UCL Université catholique de Louvain

École polytechnique de Louvain (EPL)

epl

Etude du comportement en fatigue d'un coulis (grout) soumis à des efforts de compression et de cisaillement dans le contexte d'une connexion en grout pour les structures d'éoliennes offshores

Mémoire présenté par
Oualid BOUKERROU

En vue de l'obtention du grade de master
Ingénieur civil des constructions GCE

Promoteur
Pr. Dr. Ir. Jean-François Cap

Lecteur(s)
Alain Holeyman, Christophe Bayart, Haythem Gharsallaoui, Damien Christiaens

Année académique 2017-2018

REMERCIEMENTS

A vous parents et amis, qui m'avez apporté soutien et sympathie tout au long de ces années de travail, sachez qu'il m'est fort agréable de vous exprimer mes vifs remerciements.

Je remercie particulièrement Monsieur le Professeur Jean-François Cap d'avoir accepté de diriger ce travail durant une année de collaboration, ainsi que pour son aide dans sa synthèse et sa finalisation.

Je remercie vivement Monsieur le Professeur Alain Holeyman et Monsieurs Christophe Bayart, Haythem Gharsallaoui et Damien Christiaens d'avoir accepté de rapporter sur ce mémoire.

Mes sincères pensées vont à tous mes amis de l'Université Catholique de Louvain qui ont fait que mon séjour parmi eux fût très agréable. Que tous les collègues du Groupe Mécanique Matériaux en particulier le Directeur Mr. Guy Henriet trouvent ici l'expression de ma sympathie.

Enfin je tiens à exprimer mes plus tendres sentiments à ma femme pour son soutien et sa patience durant mes longues absences.

Table des matières

REMERCIEMENTS 2
Liste des symboles 5
I. INTRODUCTION GENERALE 6
1. Introduction 10
2. Présentation du problème 10
3. Enoncé du problème 11
4. Contexte générale et conception des éoliennes 12
4.1. Ordres de grandeurs et dimensions 13
5. Propriétés de grout 15
6. Principaux effets dans les connexions en grout 15
II. ETAT DE L'ART SUR LES CONNEXIONS EN GROUT 16
1. Commentaires 20
III. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE DEVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION DES CONNEXIONS EN GROUT (Etudes et essais de fatigue réalisés) 21
1. Introduction 22
2. Etudes significatives 22
2.1. Lotsberg – Capacité verticale des connexions en grout avec l'effet du moment de flexion 25
2.2. Moment résistant dû à la pression de contact 26
2.3. Moment résistant dû au frottement dans la direction horizontale 26
2.4. Moment résistant dû au frottement dans la direction axiale 27
2.5. Effet d'irrégularité de la surface 28
2.6. Usure de glissement de grout contre l'acier 29
2.7. Conical shaped grouted connections 29
IV. REVUE DE LITTERATURE SUR LA FATIGUE 30
1. Introduction 31
2. La fatigue dans les matériaux cimentaires 32
2.1. Mécanisme de fatigue des matériaux granulaires 33
2.2. Mécanismes d'endommagement 34
2.3. Facteurs d'influence sur la fatigue 34
3. Modèles de la fatigue 37
3.1. Les courbes S-N 37
3.2. Diagrammes de Goodman et Smith 39
V. INVESTIGATIONS EXPERIMENTALES 40
1. Objectif de l'essai 41
2. Définition du problème et paramètres 41
3. Procédure de l'essai à la fatigue 42
3.1. Dimensionnement des éprouvettes 43
3.2. Caractéristiques élastiques du grout 47
3.3. Préparation de l'échantillon 47
3.4. Les éléments de l'essai 49
3.5. Les pièces inclinées (la partie supérieure) 50
3.6. La presse hydraulique 50

4. Programme expérimental 51
5. La procédure expérimentale 52
6. Système d'acquisition des données 54
6.1. Extensomètres 54
6.2. Corrélation d'image digitale 55
7. Résultats expérimentaux et discussion 57
7.1. Evaluation de la pertinence de la méthode de corrélation d'image pour la détermination des déformations au niveau des éprouvettes 57
7.2. Influence de la surface de contact (grout- plaque métallique) sur le comportement des éprouvettes à la fatigue 60
7.3. Evaluation de la résistance à la rupture du grout lors de l'essai 61
7.4. Evaluation de la résistance des échantillons de grout à la fatigue 67
7.5. Analyse des résultats expérimentaux et courbe de Wöhler 74
8. Analyse descriptive et critique de dispositif d'essai : Avantages, inconvénients et pistes d'amélioration 74
8.1. Etapes et temps estimé de réalisation 75
8.2. Instrumentation 75
VII. CONCLUSION GENERALE 76
VIII. BIBLIOGRAPHIE 78
IX. ANNEXES 85
Annexe_X1 : Propriétés physiques et mécaniques du grout et mode d'emploi
Annexe_X2 : Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant
Annexe_X3 : Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigues
Annexe_X4 : Caractéristiques mécaniques du grout
Annexe_X4 : Caractéristiques mécaniques du grout _Essais de traction
Annexe_X6 : Dessins techniques du dispositif sur Solidworks
Annexe_X7 : Exemple détaillé de l'analyse et de traitement d'image par la méthode « Digital Image correlation » sur une éprouvette de grout soumise à la fatigue

Liste des symboles

E_0	*Module d'élasticité initial, MPa*
σ_t	*Contrainte de traction critique du grout, MPa*
σ_c	*Contrainte de compression critique du grout, MPa*
σ_{cu}	*Contrainte ultime de compression du grout, MPa*
σ_{tu}	*Contrainte ultime de traction du grout, MPa*
E_{moy}	*Module d'élasticité moyen du grout, MPa*
ε_{el}	*Déformation élastique,*
ε_c	*Déformation due à la compression,*
ε_t	*Déformation due à la traction,*
μ	*Coefficient de frottement,*
A	*Section de l'éprouvette,* m^2
τ_c	*Contrainte tangentielle critique, MPa*
τ_{cu}	*Contrainte ultime critique dû à la compression, MPa*
τ_{tu}	*Contrainte ultime critique dû à la traction, MPa*
L_s	*Longueur de la pièce de transition, m*
L_g	*Longueur de grout, m*
L_p	*Longueur du pieu, m*
t_g	*Epaisseur de de l'espace annulaire contenant le grout, m*
t_p	*Epaisseur de la section du pieu, m*
t_s	*Epaisseur de la section de la pièce de transition, m*
D_s	*Diamètre extérieur de la pièce de transition, m*
D_g	*Diamètre de la section annulaire contenant le grout, m*
D_p	*Diamètre du pieu, m*
F_V	*Forces verticales résistantes, KN*
F_H	*Force verticales résistantes, KN*
τ_h	*Contrainte tangentielle dû à la force* F_H*, MPa*
τ_v	*Contrainte tangentielle dû à la force* F_V*, MPa*
M_P	*Moment résistant dû à la pression de contact, KNm*
$M_{\mu h}$	*Moment résistant dû au frottement dans la direction horizontale, KNm*
$M_{\mu v}$	*Moment résistant dû au frottement dans la direction axiale, KNm*
P	*Pression nominale de contact, MPa*

INTRODUCTION GENERALE

Le présent travail concerne l'étude de la fatigue d'un grout soumis à un effort de compression et d'effort tranchant dans le cas d'une connexion entre la partie supérieure (le mât) et la partie inférieure (le pieu) des éoliennes offshores.

Montées sur des fondations portant le nom fondations monopiles, ces dernières comportent un assemblage spécial liant le pieu au pylône (la partie supérieure), l'intérêt d'une telle jonction est de permettre le transfert des charges venant de la partie supérieure (effort de vent et effort de vibration due au fonctionnement de la turbine). La liaison entre les deux parties est assurée par un grout à base de béton de haute résistance.

La procédure de dimensionnement et de réalisation de ce type des connexions est documentée et normalisée dans plusieurs codes en l'occurrence de Det Norske Veritas (DNV).

Il est observé que les formules dans la DNV sont établies pour des connexions soumises à des efforts de compression (uni axiaux) seulement. Mais dernièrement des anomalies ont été détecté au niveau des connexions en grout ont incités les chercheurs et les maitres d'ouvrages à chercher les raisons pour lesquelles le grout se fissure malgré le surdimensionnement indiqué dans la norme. La méthode de dimensionnement de la DNV est donc a été mise en cause.

Les chercheurs ont trouvé que finalement les connexions en grout ne sont pas seulement soumises à un effort de compression, mais à des composantes multiples suivant les autres directions perpendiculaires.

Une fois la connexion est soumise à la fatigue, le grout atteint ses limites mécaniques en manifestant des fissures radiales et longitudinales laissant penser que l'effort provoquant un tel désordre ne peut qu'être suivant plusieurs composantes orthogonales.

L'objectif de ce travail est d'analyser à la fatigue par voie expérimentale une connexion soumise à un transfert d'effort de compression et d'effort tranchant en même temps, afin de comprendre les anomalies qui surviennent sur le grout.

Ce travail sera divisé en deux grandes parties, une qui s'intéresse au progrès réalisé dans le domaine de développement de la conception des éoliennes et l'autre partie, à la procédure expérimentale, où la connexion en grout sera réduite en une pastille en grout soumise à un effort de compression et d'effort tranchant simultanément et sous une fréquence de 5Hz appliqué jusqu'à la rupture.

L'étude sera alors paramétrisée selon l'angle que fait l'effort par rapport à l'horizontal et le coefficient de frottement entre l'échantillon en grout et le support en acier transmettant l'effort.

Les références sont données suivant la forme suivante : [Auteur/ Source, année de publication] et sont classé à la fin de ce rapport sous la rubrique bibliographie.

La documentation et les informations relatives au projet, les codes de programme, les modèles de conception assistée par ordinateur (CAO), ainsi qu'une copie numérique du rapport sont jointe à ce rapport.

1. Introduction

La demande en électricité ne cesse d'augmenter, et le recours à l'énergie verte et d'autant plus incités que jamais à cause de la conversion énergétique que connait le monde. Le choix de la production de l'énergie éolienne s'est donc développé pour satisfaire les besoins en électricité. Un besoin qui se traduit par l'augmentation des dimensions géométriques des éoliennes et donc des éoliennes qui produisent plus et qui sont plus lourdes.

Les éoliennes sont alors installées un peu partout dans le monde dans le sol, en onshore et en offshore. L'une des éoliennes offshores les plus utilisées sont les éoliennes à fondation monopile, adaptée pour des profondeurs d'eau allant jusqu'à 30 m.

Dans ces types de fondations, le pieu est lié coaxialement à la partie supérieure de l'éolienne (le mât) par l'intermédiaire d'une connexion en grout à base de ciment de haute résistance.

Principalement utilisées pour transmettre des efforts verticaux, ce qui est le cas pour les structures offshores des plates-formes pétrolières et gazières.

Dans le cas des structures éoliennes offshores, les efforts transmis aux fondations sont des vibrations induites par les vents et les vagues, en conséquence, des moments de flexions qui naissent au niveau de la connexion en grout provoquant des efforts suivant les trois directions orthogonales.

Cependant, les normes dont elles découlent les formules analytiques de dimensionnement des connexions en grout telles que DNV, ne considèrent que les efforts verticaux dans les formules, chose qui a rendu le calcul analytique peut pertinent vu qu'il ne reprend pas les contraintes réelles de problème. Et encore beaucoup moins intéressants quand il s'agit d'un dimensionnement à la fatigue.

Le grout subit lors de son fonctionnement des sollicitations de fatigue engendrant des fissures radiales et longitudinales due au dépassement de la résistance à la traction du grout.

L'objectif général de ce travail est de mieux comprendre le comportement structural du grout soumis à des efforts de compression et d'efforts tranchant de type cyclique.

2. Présentation du problème

Les connexions en grout sont soumises généralement à un chargement axial combiné à un couple moment de flexion en plus de la charge au cisaillement.

Les formules paramétriques pour une charge axiale combiné à un moment existe déjà et sont présentés dans la norme DNV, Elle concerne le dimensionnement des connexions en grout à l'état ultime. Ce dimensionnement basé sur des essais expérimentaux et des analyses numériques n'a pas empêché l'apparition de fissures au niveau de grout après certain temps d'exploitation. Pour cela, on a décidé de faire un essai expérimental présentant le même état de contrainte présent au niveau du grout de la connexion en grout pour connaitre au 1^{er} lieu, la durée de vie de grout sous cet état de contrainte et en $2^{ème}$ lieu, la validité de la formule DNV à la fatigue.

Cependant, l'effort de cisaillement (effort horizontal) agit rarement seul sur la connexion en grout, il est généralement combiné à un effort axial et un moment de flexion.

Et vu que les formules paramétriques ne sont jusqu'à maintenant développées pour comprendre l'état de contrainte au niveau de la connexion en gout, l'effet de la combinaison d'un effort de compression et d'un effort tranchant reste jusqu'à maintenant méconnu.

La présente étude va loin, vu qu'elle étudie expérimentalement l'effet de ces efforts à la fatigue.

3. Enoncé du problème

Sur la base de la discussion qui a eu lieu dans la section de la présentation du problème, ce rapport a traité :

Le développement d'une analyse paramétrique de contraintes et de déformations d'un échantillon de grout soumis à un effort cyclique de compression et d'effort tranchant jusqu'à la rupture, dont les paramètres sont le coefficient de frottement entre le support en acier et la section de l'éprouvette en gout et l'angle que fait l'effort par rapport à l'horizontal.

On a traité les sous-problèmes suivants :

- Estimation de l'état de contrainte et évaluation de la rigidité des échantillons du grout soumis à la compression et l'effort tranchant.
- L'évolution de la déformation durant l'essai de fatigue.

Plusieurs simplifications ont été apportées aux problèmes sous forme de simplification, hypothèses et restrictions afin d'aboutir à une première approche simpliste de la solution au problème.

Elles sont détaillées dans la section suivante.

En réalité, la connexion en grout est plus sophistiquée et complexe que l'échantillon qu'on a pris pour entreprendre cette étude, afin de décrire le comportement de grout dans une situation bien précise et plus similaire par rapport aux contraintes et déformations de la structure complexe (la connexion en grout) telle qu'elle est.

Le recours à ce choix est justifié par le degré de notre compréhension de phénomène ce qui nous a permis de choisir un échantillon similaire au niveau de comportement et non pas à la similitude physique.

On ajoute à cela, les limites de budget consacré à l'étude, sachant que les connexions en grout sont de grandes dimensions allant jusqu'à 7m de longueur et de 5 m de diamètre. Quant au modèle numérique, sa complexité se traduit par le nombre d'élément à créer, plus que le modèle est grand est complexe, plus que les moyens à alloués sont importants et plus qu'il demande une compétence technique importante pour traiter le problème.

Un tel modèle petit en dimension et similaire par rapport au comportement mécanique de la connexion en grout réelle, permet une réduction du nombre de variables d'état et de paramètres. Cependant, toute simplification doit être bien posée et argumentée afin de préserver l'unicité de la solution et la pertinence du système.

Présentation de la norme Det Norske Veritas (DNV) : OS-J101

Un document normatif qui couvre un ensemble de règle à respecter pour pouvoir donner une approbation complète d'une structure éolienne offshore [1].

Il concerne :

- La prise en compte des sollicitations environnementales (courant induits par les vagues), opérationnelles (fonctionnement de la turbine), et le poids propre de la structure.
- Matériaux de construction certifiés et protection anticorrosion de surfaces des éléments de construction métallique.
- Analyse de la fatigue due à une période de 20 à 30 ans.
- Longueur de l'ancrage est fonction de son diamètre et de son épaisseur.
- Effets de réaction du sol sur les charges transmises par les pieux de fondation.

4. Contexte générale et conception des éoliennes

La norme DNV correspond à la documentation technique des structures éoliennes monopiles avec un ensemble de règle standard [DNV-OS-J101,2013] conception de structure en mer, et l'élaboration détaillée d'une fondation monopile.

Notre travail concerne les fondations des éoliennes dont la profondeur de la mer est entre 0 et 30 m comme le montre la figure 1, et il se concentre au niveau de la connexion en grout présentée dans la figure 2.

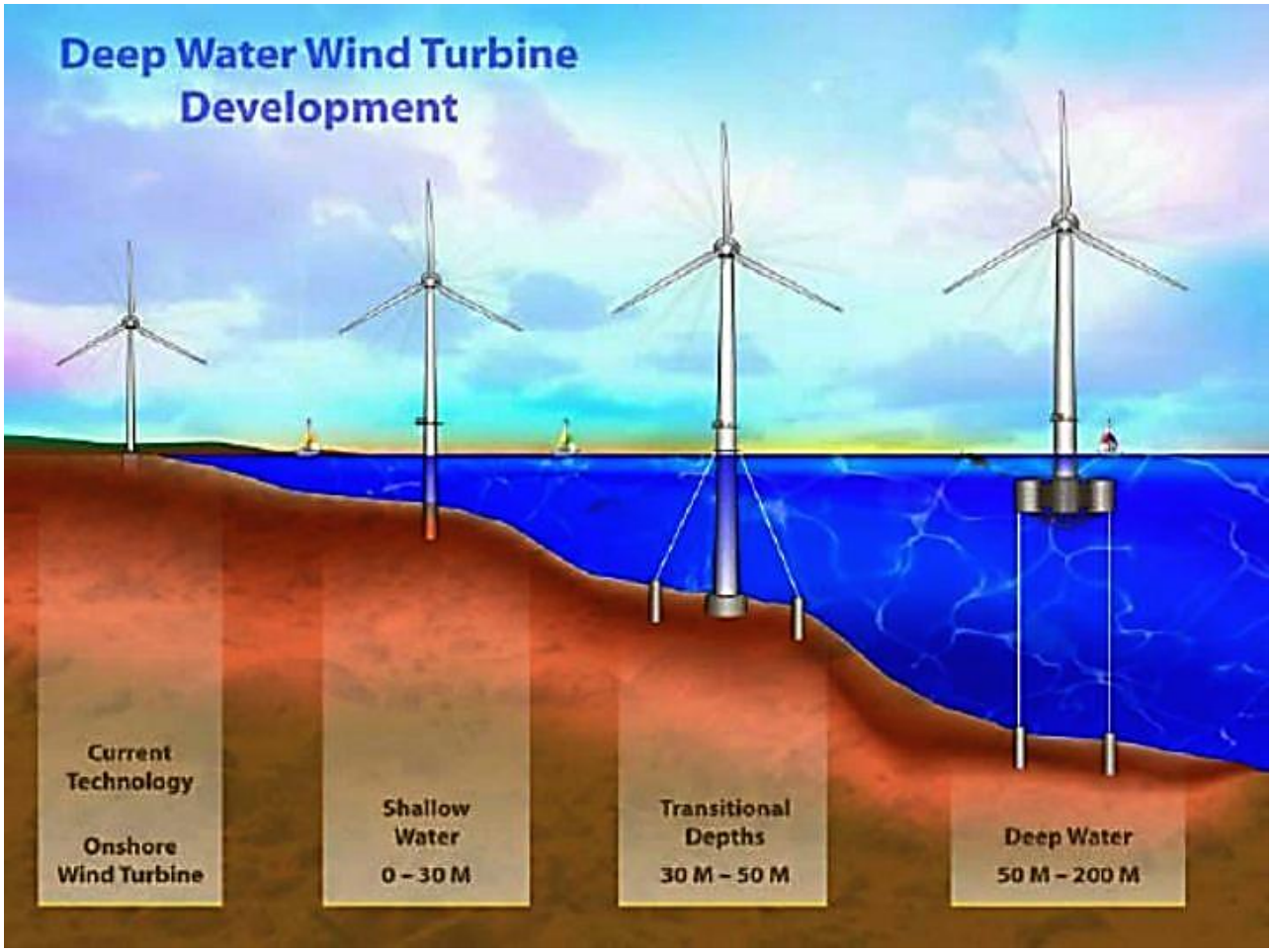


Figure 1: caractérisation des structures de fondation pour les turbines offshore [1]

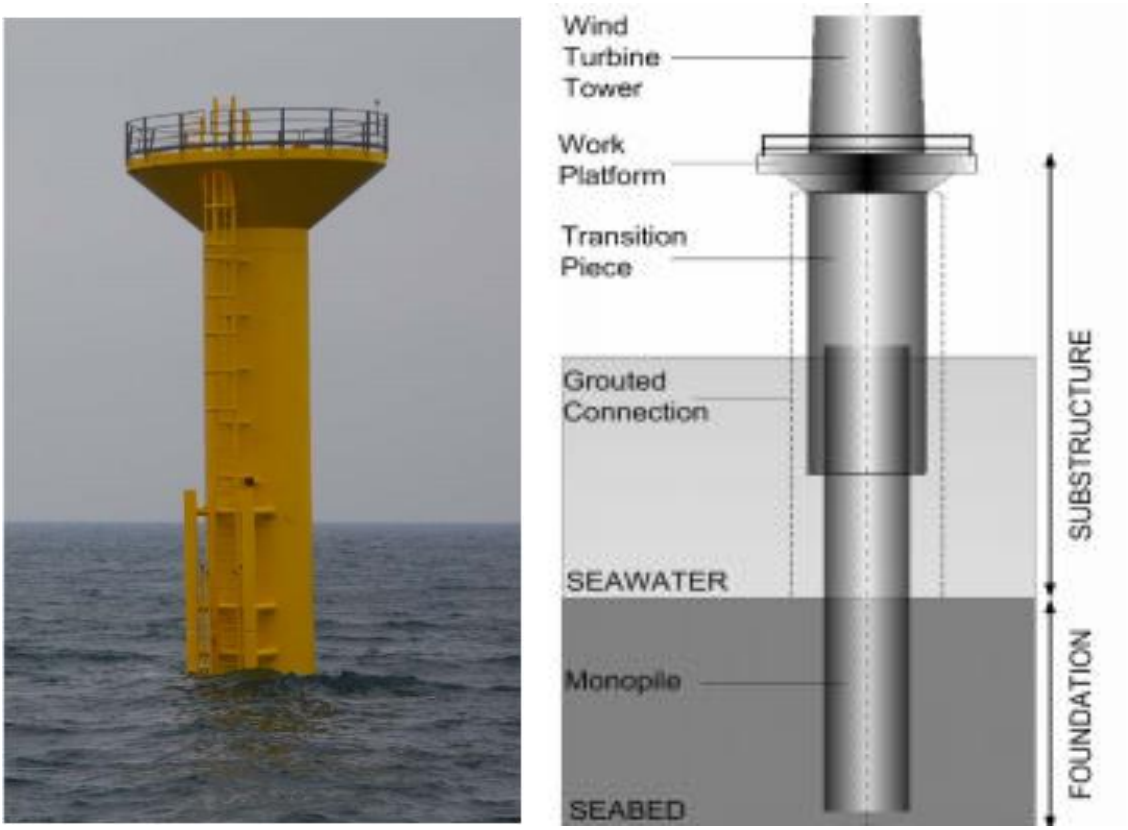


Figure 2: Connexion en grout

4.1. Ordres de grandeurs et dimensions

Les fondations monopiles ont été utilisée dans les plateformes offshores pétrolières. La pièce de transition consiste à lier concentriquement le mât (la partie supérieure de l'éolienne) au pieu ancré au sol. Un espace annulaire se forme entre la section annulaire de la pièce de transition et celle du pieu.

L'espace annulaire est par la suite rempli par un grout spécialement développé pour transmettre les efforts venant de haut vers le pieu. Ce grout se caractérise par sa haute résistance à la compression qui peut atteindre les 160 MPa.

Une illustration de la connexion en grout au niveau de la connexion pieu - mât est présentée à la figure 2.

La pièce de transition a un diamètre plus grand que celui du pieu et par conséquent elle embrasse le pieu, le contraire est aussi possible mais la complexité de la réalisation engendre des coûts supplémentaires dont l'intérêt d'une telle disposition est moins préférable. On ajoute à cela la tolérance dont il faut prendre en compte durant la mise en place du pieu qui dépend en elle-même à la mise en place de la pièce de transition.

Le grout est pompé à travers l'espace annulaire à l'aide d'une tubulure flexible, ou par un pompage manuel et vibré à l'aide des outils conçu pour cette mission (Rubber seals) pour le répartir sur tout l'espace annulaire jusqu'à le pied de la connexion.

La structure est divisée en deux parties, la superstructure qui est entre le mât portant la turbine et le fond marin ou la tête de la pièce de transition. L'infrastructure comprend la partie qui est en dessous du fond marin. Une représentation technique est illustrée à la figure 3 montrant la connexion en grout au niveau du fond marin.

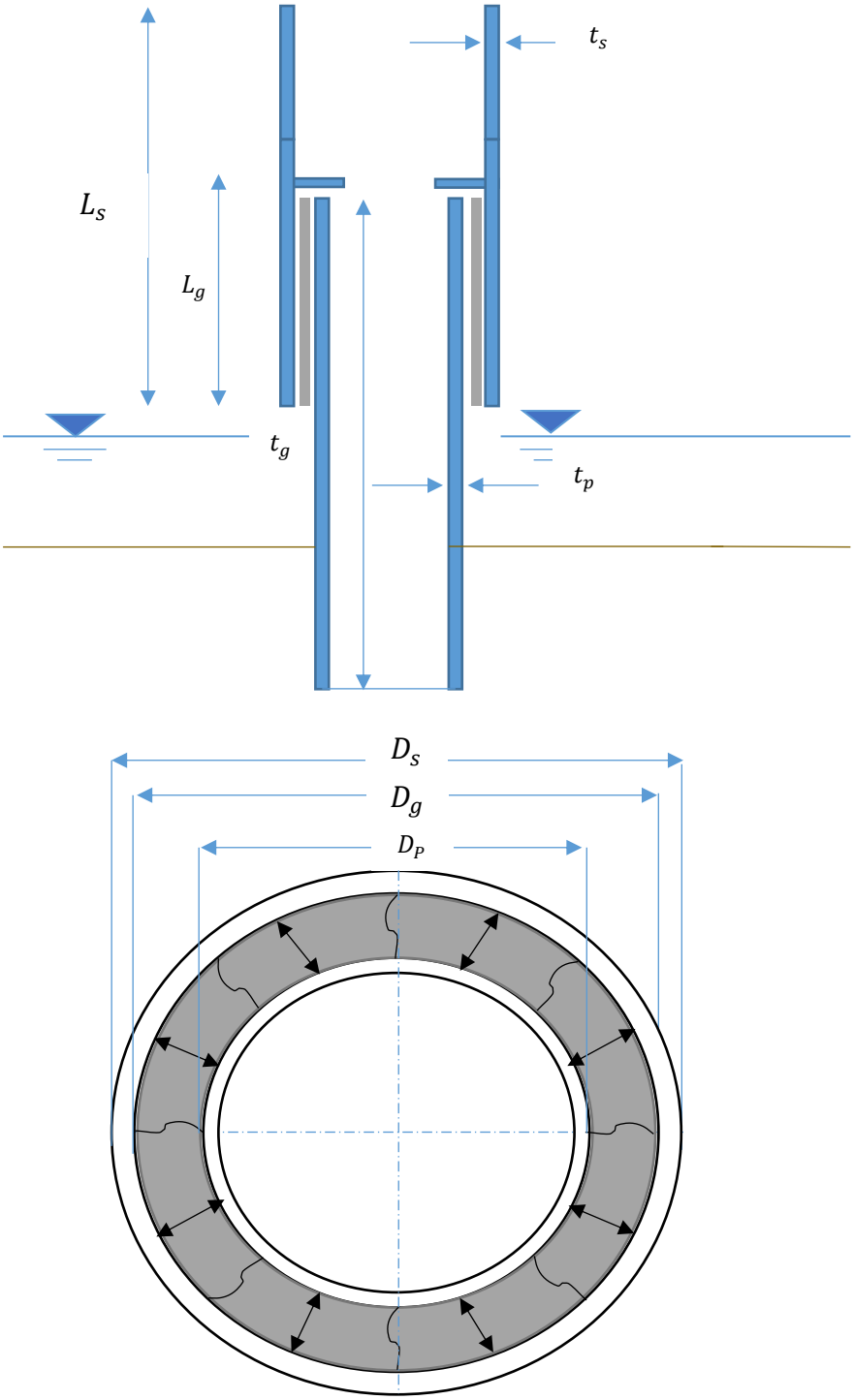


Figure 3: Schéma technique de la connexion en grout

Les dimensions typiques les plus utilisées dans le domaine de l'éolien sont représentées dans le tableau 1.

La profondeur de l'eau	5 à $30\ m$
Diamètre extérieur D_P	3 à $6\ m$
La longueur de la connexion en grout L_g	$1.3 - 1.6\ \times D_P$
L'épaisseur du grout t_g	$50 - 125\ mm$
L'épaisseur du pieu t_P et de la pièce de transition t_s	$40 - 80\ mm$
La profondeur de l'ancrage dans le sol	$20 - 40m$

Tableau 1: Dimensions typiques d'une connexion en grout [1]

Les dimensions des monopiles varient significativement, les dimensions de la turbine et les caractéristiques du fond marin qui déterminent le diamètre du pieu.

L'avantage des fondations monopiles est qu'elles requièrent une préparation minimale de fond de la mer, résistance au mouvement du fond de la mer, et les couts bas grâce à la simplicité de la structure.

L'inconvénient est la souplesse pour des diamètres plus grands en comparaison avec d'autres types de fondation [1], le coût très élevé et la durée de réalisation.

Les propriétés basiques du grout usuellement utilisées dans les connexions en grout sont décrit dans la section suivante.

5. Propriétés de grout :

La majorité des informations sur le matériau grout sont données dans cette section, cependant plus de détails sont données dans l'annexe_X1.

Le grout utilisé dans le domaine de l'offshore est un matériau composite. Ses capacités physiques dépendent intimement de sa composition, le cas de béton d'ailleurs et le rapport eau/ciment, propriété du sable utilisé et la quantité de fibre métallique utilisée.

La procédure de grouting peut être procéder du bas ou du haut de la connexion en grout en appliquant les équipements standards de la procédure.

Le grout utilisé est caractérisé par :

- Sa haute résistance et rigidité.
- Résistante très élevée au jeune âge.
- Rétrécissement nul.
- Pas de dissolution.
- Bonne performance à la fatigue.

Il est connu que les grouts sont des matériaux qui ont un comportement fragile et présentent un comportement fortement anisotrope et non linéaire pour relier les forces appliquées aux contraintes et aux déformations dans le grout.

Des modèles sont proposés pour décrire le comportement de grout sur base des modèles de fissuration de la plasticité [Chan et al.,2005].

Le critère de Drucker-Prager est un exemple d'un modèle dépendant de la pression pour déterminer si le matériau a atteint la rupture ou a subi la déformation plastique, généralement traite la déformation plastique dans les sols [Drucker & Prager, 1952].

En plus des caractéristiques mécaniques du grout, plusieurs effets mécaniques doivent être prise en compte dans le choix du produit.

6. Principaux effets dans les connexions en grout :

Les conditions limites de conception dans les fondations monopiles sont la déflexion globale de la structure, et les efforts de vibrations pendant le chargement.

Les structures à fondations monopiles sans support conviennent pour des profondeurs d'eau allant jusqu'à $30\ \mathrm{m}$ comme le montre la figure 1.

Elles sont également adaptées pour des profondeurs allant jusqu'à $40\ \mathrm{m}$ et sont mieux adaptés pour les sols non homogènes et doivent être évitées dans les sols profonds et mous en raison de la longueur de la pile de fondation [2].

Pendant le processus de coulage du grout, aucune adhérence particulière entre le grout et les surfaces en acier ne peut être atteinte. La liaison entre la pile et la pièce de transition est par la suite obtenue par frottement statique dû à la rugosité de surfaces des zones de contact [3].

Les modèles expérimentaux permettent d'avoir un coefficient de frottement statique dans l'interface acier-grout de $\mu = 0.4$ à 1 en utilisant de l'acier de surface rugueuse.

Dans ces modèles à l'échelle correspondent à une connexion 5 fois plus petite que celle d'une connexion en grout réelle.

Les modèles mathématiques sont tirés à partir des essais expérimentaux, ces derniers qui sont plus que 5 fois inférieure à l'échelle réelle. Cela, pourrait atteindre l'exactitude de ces modèles, et sont donc hors de portée lorsqu'ils traitent une structure à pleine échelle.

Ces modèles pourraient être inspectés, mais jusqu'à maintenant aucun modèle physique n'a été préformé en raison des dépenses excessives et les questions pratiques. Néanmoins, les modèles à l'échelle sont probablement bien adaptés pour tirer des conclusions sur le comportement global de la connexion soumises à des charges de différentes nature.

Le transfert des résultats ne se fait pas directement sur les structures à grande échelle, en raison des effets discutés précédemment.

C'est pour cette raison, s'inscrit notre travail qui essaye de voir le comportement du grout soumis à un état de contrainte similaire à celui appliqué sur la connexion en grout, au lieu de voir cela à l'aide de la similitude physique.

Les effets de frottement sont augmentés par les imperfections rugueuses éventuelles dans les parois des deux tubes en aciers [3].

Les micropropriétés dans l'interface grout-acier sont beaucoup moins importantes que dans les structures à pleine échelle, l'effort de cisaillement induit est par conséquent négligeable.

Cette imprécision altère principalement l'étude de connexion en grout, vu qu'elle ne représente pas la réalité des connexions qui sont à l'échelle.

Un glissement entre les deux tubes qui se réalisent provoquant la rupture du grout.

ETAT DE L’ART SUR LES CONNEXIONS EN GROUT

Etat de l'art sur les connexions en grout

Les connexions en grout sont couramment utilisées dans les structures monopiles. Elles sont formées en remplissant les anneaux entre les tubes (transition sleeve & pile) avec un coulis de haute performance [9].

La connexion permet le transfert des charges dû au vent et au mouvement rotatif de la turbine vers le pieu.

Des performances insatisfaisantes des connexions en grout ont été relevées au niveau de plusieurs parcs éoliens en Europe, ont générées l'intérêt immédiat des chercheurs [26], ces derniers ont entamé des recherches qui restent jusqu'à maintenant insatisfaisantes.

Des questions restent alors sans réponses.

Afin de remédier au problème lié au glissement et dans l'intérêt d'augmenter la résistance au niveau de la connexion, des clés de cisaillement ont été ajoutés aux connexions en grout pour contrer le glissement, cette solution est avérée par la suite moins efficace car elle n'a pas mal d'inconvénients [9].

Quelques études de référence qui ont affectées significativement les codes standards et les directives de pratiques de conception sont présentés dans la section suivante.

Depuis les années 1970, Les connexions en grout utilisées dans les structures pétrolières et gazières présentent un intérêt pour de nombreux chercheurs tels que Billington and Lewis, 1978 [29] ; Billington and Tebbett (1980, 1982) [27] ; Krahl and Karsan, 1985 [6] ; Lamport et al., 1991 [7] ; Harwood et al., 1996 [8].

Et depuis, les recherches sont de plus en plus importantes et continuent jusqu'à ce jour-ci.

Avec le développement du secteur de l'énergie renouvelables et la mise en service des turbines en mer, plusieurs chercheurs tels que Andersen and Petersen, 2004 [28] ; Schaumann et al., 2010 [9] ; Lotsberg, 2013 [10] ont commencé à travailler sur les connexions en grout utilisées dans les structures monopiles.

Le début des connexions en grout remonte aux années 80, quand le ministère britannique de l'énergie (DEn, 1980) a ordonné ses services pour établir une procédure de conception des connexions en grout.

Billington and Lewis (1978) [29] and Billington and Tebbett (1980) [27] ont effectué près de 400 essais pour expliquer l'effet de plusieurs paramètres tels que : les propriétés du grout, et le rapport entre la longueur de la connexion en grout et le diamètre du pieu. Ils ont trouvé que la résistance d'adhérence est proportionnelle à la résistance de compression du grout.

Billington et Tebbett (1982) [11] ont poursuivi leurs recherches sur la durée de vie des échantillons de petite échelle soumis à des essais de fatigue. Des coefficients de sécurité utilisés dans la procédure de conception ont été mis en doute et ont été changé par les deux auteurs.

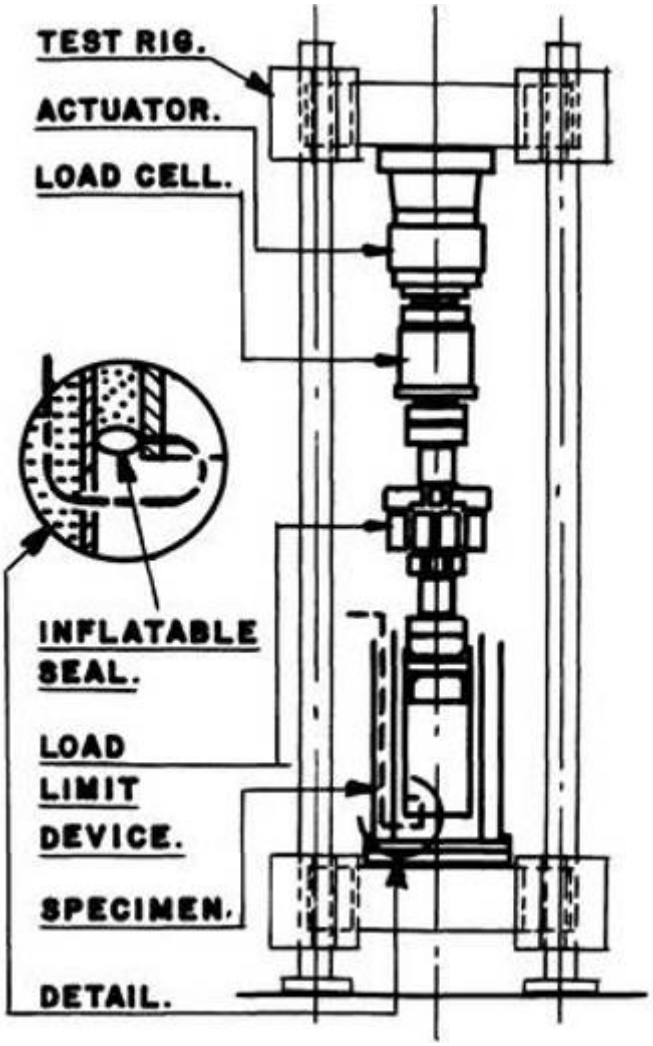


Figure 4: Schéma de dispositif d'essai utilisé pour l'étude la fatigue au jeune âge [71]

Boswell et D'Mello (1986) [12] ont étudié le comportement à la fatigue des connexions en grout équipées de clés de cisaillement. La portée des résultats sont limitées vu qu'un seul échantillon de petite échelle qui a été étudiée.

Karsan and Krahl (1984) [6] and Krahl and Karsan (1985) [12] ont élaboré des équations de conception pour les directives de (API, 1984). Ils avaient les mêmes conclusions concernant les coefficients de sécurité utilisés à cette époque, mais ils ont mis en doute l'exactitude la relation entre la résistance à la compression et la force d'adhérence du grout proposée par Billington and Lewis (1978) [29].

Premier modèle numérique non linéaire a été élaboré par Elnashai et Aritenang (1991) [13], il a montré une bonne concordance avec les résultats des essais menés par (DEn, 1984) [15] et qui s'éloigne significativement des résultats de l'API (1986).

Lamport et al. (1991) [14] a étudié les coefficients de sécurité de l'API et le Den [15].

Aritenang et al. (1992) [24] a montré l'accord de la formulation Den [15] avec les données expérimentales, il a élaboré une méthode de confection des échantillons.

Harwood et al. (1996) [16], a réalisé des essais expérimentaux pour ISO sur des connexions en grout avec clés de cisaillement, pour déterminer l'effet du rapport hauteur/ distance entre clés de cisaillement.

Andersen et Petersen (2004) [28] ont réalisé des essais à grande d'échelle en utilisant des échantillons de $1:8$, ce travail a été mené à l'université d'Aalborg, ils ont utilisé un grout de haute performance soumis à des charges extrêmes et de charges de fatigue. Ils ont remarqué que le grout se comporte suffisamment bien, aucune fissure n'a été détecté par contre un petit espace qui se forme entre l'acier et le grout.

Le régime de chargement n'a pas été cependant explicitement indiqué dans cet article, un glissement de $6.4\ \mathrm{mm}$ a été signalé dans les conditions ultimes.

Le modèle FE a montré un accord raisonnable avec l'expérimentation, mais reste cependant insuffisant vu qu'il n'a essayé qu'une seule configuration expérimentale et des dimensions modélisées uniques.

Les essais ont porté sur l'influence de la flexion pure seulement, non combiné avec l'effort axial.

Aucun compte n'a été rendu sur l'influence de la rugosité de la surface au niveau de la connexion en grout, et les conditions environnementales dont l'essai a été réalisé sont différentes à celles connues/vécue par les fondations monopiles en réalité.

Ce projet est axé sur l'étude des propriétés de la capacité de fatigue axiale, deux projets ont par la suite été lancer concernant le même problème, il s'agit de :

- Research project "grouted Joints for offshore Wind Turbine Structures" (GROW) en Allemagne depuis 2007 (Klose et al.,2012) [26].
- "Joint industry Project" (JIP) en Norvège depuis 2011 (Lotsberg et Bertnes,2012) [20].

Des phénomènes de glissement de grout aient été rapportés et environ 800 fondations de connexion sans clés de cisaillement ont été impliquées (Klose et al.,2012) [26].

[Neilsen] est convaincu que la dégradation cyclique de la capacité axiale ne serait pas un problème important pour les structures monopiles, qui a été prouvé par le glissement à partir de l'année 2010.

A partir de l'année 2010, des études numériques ont été faites sur les connexions en grout sans clés de cisaillement pour comprendre les raisons du glissement du grout dans les connexions en grout.

Des échantillons de hautes performances de grandes et petites échelles ont été étudiés par Schaumann and Wilke (2006) [17]. Ont conclu que les clés de cisaillement sont primordiales car ils améliorent considérablement les performances des connexions.

Deux projets ont par la suite apparu, ils concernent les projets initiés par la DNV (JIP I et JIP II), le premier a porté sur la capacité axiale des connexions en grout sans clés de cisaillement dont les résultats présentés par Lotsberg et al. (2013a) [19] ont montrés que les connexions simples sans clés de cisaillement n'étaient plus recommandées pour les monopiles de grand diamètre car l'effet de la rigidité de la connexion est inférieur à celle calculé dans la conception (à cause de la déformation locale). La constatation des performances d'insuffisances des connexions en grout sans clés de cisaillement est en accord avec les résultats de Schaumann et Wilke (2010) [18].

Lotsberg et al. (2012) [20] a proposé une solution afin de limiter le glissement de la pièce de transition, elle s'agit d'un raccord conique au niveau de la pièce de transition, détaillé dans la section suivante.

Le deuxième projet conjoint de l'industrie (JIP II) a porté son choix sur les raccords de forme cylindrique avec des clés de cisaillement et qui ont été le fruit de l'étude de (Lotsberg et al., 2013b) [21].

Dans le même projet (Lotsberg et al., 2013b) [22] a développé une procédure analytique pour l'évaluation des contraintes dans les connexions en grout sans et avec clés de cisaillement, cette procédure a finalement été adopté par DNV jusqu'à aujourd'hui.

Wilke (2014) [23] a étudié l'effet de la flexion sur les connexions en grout sur des échantillons de grande échelle (1: 6.25) et de petite échelle, il conclut que l'utilisation des clés de cisaillement réduisent les dommages au niveau de la circonférence du grout.

Tziavos et al. [25] ont suivi l'évolution des connexions en grout et les standards existants et ils les ont résumés dans le tableau 2.

Le tableau 2 résume les essais significatifs qui ont eu lieu depuis le début des années 1970 jusqu'à maintenant et comment celles-ci ont affecté les codes standards et les directives de conception des connexions en grout.

Tziavos et al. [25] ont constaté le manque de données des essais provenant de compagnes expérimentales sur les connexions en grout et que les conditions de chargement ne ressemblent pas à celles rencontrées dans la réalité dans le cas des monopiles. Ce qui explique l'évolution constante des codes standards et des directives développés.

Commentaires

L'évolution des codes standards et les directives a été marqué par les difficultés qui ont suivi l'évolution des méthodes de conception. Ces difficultés sont liées au manque de données provenant des essais à grande échelle des connexions en grout.

L'analyse FEM a significativement contribuée au développement de la conception des connexions en grout. Cependant, la modélisation des caractéristiques mécaniques qui permettent de traduire le comportement réel du grout sous tous ses états restent jusqu'à maintenant difficile. L'un des défis pour la recherche future dans le domaine.

Le comportement non linéaire du grout et le comportement d'interface entre grout et acier doivent être soigneusement inclus dans les modèles numériques afin de représenter de manière réaliste les mécanismes de transfert de charge entre l'acier et le coulis.

Design Basis	Design for GCs is based on [1]API	[4]DEn	[4]DEn, [10]API, [11]DNV		[23]ISO, [24]DNV, [15]API
Motivation	[1]Unsatisfactory design recommendations for GCs with Shear Keys [1]Based on small-diameter GCs [1]Lack of guidance on the capacity of GCs with Shear Keys	Reconsideration of [1]API [5,6]New Design process for API code on GCs [8]Development of DNV code for fixed offshore structures	[12]Assessment of the existing design equations Development of [14]ISO standard code for offshore structures	*2000*: Design phase of Horns Rev I Wind Farm 2009: Slippage of TP in several OWTs Lack of large scale testing and effect of bending moments remain unknown	[29-31]Effect of wet conditions is unclear [17-20]Bending moments are of significance and are introduced in the testing procedure
Action	[2,3]Experimental testing on axial capacity of GCs at Wimpey Laboratory, UK	[7]Analytical model for GCs with Shear Keys under axial loading [8]Axial capacity tests for DNV draft offshore standard code	[13]Review of 30 model test for ISO design equations [12]Experimental testing for a new analytical model	[16]Aalborg University model tests [17-20]Research project GROW, Hannover [17-20]Small and large scale testing of GCs [21,22]JIP I	[24]New recommendations for GCs with shear keys. [27]Guidelines for GCs with shear keys [23]JIP II: fatigue testing, new design methodology for cylindrical shear-keyed GCs
Outcome & Code Development	[2,3]Significant amount of test data, new design equations on the strength of axially loaded GCs → Revised [4]DEn	Revised: [10]API , [11]DNV	[12]Combined loading does not have a detrimental effect on the axial capacity of GCs [15]API	Design equations do not represent actual capacity → Amendment of GCs section in [26]DNV [21]Design methodology for conical GCs	[27]DNV [28]Technical note on GCs [29-31]Large scale cyclic tests under wet and dry conditions

[1]API (1977), [2]Billington and Lewis (1978), [3]Billington and Tebbett (1980), [4]DEn (1980), [5]Karsan and Krahl (1984), [6]Krahl and Karsan (1985), [7]Lamport *et al.* (1987), [8]Sele and Kjeøy (1989), [10]API (1984), [11]DNV (1989), [12]Lamport *et al.* (1991), [13]Harwood *et al.* (1996), [15]API (2000), [16]Andersen and Petersen (2004), [17]Schaumann and Wilke (2006), [18]Schaumann and Wilke (2007), [19]Schaumann *et al.* (2010), [20]Wilke (2014), [21]Lotsberg *et al.* (2012), [22]Lotsberg *et al.* (2013a), [23]Lotsberg *et al.*(2013b), [24]BSI (2007), [25]DNV (2011), [26]DNV (2007), [27]DNV (2014), [28]Lloyd (2013), [29]Schaumann *et al.* (2014a), [30]Schaumann *et al.* (2014b), [31]Schaumann and Raba (2015).

Tableau 2: L'évolution des codes sur les connexions en grout [25]

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE DEVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION DES CONNEXIONS EN GROUT

(ETUDES ET ESSAIS DE FATIGUE REALISES)

1. Introduction

Les liaisons en grout ont été utilisées pour les fondations de plates-formes pétrolières et gazières. Les méthodes principales de transfert de charges se font par frottement mobilisées par la contrainte normale induite par l'inter-verrouillage des surfaces métalliques et par la compression du grout.

A partir de l'année 1970 à 1980, des travaux expérimentaux ont commencé à voir lieu pour quantifier les performances des connexions en grout, et cela dans le but de réduire les couts et d'optimiser la conception des fondations. Ces études ont été particulièrement lancé pour les fondations Offshores.

Les dimensions de la connexion en grout, la résistance du grout et le rapport entre le diamètre et l'épaisseur du pieu et le mât ont été les sujets de ses travaux.

Depuis 2002, le parc éolien européens s'est équipé à la hauteur de 60% des installations de ses connexions en grout, où le diamètre des connexions en grout est grand.

Il a été signalé que la capacité axiale de ces connexions est insuffisante, Cela a conduit à des travaux de maintenance très couteux.

La poursuite de l'utilisation de la liaison par injection est le résultat fructueux des différentes études et les améliorations qui ont été apporté au code de dimensionnement, mais également sa capacité d'être un moyen rentable et un rapport Capacité/ cout efficace.

La croissance prévue dans le secteur des énergies renouvelable plus spécialement l'énergie éolienne offshore incite les différents intervenants dans le domaine de chercher des solutions durables pour la question d'insuffisance en capacité des connexions en grout, l'objectif est de comprendre, si le coût de ses défaillances aurait pu être évitées, la réduction des problèmes similaires à l'avenir.

La DNV a été soumise à plusieurs mis à jour pour fournir un niveau de connaissance évolutif dans le temps et fournir une compréhension des défaillances qui ont été constatés au niveau des connexion en grout.

Les recherches qui ont été mené par la DNV ont principalement été porté sur les connexions en grout chargée axialement, et sur les connexions soumises à l'effet de la flexion sous les conditions expérimentales peu avant l'année 2007.

Une revue de littérature sur le développement des connaissances au fil des années dans l'industrie offshore est dressée dans la section précédente de ce rapport.

Seul le travail significatif le plus récent adopté par la DNV à partir de l'année 2013 qui est présenté dans ce chapitre.

2. Etudes significatives

Dans le but d'établir une procédure de conception, plusieurs études [30], [31], [32], [33] ont été lancé afin d'étudier l'effet de plusieurs paramètres, tels que, le rapport entre le diamètre de la connexion en grout et sa longueur, et les propriétés mécaniques du grout.

Dans les études citées précédemment le choix des dimensions des échantillons est basé sur la similitude physique du rapport $\frac{D_p}{t_p}$, c.-à-d. chaque échantillon avait un rapport $\frac{D_p}{t_p}$ égal à celui de la structure réelle. Tel que, D_p est le diamètre de pile et t_p l'épaisseur du grout comme le montre la figure 5.

L'objectif de tel choix, est d'assurer une rigidité radiale égale à la connexion en grout réelle et de diminuer les effets d'échelles.

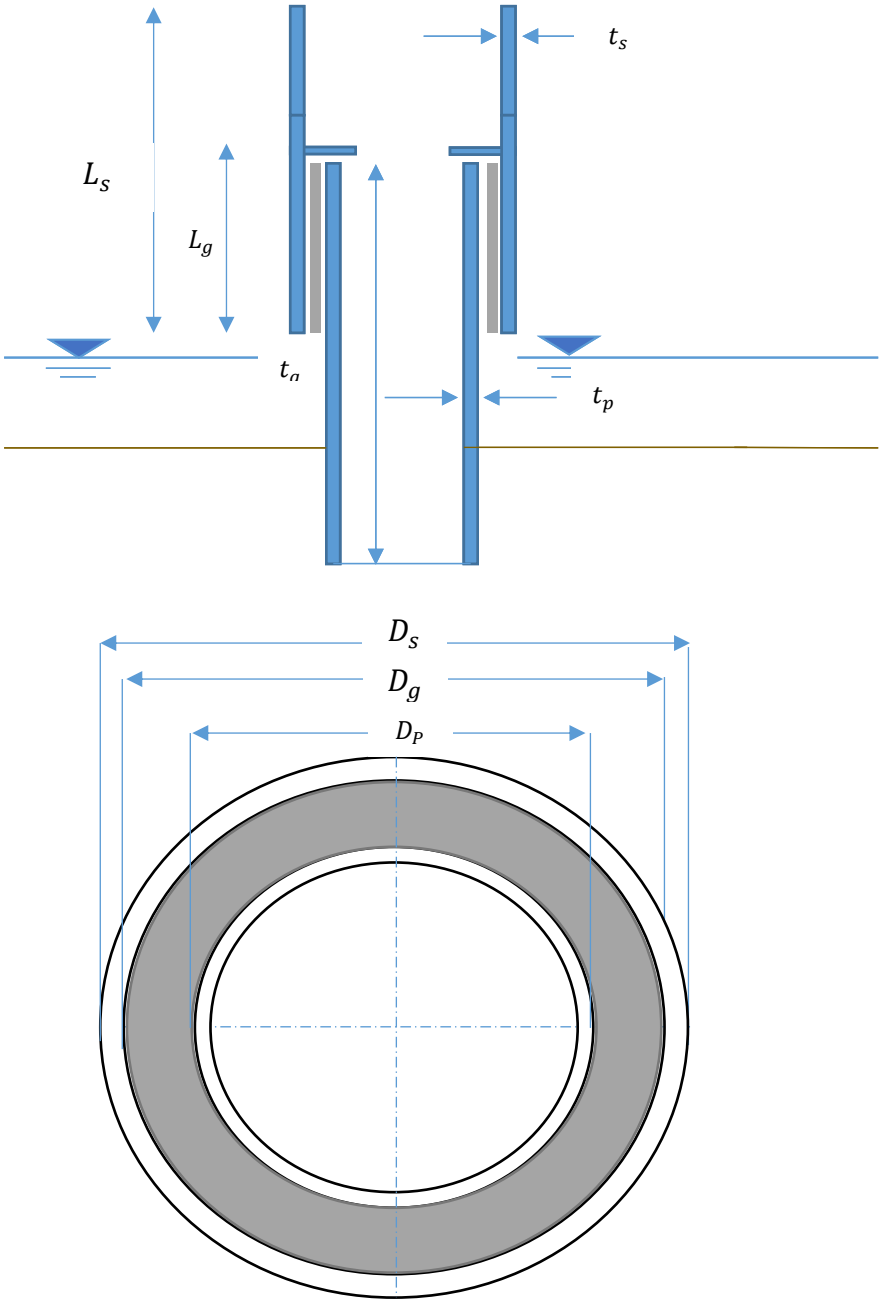


Figure 5: Schéma présentant les caractéristiques d'une connexion en grout sans clés de cisaillement

Selon [31], La plupart des essais de fatigue en laboratoire sur les connexions en grout rapportées dans la littérature ont été effectués avec des échantillons de diamètre inférieur à $400\ \mathrm{mm}$

Dans le but de dimensionner des petits échantillons de comportement structural similaire aux connexions en grout, soumise à un effort axial, et un moment de flexion, la rigidité radiale des connexions en grout est prise égale à celle des structures réelles.

D'après les essais en laboratoire [30], [31], [32], [33] qui ont été menés, le comportement du grout est intimement lié à la rigidité radiale au droit de la connexion en grout. Les efforts dont le grout est soumis dépendent intrinsèquement du rapport $\frac{L}{D_p}$, plus ce dernier est grand, moins que la connexion est rigide.

Le tableau 3 décrit l'ensemble des études de fatigue effectuée sur des échantillons de petite échelle à partir de l'année 2000.

L'état de contrainte du grout dans les échantillons à petite échelle doit être comparable à l'état de contrainte multiaxial dans les connexions réelles.

Auteurs	Résistance à la compression uniaxial fc (MPa)	(D/t)p	(D/t)s	L/Dp	(D/t)g
Ingebrigsen, Løset and Neilsen	27<x<49	24.5/28.8	29.5/65.5	2.0	28.2/33.8
Etterdal, Askheim, Grigorian and Gladsø	140/213	N/A	25.7	1	N/A
Zhao, Grundy and Lee	N/A	26;33	19;27	1.3/4.3	7.5;20.1
Andersen and Petersen	140/114	72.0; 84.4	-;80.0	1.5	-,68.0
Zhao, Ghojel, Grundy and Han	N/A	21.2	33.0	1.4/3.1	7.6
Schaumann and Wilke	133	5.5;100	14.3;107	1.3;1.5	4.6;42.0
Schaumann and Wilke	130	100.0	107.0	1.3	42.0
Schaumann, Bechtel and Lochte-Holtgreven	70/115	4.8	14.3	1.5	5.2
Lotsberg, Serednicki, Oerlemans, Bertnes and Lervik	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Typical Offshore WTG Grouted Connection ∗	130	90	86	1.5	63
∗ Relative values for a typical offshore WTG grouted connection have been provided to assist in appreciation of the scale and potential validity, of research and development.					

Tableau 3: Différentes études effectués sur des échantillons de petite échelle

Parmi ces études, une étude significative qui a été adopté par la norme DNV, elle concerne les connexions en grout sans clés de cisaillement. Présenté dans les paragraphes suivants.

2.1. Lotsberg – Capacité verticale des connexions en grout avec l'effet du moment de flexion

L'effort axial dû au poids propre de la structure est supporté par la capacité de liaison (pièce de transition – grout – Pieu), cette capacité et fonction de la rugosité des surfaces.

Au premier temps, la rugosité des surfaces assure l'entièreté de la résistance dû à l'effort axial. Une fois la capacité de liaison est dépassée, la rigidité de la connexion en grout, définie par le ratio entre le diamètre du pieux et son épaisseur sera le garant de la résistance.

L'effort du moment dû au vent est beaucoup plus significatif que l'effort axial, le transfert d'un tel effort de la pièce de transition au pieu par l'intermédiaire de la connexion en grout est assuré par les forces horizontales, mais également par des forces verticales dues à la pression de contact.

La résistance au moment est donc assurée par des forces verticales F_V et des forces circonférentielles F_H dues à la pression de contact, mais aussi aux forces de frottements verticales et horizontales engendrées par l'état de surface de la pièce de transition et du pieu. Ces forces contribuent à la résistance tangentielle de la connexion mais également à la résistance au moment appliqué.

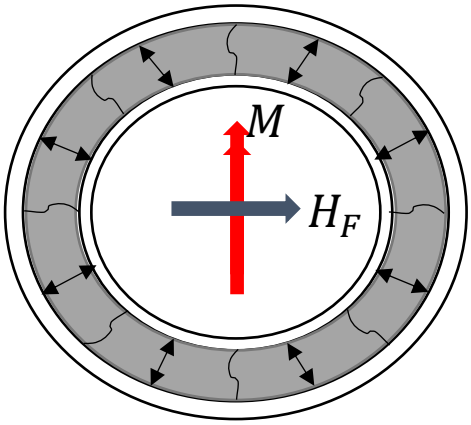


Figure 6: comportement du grout au niveau de la connexion (pièce de transition - Pieu)

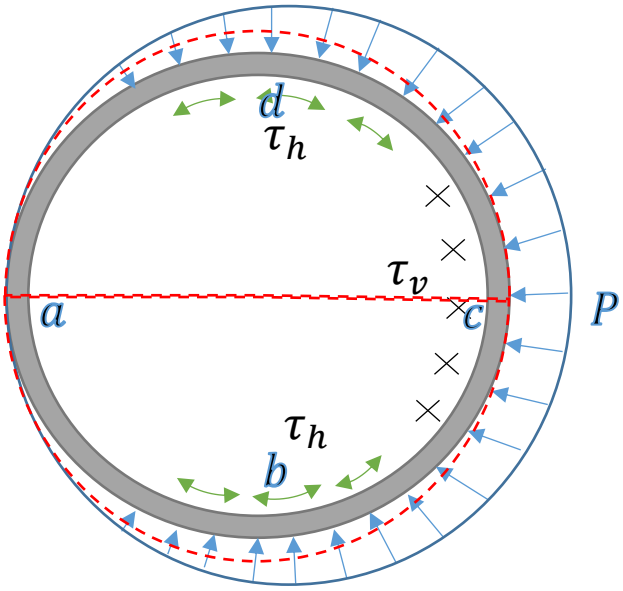


Figure 7: Forces et réactions engendrées au niveau du grout

Le moment appliqué provoque des efforts de traction dans le grout dans la direction circonférentielle. Une fois la résistance à la traction est dépassée, des fissures radiales et verticales apparaissent dans le grout (Figure 6). Elles s'expliquent par la présence d'un ratio local élevé de $\frac{D_p}{t_p}$ au niveau de la connexion et l'ovalisation de la pièce de transition, cette dernière provoque un écartement entre elle et le grout, provoquant ainsi un glissement vertical (Figure 8).

Lotsberg [30] a présenté un modèle analytique pour quantifier le moment résistant des connexions en grout sous un certain nombre d'hypothèses :

- La pression de contact supposée constante et égale à P entre b) et d) puis elle diminue progressivement pour atteindre 0 au point a), (Figure 7).
- La distribution de la pression est supposée fonction du ratio $\frac{D_p}{t_p}$ et cela s'explique par le fait qu'au niveau du point C (Figure 7), le ratio $\frac{D_p}{t_p}$ de la pièce de transition est petit (car une ovulation de la même pièce apparait au niveau du point d) et b et donc un $\frac{D_p}{t_p}\ plus\ grand$).

2.1.1. Moment résistant dû à la pression de contact :

En intégrant la pression de contact sur la moitié de la circonférence b) c) et d) :

$$M_p = \int_0^{\pi/2} sin\varphi R_p\, d\varphi\, p\, \frac{L_g}{2}\,\frac{1}{2}\left(\frac{L_g}{2}\,\frac{2}{3}\right) \times 2$$

La première partie correspond à la force de pression appliquée au sommet et en bas du pieu, et la deuxième partie (entre parenthèses) correspond au bras de levier au centre de la connexion en grout.

On obtient le moment résistant du grout, tel que :

$$M_p = p\frac{R_p {L_g}^2}{3} \dots (1)$$

Où

p La pression nominale maximale au sommet et en bas de la connexion en grout comme le montre la figure 7.

R_p Rayon extérieur du pieu.

L_g La longueur effective de la section en grout tel que : $L_g = L - 2 \times t_g$ avec : t_g l'épaisseur du pieu.

2.1.2. Moment résistant dû au frottement dans la direction horizontale

On suppose une pression de contact égale à $0.75 \times p$ à la position b) et d), on intègre la pression de contact de a) à c) tel que :

$$M_{\mu h} = 4\int_0^{\pi/2} \sin\varphi\, R_g d\varphi\, p(\varphi)\mu\frac{L_g}{2}\frac{1}{2}(\frac{L_g}{2}\frac{2}{3}) \times 2$$

$$M_{\mu h} = \frac{1}{\pi} p\mu R_g {L_g}^2 \dots (2)$$

2.1.3. Moment résistant dû au frottement dans la direction axiale

On intègre sur la circonférence b-c-d avec une pression de contact constante, cette dernière est prise égale à 0 en a), égale à p à c) et à $0.5 \times p$ à b) et d).

$$M_{\mu v} = 2\int_0^{\pi/2} R_p d\varphi \; p \; \mu \frac{L_g}{2}\frac{1}{2}(\sin\varphi \; R_g) \times 2$$

$$M_{\mu v} = \mu p {R_p}^2 L_g \; \ldots (3)$$

$$M_{tot} = M_{\mu v} + M_{\mu h} + M_p \; \ldots (4)$$

Le moment M_{tot} correspond au moment extérieur appliqué à la structure.

A partir des relations de (1) à (4) :

La pression nominale de contact estimée est égale à :

$$P = \frac{3 \times \pi \times M_{tot}}{R_p \times {L_g}^2(\pi + 3\mu) + 3\pi\mu \; {R_p}^2 \; L_g}$$

Afin de déterminer les contraintes au niveau de l'échantillon, on calcule les forces tangentielles verticales et horizontales agissant sur la connexion en grout (Figure 8)

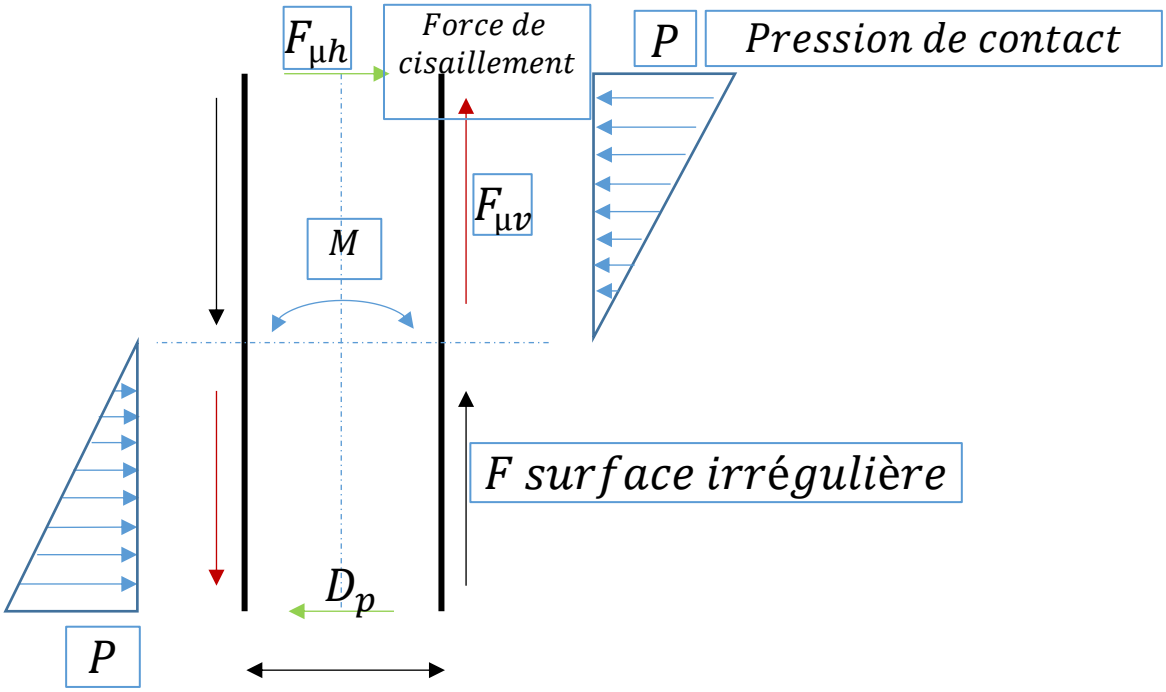


Figure 8: Pression de contact et forces résistantes au moment de flexion dans une connexion en grout

2.1.4. Effet d'irrégularité de la surface

Pendant 30 ans aucune explication claire n'a été trouvé concernant la capacité des connexions en grout à reprendre les efforts à leur niveau.

La compréhension du comportement physique a cependant été plus claire grâce aux différents essais qui ont été confectionnés durant les dernières années.

La rugosité et les différentes tolérances des surfaces dans les sections tubulaires joue un rôle important dans la définition de la capacité axiale de la connexion en grout, en effet plusieurs phases sont parcourues :

1- 1ére phase : la capacité dépend d'une combinaison de surfaces rugueuses et de défaillance de tolérance existante entre le grout et la surface d'acier, dans cette phase la connexion en grout dépend seulement de la résistance d'adhérence de celle-ci.
2- 2éme phase : Une fois la capacité d'adhérence est dépassée, la capacité de la connexion devient dépendante de la rigidité du pieu et de la pièce de transition, et les tolérances et imperfections qui peuvent avoir lieu dans ces différents éléments. La capacité d'interface sera alors prépondérante et assure le bon fonctionnement de la connexion.

2.1.5. Usure et glissement du grout contre l'acier

La résistance au glissement diminue considérablement au cours du temps, cela est dû à la souplesse des assemblages de la connexion qui engendre une déformation lors d'un chargement flexionnel.

La conception des connexions devrait chercher des solutions autre que s'est prévu pour une connexion de forme cylindrique plane.

2.1.6. Forme conique pour les connexions en grout

Choisissant cette forme, une partie de la pression axiale appliquée sur la connexion est alors éliminé permettant ainsi la diminution voire l'élimination du glissement/ tassement qui peut avoir lieu au niveau de la connexion en grout.

Lotsberg recommande un angle entre 1° et 3° pour pouvoir transférer le moment naissant sous forme d'un effort de compression dans le grout à partir d'une pression de contact comme le montre la figure 9

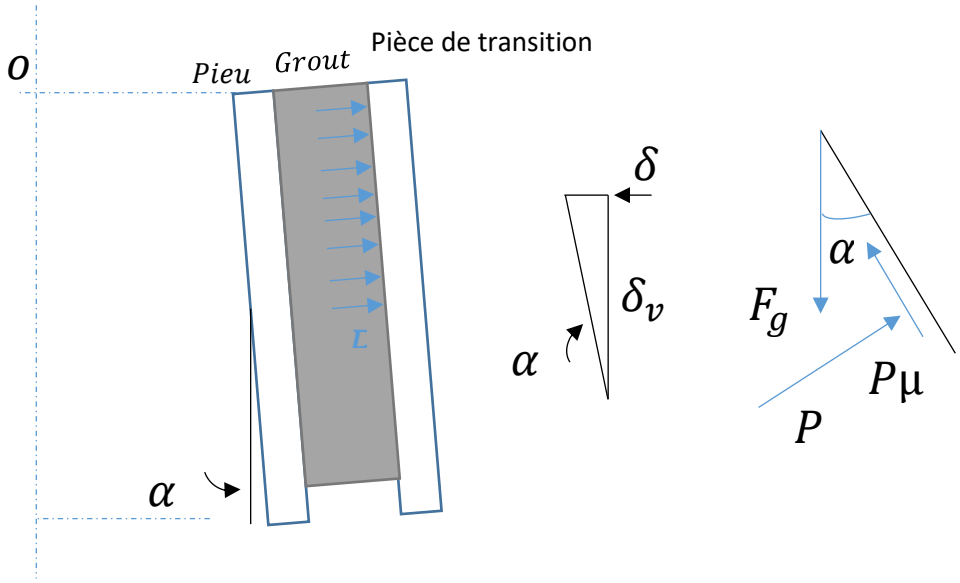


Figure 9: Schéma présentant la forme conique d'une connexion en grout

REVUE DE LITTERATURE SUR LA FATIGUE

1. Introduction

Durant le chargement à la fatigue, les propriétés du grout subissent des altérations qui entrainent des dommages.

La progression des dommages de l'élément en grout peut être observé par l'évolution de divers paramètres de déformation tel que, la déformation totale, la déformation résiduelle, la dégradation de la rigidité, la dégradation de la résistance, dissipation de l'énergie thermique due à la microfissuration, la croissance des fissures, et l'évolution de la vitesse du son dans le grout [35,36]. Basée sur des investigations précédentes [37,38], l'évolution des dommages dans le grout ont un comportement non-linéaire.

Le comportement à la fatigue du grout est influencé par plusieurs facteurs. Selon Ople and Hulsbos [54], le nombre de cycles à la rupture augmente avec l'augmentation du gradient de contrainte (excentricité du chargement à la fatigue).

Comme reporté dans les précédentes investigations, Graf and Brenner [40], Spark and Menzies [40], Raithby et Galloway [49], Holmen [51], Naik et al., et Zhang et al. [42], tous indiquent que le nombre de cycles menant à la rupture diminue avec la diminution de la fréquence de chargement à la fatigue. Ce comportement est plus prononcé lorsque le niveau de contraintes est plus élevé. Pour des niveaux de contraintes très élevés le comportement du grout dépend du nombre de cycles et la durée de chargement ou les effets de fissures deviennent plus en plus importantes, et mènent à une réduction de la durée de vie à la fatigue [43]. Dans le cas contraire Takhar et al. [44], et en se basant sur des analyses statistiques a conclu qu'il n'y a pas de différence significative entre une fréquence de chargement de 20 cycles par minute et 60 cycles par minute pour un niveau de contrainte entre 0.8 et 0.9 (fraction de la résistance moyenne à la compression).

Il est ainsi reporté dans la littérature que la forme sinusoïdale utilisée dans les essais de fatigue influence la durée de vie à la fatigue. Toutefois, l'influence est importante au niveau de la contrainte maximale égale ou supérieure à 0.8 ou les cycles de rupture sont égal ou inférieur à 1000 sous le niveau de contrainte maximum. Selon les observations qui ont déjà été faites, le nombre des cycles menant à la rupture avec une forme sinusoïdale est environ la moitié du nombre de cycles menant à la rupture avec une forme triangulaire, tandis que le nombre de cycles menant à la fatigue de le forme rectangulaire est environ $1/6$ le nombre de cycles sous la forme sinusoïdale sous le même niveau de contrainte [36,64].

L'impact de niveau de contrainte sous la fatigue a été étudié par Zhang et al. [42] sur 171 éléments de béton avec 7 ratios de contraintes, en incluant les ratios négatifs de contraintes. Les courbes contraintes-durée de vie (S-N) obtenues montrent une réduction de la durée de vie des éprouvettes de béton sous des niveaux de contraintes inférieurs.

L'effet des autres facteurs tel que la forme de l'échantillon, le rapport eau/ciment, type de gravier et répartition granulaire, résistance, conditions de cure et l'âge à la mise en essai peut être éliminé en normalisant le niveau de contrainte par rapport à la résistance limite à la compression des éprouvettes [41,65,66]. Ce concept diminue le nombre des facteurs à considérer dans les modèles analytiques pour la prédiction du comportement des éléments en mortier/ béton sous le chargement à la fatigue au paramètre de chargement seul [36].

La perception de l'évolution des dommages au niveaux des matériaux fournie une conception de base avec laquelle la dégradation des propriétés mécaniques et les déformations physiques correspondantes peuvent être corrélés.

Les méthodes d'investigation de la fatigue des matériaux se devisent en deux grandes parties, celles qui découlent des calculs probabilistes et celles basées sur les contraintes/tensions qui rentrent dans les relations constitutives.

On présente dans cette partie un bref résumé des modèles de durée de vie en fatigue basés sur les données expérimentales.

Seul les modèles qui ont été utilisé et qui sont proposés comme base dans les codes sont présentés.

2. La fatigue dans les matériaux cimentaires

La fatigue se manifeste au niveau des matériaux cimentaires par des changements structurels progressifs, ces derniers se présentent comme une détérioration de la liaison entre les granulats grossiers et la matrice liante d'après Murdock & Kessler [52]. Les petites fissures qui naissent au niveau de la matrice liante sont la cause de la détérioration des éprouvettes en béton/ mortier par affaiblissement de la section de l'élément [47]. Une autre hypothèse a été également proposé, qui indique que la fatigue peut être causée par des microfissures résultant du rétrécissement en période de durcissement, ou pendant la période gel/dégel. Selon Holmen [51], la propagation des fissures est plus répandue que dans le cas de charges statiques.

La rupture dans le béton se manifeste sur trois niveaux différents comme proposé par Wittmann et le comité technique de RILEM 90 FMA & Elfgren [56].

Le premier niveau est le niveau microscopique, il n'est pas intéressant du point de vue de la mécanique de la rupture selon RILEM 90 FMA & Elfgren [56]. Ce niveau s'intéresse au liaisons primaires et secondaires qui lient les cristaux de silicate de calcium hydraté. Le comportement à ce niveau est régi par les réactions physico-chimiques et les conditions environnantes.

Le deuxième niveau est celui du niveau intermédiaire ou méso, ce niveau montre l'interaction de la pâte de ciment et le granulat. Selon Petkovic [55] la rupture peut avoir lieu par tension autour du granulat, rupture de la liaison par cisaillement autour du granulat, ou rupture de la matrice par tension ou cisaillement du granulat.

La rupture à ce niveau est régi par les mécanismes de fissurations-déformations. Les contraintes à ce niveau sont non-linéaire, et sont largement influencées en agissant à ce niveau. La figure 10 montre les contraintes autour du granulat.

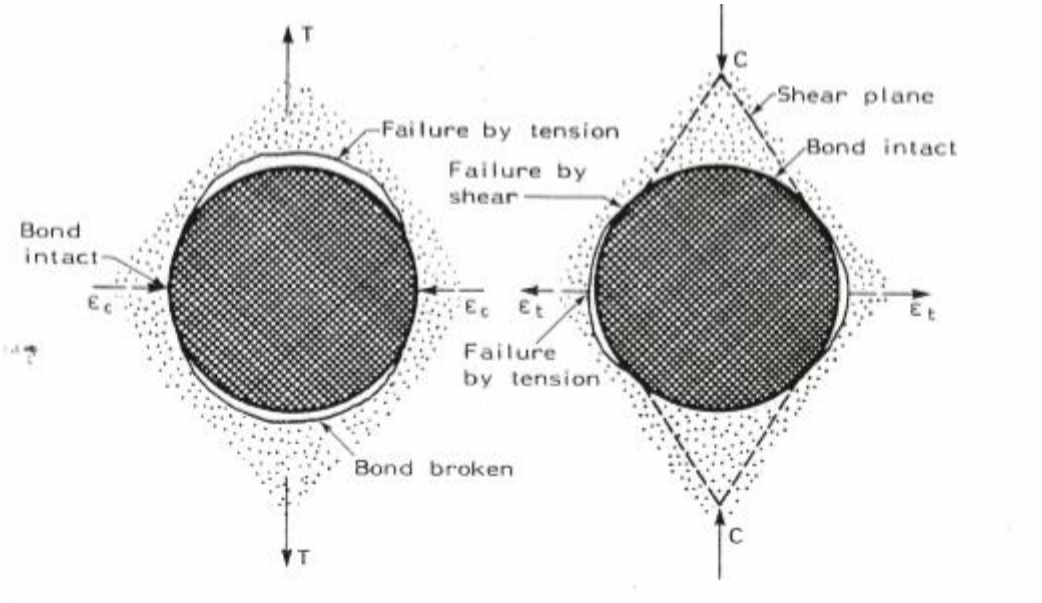


Figure 10: Contraintes locales au niveau de l'interface matrice-granulat sous l'effort de traction et de compression [55]

Le troisième niveau correspond à la modélisation du matériau au tant qu'un élément isotrope avec présence de défaut et en considérant les contraintes moyennes de déformation et la non-linéarité du matériau.

2.1. Mécanisme de fatigue des matériaux granulaires

L'essai de fatigue fait apparaitre trois phases dans les courbes de fatigue qui présente l'évolution de la contrainte en fonction de logarithme du nombre de cycles appliqué (Figure 11).

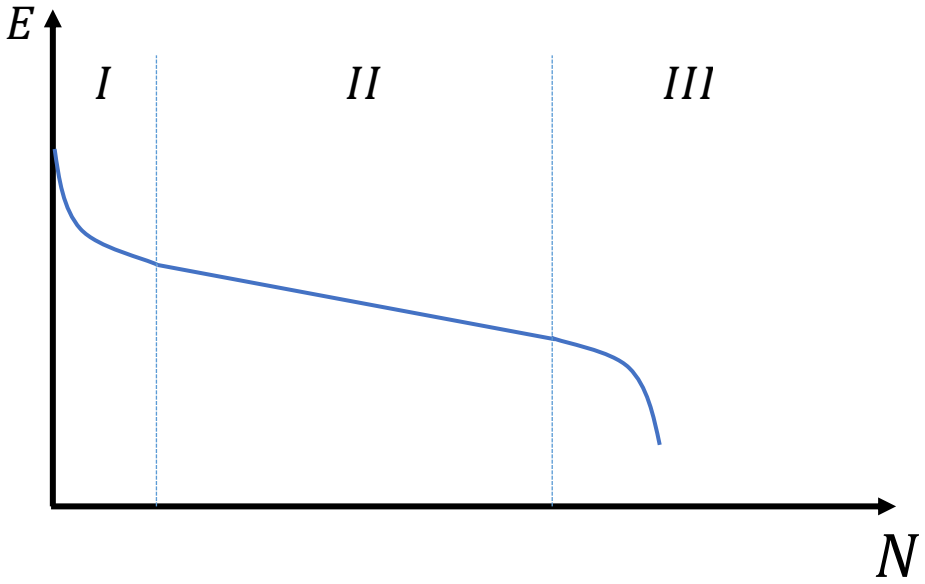


Figure 11: Evolution du module d'élasticité et distinction de trois domaines différents [60]

Phase I : est la phase initiale d'amorçage, la dégradation du matériau est rapide et se traduit par une perte rapide de module d'élasticité, et représente 7% à 10% du nombre de cycles nécessaire pour atteindre la rupture.

Phase II : l'évolution de la fatigue est lente, et la vitesse de dégradation est stabilisée et l'évolution des dommages est lente. Cette phase représente entre 80% et 90% du cycles à la rupture.

Phase III : elle se caractérise par une accélération progressive de l'endommagement provoquant ainsi la rupture de l'échantillon.

2.2. Mécanismes d'endommagement

Les premiers endommagements qui apparaissent dans les matériaux granulaires sont de type microscopique, ils résultent lorsque l'effort localisé atteint la limite de rupture de l'un des constituants ou celle de l'interface les reliant.

Sachant que les microfissures ne sont pas responsables d'une éventuelle rupture de l'élément vu qu'il sont trop petits.

Les principaux modes de ruptures ou mécanismes potentiels d'endommagement d'un matériau hétérogène soumis à des sollicitations mécaniques sont [45] :

1- Fissuration matricielle :

Elle se crée à partir des défauts présents et porosité de la matrice et se propage selon la direction perpendiculaire à la sollicitation.

2- Rupture des granulats :

Rarement observé dans un grout dont les éléments de ses compositions sont extrêmement fins. Elle se manifeste lorsque la contrainte appliquée sur les grains/ granulats dépasse la contrainte à la rupture de celui-ci.

3- Rupture de l'interface granulat / matrice :

L'interface granulat/matrice est extrêmement sensible au niveau de sollicitation et donc à la rupture si la contrainte admissible à ce niveau a été dépassé. Elle se manifeste par la propagation de la fissure à travers l'interface, comme le montre la figure 12.

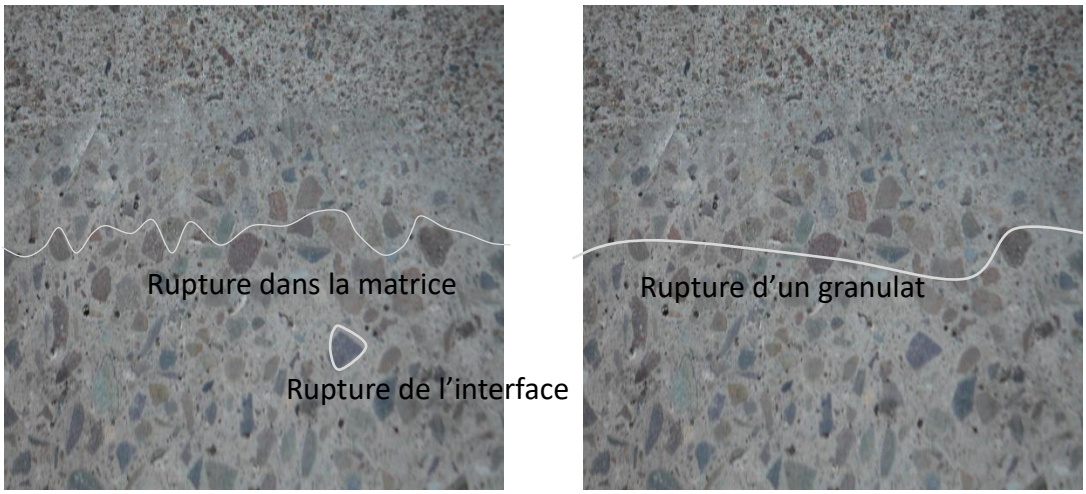


Figure 12: différents mécanismes de rupture dans un matériau granulaire [45]

2.3. Facteurs d'influence sur la fatigue

La plupart des études qui ont été faites sur le comportement à la fatigue des matériaux cimentaires ont essayé de trouver la relation entre la résistance à la fatigue et les facteurs environnants tels que : le mode et les conditions de chargement, le rapport eau/ciment, les dimensions des granulats, le gel/dégel, milieu marin ou non et les conditions de température.

Une manière de comparer la résistance à la fatigue obtenue avec la résistance statique de l'élément pour un nombre donnée de cycles, permet de limiter l'étendu de ces facteurs.

2.3.1. Types de sollicitations dans les essais de fatigue et fréquence de chargement

La tendance générale est d'appliquer une sollicitation sinusoïdale avec ou sans période de repos.

La forme propre du signal n'a pas un effet significatif sur la durée de vie en fatigue selon Wang [11], par contre elle est importante pour l'analyse des résultats des essais de fatigue et l'influence de la vitesse d'application de la charge.

Dans la plupart des essais de fatigue, les sollicitations sont centrées pour obtenir un chargement de type traction/compression alternée.

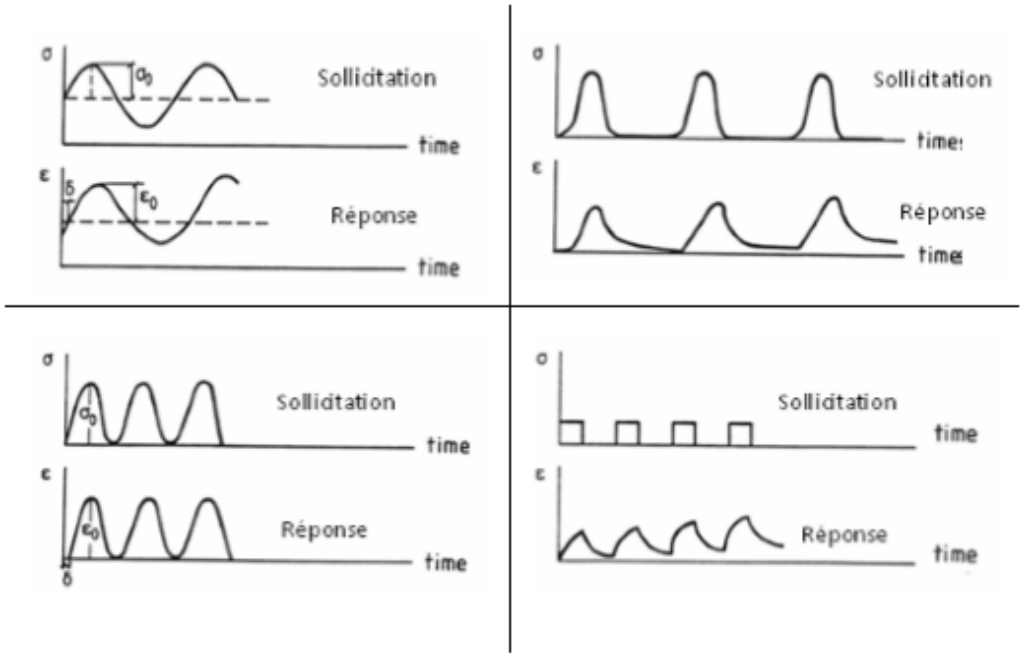


Figure 1.10. Quelques signaux de chargement en contrainte et leur réponse en déformation dans les essais de fatigue [13].

Figure 13: Signaux de chargement en contrainte et leur réponse en déformation dans les essais de fatigue [11]

Les formes des signaux que représente la figure 13 ci-dessus correspondent à des cas particuliers des sollicitations appliquées uniquement en compression ou traction indirecte – l'essai Brésilien).

Selon Petkovic [55], la forme de la charge du vent ou de vagues sont très similaire à l'onde sinusoïdale.

Tepfers et al. [57], ont trouvé que la forme rectangulaire de l'onde est la plus dommageable et la triangulaire est en la moins. Cela peut être expliqué par le fait que le chargement sous la forme rectangulaire permet un chargement pendant une durée du temps plus longue que dans le cas d'ondes sinusoïdales ou triangulaires.

On conclut de l'étude de Tepfers et al. [57], que le temps sous charge joue un rôle important sur la durée de vie de l'échantillon.

Selon Hilsdorf & kesler [43], Les périodes sans chargement lors de l'essai de fatigue allant jusqu'à 5 minutes peuvent prolonger la durée de vie de l'échantillon, alors que les périodes de repos supérieures à 5 minutes n'influencent pas la résistance à la fatigue.

Quant à Petkovic [55], il indique que l'effet de la fréquence n'est significatif que sur la résistance à la fatigue pour des niveaux de contraintes élevés, et ajoute qu'une haute fréquence augmente la durée de vie en fatigue.

2.3.2. L'effet de niveau de contrainte

Le niveau de contrainte défini comme $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ a un effet direct sur la durée de vie de l'échantillon. L'augmentation de R conduit à une diminution de nombre de cycles menant à la rupture. La diminution de nombre de cycles est beaucoup plus prononcée pour des faibles taux de contraintes [46].

Richard et al. [62] ont observé que le volume apparent du béton commençait à augmenter sous charge axiale compressive lorsqu'il atteignait une valeur de 75-85% de la charge de rupture finale. L'augmentation de volume apparent du béton est due à la microfissuration interne.

Nombreux auteurs ont observé des changements importants dans le béton à partir de 75% de la charge de rupture. Ces changements sont dus à la microfissuration dans le béton, qui augmente son volume et son coefficient de Poisson [63].

L'utilisation ultérieure des techniques ultrasoniques a permis de déterminer le moment initial où la microfissuration commence [64]. Ces microfissures ont d'abord été enregistrées à des valeurs d'environ 25 à 30% de la charge de rupture finale.

2.3.3. Gradient de contrainte

Dans le cas où l'échantillon est soumis à un chargement cyclique de même degré d'excentricité du chargement statique aucune influence n'est observée au niveau de la durée de vie de l'échantillon selon Hulsbos [54].

2.3.4. Pression de confinement latéral

La pression dans la direction latérale a un effet favorable sur la durée de vie de l'échantillon pour des niveaux de contraintes inférieurs. Cet effet est perdu après que l'échantillon est chargé pendant plus de 50 fois à n'importe quel rapport de la contrainte latérale selon Petkovic [55].

2.3.5. Humidité

L'effet de l'humidité se traduit par une augmentation de fluage qui affectera à son tour les caractéristiques de déformation de l'échantillon sous un chargement cyclique. Van_Leeuwen & Siemes [59] et Waagaard [58] ont remarqué qu'il y a une réduction significative de la durée de vie de l'échantillon soumis à une humidité élevée sous un chargement alterné de traction et de compression.

Cependant, Gylltoft & Elfgren [50], Galloway et al. [49] indiquent que cette influence est supportée par les échantillons sous diverses conditions d'humidité.

Galloway et al. [49] trouve que les échantillons secs ont une durée de vie plus grande que celle des échantillons humides et arrive à la conclusion que ce n'est pas le pourcentage d'humidité qui joue le rôle important mais, c'est le gradient d'humidité.

2.3.6. Rapport E/C

Les teneurs en eau et en ciment n'ont aucun effet sur la résistance à la fatigue, si le niveau de contrainte est normalisé par rapport à la résistance statique [48].

2.3.7. Température

La résistance à la fatigue augmente avec la diminution de la température, cette conclusion a été le fruit des expériences menées par Ohlsson et al. [53].

2.3.8. Choix du mode de sollicitation

L'essai de fatigue peut être mené par deux méthodes, à contrainte ou à déformation contrôlée.

- Force imposée :

L'échantillon mise en essai est sollicité par une force, l'amplitude et la fréquence restent constantes pendant l'essai tandis que la déformation varie.

Si le champ de contraintes dans l'éprouvette est homogène, alors le mode de l'essai est à contrainte homogène (la contrainte est identique en tout point de l'éprouvette). Cela, permet le dimensionnement de l'éprouvette avant l'essai.

- Déplacement imposé :

Dans ce cas l'échantillon est soumis à un déplacement d'amplitude et fréquence constante.

La force nécessaire à provoquer le déplacement varie au cours de l'essai. Des déformations sont alors observées dans l'échantillon, s'ils sont homogènes, le mode de l'essai est alors à déformation imposée.

3. Modèles de la fatigue

La résistance à la fatigue est définie comme une fraction de la force statique pour lequel l'élément supporte l'effort pour un nombre fini de cycles. Il peut être représenté par des courbes de durée de vie en fatigue en l'occurrence de courbes de Wöhler.

La durée de vie peut également être représenté par les diagrammes de Goodman ou de Smith. Ces diagrammes présentent la dépendance de la contrainte maximale et minimale à la résistance de fatigue.

3.1. Les courbes S-N

La performance des matériaux est caractérisée par une courbe S-N, appelé courbe de Wöhler.

Les courbes S-N (Figure 14) montrent la relation entre l'amplitude de contrainte appliquée au matériau et le nombre de cycles qui mènent à sa rupture.

Afin d'obtenir la courbe S-N, Chaque échantillon est soumis à une charge cyclique d'amplitude constante, l'essai continue jusqu'à la rupture de l'échantillon. Le moment où la rupture a été observé correspond au nombre de cycles écoulé jusqu'à la rupture. Son logarithme N qui correspond à σ_{max} est tracé dans un diagramme. Cette courbe est valable pour un rapport constant entre contrainte maximale et minimale.

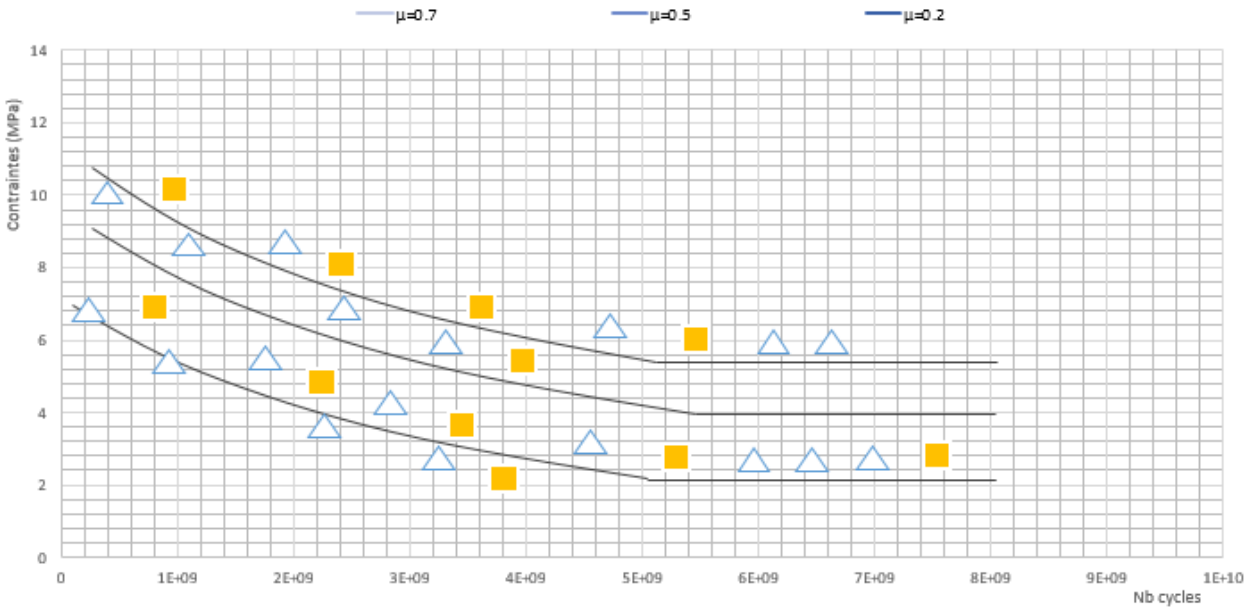


Figure 14: Courbes de Wöhler pour deux types d'éprouvettes soumis à plusieurs coefficients de frottement

L'intérêt de cette méthode est de déterminer la capacité à reproduire le comportement en fatigue du matériau.

Pour obtenir des informations statistiquement raisonnables pour chaque courbe, il est nécessaire de tester plusieurs échantillons à chaque niveau de contrainte, vu que la dispersion de nombres de cycles à la rupture est importante, surtout quand il s'agit des éprouvettes de mortier ou de béton dont les résultats sont généralement stochastiques.

Johansson [38] a décrit une procédure probabiliste afin d'obtenir la probabilité de rupture requise pour un nombre de cycle jusqu'à la rupture.

On note que le béton et les matériaux cimentaires n'ont pas de limite da fatigue et cela se traduit dans les courbe de Wöhler par des droites qui ne convergent vers aucune valeur spécifique sur l'axe vertical pour un grand nombre de cycles [38].

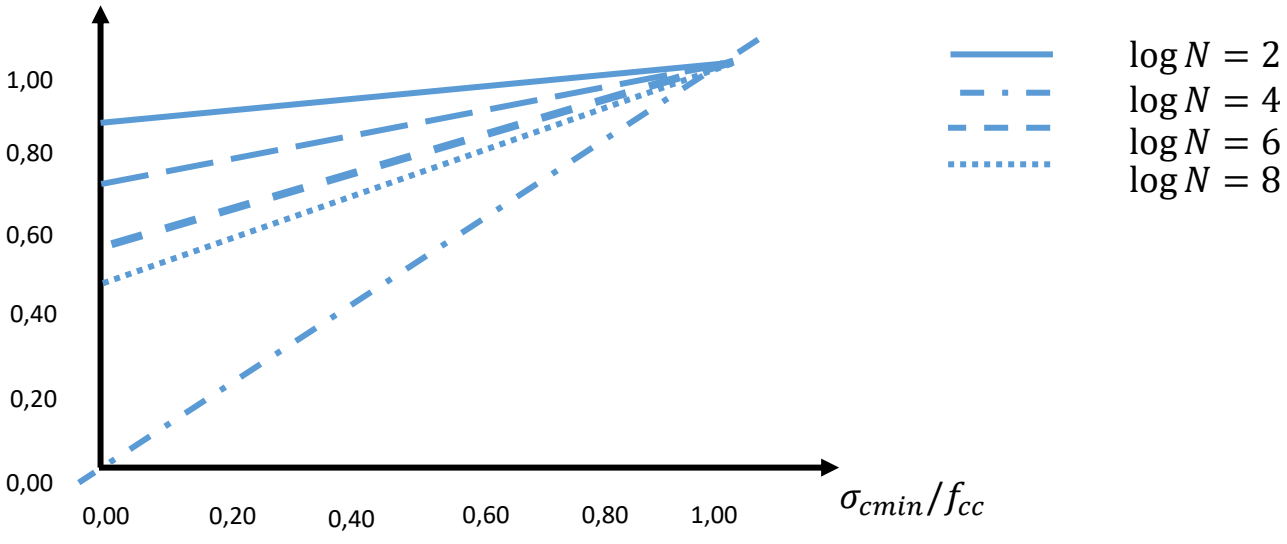


Figure 15: Diagramme de Goodman donné en fonction de nombre de cycles N selon [38]

3.2. Diagrammes de Goodman et Smith

Le diagramme de Goodman permet de prédire la durée de vie d'un échantillon d'une façon différente à celle présentée précédemment. Dans ce diagramme, le niveau de contrainte maximum σ_{max} est noté sur l'axe vertical tandis que la contrainte minimale σ_{min} est sur l'axe horizontal. Le diagramme présente plusieurs lignes dont chacune correspond au nombre de cycles menant à la rupture comme il est montré dans la figure 15.

Le diagramme de Smith est un diagramme similaire à celui de Goodman. Il représente les contraintes maximales et minimales dans l'axe vertical, et la contrainte moyenne sur l'axe horizontal. Les diagrammes de Wöhler et de Goodman/Smith peuvent être exprimés dans une équation. A titre d'exemple Johanssen a présenté l'équation ci-dessous dans son étude [38] :

$$\sigma_{max} = 1 - \beta_x(1 - R)logN$$

Où β_x est une constante dépend du matériau et entre $0{,}064$ à $0{,}080$

INVESTIGATIONS EXPÉRIMENTALES

1. Objectif de l'essai

L'objectif de l'essai est d'évaluer la capacité d'un grout soumis à un effort combiné de compression et d'effort tranchant vis-à-vis de la fatigue. Ce grout permet de jointer le mât d'une éolienne offshore avec son pieu par l'intermédiaire d'une connexion appelée « connexion en grout ».

L'espace annulaire rempli de coulis reliant le pylône du support à la pièce de transition a récemment devenu l'objet de nombreuses études, car il a été constaté que les connexions en grout ont tendance à avoir une résistance réduite avec le temps lorsqu'elles sont soumises à des moments de flexion alternés du vent et de vagues agissant sur la structure [67].

Une telle action provoque des contraintes périodiques élevées localement au niveau des extrémités de coulis qui peuvent conduire à des fissures locales radiales et longitudinales. En outre, la présence de l'eau provoque davantage une réduction de la capacité à la fatigue [67].

L'objectif de la présente étude est d'étudier la capacité de fatigue d'un grout de haute performance conçue pour les connexions en grout sous un chargement cycliques combinées de compression et d'effort tranchant, dans l'air.

2. Définition du problème et paramètres

Dans le but d'étudier le comportement à la fatigue d'une éprouvette de grout soumise à un effort combiné de compression et d'effort tranchant.

Les pièces du support sont caractérisées par un angle d'inclinaison de leur surface.

En premier lieu, on a placé l'échantillon sur la surface de support, et on l'a fixé à l'aide d'une colle afin qu'il ne soit pas désaxé par rapport au centre de gravité de l'ensemble (Support supérieur- Eprouvette- Support inférieur) comme le montre la figure 16.

L'éprouvette a subi par la suite une contrainte cyclique de compression appliquée suivant les deux composantes orthogonales, radiale et longitudinale.

Les extensomètres placés sur la surface latérale de l'échantillon suivant la circonférence médiane et au niveau des bords de l'échantillons, permettent d'acquérir les déformations instantanées, ces dernières seront par la suite traitées en fonction de l'angle de l'inclinaison de l'échantillon et le type d'interaction de l'éprouvette avec la surface inclinée de la pièce en acier.

La $1^{ère}$ partie de l'essai consistait à soumettre une éprouvette sous un effort de compression simple (Angle d'inclinaison = $0°$), et suivre l'évolution de la déformation jusqu'à avoir une rupture de l'éprouvette.

Le $2^{ème}$ essai qui concerne un ensemble d'éprouvettes, consistait à les soumettre à un essai de compression cyclique en leurs donnant un angle d'inclinaison, en conditionnant leurs interactions surfaciques par une colle ou sans colle.

Le tableau 4, résume les différentes données liées à la condition de chargement et au niveau de contrainte appliqué sur les éprouvettes.

Figure 16: Dispositif d'essai avec échantillon (la mise en essai)

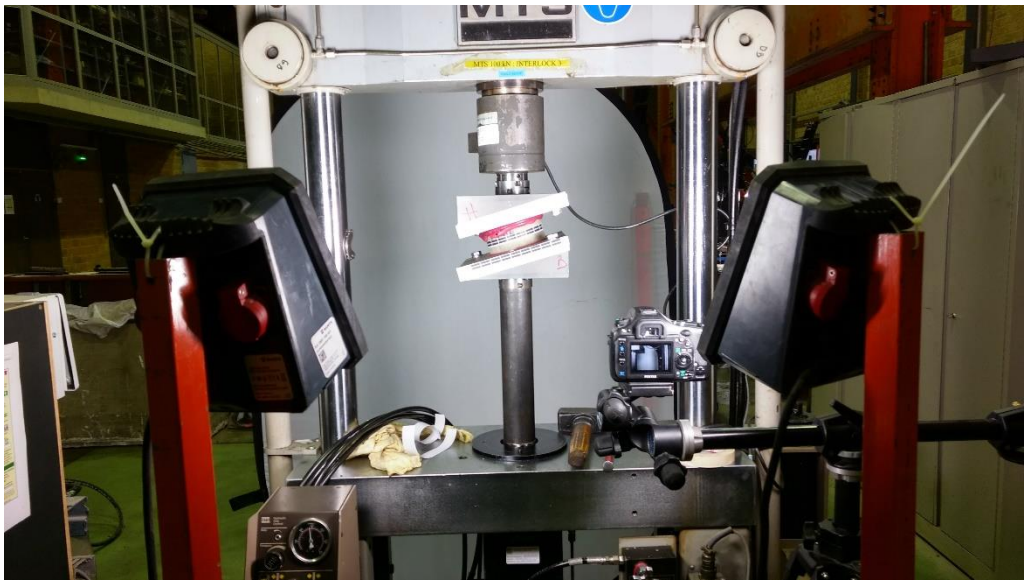


Figure 17: Photo prise lors de la mise en essai à la compression cyclique

3. Procédure de l'essai à la fatigue

Des éprouvettes cylindriques de $110\ mm$ de diamètre et $220\ mm$ de hauteur sont coulées et stockées dans de l'eau à $20\ °C$ jusqu'à le jour de l'essai.

Des éprouvettes dont les dimensions sont calculées dans le paragraphe $3.1)$ sont par la suite carottés, surfacées puis collées.

Premièrement, la résistance à la compression statique est déterminée en utilisant 02 éprouvettes de mêmes dimensions. Ensuite, on procède à l'essai de fatigue sur plusieurs éprouvettes soumises simultanément à la compression et à l'effort tranchant cyclique, contrôlées par une force imposée, avec une force maximale allant jusqu'à $40\ KN$ et une force minimale de $5\ KN$. Le rapport Force/contrainte minimum spécifié appliqué sinusoïdalement à une fréquence constante égale à $5\ Hz$. Le chargement cyclique est poursuivi jusqu'à la rupture de l'échantillon ou jusqu'à ce qu'il ait dépassé 2 millions de cycles de chargement.

Au cours de l'essai, la surface libre de l'échantillon est entourée par l'air ambiant ou par de l'eau contenue dans un récipient. Les essais ont été effectués à des niveaux de charge supérieures à $60\ \%$ de la résistance à la compression statique. Au moment de l'essai, les échantillons doivent présenter une résistance à la compression statique déterminé à partir de l'essai de compression à 95% de confiance.

Le résultat pour chaque échantillon est indiqué dans un tableau reprenant l'environnement d'immersion et le niveau de contrainte appliqué. Chaque série d'essai comprenait un nombre définit d'échantillons.

Type	ID	Niveau de contrainte	Environnement (S/E)	Angle d'orientation	Conditions de chargement
Collé	PC1/2/3	À partir de 60%	S	0°	Compression
	SC1/2/3	À partir de 60%	S	15°	Shear-compression

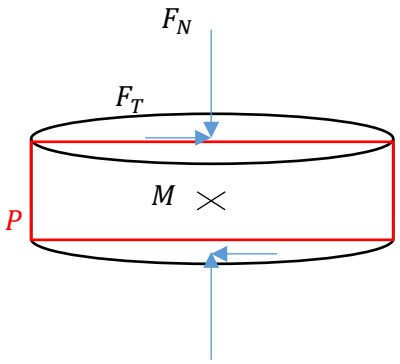
Tableau 4: Type, niveau de contrainte, conditions de chargement des éprouvettes sous une fréquence de 5Hz

3.1. Dimensionnement des éprouvettes

En se basant sur les conclusions des études citées dans la première section, les contraintes tangentielles développées au niveau du grout provoque la rupture de celui-ci une fois sont plus grandes que les contraintes principales de traction du grout.

Afin de pouvoir arriver à cette situation, plusieurs dimensions d'éprouvettes sont prises arbitrairement afin de déterminer les contraintes principales. Pour se faire, on a calculé les contraintes principales à l'aide de cercle de Mohr et d'un modèle d'éléments finis réalisé sur Abaqus.

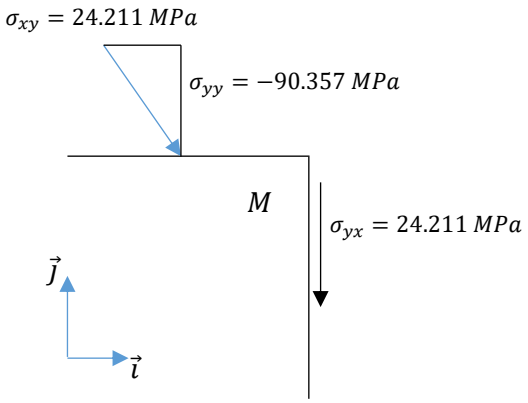
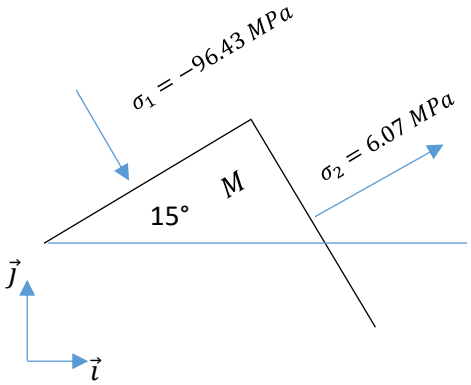
Au premier lieu, on a fixé les dimensions de l'éprouvette du grout, comme le montre le tableau 5, les contraintes principales ont été calculé comme ci-après.



En un point M de l'éprouvette cylindrique et suivant le plan P dans le repère orthonormé $\{\vec{\imath}, \vec{\jmath}, \vec{k}\}$.

Pour une charge appliquée de $90\ KN$ (étant donné que la charge maximale qu'on peut appliquer expérimentalement au laboratoire) sur une section d'éprouvette de dimension $35 \times 50\ mm$ égale à $A = \ 0.000962\ \mathrm{m}^2$ le tenseur de contraintes a pour valeur :

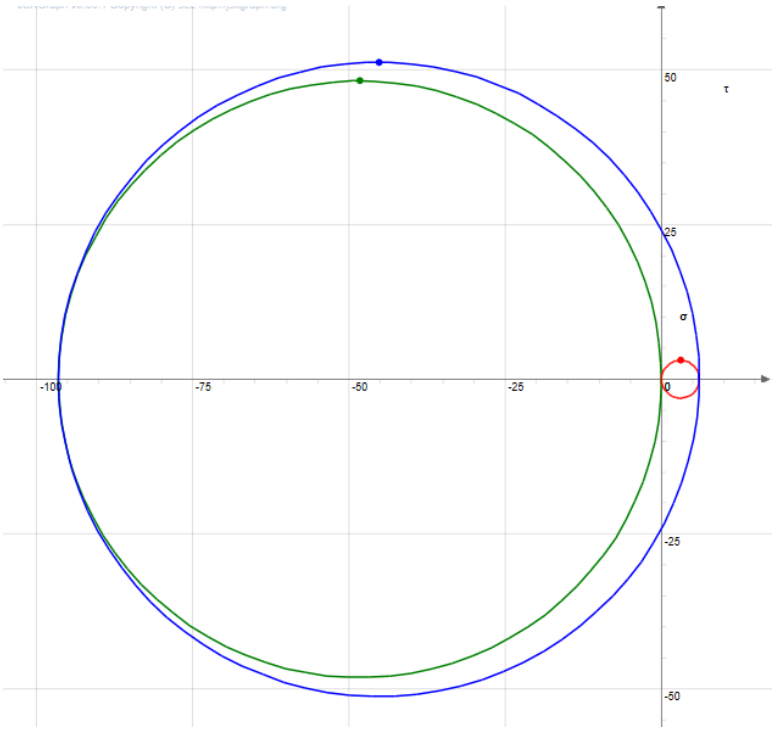
$$[\sigma(M)] = \begin{bmatrix} 0 & 24.211 & 0 \\ 24.211 & -90.357 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} MPa$$

Le tenseur de contraintes	$[\sigma(M)] = \begin{bmatrix} 0 & 24.211 & 0 \\ 24.211 & -90.357 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} MPa$
	
Les contraintes principales σ_1, σ_2 et σ_3	$det \begin{bmatrix} 0-\sigma_n & +24.211 \\ +24.211 & -90.357-\sigma_n \end{bmatrix}$ $= (0-\sigma_n)(-90.357-\sigma_n) - (24.211)^2$ $= 90.357 \times \sigma_n + {\sigma_n}^2 - 586.173 = 0$ Solutions : $\sigma_1 = 6.07\ MPa$ $\sigma_2 = -96.43\ MPa$ $\overrightarrow{n_3} = \vec{k}$, $\sigma_3 = 0$
La position angulaire des directions principales $\overrightarrow{n_1}$ et $\overrightarrow{n_2}$	$\tan\theta_1 = \frac{\sigma_1-\sigma_{xx}}{\sigma_{xy}} = \frac{6.07}{24.211} = 0.2507,$ $\tan\theta_2 = \frac{\sigma_2-\sigma_{xx}}{\sigma_{xy}} = \frac{-96.43}{24.211} = -3.9803$ $\theta_1 = 15.00°, \theta_2 = -75.00°$
Les contraintes et directions principales	
Le tenseur de contraintes principales	$[\sigma(M)]_{\{\overrightarrow{n_1},\overrightarrow{n_2},\overrightarrow{n_3}\}} = \begin{bmatrix} 6.07 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -96.43 \end{bmatrix} MPa$

Calcul des contraintes et directions principales à l'aide du cercle de Mohr :

STRESS TENSOR DEFINITION		
σ_{xx} [MPa] 0	τ_{xy} [MPa] 24.211	τ_{xz} [MPa] 0
τ_{yx} [MPa] 24.211	σ_{yy} [MPa] -90.357	τ_{yz} [MPa] 0
τ_{zx} [MPa] 0	τ_{zy} [MPa] 0	σ_{zz} [MPa] 0

MOHR CIRCLE SOLUTION		
σI [MPa]	Principal stress I	6.0784
σII [MPa]	Principal stress II	0
σIII [MPa]	Principal stress III	-96.4354
τ_{MAX} [MPa]	Guest - Tresca	51.2569
σ_{VM} [MPa]	Huber - Hencky - Von Mises	99.6138



En second lieu, on a réalisé un modèle FEM sur Abaqus, reprenant les mêmes dimensions des éprouvettes.

Les contraintes principales trouvées sont présentées sur la figure 18.

Ces deux études ont été également appuyé par un essai de fatigue au laboratoire.

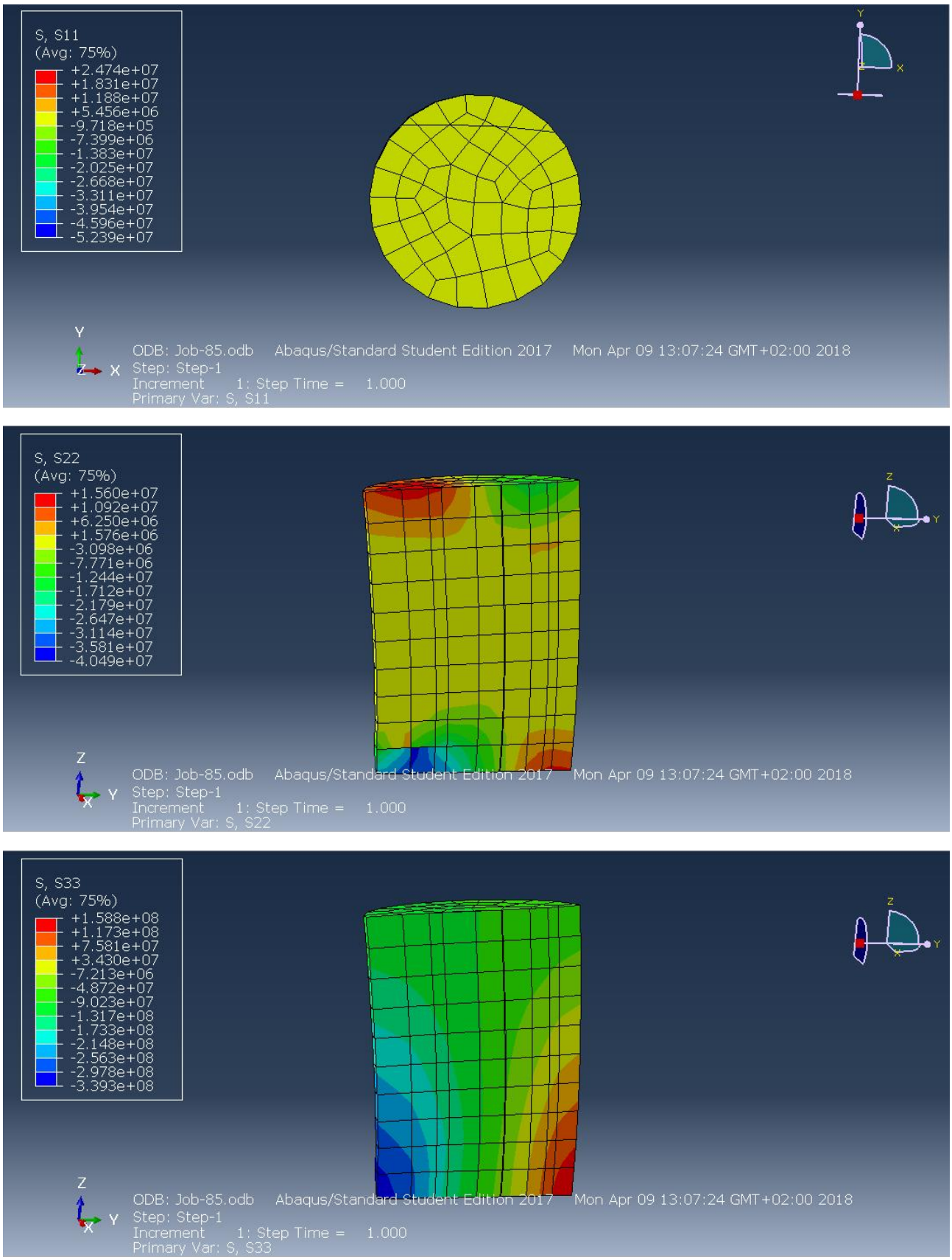


Figure 18: Contraintes principales sur Abaqus sous une force de 90 KN

Le tableau 5 donne les dimensions :

Type d'éprouvettes	Diamètre $\emptyset$ $[mm]$	Rapport $\frac{\emptyset}{L}$	Section A $[mm^2]$
Cylindrique	35	0.7	961.625

Tableau 5: Dimensions des éprouvettes

Le niveau de contrainte appliqué, les contraintes principales trouvées à l'aide de cercle de Mohr et de l'analyse d'éléments finis en fonction de la force appliquée sont dressées dans le tableau 6.

Dimensions des éprouvettes	Forces appliquées $[KN]$	Contrainte verticale σ_N $[MPa]$	Contrainte horizontale σ_T $[MPa]$	Cercle de Mohr $[MPa]$		Eléments finis Abaqus $Moy[MPa]$	
				σ_2	σ_3	σ_2	σ_3
$35 \times 50\ mm$	90	90,357	24,211	6,07	96,43	5,74	90,45
	85	85,337	22,866	5,74	91,06	5,49	85,68
	80	80,317	21,521	5,40	85,72	5,15	80,68
	75	75,297	20,176	5,07	80,36	4,84	75,64
	70	70,277	18,831	4,72	75,00	4,50	70,64
	65	65,258	17,486	4,39	69,65	4,19	65,60
	60	60,238	16,141	4,05	64,29	3,85	60,49
	55	55,218	14,796	3,71	58,92	3,55	55,45
	50	50,198	13,451	3,38	53,58	3,23	50,42
	45	45,178	12,106	3,03	48,20	2,89	45,41
	40	40,159	10,760	2,70	42,85	2,59	40,38
	35	35,139	9,415	2,36	37,50	2,26	35,26
	30	30,119	8,070	2,02	32,14	1,93	30,24
	25	25,099	6,725	1,68	26,74	1,61	25,22
	20	20,079	5,380	1,35	21,43	1,29	20,19

Tableau 6: Contraintes principales en fonction de la force appliquée sur la section de l'éprouvette

Les éprouvettes de dimensions $35 \times 50\ mm$ ont été choisi pour la réalisation de l'essai de fatigue détaillé dans les paragraphes suivants.

3.2. Caractéristiques élastiques du grout

Un essai de compression a été réalisé sur 02 éprouvettes cylindriques de haute résistance, de diamètre de $110\ mm$ et d'une longueur de $220\ mm$ pour déterminer la résistance caractéristique à la compression f_{ck}.

Ces essais nous fournissent des données qui sont par la suite exploitées pour normaliser la contrainte appliquée à la fatigue.

Résistance caractéristique à la compression (cyl. $\mathbf{110 \times 220\ mm}$)	$\boldsymbol{f_{ck}}$	MPa	90.4
Résistance à la traction (cyl. $\mathbf{110 \times 220\ mm}$)	$\boldsymbol{f_{tk}}$	MPa	N/A
Module d'élasticité longitudinal (cyl. $\mathbf{110 \times 220\ mm}$)	$\boldsymbol{E}$	GPa	14
Module de Poisson (cyl. $\mathbf{110 \times 220\ mm}$)	$\boldsymbol{\nu}$		0.199

Tableau 7: Caractéristiques mécaniques du grout

3.3. Préparation de l'échantillon

Nous avons préparé les éprouvettes en versant le coulis liquide dans un moule reprenant les dimensions de l'éprouvette. Après environ 24h, les éprouvettes ont été décoffrés. Cette étape a été suivie par le stockage des éprouvettes pendant sept jours dans une chambre

humide à une température constante de 20°C afin d'atteindre la résistance maximale à la compression suivant les consignes du fabriquant détaillées dans l'annexe_X1. Jusqu'à l'heure des essais en laboratoire, les échantillons ont été stockés à température ambiante. Les éprouvettes cylindriques sont par la suite découpées, surfacées (voir la figure 19) et collées sur des plaques métalliques.

Au moment de la mise en essai cycliques, les échantillons avaient atteint l'âge de 7 jours. Ainsi, l'âge de grout n'a pas d'intérêt dans l'étude de fatigue car c'est un phénomène qui se produit après quelques années et non au moment de la résistance à 7 ou 28 jours.

Chaque échantillon a été observé par une caméra qui prend une photo chaque 300 secondes soit 1500 cycles, et des extensomètres LVDT pour la mesure de déplacement du plateau supérieur de la presse hydraulique.

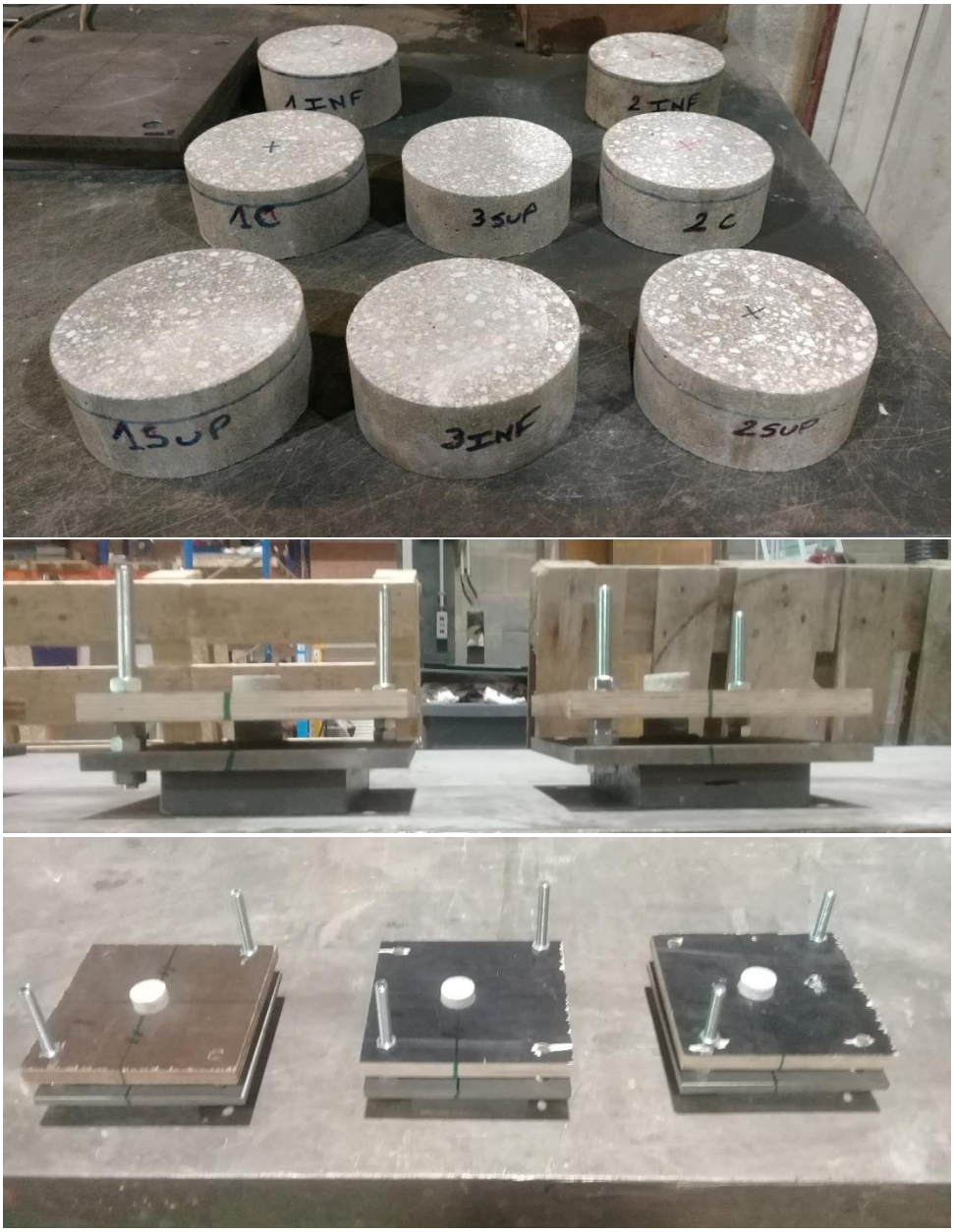


Figure 19: a) Confection, sciage, carottage et rectification de la surface des éprouvettes de grout. b) coffrage et collage des échantillons

Le niveau de charge sélectionné était de 40, 45, 50, 55 et 60% de la charge de rupture en tant que niveau de charge supérieur.

En raison du comportement stochastique du grout, plusieurs éprouvettes ont été testé afin de valider les résultats obtenus à la fatigue.

3.4. Les éléments de l'essai

Le dispositif de l'essai de cisaillement et de compression combiné comprend une partie de chargement supérieure et inférieure adaptée pour être utilisée conjointement avec une machine d'essai universelle ou une presse.

La partie supérieure comprend un support à surface incliné à angle défini.

La face du support est de préférence rugueuse pour saisir l'échantillon et transférer la force de cisaillement de la tête de chargement à l'éprouvette.

La partie de chargement inférieure est symétrique à la partie de chargement supérieure, et la surface de contact est sensiblement parallèle à la face de contact supérieure permettant ainsi la réception de l'éprouvette.

Le corps de la partie de chargement inférieure comprend une plaque de base qui repose sur une surface de frottement (appuis simples) empêchant un mouvement latéral non résistant lorsqu'une contrainte de cisaillement se développe au niveau de l'éprouvette.

De préférence, la partie de chargement supérieure comprend un capuchon pivotant de sorte que la force de compression est appliquée uniformément. Les supports sont de préférence formés avec des faces séparables et qui sont réglables par rapport aux corps de la partie de chargement.

Le dispositif d'essai, tel qu'il a été imaginé pour les deux environnements sec et humide est présenté dans la figure 20.

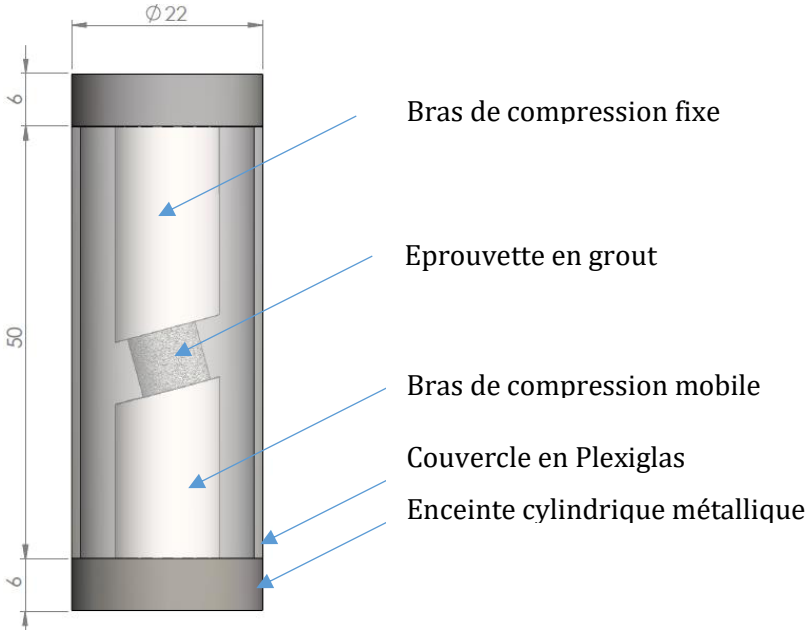


Figure 20: Dispositif d'essai de fatigue pour la compression et l'effort tranchant combiné

Les éléments constitutifs ainsi que leurs dimensions sont présentés dans l'annexe_X6 à la fin de ce rapport.

Figure 21: Dispositif d'essai

3.5. Les pièces inclinées (la partie supérieure)

Les pièces qui servent comme support et qui permettent la transmission de la contrainte due au déplacement imposé suivant un angle précis ont été usiné avec de l'acier.

Ces pièces présentées dans la figure 21 ont été incorporé dans un récipient cylindrique qui est aussi métalliques mais n'assure que l'étanchéité de système dans le cas de la mise en eau.

Le tout est mis sur le support de la presse hydraulique, tout en assurant le maintien de l'axe de l'éprouvette sur le centre de gravité de l'ensemble.

Des extensomètres de type LVDT sont installés sur la surface latérale de l'échantillon, ils assurent l'acquisition des données liées à la déformation au cours de l'essai dans l'échantillon.

L'emplacement ainsi que le type des capteurs sont montrés dans les paragraphes suivants.

3.6. La presse hydraulique

Une presse de type MTS présentée dans la figure 22 a été utilisé pour l'essai, d'une capacité de 100 KN, contrôlé par ordinateur. L'essai s'est déroulé sur la même machine afin d'éviter les erreurs liées aux instruments.

Figure 22: Presse servo- hydraulique d'une capacité de 100 KN

4. Programme expérimental

Les échantillons sont soumis à deux essais essentiels :

- Le premier est un essai dans lequel la capacité quasi-statique de l'échantillon est atteinte. Ils sont soumis à la compression et à l'effort tranchant dans un banc d'essai commandé par déplacement, et déposés sur le banc d'essai suivant un angle bien précis de $15°$. La contrainte moyenne σ d'un lot d'échantillons est choisie pour être représentative dans les résultats de l'essai.
- Deuxième essai, les échantillons sont mis en l'essai en fonction de leur comportement à la fatigue. Dans ces essais la condition ambiante (CA) est sec. Le niveau de charge maximale varie entre 60% et 80% de la capacité maximale à la compression σ.

La fréquence de chargement est égale à $5\ Hz$, ce choix représente un avantage vu qu'elle s'éloigne de la fréquence propre de dispositif d'essai.

L'éprouvette est cylindrique, le choix s'est basé sur une forme axisymétrique permettant une bonne distribution des contraintes le long de l'éprouvette et un effet minimal des bords. Quant au diamètre, le choix s'est porté sur un diamètre de $35\ mm$, plus petit que celui pris par l'étude [68] afin de pouvoir appliquer des efforts de fatigue convenables au niveau de l'échantillon.

Nous avons élaboré un modèle numérique afin de simuler le comportement de l'éprouvette sous un chargement combiné de compression et d'effort tranchant, et choisir par la suite des dimensions convenables qui représente le mieux les contraintes dans l'échantillon.

Le choix s'est donc porté sur des éprouvettes de dimensions $35 \times 50\ mm$, comme a déjà été montré dans le paragraphe 3.1).

5. La procédure expérimentale

L'éprouvette de grout utilisée dans cette étude est présentée dans la figure 19.

Un mélange de grout ayant une résistance maximale à la compression égale à 90 MPa est conçu. Le rapport eau/ciment de grout est de $0{,}115$. La taille maximale des granulats est inférieure à $8\ mm$ et le diamètre maximum du sable est de $0{,}2\ mm$

La déformation dans le grout est mesurée en utilisant les deux méthodes d'acquisition des données, les extensomètres de type LVDT et la DIC présentées dans la section suivante.

Douze échantillons d'une section de $35\ mm$ et d'une hauteur de $50\ mm$ ont été soumis à une charge cyclique de compression statique dans une plage de contraintes comprise entre 60 et 80% de la résistance maximale à la compression. Les deux échantillons de grout restants sont testés sous chargement uni axial à partir d'une contrainte nulle et jusqu'à la rupture.

Le chargement cyclique est réalisé en chargeant-déchargeant suivant une fréquence de $5\ Hz$ avec une force maximale $F_{max} = 30, 32.5, 35, 37.5, 40\ KN$ et une force minimale $F_{min} = 5\ KN$ pour chaque F_{max}

Les forces F_{max} et F_{min} correspondent chacune aux contraintes σ_{max} et σ_{min} calculées comme suit :

$$\sigma = \frac{F_{max,min}}{S} = \frac{F \times cos\varphi}{S}$$

S représente la section soumise à l'effort.

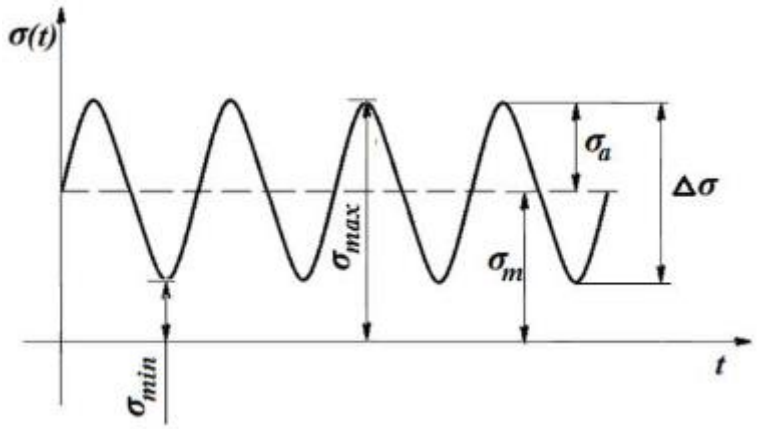


Figure 23: Contraintes cycliques appliquées sur les échantillons en grout

σ_m Contrainte moyenne

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

σ_a Amplitude de la contrainte

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$\Delta\sigma$ Etendue de la contrainte

$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a$; $\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$; $\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$

Le tableau 8 résume les contraintes de sollicitation appliquées aux éprouvettes pour l'essai de fatigue.

On note que les sollicitations sont de type répété puisque $\sigma_{max} > 0$, $\sigma_{min} > 0$ et σ_m est positive.

F_{max} $[KN]$	F_{min} $[KN]$	σ_{max} $[MPa]$	σ_{min} $[MPa]$	σ_m $[MPa]$	σ_a $[MPa]$
40	5	41.58	5.20	23.39	18.19
37.5	5	38.98	5.20	22.09	16.89
35	5	36.38	5.20	20.79	15.59
32.5	5	33.78	5.20	19.49	14.29
30	5	31.18	5.20	18.19	12.99

Tableau 8: Valeurs des contraintes cycliques appliquées sur les éprouvettes en grout

Les paramètres de 2 types d'échantillons et les conditions de chargement correspondantes sont listés dans le tableau 9.

Type de chargement	f (Hz)	ID	Dimensions	Angle d'orientation	Conditions de chargement	Plage de contrainte
Chargement cyclique	5	FC1/2/3	$35 \times 50\ mm$	0°	Compression	60 à 80% de la résistance à la compression
		SC1/2/3	$35 \times 50\ mm$	15°	Shear-compression	
Chargement à la rupture	/	PC1/2	$35 \times 50\ mm$	0°	Compression	Contrainte à la rupture
		1C2/3C1	$35 \times 50\ mm$	15°	Shear-compression	
		1INF2/3INF1	$35 \times 50\ mm$	15°	Traction	

Tableau 9: Paramètres et types des échantillons en grout utilisés

Il convient de souligner que les éprouvettes ont été confectionné à partir d'un seul mélange du grout afin de garder les mêmes caractéristiques mécaniques.

A l'aide d'une machine d'essai de matériaux universelle décrite ci-dessus, comme le montre la figure 22 les essais ont été effectués à un taux de déplacement constant de $0.5\ \mathrm{mm/\ min}$ pour l'essai de compression uni axial. Quant à l'essai de fatigue une plage de contrainte définie précédemment est appliquée sur les éprouvettes. Les efforts et les déplacements ont été enregistrés pendant tout le processus de chargement.

Les essais ont été répétés 2 fois et la résistance à la rupture est déterminée à partir de la contrainte moyenne de l'ensemble des éprouvettes mises en essai.

La plateforme d'essai est conçue pour étudier le comportement des éprouvettes du grout sous l'effort de compression et de cisaillement combiné. La plateforme comprend deux supports métalliques à surface inclinée permettent le transfert de l'effort de compression comme illustré dans la figure 21. Les deux supports métalliques sont reliés à une machine d'essai « une presse » par serrage.

L'éprouvette en grout a été sujet d'une distribution uniforme de l'effort sur toute sa surface et la déformation plastique initiale apparait sur l'échantillon indiquant ainsi la fin de domaine élastique dont il était objet.

Les échantillons ont été soumis à une pression constante faible dans leurs emplacements jusqu'à ce qu'ils soient prêts à être testés.

La contrainte normale et de cisaillement sont donné par :

$$\sigma = \frac{F_N}{S} = \frac{F \times cos\varphi}{S}, \tau = \frac{F_T}{S} = \frac{F \times sin\varphi}{S}$$

S représente la section soumise à l'effort.

Les échantillons $PC1/2$ et $1INF2/3INF1$ ont été soumis jusqu'à leurs rupture à la compression, respectivement la traction. Tandis que les éprouvettes $E1/E2/\ldots/E9$ ont été soumise à l'essai de fatigue sous plusieurs plages de contraintes comme le montre le tableau 8.

La charge a été appliqué avec une intensité constante, et à chaque valeur de la charge, la déformation a été mesurée par des extensomètres LVDT mises au niveau du support inférieur de la presse, le capteur de déplacement de vérin de la presse, et la méthode de la corrélation d'image digitale (DIC).

6. Système d'acquisition des données

6.1. Extensomètres

La presse hydraulique est équipée d'un capteur de déplacement qui mesure le déplacement de support (vérin) supérieur ainsi qu'un capteur de force mesurant la force appliquée sur l'échantillon. Ces deux capteurs sont liés à un dispositif d'acquisition de données Grabber pour permettre la visualisation et leurs stockages.

Les données sont présentées dans la section suivante 7.) sous forme de tableau, et graphiques liant la force au déplacement pour chaque échantillon soumis à la fatigue.

Un extensomètre LVDT (Figure 24), a également été ajouté afin de mesurer le déplacement longitudinal au cours de l'essai de fatigue.

Figure 24: LVDT utilisé pour la mesure diagonale

6.2. Corrélation d'image digitale

La corrélation d'Image Numérique (DIC) est un outil de métrologie de déformation à champ complet. On peut se servir pour effectuer des mesures sans contact de déformations à l'échelle nanométrique, comme il peut être utilisé pour estimer les déformations in-situ sur site complet.

Cette méthode se différencie par les méthodes de contact traditionnelles telles que les jauges de déformation et les extensomètres par le fait, qu'elle peut mesurer l'entièreté du champ de contrainte et même de mesurer les contraintes à travers les grains constitutifs du matériau.

Procédure simple d'acquisition successive de photos d'un objet cible ou un échantillon, en utilisant des caméras de haute résolution. Les images sont par la suite traitées à l'aide d'un logiciel open-source spécialisé.

La méthode DIC compare l'intensité de la lumière sur la surface d'une image déformée à celle d'une image de référence pour déterminer les déplacements.

La DIC a été utilisé pour déterminer les taux de croissance de fissures et les champs de déplacement des fissures pendant les cycles de chargement de fatigue [69].

La surface de l'échantillon contient de nombreux pixel de même intensité lumineuse et des groupes carrés de pixels, ou sous-ensembles sont nécessaires pour créer des blocs uniques d'intensités lumineuses. La DIC utilise ensuite une estimation initiale et trouve les déplacements en suivant des sous-ensembles individuels et en déterminant la meilleure corrélation entre les différents sous-ensembles entre les deux images.

Le nouvel emplacement de chaque Pixel basé sur le centre du sous-ensemble est décrit en utilisant le développement de Taylor. Les termes d'ordre supérieur sont inclus dans le développement pour adapter à la forme changeante des sous-ensembles pendant la déformation. Les nouvelles positions (x, y) sont données par rapport à la position de référence (x_0, y_0).

$$\bar{x} = x_0 + u_0 + \frac{\partial u}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial u}{\partial y}\Delta y + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\Delta x^2 + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\Delta y^2 + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}\Delta x \Delta y$$

$$\bar{y} = y_0 + v_0 + \frac{\partial v}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial v}{\partial y}\Delta y + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\Delta x^2 + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\Delta y^2 + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}\Delta x \Delta y$$

Où (x, y) sont les coordonnées du pixel, et (u, v) sont respectivement les déplacements horizontaux et verticaux, et x et y représentent la distance du Pixel par rapport au centre du sous-ensemble où $\Delta x = x - x_0 \; et \; \Delta y = y - y_0$. Pour une description plus détaillée de la technique de corrélation d'image numérique, voir [70].

Un programme open-source de corrélation d'images (Ncorr), basé sur Matlab et produit par Dr. Justin Blaber de Georgia Institute of Technology a été utilisé pour effectuer une DIC sur les cycles de mesure. La première image de chaque cycle de mesure, capturée sur un lapse du temps fixe (chaque 1500 cycles), et dont la 1ère image a été utilisée comme image de référence pour l'essai.

Au cours de l'essai de fatigue, un appareil photo synchronisé à la presse hydraulique prend une image chaque 300 secondes (1500 cycles). L'acquisition des photos se fait automatiquement et sont sauvegardées au niveau de la mémoire interne de l'appareil photo.

Le champ d'image complet, à la fois derrière et devant le fond de l'échantillon, a été utilisé pendant les corrélations. La taille maximale du sous-ensemble utilisé était de 72 par 72 microns avec un maximum de 9 microns entre les centres des sous-ensembles. Les paramètres optiques de résolution pour chaque éprouvette sont dressés dans le tableau 10.

Conditions de chargement	ID	Angle d'orientation [°]	Plage de résistance $[MPa]$	Résolution $[mm/pix]$	Fréquence $f[Hz]$	Cycle par image
Compression	E2	0°	$40\% \times \sigma_c$	0.3763	5	1500
	E4		$55\% \times \sigma_c$	0.3245		
Compression-cisaillement	E1/E2/E3	15°	$60\% \times \sigma_c$	0.3359		
	E4/E5/E6		$70\% \times \sigma_c$	0.3234		
	E7/E8/E9		$80\% \times \sigma_c$	0.4024		

Tableau 10: Paramètres optiques de l'appareil photo appliqués sur les échantillons en grout

Avant de procéder à l'évaluation de déplacements et de déformations, les images ont été corrigé afin d'éliminer l'effet de la distorsion qui provient de la lentille de l'appareil photo.

Pour cela, on a utilisé une correction de distorsion à l'aide de logiciel commercial « DXO PhotoLab ». Ce dernier contient la majorité des lentilles d'appareils photos utilisées dans le monde, ce qui nous a permet de faire des corrections automatiques, reconnues, et standards.

L'appareil photo utilisé porte le nom : Pentax $\mathrm{K20\ D}$, d'un objectif de type Pentax Smc DA $18\text{-}55\ \mathrm{mm\ f/\ 3{,}5\text{-}5{,}6\ AL\ II}$ présenté dans la figure 25.

Figure 25: l'appareil photo utilisé dans les essais de fatigue

Une fois que les images sont corrigées, une autre correction a été appliqué, elle s'agit de rendre les images de l'échantillon cylindrique ($3\mathrm{D}$) en images ($2\mathrm{D}$) plate, en utilisant le Plugin « Deformation » avec le logiciel open-source « ImageJ » et en insérant la grille présentée dans la figure 27.

Le processus de préparation de la corrélation d'images digitales est présenté dans la figure 26.

Figure 26: Processus de préparation de correction de traitement d'image

L'analyse de la corrélation d'images digitales par le programme « Ncorr » dont le code source est données dans [70], nous a permis d'avoir les déplacements, et les déformations au niveau de la section latérale de l'échantillon. Ils sont dressés dans la section suivante 7.).

Un exemple détaillé de l'analyse et de traitement d'image par la méthode DIC (Digitale Image correlation) d'un essai de fatigue est présenté dans l'annexe_X7 à la fin de ce rapport.

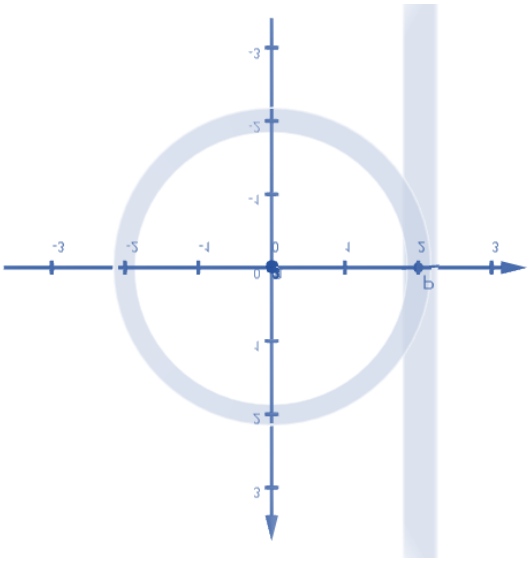


Figure 27: Plan d'application des mesures optiques

7. Résultats expérimentaux et discussion

7.1. Evaluation de la pertinence de la méthode de corrélation d'image pour la détermination des déformations au niveau des éprouvettes

Dans le but d'exploiter les avantages de la méthode de corrélation d'images pour la détermination des déplacements et de déformations des éprouvettes, un essai a été réalisé sur une éprouvette soumise à la fatigue. Le dispositif d'essai a été équipé d'un LVDT placé parallèlement à l'éprouvette et mesure les déplacements de celle-ci tandis qu'une caméra est placée en face de l'éprouvette prend une image chaque 1500 cycles (300 secondes) pendant l'essai de fatigue comme le montre la figure 28.

Figure 282: Dispositif de mesure Optique à l'aide d'une caméra liée à la presse hydraulique

En utilisant les programmes « Ncorr et Ncorr_post » détaillés dans l'annexe_X7, deux extensomètres virtuels ont été créé afin de mesurer les déplacements et les déformations au niveau de l'éprouvette, comme le montre la capture d'écran présentée dans la figure 30.

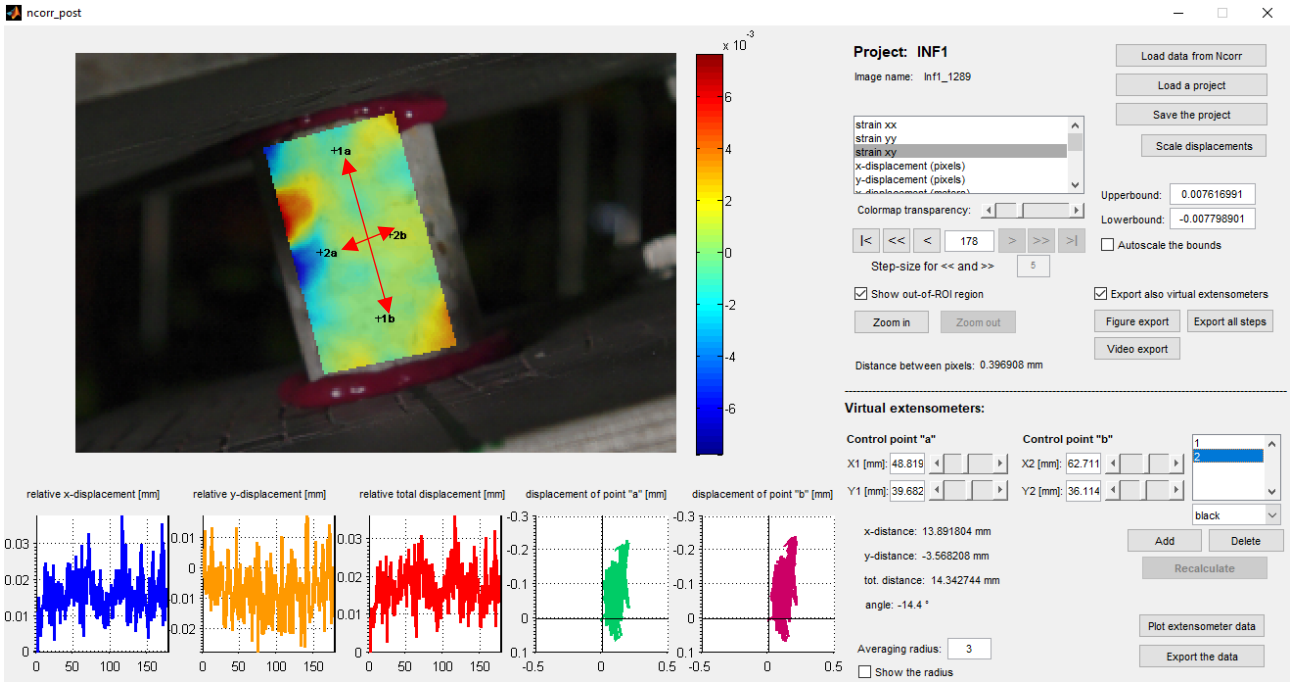
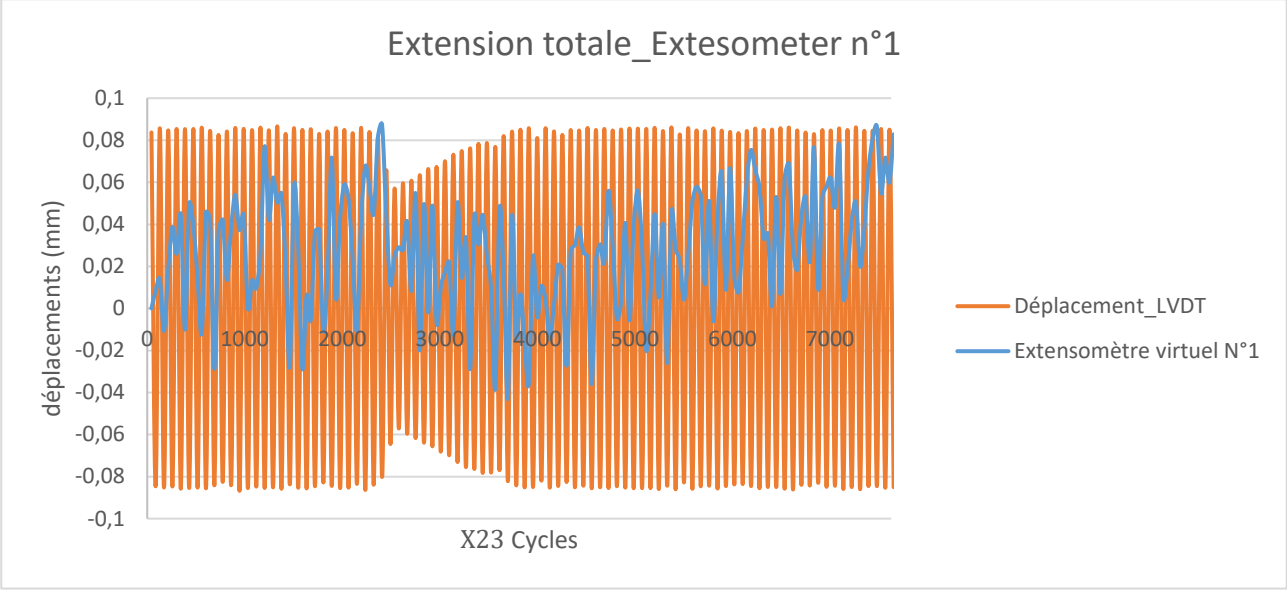


Figure 30: Une capture d'écran de Ncorr_post montrant la position des deux extensomètres virtuels

Ces résultats ont été par la suite comparé avec ceux mesurés avec le LVDT physique placé au niveau de l'éprouvette.

Les graphiques de la figure 30, présentent respectivement l'évolution des déplacements et de déformations au niveau de l'éprouvette, mesurés par le LVDT physique et l'extensomètre virtuel.



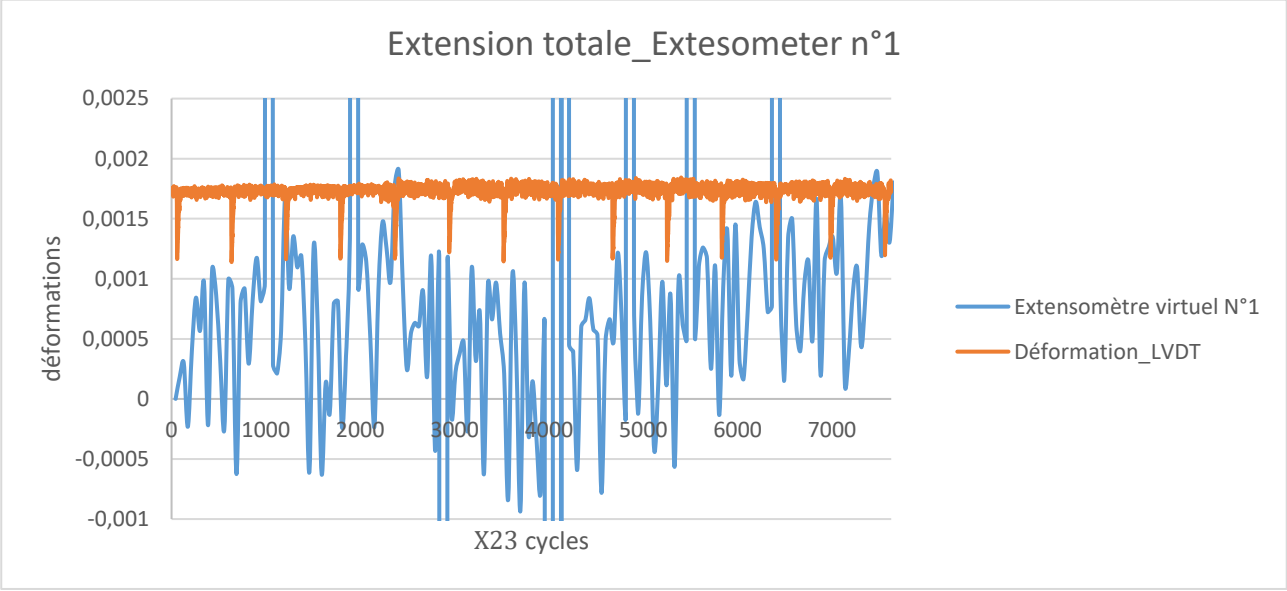


Figure 30: Graphiques présentant les déplacements et les déformations respectivement enregistrés à partir de LVDT et l'extensomètre virtuel

Les graphiques de la figure 31 permettent de comparer les données enregistrées par l'extensomètre physique placé sur l'éprouvette et l'extensomètre virtuel. On remarque que les résultats de LVDT sont plus uniformes et stable contrairement à ceux de l'extensomètre virtuel. Ces derniers varient très fortement d'un point à un autre tout en restant proches entre eux mais surtout égalent à ceux enregistré par LVDT physique.

Pour le graphique présentant les déplacements relatifs de l'éprouvette, on observe une concordance entre les données de LVDT et ceux de l'extensomètre virtuel au début de l'essai (entre 23 et 57500) et entre 138000 et 175651 cycles. Entre ces deux plages, les déplacements enregistrés au niveau de l'extensomètre virtuel ne s'accordent plus avec ceux de LVDT. Cela peut être expliqué par la diminution de la lumière sachant que cette plage correspond à la période de nuit ou l'apport de la lumière du jour n'est plus disponible.

La même constatation peut être faite pour les graphiques de déformations, vu que ces derniers sont calculés à partir des déplacements et que la variation de la lumière (entre le jour et la nuit) affecte le niveau du gris sur les photos prises pendant l'essai.

Des valeurs maximales de déplacement égalent à $0.08\,mm$ ont été enregistré par le LVDT et l'extensomètre virtuel juste avant la rupture de l'éprouvette sous une force de $40\,KN$.

Afin d'avoir une bonne estimation des déplacements et de déformations il faut diminuer la durée de prise de photo. Néanmoins, une grande quantité de photo rend le traitement long et fastidieux.

L'utilisation de cette méthode est pertinente et elle permet d'avoir les déplacements et les déformations en tout point de l'éprouvette contrairement à LVDT ou les déplacements ne sont connu qu'au niveau de l'axe où a été placé.

L'inconvénient de la méthode DIC est la durée de traitement des images qui dépend essentiellement de nombre et résolutions des photos ainsi que la variation de la lumière évoquée ci-dessus.

La combinaison des deux méthodes permet de s'assurer de la qualité des données trouvées par la DIC dans le but de les utiliser dans les calculs par la suite, mais aussi sur l'infinité de nombre d'extensomètres virtuels qui pourraient être placé au niveau de l'éprouvette en post-traitement des images.

7.2. Influence de la surface de contact (grout- plaque métallique) sur le comportement des éprouvettes à la fatigue

Trois essais ont été réalisé sur des éprouvettes de dimensions $35 \times 50\,mm$. La première éprouvette a été collé entre deux plaques métalliques, contrairement à la deuxième éprouvette, où n'a été collé que sur la plaque métallique inférieure. Quant à la troisième éprouvette, la surface métallique supérieure a été posé sur la surface de l'éprouvette par l'intermédiaire d'une feuille en polymère glissante (Téflon).

Les résultats de l'essai de fatigue sont dressés dans le tableau 11.

Essai	Type de disposition	Fréquence $[Hz]$	Angle d'orientation [°]	Force alternée appliquée $[KN]$	Contrainte normale $[MPa]$	Contrainte tangentielle $[MPa]$	Nombre de cycle
Essai 01	Feuille Téflon	5	15°	5 - 30	5.02-30.12	1.35-8.07	14
Essai 02	Non collée			5 - 30	5.02-30.12	1.35-8.07	79
Essai 03	Collée			5 - 30	5.02-30.12	1.35-8.07	>500000
Essai 04	Collée			5 - 40	5.02-40.16	1.35-10.76	141

Tableau 11: Nombre de cycle menant à la rupture pour plusieurs types d'interaction entre plaque métallique et la section des éprouvettes

On a constaté que toutes les éprouvettes ont manifesté un mode de rupture semblable, qui se génère sur un plan de 15° par rapport à la verticale passant par le centre de gravité de l'éprouvette.

La rupture dans les trois échantillons a touché la matrice ainsi que les granulats qui se trouvent sur le plan de rupture.

Le nombre de cycle est faible pour la première éprouvette peut s'expliquer par le fait que la sollicitation se concentre au niveau de la demi-arrête circulaire de l'éprouvette provoquant un dépassement de la contrainte admissible locale menant l'éprouvette à la rupture.

La figure 31 présente des photos prises successivement et qui montre l'initiation et l'amorçage des fissures pour l'essai 03.

Figure 31: Images successives de l'amorçage des fissures pendant un essai de fatigue

Pour le deuxième échantillon, le nombre de cycles est sensiblement amélioré par rapport au premier échantillon. Cela peut être dû à la diminution de la concentration des contraintes sur la demi-arrête circulaire de l'éprouvette.

Quant au troisième échantillon, les contraintes sont uniformément distribuées sur la section supérieure diminuant ainsi l'effort concentré sur la demi-arrête circulaire de l'éprouvette ce qui a permis d'avoir un nombre de cycle important supérieur à 500000 cycles.

L'augmentation de l'effort verticale de 10 KN a causé la rupture de l'échantillon au bout de 141 cycles seulement. La figure 32 montre l'éprouvette avant et après la rupture.

Figure 32: Eprouvettes avant/ après l'essai de fatigue sous une force de 40 KN

7.3. Evaluation de la résistance à la rupture du grout lors de l'essai

7.3.1. Réponse en compression pure

Les éprouvettes du gout ont d'abord été mis en essai de compression uni-axial comme le montre la figure 34. Une courbe typique de la contrainte en fonction des déformations est présentée à la figure 34.

La courbe $\sigma - \varepsilon$ présente une région élastique linéaire et un point de crête.

Figure 33: Eprouvette avant/ après l'essai de compression uni axial

Le pic initial de la courbe contraintes-déformations indique le début de la rupture des éprouvettes (ou le début de l'état plastique).

La résistance à la rupture est fonction de la courbe de déplacement de la charge et la section correspondante dans cette étude.

Il convient de noter que le travail actuel se concentre sur le comportement des éprouvettes du grout soumises à des efforts cycliques de compression et d'effort tranchant.

Les pics et la résistance à la compression des éprouvettes sont données dans le tableau 12.

La résistance moyenne de compression des éprouvettes est de : $74.40\ \mathrm{MPa}$.

Les résultats numériques et graphiques des essais de compression sont détaillés dans l'annexe_X4 et l'annexe_X2.

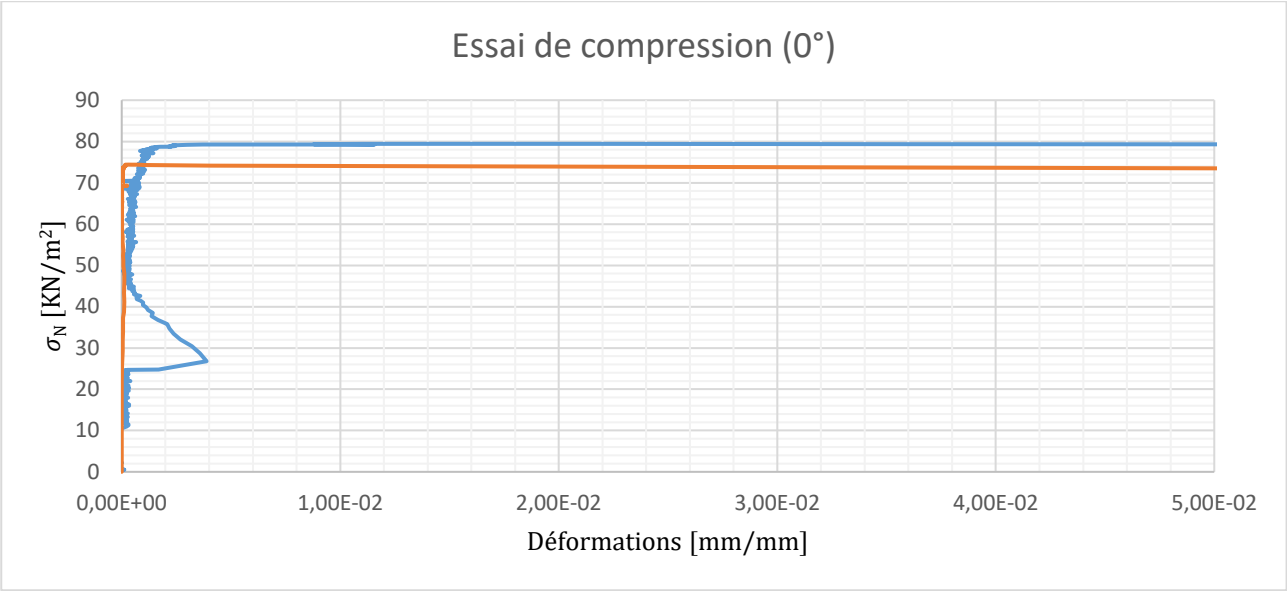


Figure 34: Courbes contraintes- déformations de deux éprouvettes soumises à la compression simple

Type	ID	Section de contact $[mm^2]$	Pic de chargement $[KN]$	Résistance à la compression $[MPa]$	COV (%)
Collé	PC1	0,00096211	71.58	74.40	8,22
	PC2	0,00096211	76,42	79,43	

Tableau 12: Résistance à la compression des échantillons en compression uni axial

La limite d'élasticité est déterminée par la charge de pointe moyenne divisée par la section de l'éprouvette comme indiqué dans le tableau 12. La différence de contrainte entre l'ensemble des éprouvettes soumises à un effort vertical est de $5{,}03$ MPa. Cette différence de résistance entre les éprouvettes est causée par le caractère stochastique du grout. Il convient de noter que les propriétés mécaniques du grout ont habituellement des variations de $+/-5\%$ de la valeur moyenne.

Les valeurs limites d'élasticité du grout se situent dans la plage de résistance à la compression de $10{,}28$ MPa, obtenue à partir des essais réalisés dans la section précédente. Par conséquent, les résultats de l'essai suivant un angle définit par rapport à l'horizontal sont loin d'être compatibles avec ceux obtenus à partir des essais de compression pure et l'influence de la différence entre les deux types d'éprouvette sur les résultats expérimentaux est significative.

7.3.2. Réponse en compression-cisaillement

Deux éprouvettes soumises à l'essai de compression à la rupture sont présentées dans la figure avant et après l'essai.

Figure 35: Eprouvette avant et après l'essai de fatigue à 15°

La contrainte normale en fonction de déformations des éprouvettes soumises à la sollicitation combinée de l'effort de compression et d'effort tranchant pour un angle d'orientation de 15° est présenté dans les courbes de la figure 36.

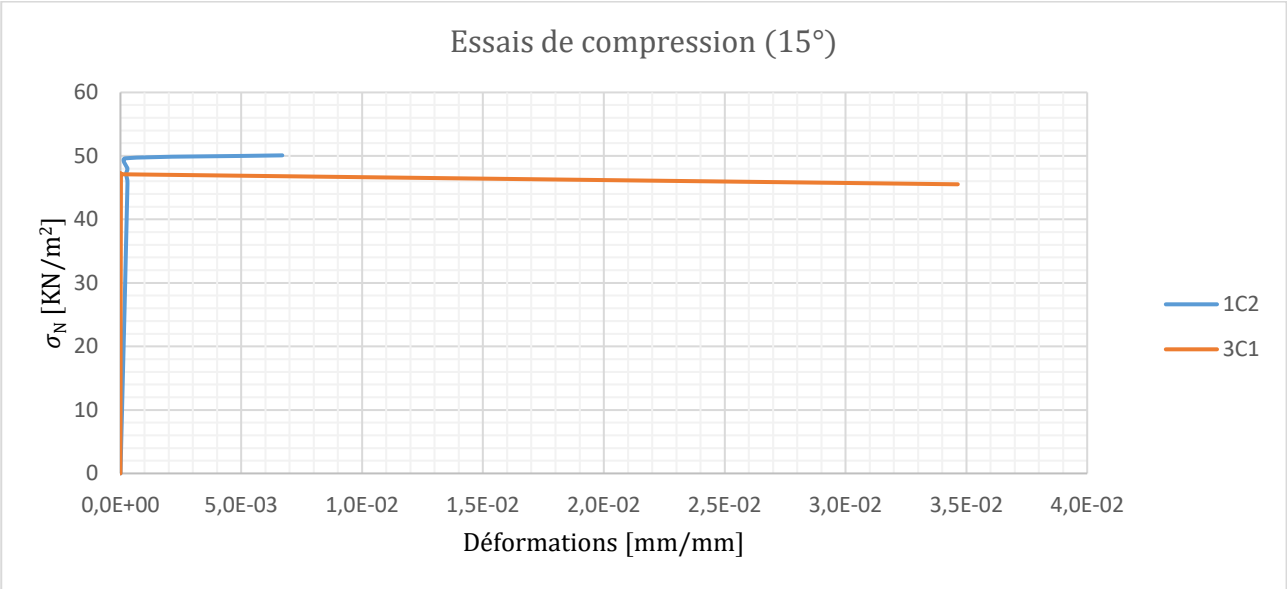


Figure 36: Courbe contraintes-déformations à 15° de deux éprouvettes

Dans la région élastique, la courbe $\sigma_N - \varepsilon$ est initialement linéaire, mais devient non linéaire pour les parties suivantes en raison des déformations non réversibles et qui se présentent comme des fissures au niveau des échantillons. Lorsque la contrainte normale atteint le pic, la déformation plastique initiale apparait dans la surface de l'échantillon comme le montre les fissures sur la surface des échantillons.

Type	Angle	ID	Section de contact $[mm^2]$	Pic de chargement F [KN]	$\sigma_{N\,max}$ $[MPa]$	$\sigma_{T\,min}$ $[MPa]$	COV (%)
Collé	15°	1C2	962.112	49.89	50.09	13.42	4.41
		3C1	962.112	46.97	47.16	12.63	

Tableau 13: Pic de contraintes normale et tangentielle des deux éprouvettes soumises à l'essai de compression

Après le pic, l'effort augmente lentement et subsiste à une valeur presque constante à mesure que le déplacement augmente pour l'éprouvette 1C2, contrairement à l'éprouvette 3C1 ou la contrainte normale diminue légèrement et les déformations continuent à augmenter. Au-delà de ce point, une diminution brutale qui se réalise pour les deux éprouvettes.

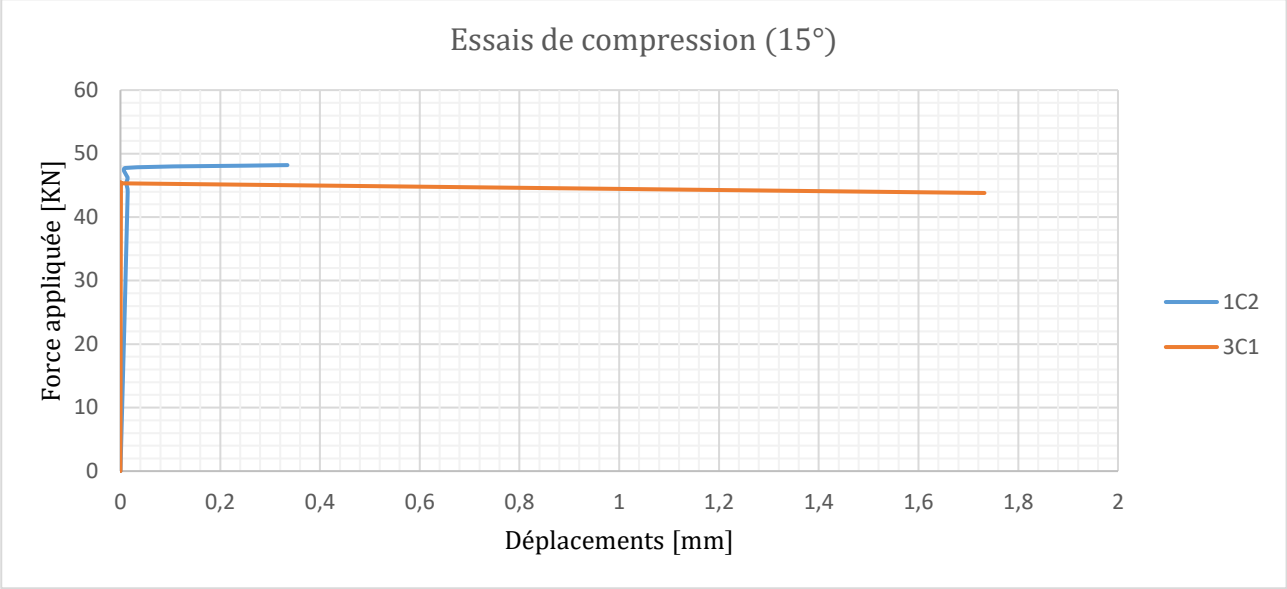


Figure 37: Courbes Force- Déplacement de deux éprouvettes soumises à l'essai de fatigue à 15°

Sous une combinaison de cisaillement et de compression, un pic a été observé dans la courbe Force- déplacement. Ceci est illustré à la figure 37 pour les 2 échantillons soumis à un effort combiné de compression et de cisaillement suivant l'angle de sollicitation de 15°. Initialement, l'effort varie linéairement suivant le déplacement. Au-delà de la partie linéaire, la pente de la courbe diminue en raison de la perte de résistance causée par la déformation élastique des échantillons. Ce comportement se poursuit jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte, puis diminue. On note que le comportement élastique contrôle la résistance de l'échantillon. Par conséquent, il est raisonnable de définir le point maximal qui définit la force verticale par rapport à la courbe de déplacement au début du comportement plastique des échantillons. La force de sollicitation maximale pourrait représenter plusieurs valeurs en fonction de l'angle de chargement. Pour les sollicitations combinées dominantes de compression, la force maximale peut indiquer l'apparition de la déformation plastique (flambement plastique) initial. La raison de ce motif de déformation est que le chargement par cisaillement induit une translation globale de l'échantillons déformés par rapport à la partie non déformée. Pour les charges combinées dominante de cisaillement, la charge maximale pourrait représenter l'apparition d'une fissure d'extension fragile. Une comparaison des échantillons écrasés à partir des essais combinés de cisaillement-compression est illustrée à la figure 35. Les contraintes normales et de cisaillement des 2 échantillons aux points de rupture des différentes conditions de chargement sont présentés dans le tableau 13. Les points de résistance ultime calculés à chaque angle de chargement sont tracés dans l'espace de contrainte normal et de cisaillement, comme le montre la figure 38. On peut constater que dans les mêmes conditions de chargement, les contraintes normales diminuent à mesure que l'angle d'inclinaison dans le plan augmente. Ces résultats sont bien conformes aux résultats obtenus à partir des essais de compression purs. Les capacités de sollicitation des échantillons sous chargement combiné sont limitées par la résistance au cisaillement pur. Pour un angle de chargement inférieur, les contraintes normales des échantillons aux points de rupture sont proches de la contrainte de compression dus à l'état de chargement dominé par la compression.

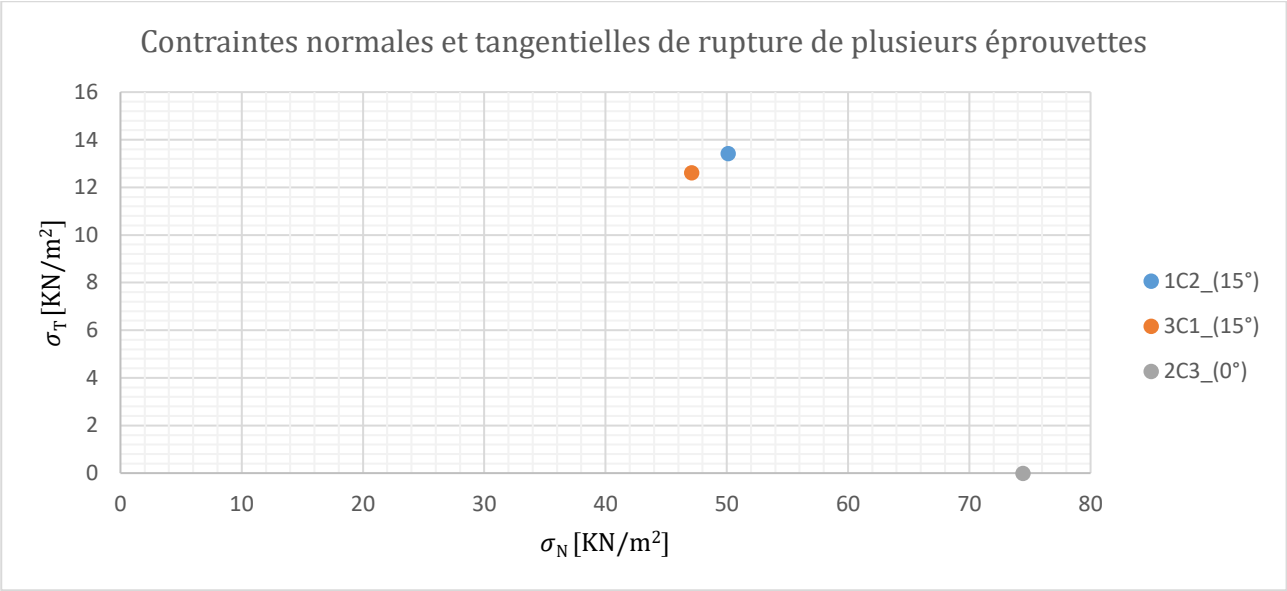


Figure 38: Contraintes normales et de cisaillement de rupture appliquée pour plusieurs éprouvettes sous différentes conditions d'angles

Les résultats numériques et graphiques des essais de compression sont détaillés dans l'annexe_X4 et l'annexe_X2.

7.3.3. Evaluation de la résistance des échantillons de grout à la traction pour 15°

Deux éprouvettes soumises à l'essai de traction à la rupture ont manifesté un comportement linéaire au début de l'essai jusqu'à une contrainte maximale de 2.39 MPa pour l'éprouvette 1INF2 et 2.43 MPa pour l'éprouvette 3INF1. Au-delà des pics enregistrés, les contraintes normales des deux éprouvettes diminuent légèrement et continuellement à mesure que les déformations deviennent plus en plus grande. Comme le montre la courbe contraintes-déformations de la figure 39.

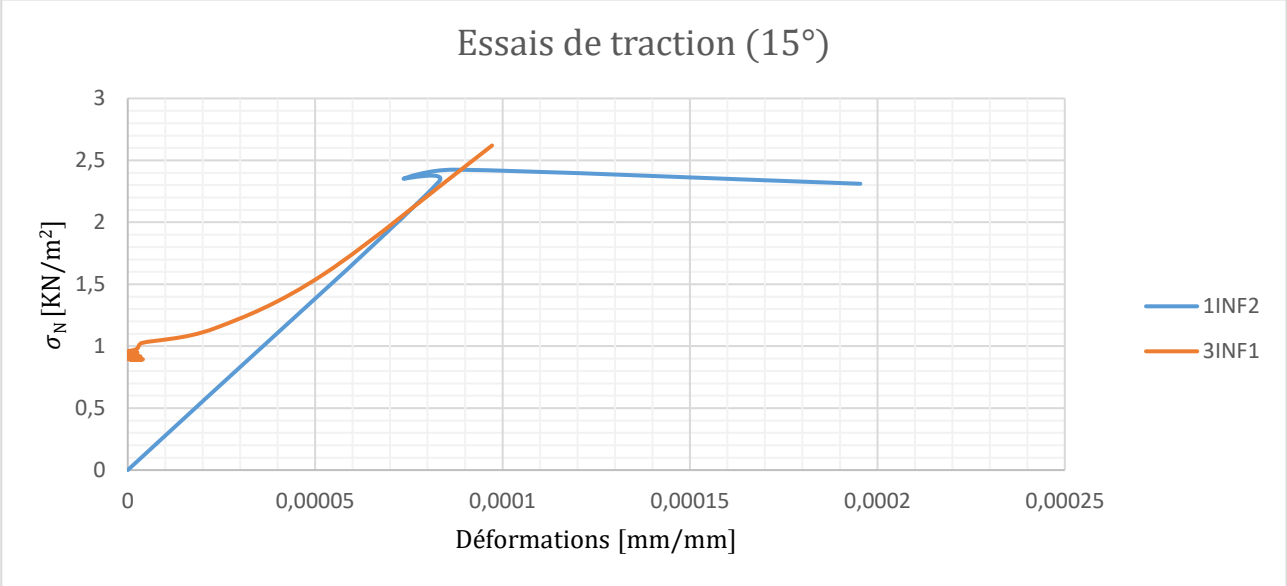


Figure 39: Courbe Contrainte normale déformations de deux éprouvettes soumises à l'essai de fatigue à 15°

Les résultats numériques et graphiques des essais de traction sont détaillés dans l'annexe_X4 et l'annexe_X2.

7.4. Evaluation de la résistance des échantillons de grout à la fatigue

Plusieurs essais ont été réalisé afin de valider la fiabilité et l'intérêt de notre système de combinaison des efforts de compression et d'effort tranchant à montrer et expliquer les effets de fatigue des éprouvettes du grout.

Les éprouvettes de dimensions $35 \times 50\ mm$ ont été soumises à des forces de compression répétées qui correspondent à des contraintes répétées parallèles à l'axe de l'éprouvette combinées à des contraintes de cisaillement comme le présente les trois premières colonnes du tableau 14.

Résultats expérimentaux pour les échantillons soumis à la fatigue												
E	Echantillons soumis au chargement cyclique 15°							Echantillons soumis au chargement cyclique 0° dans la plage				
	F $[KN]$	σ_{min} $-\ \sigma_{max}$ $[N/mm^2]$	τ_{min} $-\ \tau_{max}$ $[N/mm^2]$	ΔL_{max} $[mm]$	ε_N $[mm/mm]$ $\times E-03$	ε_T $[mm/mm]$ $\times E-04$	Cycles	F $[KN]$	σ_{max} $-\ \sigma_{min}$ $[N/mm^2]$	ΔL_{max} $[mm]$	ε_{max} $[mm/mm]$	Cycles $\times E+06$
1	5-30	5.02-30.11	1.35-8.07	0.082	1.6	6.7	>500000	5-30	5.20-31.18			
2	5-40	5.02-40.16	1.35-10.76	/ (*)	/ (*)	/ (*)	141	5-40	5.20-41.58			2.00
3	5-30	5.02-30.11	1.35-8.07	0.085	1.7	4.6	>250000	5-30	5.20-31.18			
4	5-32	5.02-32.63	1.35-8.74	0.154	3.1	7.6	>250000	5-32	5.20-33.78			2.00
5	5-35	5.02-35.14	1.35-9.42	0.178	3.6	9.2	248036	5-35	5.20-36.38			
6	5-32	5.02-32.62	1.35-8.74	0.152	2.9	8.0	6149	5-32	5.20-33.78			
7	5-32	5.02-32.62	1.35-8.74	0.098	2.0	5.3	1811	5-32	5.20-33.78			
8	5-30	5.02-30.12	1.35-8.07	0.0000016	0.0012	0.0031	>1300	5-30	5.02-31.18			
9	5-30	5.02-30.12	1.35-8.07	0.277	5.5	0.14	1533942	5-30	5.02-31.18			

Tableau 14: Résultats expérimentaux pour les échantillons soumis à la fatigue pour plusieurs plages de contrainte

(*) la notation « / » signifie qu'aucun enregistrement n'a été fait par le LVDT car la fréquence d'enregistrement est supérieure à celle de la rupture.

Les conditions expérimentales suivantes ont été appliquées :

- Mode de sollicitation : Contraintes contrôlées (colonne 2 et 3 du tableau 14).
- Fréquence de sollicitation : $f = 5Hz$.
- Condition d'arrêt de l'échantillon : rupture de l'éprouvette (déplacement verticale de 0,5 mm).

7.4.1. Traitement des données et interprétation des résultats

7.4.1.1. Traitement des signaux

Les points expérimentaux des signaux enregistrés dans la figure 41 et 42 ne se confondent pas avec la courbe sinusoïdale théorique en raison de la faible non-linéarité du comportement du grout et les imperfections expérimentales.

Le signal de contrainte est obtenu à partir de la colonne de la force dans le fichier d'acquisition en divisant ces valeurs par la section initiale de l'éprouvette.

Le signal de déformation est obtenu à partir des données fournies par l'extensomètre placé parallèlement à l'axe de l'éprouvette en les divisant par sa longueur initiale.

Six colonnes dressées dans le fichier d'acquisition présentent chacune :

$|Temps\ (s)|\ Force\ F|Contrainte\ normale\ \sigma_N|Contrainte\ tangentielle\ \sigma_T|Déformation\ normale\ \varepsilon_N|$

$|Déformation\ tangentielle\ \varepsilon_T|Déplacement\ relatif\ normale\ \Delta_V|\ Déplacement\ relatif\ tangentiel\ \Delta_H|$

Des exemples de signaux de contraintes et courbes de déformations sont présentés dans les figures 40 et 41.

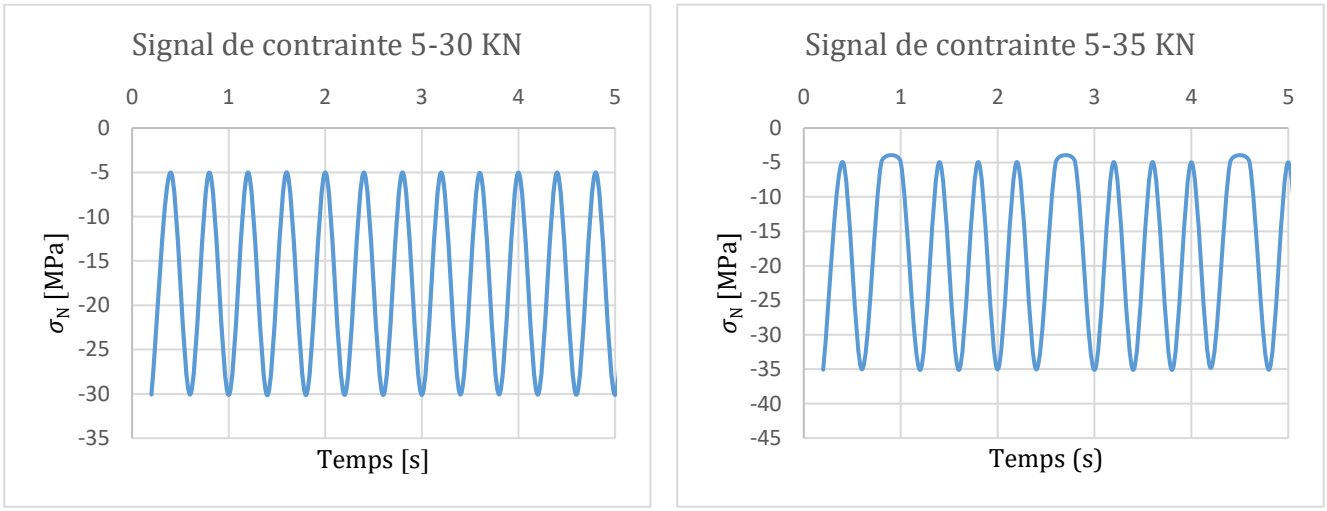


Figure 40: Signal de contrainte normale appliqué

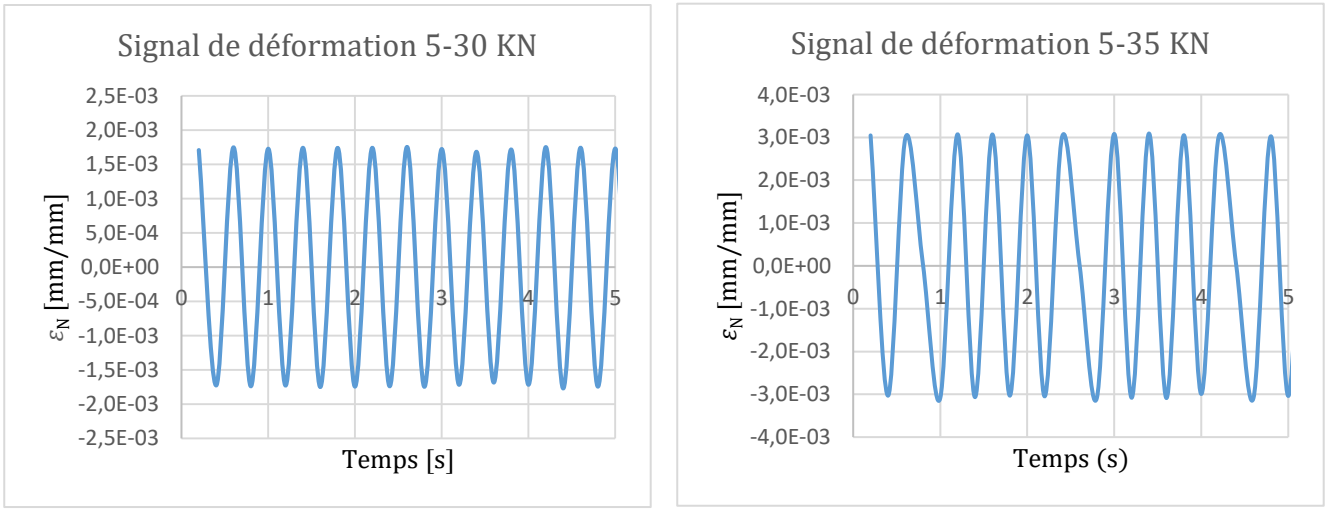


Figure 41: Signal de déformation obtenu

On observe que le signal de contrainte pour 5-35 KN n'est pas parfaitement sinusoïdale, la presse hydraulique a mal a augmenté la force de compression à 5 KN pour atteindre 35 KN.

Ces imperfections jouent un rôle négatif vis-à-vis de la durée de vie de l'éprouvette.

7.4.1.2. Calcul des caractéristiques mécaniques

Afin de représenter graphiquement les résultats de l'essai de fatigue, les valeurs suivantes sont déterminées :

- L'amplitude et la valeur moyenne de la déformation : ε_{aN}, ε_{aT} et ε_{mN}, ε_{mT} pour le signal de déformation.

- L'amplitude et la valeur moyenne de la contrainte : σ_{aN}, σ_{aT}, σ_{mN}, σ_{mT} pour le signal de contrainte.

Le fichier Excel joint à ce rapport contient les résultats traités des essais permettant la caractérisation du phénomène de fatigue en fonction du temps.

Chaque ligne représente le numéro de cycle N, les amplitudes des signaux des déformations ε_N et ε_T, Les amplitudes des signaux de contrainte σ_N et σ_T, les valeurs moyennes des déformations ε_{mN} et ε_{mT}

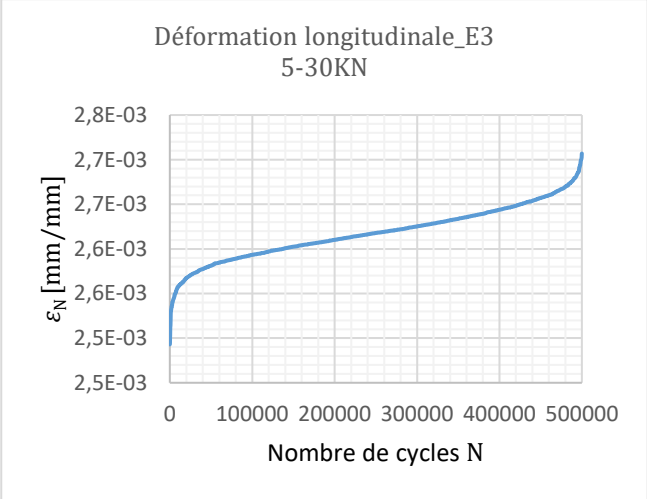
7.4.1.3. Représentation graphique des résultats

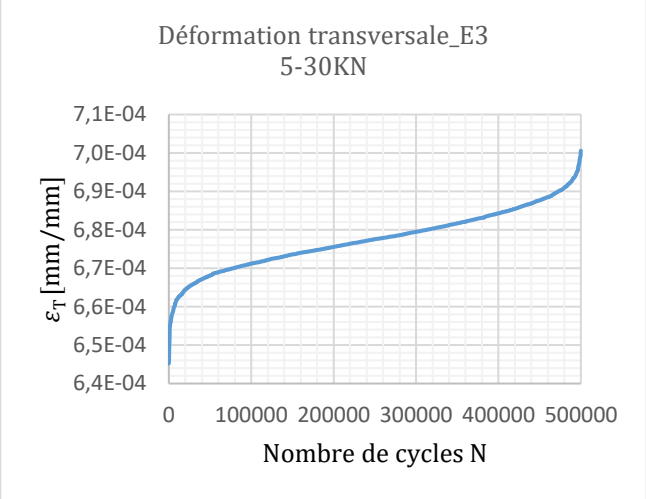
Le but de représenter graphiquement les résultats est de vérifier la validité des essais, l'observation de l'évolution des caractéristiques mécaniques en fonction du temps, et l'étude de l'évolution des fissures au niveau de l'éprouvette.

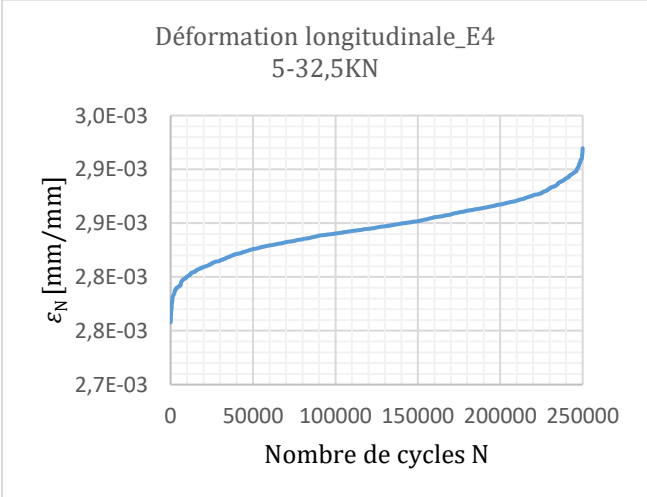
$f(N) = \varepsilon_N$ et $f(N) = \varepsilon_T$: la courbe de l'évolution de la déformation longitudinale et transversale respectivement en fonction du nombre de cycles.

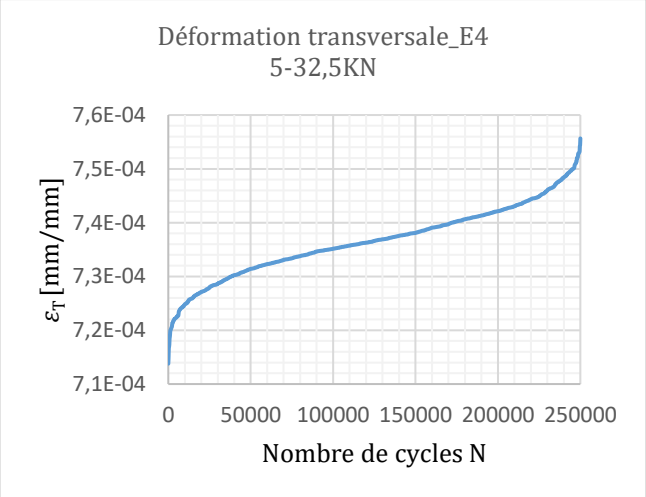
Evolution de la déformation au niveau des éprouvettes :

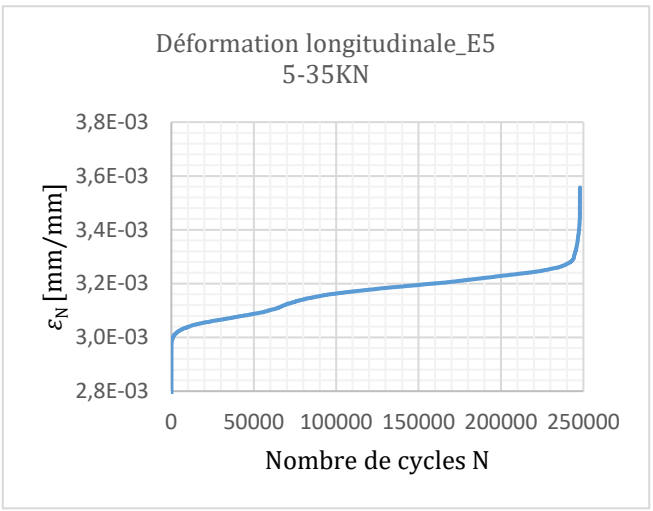
Les courbes d'évolution de la déformation ε_N, ε_T en fonction du nombre de cycles sont présentées dans la figure 42 pour les 8 éprouvettes soumises à l'essai de fatigue.

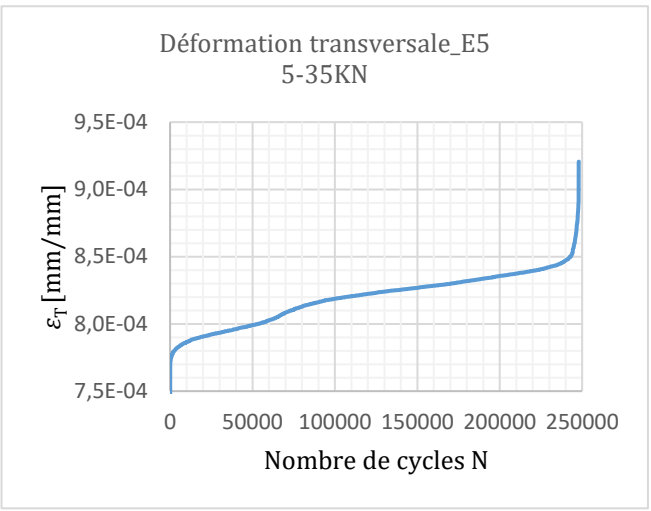


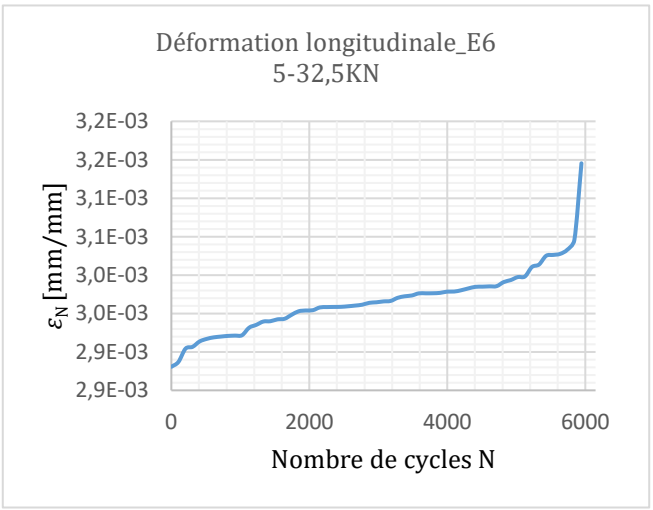


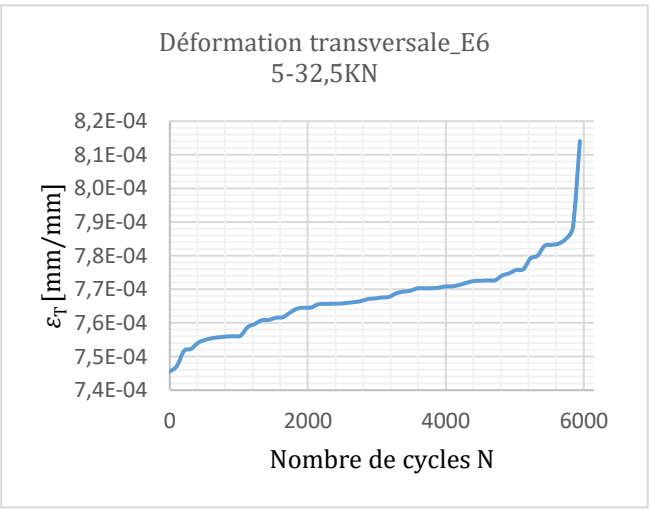


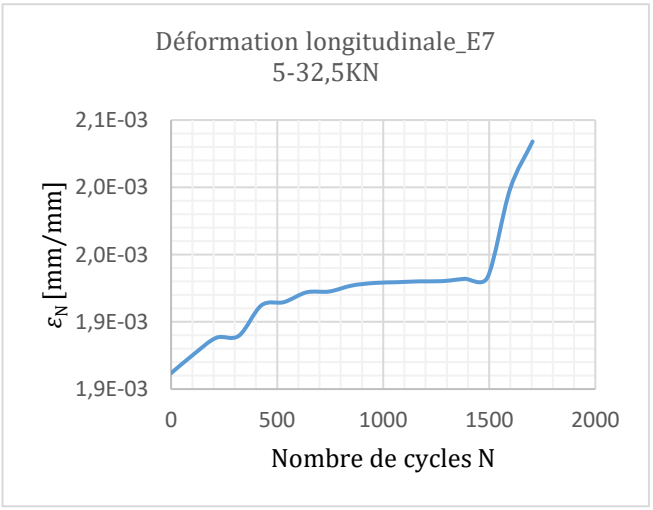


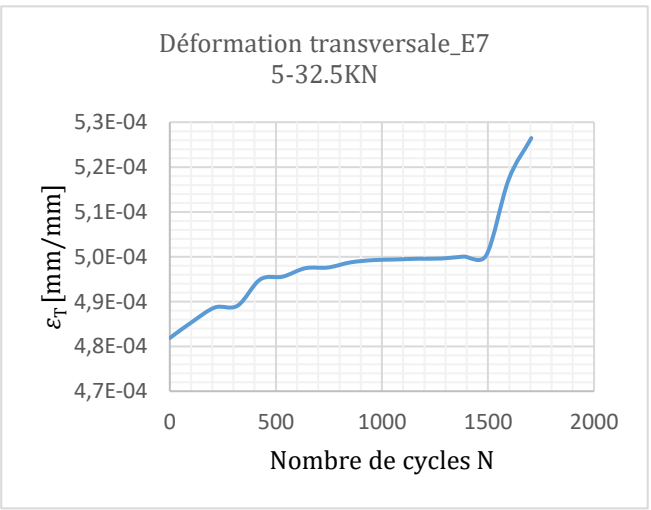

Déformation longitudinale_E5
5-35KN
3,8E-03
3,6E-03
3,4E-03
3,2E-03
3,0E-03
2,8E-03
ε_N [mm/mm]
0
50000
100000
150000
200000
250000
Nombre de cycles N


Déformation transversale_E5
5-35KN
9,5E-04
9,0E-04
8,5E-04
8,0E-04
7,5E-04
ε_T [mm/mm]
0
50000
100000
150000
200000
250000
Nombre de cycles N


Déformation longitudinale_E6
5-32,5KN
3,2E-03
3,2E-03
3,1E-03
3,1E-03
3,0E-03
3,0E-03
2,9E-03
2,9E-03
ε_N [mm/mm]
0
2000
4000
6000
Nombre de cycles N


Déformation transversale_E6
5-32,5KN
8,2E-04
8,1E-04
8,0E-04
7,9E-04
7,8E-04
7,7E-04
7,6E-04
7,5E-04
7,4E-04
ε_T [mm/mm]
0
2000
4000
6000
Nombre de cycles N


Déformation longitudinale_E7
5-32,5KN
2,1E-03
2,0E-03
2,0E-03
1,9E-03
1,9E-03
ε_N [mm/mm]
0
500
1000
1500
2000
Nombre de cycles N


Déformation transversale_E7
5-32.5KN
5,3E-04
5,2E-04
5,1E-04
5,0E-04
4,9E-04
4,8E-04
4,7E-04
ε_T [mm/mm]
0
500
1000
1500
2000
Nombre de cycles N

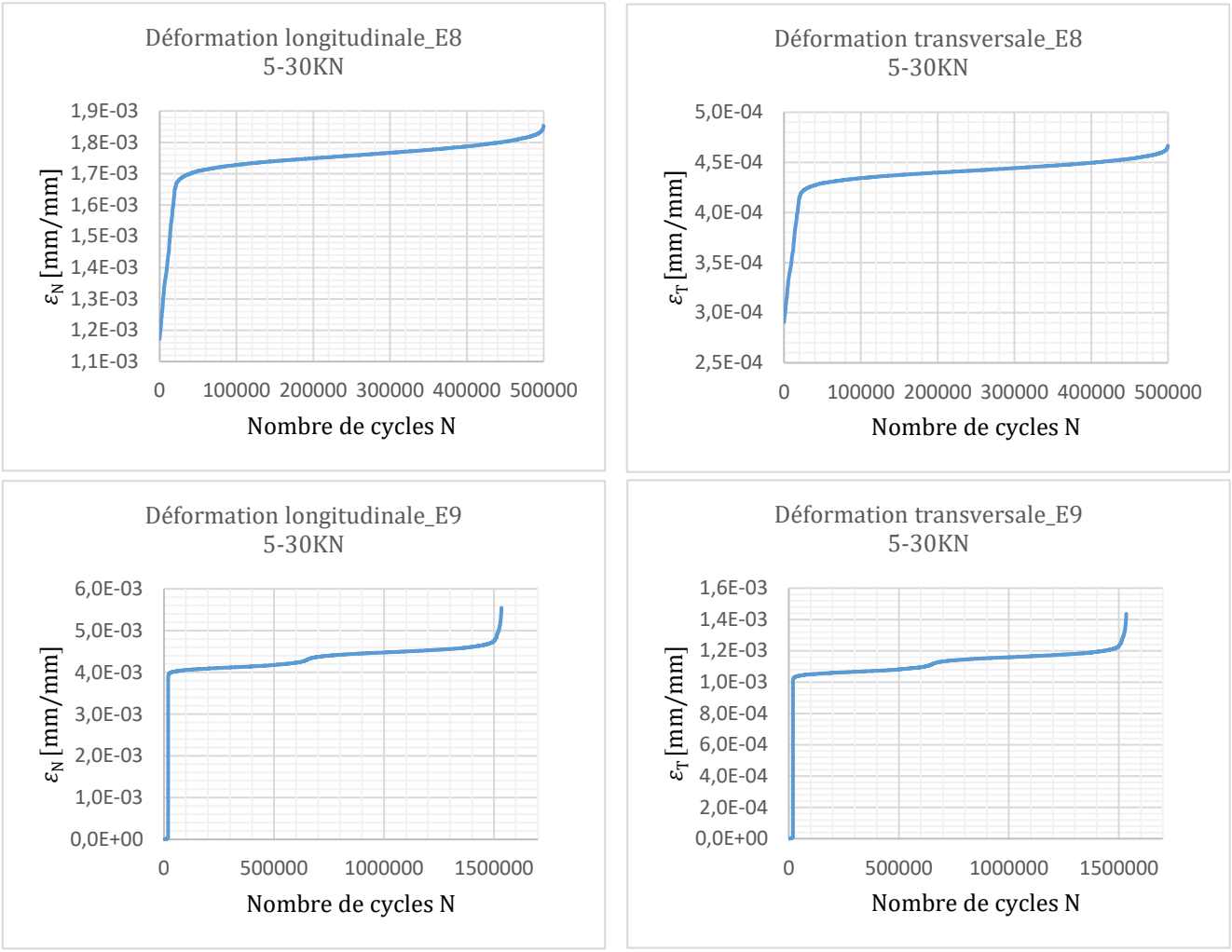


Figure 42: Déformations normales et transversales en fonction de nombre de cycles pour un groupe d'éprouvettes

La figure 42 présente l'évolution de la déformation longitudinale et transversale au niveau de la section initiale de l'échantillon par rapport au nombre de cycles pour différentes éprouvettes.

Les déformations longitudinales et transversales augmentent tout au long de l'essai. Au début de l'essai, les déformations augmentent très rapidement en raison de la chute de la rigidité des éprouvettes. Par la suite, les déformations continuent à augmenter modérément. A la fin, juste avant la rupture des éprouvettes, les déformations augmentent considérablement, cette augmentation peut être expliquée par l'apparition de microfissurations.

L'intense fluctuation de la déformation longitudinale et transversale des éprouvettes E6 et E7 est dû à l'apparition de microfissurations locales.

La différence entre les déformations enregistrées pour chaque essai est due à la non-homogénéité des échantillons et à l'excentricité de la force appliquée.

La non-homogénéité est une caractéristique propre des matériaux cimentaires de type granulaire. Afin de diminuer l'effet de cette caractéristique, une bonne préparation de mélange ainsi que le respect des consignes du producteur est indispensable. Il est important

également d'étudier des éprouvettes issues du même mélange et de faire des carottages bien alignés.

L'excentricité de la force a un effet négatif sur la durée de vie des échantillons. Pour cela, il est important d'effectuer le carottage, le sciage et le surfaçage soigneusement afin d'obtenir des éprouvettes cylindriques avec des plans parallèles.

La figure 43 présente les déformations longitudinales et transversales maximales enregistrées au niveau de la section initiale des éprouvettes. Les éprouvettes rompues sont mentionnées dans la légende du graphe par la lettre « R » suivi par le nombre de cycles enregistrés.

Les déformations longitudinales augmentent linéairement avec les déformations transversales pendant l'essai de fatigue. Le rapport entre ces deux déformations reste conservé pour toutes les éprouvettes et égal à 25%.

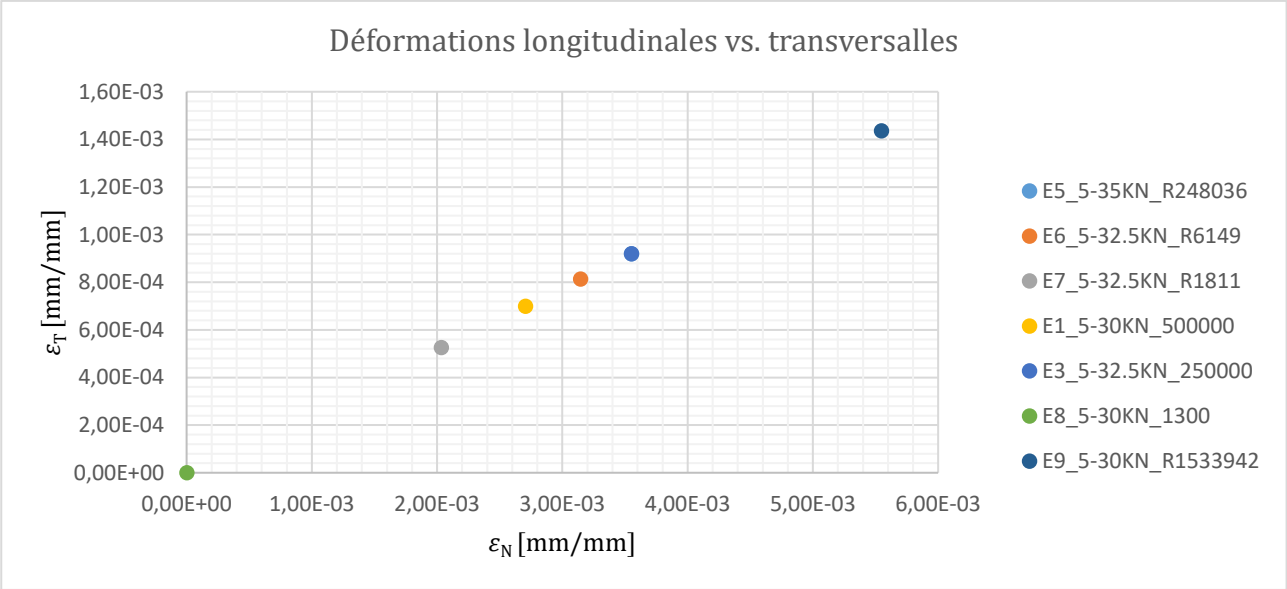


Figure 43: Graphe présentant les déformations longitudinales et transversales maximales pour plusieurs éprouvettes

On peut constater que dans des conditions de même force de chargement, les déformations longitudinales et transversales diminuent à mesure que l'angle d'inclinaison dans le plan augmente. Ces résultats sont bien conformes aux résultats obtenus à partir des essais de cisaillement purs trouvés dans la littérature. Les capacités de sollicitation des échantillons sous chargement combiné sont limitées par la résistance au cisaillement pur. Pour un angle de chargement inférieur, les contraintes normales des échantillons aux points de rupture sont proches de la force de compression dus à l'état de chargement dominé par la compression.

On peut constater également que la durée de vie des éprouvettes ne dépend pas du taux de la déformation normale ou tangentielle de celles-ci. Des éprouvettes se rompent à des taux de déformations (donc de contraintes) inférieurs à celles enregistrées pendant l'essai de compression combinée à la rupture, qui est de 3×10^{-3}

La réalisation des essais de fatigue pour plusieurs angles permet d'enrichir le graphique de la figure 43 dans le but de trouver l'angle limite pour laquelle l'état de chargement change de l'état de chargement dominé par la compression à celui de cisaillement.

L'essai de fatigue à l'état de compression pur permet d'avoir une durée de vie plus élevée que celle enregistré à l'état combiné comme le montre le tableau 14. Cela permet de déduire que le cisaillement influence négativement la durée de vie des éprouvettes.

7.4.2. Relation entre le nombre de cycles et les contraintes principales

Le graphe de la figure 44 montre le nombre de cycles N de chaque éprouvette soumise à l'effort combiné de compression et d'effort tranchant sous un angle d'inclinaison de 0° et 15°.

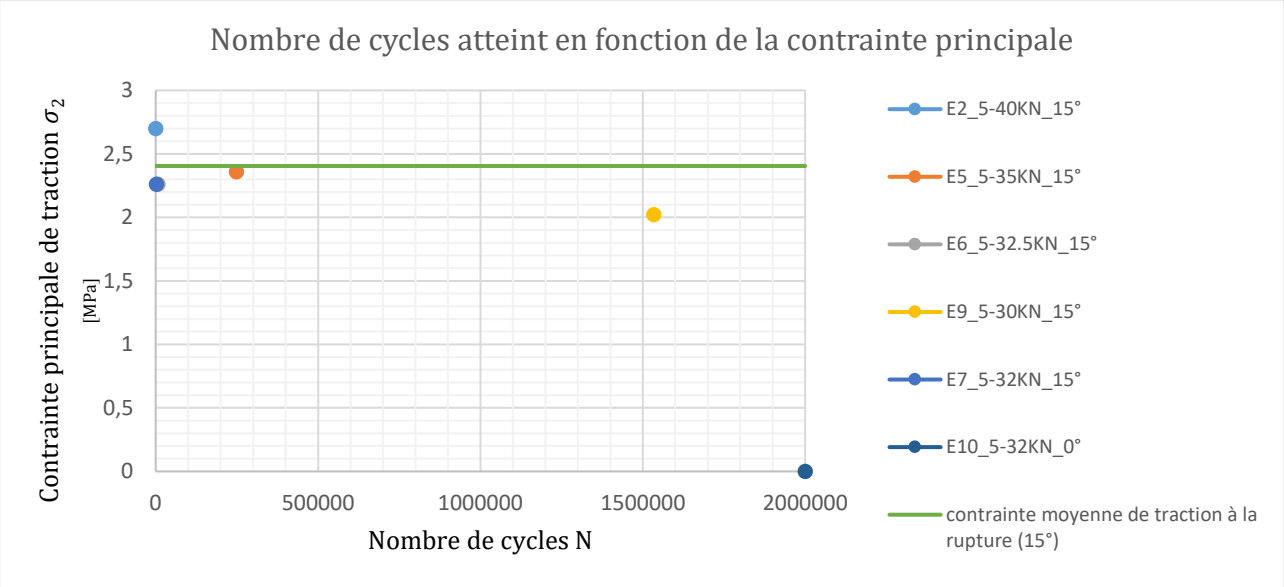


Figure 44: Nombre de cycles atteints en fonction des contraintes principales de traction et leurs relations par rapport à la contrainte de traction à la rupture

On constate que le nombre de cycles diminue considérablement quand les contraintes principales de traction sont proches de la contrainte de traction à la rupture présentée dans la figure 39.

En effet, les éprouvettes soumises à des contraintes répétées qui génèrent des contraintes principales proche à la valeur de la contrainte de traction à la rupture réalise un nombre de cycles inférieur et vis-versa comme le montre le graphique de la figure 44.

Prenant l'exemple de l'éprouvette « E2 » soumise à une contrainte répétée de $5 - 40\ KN/m2$ a réalisé 141 cycles seulement et a développé une contrainte principale de traction égal à 2.40 MPa. Quant à l'éprouvette « E9 » soumise à une contrainte répétée de $5 - 30\ KN/m2$ a réalisé 1533942 cycles en développant une contrainte principale de traction égal à 2.02 MPa.

Cette constatation s'applique sur toutes les éprouvettes sans exception. Plus que les contraintes principales de traction développées au niveau des éprouvettes sont proches à la contrainte moyenne de traction à la rupture, plus que le nombre de cycles diminue.

Les éprouvettes soumises à l'essai de fatigue uni axial ont réalisé un nombre de cycles plus important, loin de celui des éprouvettes soumises à l'effort combiné de compression et d'effort tranchant comme le montre le graphe de la figure 44.

7.5. Analyse des résultats expérimentaux et courbe de Wöhler :

Le résultat individuel pour chaque éprouvette est indiqué dans le tableau 14. Le niveau de la charge à partir de lequel les essais de fatigue ont été réalisé est de 60%

La figure 45 montre le nombre de cycle en fonction du rapport de contraintes normales appliquées sur les éprouvettes.

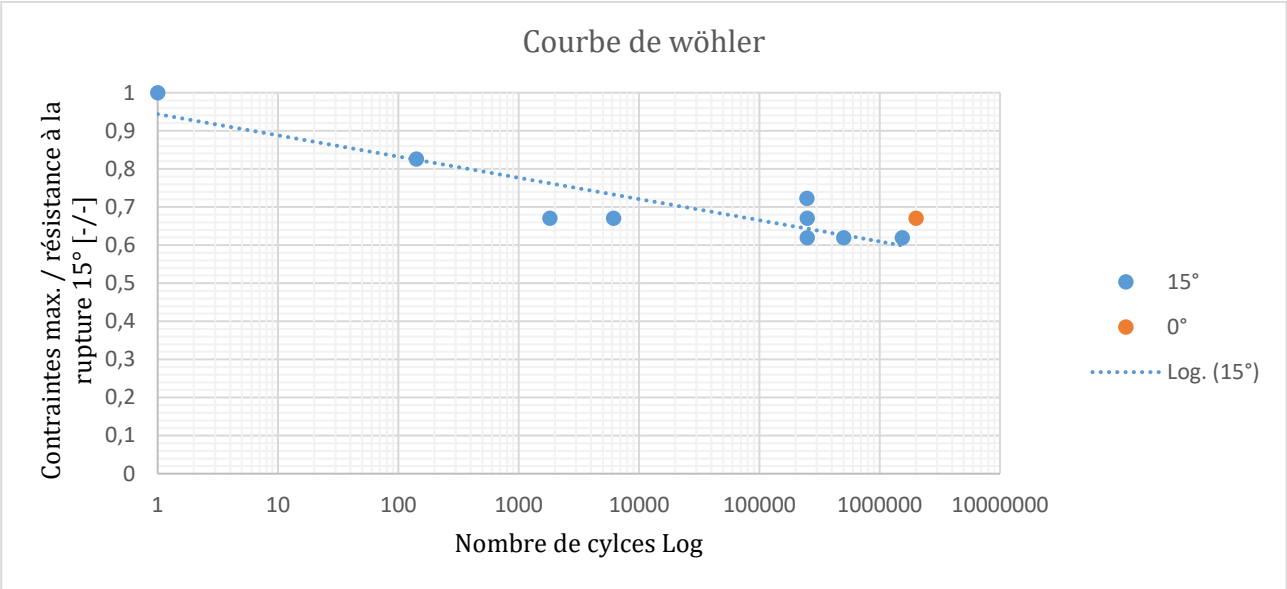


Figure 45: Durée de vie de plusieurs éprouvettes soumises à plusieurs plages de contraintes

Les essais menés sous l'angle de 15° ont conduit à des résistances à la fatigue nettement plus faibles que ceux soumises à l'angle de 0° et cela pour toutes les plages de contraintes appliquées.

Seules les éprouvettes sous l'angle de 0° soumises à la fatigue ont survécu à plus de 2 millions de cycles.

La durée de vie dépend intimement à l'angle d'inclinaison de la force sur la surface de contact.

Certaines éprouvettes ont conduit à une rupture rapide par rapport aux autres qui sont soumises à la même plage de contrainte. Cela est dû à la répartition des granulats au niveau de l'éprouvette ainsi qu'à un défaut de carottage constaté lors de la mise en essai. L'annexe X2-X3 dresse un questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue pour chaque éprouvette permettant ainsi de lier la constatation visuelle au résultat de l'essai.

La raison qui conduit à la rupture du béton sous charge est la formation progressive de microfissures.

8. Analyse descriptive et critique de dispositif d'essai : Avantages, inconvénients et pistes d'amélioration

Dans le but d'investir dans des recherches plus approfondies sur le comportement des matières cimentaires sous la combinaison d'effort de compression et d'effort tranchant, on a réalisé un essai introductif qui permet de récolter les premières conclusions concernant le comportement des éprouvettes en grout soumise à un effort combiné de compression er d'effort tranchant.

On a imaginé un dispositif d'essai qui permet d'introduire les efforts combinés de compression et d'effort tranchant. Ce dispositif a une forme cylindrique qui sert comme un récipient d'eau pour les essais de fatigue dans un environnement mouillé.

A l'intérieure de ce cylindre deux supports métalliques présentés dans l'annexe_X6 permettent la réception de l'éprouvette en grout.

L'inconvénient majeur de ce dispositif est le temps d'intervention du technicien pour la préparation de l'essai. Car, outre, la fabrication de plusieurs supports d'angles différents, le collage de l'éprouvette sur celui-ci prend minimum 8 heures.

Afin de rendre le collage et la mise en place des éprouvettes rapide au niveau du dispositif d'essai, plusieurs plaques métalliques doivent être réaliser afin de coller plusieurs échantillons en même temps. Le collage de la partie supérieure constitue l'étape la plus difficile, car l'éprouvette de grout doit être maintenue sur un angle précis pour éviter de crier une excentricité par rapport à l'axe principale (support métallique – Eprouvettes).

Un autre problème qui peut survenir est celui de l'écoulement d'eau à travers le bras métallique qui applique la force au niveau de la machine d'essai. Le joint d'étanchéité doit être soigneusement réalisé afin de réussir l'essai de fatigue dans l'environnement mouillé.

8.1. Etapes et temps estimé de réalisation

01	Confection des éprouvettes en grout	1 heure
02	Conservation des échantillons	7 jours
03	Sciage, carottage, Surfaçage	1 heure/ Eprouvette
04	Collage	8 heures
05	Mise en place de l'éprouvette dans le dispositif d'essai	1 heure/ Eprouvette
06	Préparation des équipements d'instrumentation	1 heure/ Eprouvette

8.2. Instrumentation

La mise en place des LVDT dans le sens transversal est difficile dans le cas où l'échantillon a été mis sans le conteneur métallique. Si ce dernier est fait, un LVDT pourrait être placé permettant son maintien pendant toute la durée de l'essai comme le montre la figure 46.

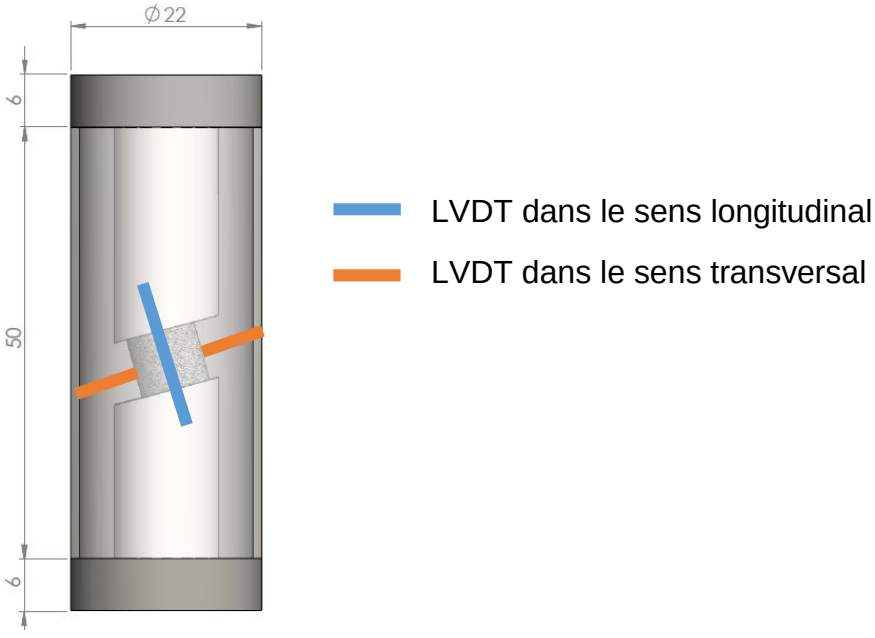


Figure 46: Positions possible pour les LVDT

Les essais réalisés nous ont permis de prouver l'utilité de la méthode de corrélation d'images digitales (DIC) dans la mesure des déplacements et des déformations pendant l'essai de fatigue.

L'avantage de cette méthode est sa capacité de fournir l'entièreté de champs de déplacement de et de déformation sur la surface exposée de l'éprouvette comme a été montré dans le paragraphe 7.1). Contrairement aux extensomètres qui donnent les quantités de déplacement ou de déformation au niveau local. La DIC a également des inconvénients, ces derniers sont montrés dans le paragraphe 7.1).

La combinaison des deux méthodes permet de confirmer la qualité des résultats de la DIC pour pouvoir les exploiter par la suite.

Concernant les jauges de déformations, leurs utilisations n'est pas aisé et leurs résultats sont difficile à confirmer vu qu'au niveau de l'éprouvette, les contraintes ne sont pas uniformes. On ajoute à cela que les jauges de déformations ne peuvent pas être combinées à la DIC car la surface de l'éprouvette est couverte par les jauges.

Les ondes ultra-soniques sont également une alternative pour déterminer le plus précisément possible le moment de l'amorçage de la première fissure au niveau de l'éprouvette de grout.

Le tableau 15 présente les différentes combinaisons qui peuvent être utilisé dans l'essai.

	LVDT	DIC	US	Jauges
Combinaisons	+	+		
	+		+	+
	+	+	+	

Tableau 2: Combinaisons possibles entre les équipements d'instrumentation

CONCLUSION GENERALE

Dans le but de fournir une étude détaillée et résoudre la problématique liée à la fatigue et l'endommagement des matériaux cimentaires dans le contexte des éoliennes offshores. Le présent rapport a traité les volets suivants :

- Etude générale de la problématique liée à l'endommagement du gout dans les connexions en grout.
- Synthèse bibliographique sur le développement de la conception des connexions en grout.
- Revue de littérature sur la fatigue des matériaux cimentaires.
- Etude expérimentale qui consiste à réaliser des essais de fatigue sur des échantillons en grout, soumis à un état de contraintes combiné de compression et d'effort tranchant.
- Evaluation de la pertinence de la méthode de corrélation d'images digitales pour la détermination des déformations au niveau des éprouvettes.
- Influence de la surface de contact sur le comportement des éprouvettes à la fatigue.

Ce projet était une occasion pour voir de près les difficultés que présente la conception des connexions en grout, l'effet de la fatigue sur leurs durabilités et les possibilités de trouver des nouvelles pistes menant à des nouvelles règles de conception des connexions en grout à la fatigue.

Aucune étude de ce genre n'a été faite par le passé en ce qui concerne les matériaux cimentaires soumis à un effort combiné de compression et d'effort tranchant.

Si le dimensionnement des connexions en grout à l'état limite ultime est disponible dans la norme DNV, aucun dimensionnement à la fatigue de ceux-ci n'est présenté dans ses articles.

Le présent rapport n'a traité que le comportement à la fatigue dans l'air pour un seul angle d'inclinaison seulement. L'étude de comportement à la fatigue dans l'eau et pour plusieurs angles d'inclinaison n'a pas été réalisé pour des raisons logistiques.

Malgré cela, les conclusions sont satisfaisantes, on cite quelques-unes :

- Le grout soumis à l'effort combiné de compression et d'effort tranchant a présenté une durée de vie de 30 à 70% inférieure à celui soumis à l'effort de compression seul.
- La durée de vie des éprouvettes ne depend pas du taux de la déformation normale ou tangentielle de celle-ci car elles se rompent à des taux de déformations inférieurs à celles enregistrées pendant l'essai de compression combiné à la rupture.
- Le cisaillement influence négativement la durée de vie des éprouvettes en grout.
- Le nombre de cycles diminue considérablement quand les contraintes sont proche de la contrainte de traction à la rupture.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Nedžad Dedić, Analysis of Grouted Connection in Monopile Wind Turbine Foundations Subjected to Horizontal Load Transfer; institute of mechanical Engineering, Aalborg University; 2009.

[2] Westgate et. al., 2005.

[3] Shen WZ, Zhang JH and Sørensen JN (2009) The actuator surface model: a new Navier–Stokes based model for rotor computations. Journal of Solar Energy Engineering.

[6] Karsan DI and Krahl NW (1984) New API equation for grouted pile-to-structure connections. In Offshore Technology Conference, Houston, Texas, http://dx.doi.org/10.4043/4715-MS.

[7] Lamport W, Jirsa J and Yura J (1991) Strength and Behavior of Grouted Pile to Sleeve Connections. Journal of Structural Engineering, 117(8): 2477-2498.

[8] Harwood RG, Billington CJ, Buitrago J et al. (1996) Grouted Pile to Sleeves Connections: Design Provisions for the New ISO Standard for Offshore Structures. In Proceedings of the 14th international conference on offshore mechanics and arctic engineering. OMAE, Florence, Italy, pp. 1-12.

[9] Schaumann P, Lochte-Holtgreven S, and Wilke F (2010) Bending tests on grouted joints for monopile support structures. In DEWEK 2010: 10th German Wind Energy Conference, Bremen, Germany.

[10] Lotsberg I (2013) Structural mechanics for design of grouted connections in monopile wind turbine structures. Marine Structures, 32: 113-135.

[11] Billington CJ and Tebbett I (1982) Fatigue strength of grouted tubular steel connections for offshore structures. International Association for Bridge and Structural Engineering: 625-632.

[12] Krahl N and Karsan D (1985) Axial Strength of Grouted Pile to Sleeve Connections. Journal of Structural Engineering, 111(4), 889-905.

[13] Elnashai A and Aritenang W (1991) Nonlinear modelling of weld-beaded composite tubular connections. Engineering Structures, 13(1), 34-42.

[14] Lamport W, Jirsa J and Yura J (1991) Strength and Behavior of Grouted Pile to Sleeve Connections. Journal of Structural Engineering, 117(8): 2477-2498.

[15] DEn (1984) Guidance on the design and construction of offshore installation (3rd edition, Department of Energy, UK.

[16] Harwood RG, Billington CJ, Buitrago J et al. (1996) Grouted Pile to Sleeves Connections: Design Provisions for the New ISO Standard for Offshore Structures. In Proceedings of the 14th international conference on offshore mechanics and arctic engineering. OMAE, Florence, Italy, pp. 1-12.

[17] Schaumann P and Wilke F (2006) Fatigue of Grouted Joint Connections. In Proceedings of the 8th German Wind Energy Conference (DEWEK), Bremen, Germany.

[18] Schaumann P and Wilke F (2007) Design of Large Diameter Hybrid Connections Grouted with High Performance Concrete. In The Seventeenth International Offshore and

Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), Lisbon, Portugal.

[19] Lotsberg I (2013) Structural mechanics for design of grouted connections in monopile wind turbine structures. Marine Structures, 32: 113-135.

[20] Lotsberg I, Serednicki A, Lervik A et al. (2012) Design of grouted connections for monopile offshore structures. Stahlbau, 81(9): 695-704.

[21] Lotsberg I, Serednicki A, Cramer E et al. (2013a) Behaviour of grouted connections of monopile structures at ultimte and cyclic limit states. The Structural Engineer, 91(2).

[22] Lotsberg I, Serednicki A, Oerlemans R et al.(2013b) Capacity of cylindrical shaped grouted connections with shear keys in offshore structures. The Structural Engineer, 91(1).

[23] Wilke F (2014) Load Bearing Behaviour of Grouted Joints Subjected to Predominant Bending. Doctoral Dissertation, Institute for Steel Construction, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Germany.

[24] Aritenang W, Elnashai AS and Dowling PJ (1992) Analysis-based design equations for composite tubular connections. Engineering Structures 14(3): 195-204.

[25] Tziavos, N, Hemida, H, Metje, N & Baniotopoulos, C 2016, 'Grouted connections on offshore wind turbines: A review' Proceedings of the ICE - Engineering and Computational Mechanics.

[26] Klose M, Mittelstaedt M and Mulve A (2012) Grouted Connections-Offshore Standards Driven By the Wind Industry. In The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), Rhodes, Greece.

[27] Billington CJ and Tebbett IE (1980) The basis for new design formulae for grouted jacket to pile connections. In Offshore Technology Conference, Houston, Texas, http://doi:10.4043/3788-MS.

[28] Andersen MS and Petersen PM (2004) Structural Design of Grouted Connection in Offshore Steel Monopile Foundations. In Global Wind Power Conference.

[29] Billington CJ and Lewis GH (1978) The strength of large diameter grouted connections. In Offshore Technology Conference, Houston, Texas, http://doi:10.4043/3083-MS.

[30] Billington CJ and Lewis GH (1978) The strength of large diameter grouted connections.

In Offshore Technology Conference, Houston, Texas, http://doi:10.4043/3083-MS.

[31] DEn (1980) Report No.ST41/80C. Report of the working party on the strength of grouted

pile sleeve connections for offshore structures, Department of Energy, Wimpey

Laboratories, Ltd, UK.

[32] Billington CJ and Tebbett IE (1980) The basis for new design formulae for grouted jacket

to pile connections. In Offshore Technology Conference, Houston, Texas,

http://doi:10.4043/3788-MS.

[33] Billington CJ and Tebbett I (1982) Fatigue strength of grouted tubular steel connections

for offshore structures. International Association for Bridge and Structural

Engineering: 625-632.

[34] Xian Wang et al. International Journal of steel structures, 16(4), 1149- 1159, 2016.

[35] Shah, S. P., “Predictions of Cumulative Damage for Concrete and Reinforced Concrete “, Materiales de Construction, V. 17, No. 1, 1984, pp. 65-68. doi: 10.1007/BF02474059.

[36] Torrcnti, .1. M.; Pijaudicr-Cabot, G.; and Reynouard, .1.-M., cds., Mechanical Behaviour o/"Concrete, John Wiley & Sons, Inc., 2010, pp. 185-223.

[37] Papa, E., and Taliercio, A., "Anisotropic Damage Model for the Multiaxial Static and Fatigue Behaviour of Plain Concrete," Engineering Fracture Mechanics V. 55, No. 2. 1996, pp. 163-179. doi: 10.1016/0013-7944(96)00004-5.

[38] Johansson U. (2004): Fatigue tests and analysis of reinforced concrete bridge deck models. Institutionen för byggvetenskap, Kungl. Tekniska högskolan, Stockholm, 198 pp.

[39] Tamulenas, V.; Gelazius, V.; and Ramanauskas, R., “Calculation Technique for Stress-Strain Analysis of RC Elements Subjected to High-Cyclic Compression," Civil and Transport Engineering, Aviation Technologies, V. 6, No. 5, 2014, pp. 468-473. doi: 10.3846/mla.20l4.687

[40] Sparks, P. R., and Menzies, J. B., “The Effect of Rate of Loading upon the Static and Fatigue Strength of Plain Concrete in Compression, Magazine of Concrete Research, V. 25, No. 83, 1973, pp. 73-80. doi: 10.1680/macr.1973.25.83.73.

[41] Raithby, K. D., and Galloway, J. W., “Effect of Moisture Condition, Age, and Rate of Loading on Fatigue of Plain Concrete, “Fatigue of Concrete, SP-41, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1974, pp. 15-34.

[42] Zhang, B.; Phillips, D. V.; and Wu, K., “Effects of Loading Frequency and Stress Reversal on Fatigue Life of Plain Concrete “, Magazine of Concrete research, V. 48, No. 177, 1996, pp. 361-375. doi: 10.1680/macr. l996.48.177.361.

[43] Hilsdorf, H. K., and Kesler, C. E., “Fatigue Strength of Concrete under Varying Flexural Stresses”, ACI Journal Proceedings, V. 63, No. 10, Oct. 1966, pp. 1059-1076.

[44] Takhar, S. S.;.Jordaan,I. J.; and Gamble, B. R., “Fatigue of Concrete under Lateral Confining Pressure", Fatigue Of Concrete, SP-41, American Concrete Institute, Farmington Hills, M1, 1974, pp. 59-70.

[45] Berthelot J.M., Robert J.L., 1987. "Damage evaluation of concrete test specimens related to failure analysis." Journal of Engineering Mechanics, vol. 116(3), pp. 587-604.

[46] Abeles P. W., American Concrete Institute; Committee 215 Fatigue of Concrete (1974): Fatigue of concrete: comp. under the sponsorship of ACI committee 215, Fatigue of concrete. Detroit, Mich., 350 pp.

[47] Antrim J. C. (1967): A study of the mechanism of fatigue in cement paste and plain concrete. Ph.D. Purdue University, Purdue, 149 pp.

[48] Ceb (1988): Fatigue of concrete structures: state of the art report. CEB, London, 300 pp.

[49] Galloway J. W., Harding H. M., Raithby K. D. (1979): Effects of moisture changes on flexural and fatigue strength of concrete. Crowthorne, 33 pp.

[50] Gylltoft K., Elfgren L. (1977): Utmattningshållfasthet för anläggningskonstruktioner: en inventering. Statens råd för byggnadsforskning : Sv. byggtjänst, Stockholm, 160 pp.

[51] Holmen J. O. (1979): Fatigue of concrete by constant and variable loading. Trondheim, 218 pp.

[52] Murdock J., Kessler C. E. (1960): The mechanism of fatigue failure in concrete. T.&A.M. Report No. 587, University of Illinois, Illinois.

[53] Ohlsson U., Daerga P. A., Elfgren L. (1990): Fracture energy and fatigue strength of unreinforced concrete beams at normal and low temperatures. Engineering Fracture Mechanics Vol. 1990(35), No 1, 2, 3, pp. 195-203.

[54] Ople F. S., Hulsbos C. L. (1966): Propable fatigue life of plain concrete with stress gradient. ACI Journal Vol. Proceedings 1966(63), No 14, pp. 59-82.

[55] Petkovic G. (1991): Properties of concrete related to fatigue damage: with emphasis on high strength concrete. Division of Concrete Structures, Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, Trondheim, 217 pp.

[56] Rilem Technical Committee 90 Fma, Elfgren L. (1989): Fracture mechanics of concrete structures. Chapman and Hall, London, 407 pp.

[57] Tepfers R., Gørling J., Samuelsson T. (1973): Concrete subjected to pulsating load and pulsating deformation of different pulse waveforms. Nordisk betong Vol. No 4, pp. 27-36.

[58] Waagaard K. (1981): Fatigue strength of offshore concrete structures. COSMAR Report, Cosmar Report.

[59] Van_Leeuwen J., Siemes A. J. M. (1979): Miner's rule with respect to plain concrete. Heron Vol. 24, No 1, pp. 34.

[60] DI BENEDETTO H., ASHAYER SOLTANI M.A. "Etude de la fatigue des mélanges bitumineux" 2ème réunion du réseau de laboratoires Géo-matériaux, Environnement, Ouvrage, Aussois (France), 1995, 3p.

[61] SAID S. "Fatigue characteristics of asphalt concrete mixtures". Rapport de recherche. Suède : Statens Väg-Och Trafikinstitut, mars 1991, 67 p.

[62] Richard, F.E., Brandzaeg, A., Brown, R.L. The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression. Bulletin No 190. University of Illinois. Engineering Experimental Station. Urbana. III. 1929.

[63] Hsu, T.C.C. Fatigue of plain concrete. ACI Journal. 1981;78:292‑305.

[64] RILEM COMMITTEE 36-RDL, “Long Term Random Dynamic Loading of Concrete Structures," Materials and Structures, V. 17, 1984, pp. 1-2s.

[65] Hsu, T. C., “Fatigue and Micro-Cracking of Concrete», Materiales de construccion, V. 17, No. 1, 1984, pp. 51-54. doi: 10.1007/BF()2474056 23.

[66] Gebreyouhannes, E.; Kishi, T.; and Maekawa, K., “Shear Fatigue Response of Cracked Concrete Interface", Journal of Advanced Concrete Technology, V. 6, No, 2, 2008, pp. 365-376. doi: 10.3151/jact. 6,365.

[67] “Joint Industry Project – Summary Report from the JIP on the Capacity of Grouted Connections in Offshore Wind Turbine Structures”. Det Norske Veritas, Report No. 2010-1053, Revision No. 05 (2011).

[68] Eigil V. Soerensen, P, Luc Westhof, Elo Yde, Andrzej Serednicki, “Fatigue life of high performance grout for wind turbine grouted connection in wet or dry environment”, EWEA OFFSHORE 2011, 29 November – 1 December 2011, Amsterdam, The Netherlands, (PO. 178).

[69] Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011 Urbana, Illinois.

[70] Ncorr : http://www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms et Ncorr_post : http://mech.fsv.cvut.cz/~nezerka/DIC/index.htm

[71] D. Mohr and M. Doyoyo. Analysis of the arcan apparatus in the clamped configuration. Journal of Composite Materials, 36:2583–8, 2002.

GROUTING PRODUCTS

GROUTEX® 6

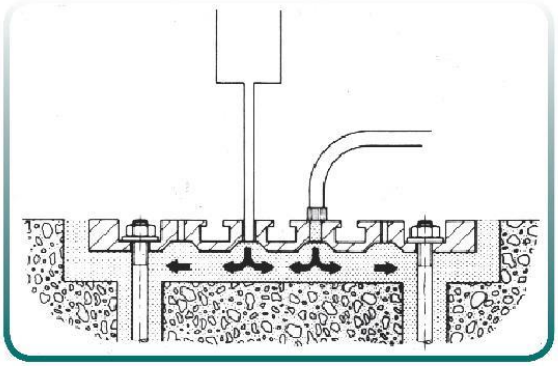
Coulis de calage et de scellement sans retrait

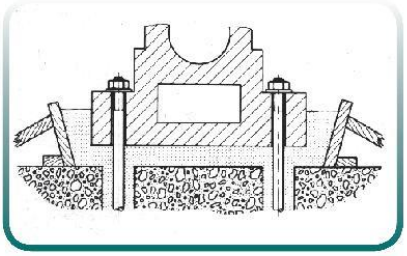
CE
EN 1504-6
BENOR
N° de certificat BB-586-0438-0040→0045-001
Organisme de certification BCCA

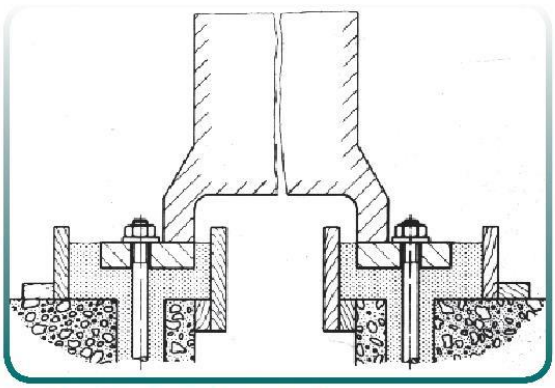
- A base de ciment et de sable.
- Sans retrait.
- Prêt à l'emploi.
- Granulométries :

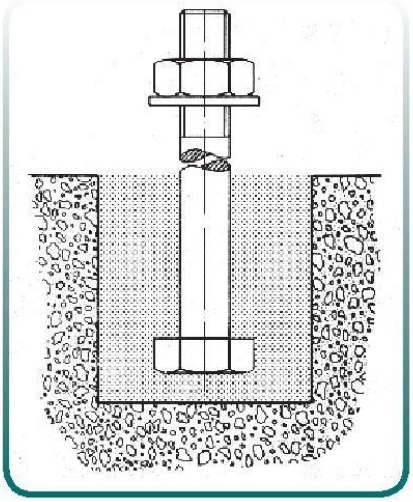
6003	(extra-fin)	0,1 - 0,3 mm
601	(fin)	0 - 1 mm
603	(standard)	0 - 3 mm
608	(gros)	0 - 8 mm
603 + Kift	(Microbéton Prémix)	0 - 8 mm

- Forte contrainte d'adhérence.
- Résistance élevée à la compression et à la flexion.
- Résistant à l'huile.
- Etanche à l'eau.
- Exempt de chlorures, de sulfures et d'agrégats métalliques.
- Rendement élevé.
- Non corrosif.
- Très fluide : pompable et injectable.









CLOQUETTE SINCE 1924 PRODUCTS FOR BUILDING INDUSTRY

Le mortier de scellement **GROUTEX** ⑥ est employé et spécifié par de nombreux organismes publics, bureaux d'études, administrations des Ponts et Chaussées, usines de construction de machines et de turbines de par le monde entier.

AVANTAGES DU COULIS GROUTEX ⑥

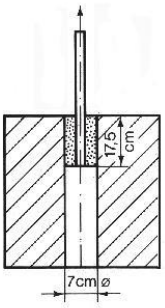
Le coulis **GROUTEX** ⑥ présente des résistances élevées à la flexion et à la compression.

	FLEXION		COMPRESSION	
	N/mm²	Kgf/cm²	N/mm²	Kgf/cm²
à 18 heures	6,1	62	34,7	354
à 24 heures	8,7	89	54,3	553
à 3 jours	10,7	109	83,6	852
à 7 jours	11,0	113	90,4	922

- Le **GROUTEX** ⑥ ne présente aucun des inconvénients des mortiers de scellement métalliques. Les mortiers de scellement qui contiennent des additifs métalliques, s'oxydent et rouillent lorsqu'ils sont exposés à l'humidité et, par là, affaiblissent la liaison du mortier.

- Le **GROUTEX** ⑥ a une volumétrie contrôlée et est garanti sans retrait.
  Une volumétrie contrôlée est nécessaire afin de garantir une liaison monolithique de la machine avec sa fondation. Il a une volumétrie dosée avec précision. En 24 heures, il se stabilise complètement et ne présente ni retrait, ni gonflement.

- A l'épreuve des chocs et des vibrations, il ne se brise pas.
- Adhésivité et contrainte d'adhérence de + de 150 kg/cm².
- Très bon comportement aux variations des tensions provoquées par l'humidité, la chaleur et le froid.
- Réduction de 60 à 80 % des dommages aux roulements des machines de laminoirs.



Grâce à sa résistance à la compression qui se manifeste très rapidement, le **GROUTEX** ⑥ supprime les temps d'attente prolongée et la mise en route de la machine peut avoir lieu dans l'intervalle d'une journée environ. De nombreux essais officiels sont disponibles sur simple demande.

CONSEIL DE MISE EN OEUVRE

Le coulis **GROUTEX** ⑥ :

- Est un mélange garanti restant égal à lui-même et surveillé en permanence.
  Il est produit en usine sous contrôle sévère quant à la qualité de manière telle que, sur le chantier, il suffit d'y ajouter purement et simplement de l'eau. Un mélangeur compliqué n'est donc pas indispensable ni non plus un personnel qualifié.

- Coule facilement, se travaille de même, remplit toutes les cavités.
  Sur base de 4 l d'eau pour 25 kg , la fluidité à la table (sans secousses) est de + de 3.
- présente un temps de mise en oeuvre suffisant (environ 1 heure).
- peut être coulé, pompé et injecté. Coulé, le mortier de scellement **GROUTEX** ⑥ ne présente pas de ségrégation.
- a la couleur du ciment et ne change pas de teinte.
- pour 1 m3 à sceller, il faut environ 1900 kg **GROUTEX** ⑥, suivant les granulométries
- peut être mis en oeuvre au dessus de 0°C. Toutefois, en cas de gel de nuit

(-5°C), il y a lieu d'utiliser de l'eau chaude (jusqu'à 40°C) et de prendre les mesures habituelles de protection.

- peut également être pompé sur des distances importantes au travers de tuyaux étroits, diamètre intérieur 3/4''.
- est livré en sacs de 25 kg, cet emballage comprenant en sus un pli traité contre l'humidité. Il est d'une manipulation facile. Il permet en outre un entreposage de longue durée (6 mois) dans un endroit protégé, et de 12 mois dans un local absolument sec.

DOMAINES D'APPLICATION

Le coulis de scellement **GROUTEX** 6 est utilisé dans les cas ci-après :

- Scellement de précision nécessitant une forte résistance à la compression et une absorption des vibrations.
- Scellement d'ancrages, de plaques d'assise et de culées de ponts, de platelage, de garde-corps, de glissières de sécurité d'autoroutes, de poteaux caténaires, de panneaux anti-bruit etc ...
- Scellement de turbines, générateurs, pompes, broyeurs, laminoirs, moteurs, presses, ventilateurs, machines à vapeur, convertisseurs, compresseurs, surpresseurs machines Diesel et autres installations qui tournent avec de fortes vibrations.
- Scellement d'installations diverses de papeteries, fabriques de panneaux, fabriques de pneus et usines de produits chimiques, raffineries, industries automobiles, machines textiles, socles et rails de machines-outils,etc...
- Scellement de constructions en préfabriqués métalliques ou en béton précontraint.
- Scellement de supports métalliques, culées et poutres de ponts, rails de grues, radiotélescopes, installations de centrales de force motrice, appuis,...
- Scellement sous l'eau de derricks, remplissages d'encadrements de portes, de joints rigides, raccords entre tuyaux, etc...

Divers : nous sommes à votre disposition pour étudier d'autres cas d'application.

PRÉPARATION DU SCELLEMENT AVEC GROUTEX 6

Le coulis **GROUTEX** 6 :

- est prêt à l'emploi et il suffit d'y ajouter de l'eau. Environ 2 heures avant le scellement, les surfaces doivent être bien nettoyées et humidifiées. En particulier, il faut veiller à enlever les boues de ciment (laitance).

La consistance désirée s'obtient en ajoutant ± 4 litres d'eau à 25 kg de mortier de scellement **GROUTEX** 6 (voir tableau).

- doit être mélangé dans un malaxeur. Le mélange avec la quantité d'eau appropriée se fait de préférence en deux phases.

1. Verser les 2/3 de la quantité d'eau (environ 3 litres) dans le malaxeur (le gravier roulé aussi, en cas d'utilisation).

2. Le sac de **GROUTEX** 6 est ensuite vidé (lentement pour éviter la formation de grumeaux) pendant que le malaxeur tourne (3 minutes environ).

3. Verser le reste d'eau (environ 1 litre) et laisser tourner encore le malaxeur pendant 2 minutes.

La durée de l'opération de mélange est de 3 à 5 minutes. Afin d'éviter toute inclusion d'air dans le scellement, il faut couler à partir d'un côté ou d'un coin seulement.

Pendant 48 à 72 heures suivant la mise en place du **GROUTEX** 6, il y a lieu de prendre des mesures de protection des surfaces apparentes exposées à l'air, au vent ou au soleil.

Un séchage trop rapide pourrait entraîner la formation de micro-fissures superficielles sans conséquence défavorable sur la réussite du scellement.
L'une des méthodes suivantes est à utiliser dès que la surface devient mate (env. 1h) :

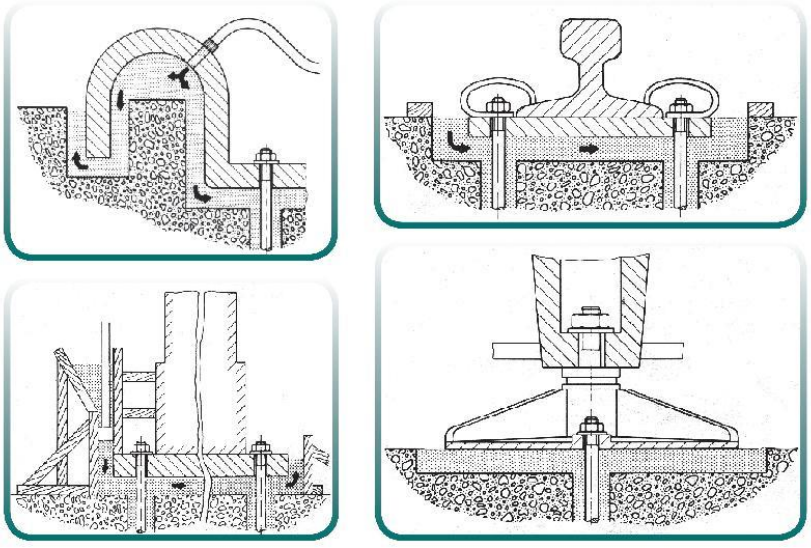
a) maintenir sous eau ou humidifier fréquemment **GROUTEX 6**
b) le couvrir de sacs, sciure, sable, nattes humides, feuilles plastiques, ou mieux encore, de laine de verre gorgée d'eau de ± 5 cm d'épaisseur.
c) effectuer un traitement ultérieur à l'aide d'un curing compound type **CUROL**.

	Granulométrie	Espace de scellement	Quantité d'eau par sac de 25 kg
GROUTEX 6003 "Extra-fin"	0,1 - 0,3 mm	> 8 mm	+/- 4 l
GROUTEX 601 "Fin"	0 - 1 mm	> 15 mm	+/- 4 l
GROUTEX 603 "Standard"	0 - 3 mm	> 20 mm	+/- 4 l
GROUTEX 608 "Gros"	0 - 8 mm	> 50 mm	2,8 l
GROUTEX 603 + Kift "Microbéton Prémix"	0 - 8 mm	> 50 mm	2,6 l

Notre gamme de mortiers prêts à l'emploi comprend également le **GROUTEX PAC**, mortier de ragréage, de réparation ou de bourrage à consistance plastique (granulométrie 0-2 mm ou autres sur demande) pour des réparations de 10 à 50 mm d'épaisseur sur des surfaces horizontales, verticales ou même en surplomb.

SÉCURITÉ

S 2 : conserver hors de portée des enfants.
S 24/25 : Eviter le contact avec la peau et yeux.
S 26 : En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
S 37 : Porter des gants appropriés.
S 46 : En cas d'ingestion consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.



Cette notice technique résulte des recherches et d'une longue expérience. Toutefois, elle ne saurait engager notre responsabilité, car le succès n'est assuré que si l'on a tenu compte de toutes les particularités de chaque cas. Nous recommandons d'effectuer des essais préliminaires afin de déterminer si le produit convient à l'application envisagée. **UPDATE 06/2007**

SPRL **ETS CHIMIQUES CLOQUETTE** BVBA
Av. Georges Truffaut 57
B-4020 Liège BELGIUM
Tél. +32(0)4 362 42 61 Fax +32(0)4 362 05 24 http://www.cloquette.be E-mail : cloquette@cloquette.be

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude ✓
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information ✓

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID PC1

Nature des éprouvettes : ✓

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre.
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 70 mm

Type de moule utilisé

Métallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\phi}$ = 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\phi}$ = 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☒ ?
Apparition de flambement :	☐	☒ ?

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 04/05/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O. BIAR & V. FRZEE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3 Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de compression pure (0°) ID de l'éprouvette : PC 1

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☑
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☑	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☑	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☑	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☑	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☑
[illegible]	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☑	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☑	☐
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☑
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☑
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☑
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☑

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☒	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☒	☐
Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.		
Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :		
- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☒	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☒
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☒	☐
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☒
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

Éprouvette non calée aux supports métalliques de la Presse hydraulique

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID PC2

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35x50 mm

Type de moule utilisé

métallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\emptyset}$ = 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\emptyset}$ = 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☑
Apparition de flambement :	☐	☑

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 18/04/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O. BKR & V. FRZEE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3 Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de Compression Pure (0°) ID de l'éprouvette : PC2

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☒
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☒	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☒	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☒	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☒	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☒
[redacted]	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☒	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☒	☐
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☒
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☒
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☒
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☒

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☑	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☒	☐
Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.		
Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :		
- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☑	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☒
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☑	☐
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☒
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

Eprouvette non collé au niveau des supports métalliques de la Presse hydraulique

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information ✓

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID 1C2

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 50 mm

Type de moule utilisé

métallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\phi}$ = 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\phi}$ = 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☑
Apparition de flambement :	☐	☑

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 12/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 04/04/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O.BKR & V. FRZEG

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3 Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de compression (15°) ID de l'éprouvette : 1 c 2

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☒
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☒	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☒	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☒	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☒	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☒
La ressemblance de la forme de rupture entre les éprouvettes	☐	☐
[illegible]	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☒	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☒	☐
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☒
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☒
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☒
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☒

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel... peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☒	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☒	☐
Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.		
Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :		
- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☒	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☒
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☒	☐
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☒
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

Rupture au niveau de l'éprouvette
L'éprouvette reste collée au support de la presse hydraulique pendant l'essai de compression à la rupture.

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude ✓
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information ✓

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID 3C1

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 70 mm

Type de moule utilisé

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\phi} =$ 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\phi} =$ 0,7

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 05/04/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O. BKR & V. FREE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☑
Apparition de flambement :	☐	☑

Annexe_X3 Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de Compression (15°) ID de l'éprouvette : 3C1

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☒
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☒	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☒	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☒	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☒	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☒
La ressemblance de la forme de rupture entre les éprouvettes	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☒	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☒	☐
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☒
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☒
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☒
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☒

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☒	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☒	☐

Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.

Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :

- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☒	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☒
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☒	☐
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☒
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

→ Rupture au niveau de l'éprouvette

→ L'éprouvette reste collée aux supports de la presse hydraulique pendant l'essai de compression à la rupture

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID E1

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 70 mm

Type de moule utilisé

métallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\phi} =$ 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\phi} =$ 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☒
Apparition de flambement :	☐	☒

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 08/03/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : D. BKR & V. FRZGE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3 Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de fatigue (15°) ID de l'éprouvette : E1

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☒
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☒	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☒	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☒	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☒	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☒
	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☒	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☐	☒
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☒
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☒
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☒
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☒

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☑	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☑	☐

Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.

Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :

- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☑	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☑
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☑
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☑
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☐	☑
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☑
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☑
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☑
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude ✓
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information ✓

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID E2

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 80 mm

Type de moule utilisé

Metallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\phi}$ = 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\phi}$ = 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☑
Apparition de flambement :	☐	☑

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 15/03/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O.BAR & V.IFRZEE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3. Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de fatigue (15°) ID de l'éprouvette : E2

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☒
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☒	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☒	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☒	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☒	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☒
	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☒	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☐	☒
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☒
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☒
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☒
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☒

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel... peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☑	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☑	☐
Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.		
Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :		
- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☑	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☑
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☑
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☑
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☐	☑
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☑
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☑
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☑
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude ✓
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information ✓

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID E3

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 50 mm

Type de moule utilisé

métallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\phi}$ = 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\phi}$ = 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☒
Apparition de flambement :	☐	☒

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 15/03/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O. BIOR & V. FRZEE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3. Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de fatigue (15°) ID de l'éprouvette : E3

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☑
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☑	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☑	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☑	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☑	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☑
[redacted]	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☑	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☐	☑
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☑
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☑
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☑
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☑

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☒	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☒	☐

Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.

Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :

- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☒	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☒
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☐	☒
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☒
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID E4

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 70 mm

Type de moule utilisé

metallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\phi} =$ 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\phi} =$ 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☑
Apparition de flambement :	☐	☑

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 16/03/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O. BKR & V. FRZEE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3. Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de fatigue (15°) ID de l'éprouvette : E4

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☑
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☑	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☑	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☑	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☑	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☑
[illegible]	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☑	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☐	☑
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☑
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☑
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☑
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☑

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☒	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☒	☐
Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.		
Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :		
- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☒	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☒
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☐	☒
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☒
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche
- Essai d'étude
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID EF

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés.
- Cylindre.
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35x70 mm

Type de moule utilisé

metallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\phi}$ = 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\phi}$ = 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☑
Apparition de flambement :	☐	☑

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 17/03/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O. BIAR & V. ARZEE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3. Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de fatigue (15°) ID de l'éprouvette : ER

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☑
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☑	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☑	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☑	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☑	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☑
	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☑	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☐	☑
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☑
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☑
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☑
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☑

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☒	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☒	☐
Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.		
Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :		
- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☒	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☒
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☐	☒
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☒
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche
- Essai d'étude
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID E6

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35x70mm

Type de moule utilisé

metallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\emptyset} =$ 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\emptyset} =$ 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☑ ✓
Apparition de flambement :	☐	☑ ✓

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 23/03/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O. BKR & V. FRZEE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3. Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de fatigue (1r°) ID de l'éprouvette : E6

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☑	☐
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☑	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☑	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?	☑	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☑	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☑	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☑
	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☑	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☐	☐
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☑
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☑
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☑

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☒	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☒	☐
Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.		
Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :		
- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☒	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☒
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☐	☒
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☒
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

Carottage de qualité moyenne
les plans tangents de l'éprouvette ne sont pas parfaitement parallèles.

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ?
- Essai d'étude ✓
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information ✓

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID E7

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ?
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 50mm

Type de moule utilisé

métallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\phi} =$ 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\phi} =$ 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☑ ✓
Apparition de flambement :	☐	☑ ✓

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 24/03/18

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O. BIER & V. FREEE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3. Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de fatigue (15°) ID de l'éprouvette : E7

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☑	☐
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☑	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☑	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☑	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☑	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☑
[illegible]	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☑	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☐	☐
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☑
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☑
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☑

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☑
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☐	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☐	☑
Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.		

Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :

- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☑	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☑
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☐
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☑
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☐	☑
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☑
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☑
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☐
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

Carottage de qualité moyenne
les plans tangents de l'éprouvette ne sont pas parfaitement parallèles

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID E9

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 70 mm

Type de moule utilisé

metallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\emptyset} = 0,7$
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\emptyset} = 0,7$

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☑
Apparition de flambement :	☐	☑

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 30/03/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O. BKR & V. FRZEE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3. Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de fatigue (15°) ID de l'éprouvette : E8

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☑	☐
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☒	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☑	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☑	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☑	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☒
[illegible]	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☑	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☐	☐
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☑	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☒
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☒
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☒

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☐	☒
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☒
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☐	☐
Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.		
Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :		
- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☒	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☐
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☐	☒
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☐
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

Carottage de qualité moyenne
les plans tangents de l'éprouvette ne sont pas parfaitement parallèles.

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression et d'effort tranchant

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude ✓
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information ✓

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID E9

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 70 mm

Type de moule utilisé

Métallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\emptyset}$ = 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\emptyset}$ = 0,7

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 15/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 05/04/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O. BIAR & V. ARZEE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☒
Apparition de flambement :	☐	☒ ✓

Annexe_X3. Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de fatigue (15°) ID de l'éprouvette : E9

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☑
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☑	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☑	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☑	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☑	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☑
La ressemblance [illegible] forme de rupture entre les éprouvettes	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☑	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☐	☑
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☑
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☑
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☑
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☑

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☒	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☒	☐
Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.		
Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :		
- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☒	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☒
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☐	☒
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☒
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude ✓
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information ✓

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID E2

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 50 mm

Type de moule utilisé

métallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\phi} =$ 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\phi} =$ 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☒
Apparition de flambement :	☐	☒

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 02/05/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O.Bick & V.FRZEE

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3 Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue

Essai de fatigue (0°) ID de l'éprouvette : E2

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☒
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☒	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☒	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☒	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☒	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☒
[illegible]	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☒	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☐	☒
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☒
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☒
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☒
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☒

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☒	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☒	☐
Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.		
Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :		
- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☒	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☒
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☐	☒
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☒
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☒

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Annexe_X2 :

Fiche d'identification des échantillons soumis à un effort de compression

Fiche d'identification de l'essai

- Essai de recherche ✓
- Essai d'étude ✓
- Essai de convenance et de contrôle
- Essai d'information ✓

Description des éprouvettes

Désignation de l'éprouvette : ID E4

Nature des éprouvettes :

- Moulées/ carottés. ✓
- Cylindre. ✓
- Cylindre à deux faces planes parallèle.

Dimensions

35 x 50 mm

Type de moule utilisé

métallique

Technique de préparation

- Surfaçage. ✓
- Rectification. ✓

Disposition des éprouvettes

Etat de surface des éprouvettes

- Plane ✓
- Parallèle entre elle ✓
- Perpendiculaire à l'axe

Elancement des éprouvettes

- Cylindrique : $\frac{L}{\emptyset} =$ 0,7
- Cylind. à surfaces planes parallèles : $\frac{L}{\emptyset} =$ 0,7

	Oui	Non
Apparition de l'effet de frettage :	☐	☑
Apparition de flambement :	☐	☑

Date de fabrication : 08/12/2017

Date de démoulage : 18/12/2017

Date de transport : /

Date des essais : 18/04/2018

Conditions de mesure :

Machine d'essai : MTS 100 KN

Marque : MTS

Type : Presse servo- hydraulique

N° :

Dernière vérification : le

Capacité : 100 KN

Chargé de l'essai : O. BKR & V. FRZET

Lieu des essais : LEMSC_UCL-LLN.

Annexe_X3. Questionnaire de vérification de la qualité des essais de fatigue :

Essai de fatigue (0°) ID de l'éprouvette : E4

Résultats d'essais mis en doute :

	Oui	Non
- Les résultats entre la présente éprouvette et les autres éprouvettes de la même série semblent dispersés (écart entre valeur max et valeur min supérieur à ..... KN)	☐	☒
Vérification de la dispersion sur la masse des éprouvettes.	☒	☐
- L'alignement des 3 pièces a été bien vérifié ?	☒	☐
- Les surfaces de contact sont-ils parallèle l'une par rapport à l'autre ?		
Remise en cause de la qualité des éprouvettes	☐	☐
- Y a-t-il bien eu homogénéisation du grout avant préparation des éprouvettes (à partir du grout prélevé) ?	☒	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Forme de la rupture des éprouvettes est en diagonale avec fissurations ?	☒	☐
Anomalie de l'effort appliqué ou remise en cause de la qualité de l'éprouvette.	☐	☐
- Y-a-t-il des éprouvettes qui ont manifestées des comportements à la rupture différents ?	☐	☒
[illegible]	☐	☐
La disposition des pièces d'assemblage et le centrage de l'éprouvette	☐	☐
- Les pièces d'assemblage et l'éprouvette sont-ils disposés au centre de gravité de l'ensemble.	☒	☐
Le plateau supérieur de la presse supporté par une rotule n'a pas connu une rotation durant l'essai.	☐	☒
- Écarts constatés sur les dimensions des éprouvettes par rapport aux normes de référence/ justification théorique ? Défauts d'aspect, cavités...	☐	☒
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Méthode de serrage à refus remis en cause ? (Problème vibration du béton, écart par rapport aux conditions normalisées ?	☐	☒
Confirmation par la masse volumique d'un problème de serrage du grout ?	☐	☐
Remise en cause de la qualité des éprouvettes.	☐	☐
- Transport des éprouvettes (délai court après fabrication < 16 h ; risques de chocs lors du transport ? ; constat d'une chute lors de la manutention ?	☐	☒
Éprouvettes défectueuses après transport.	☐	☐
- Essais conventionnels : problème de conservation par rapport aux conditions normalisées 20 °C +/- 5° C; humidité ? (Éprouvettes en position horizontale pour séchage, gel, températures de conservation élevées,	☐	☒

	Oui	Non
Humidité insuffisante, gel… peuvent expliquer des écarts de l'ordre de 10 à 20 %.	☐	☐
- Préparation des faces d'appui : face arasée et face fond de moule pour les éprouvettes cylindriques.	☒	☐
Anomalie due à l'état de surface de l'éprouvette.	☐	☐
- Choix de la méthode de préparation des éprouvettes : si la résistance attendue supérieure à 50 MPa, préparation par rectification ou boîte à sable ?	☒	☐

Pour résistance attendue > 50 MPa, le surfaçage au mortier de ciment alumineux ou au mortier de soufre est inapproprié.

Résultats d'essais mis en doute (après examen des points 1 à 10 précédents) :

- Suivi de la vitesse de montée en charge absence de suivi de la montée en charge ? Au mieux avec pompage manuel.	☒	☐
Peut expliquer une dispersion des résultats (les efforts ne sont pas réguliers et pas appliqués avec la même vitesse).	☐	☐
- Choc avec rupture violente de l'éprouvette.	☐	☒
Voir la charge d'essais par rapport à la capacité de la machine (rigidité bâti insuffisant ?).	☐	☒
- Rotule jugée défectueuse ou mal réglée lors de la vérification périodique (essais avec inclinaison rotule, ou essais avec déport de 6 mm).	☐	☒
- Exactitude de la machine d'essais : effacement paramètres de réglage de l'indicateur de force ? Panne ?	☐	☒
Écarts de justesse importants dans le cas d'une perte de mémorisation de la pente.		
- Constatation d'un défaut de planéité des plateaux > 0,05 mm (incident important sur les BHP)	☐	☒
- Dureté des plateaux ou blocs de réglage inférieurs à la recommandation de la norme.	☐	☒
Risque d'usure prématurée, mauvaise répartition des efforts.	☐	☒
- Recherche d'autres paramètres.	☐	☐

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Annexe_X4 : Caractéristiques mécaniques du grout

Nature de l'essai :

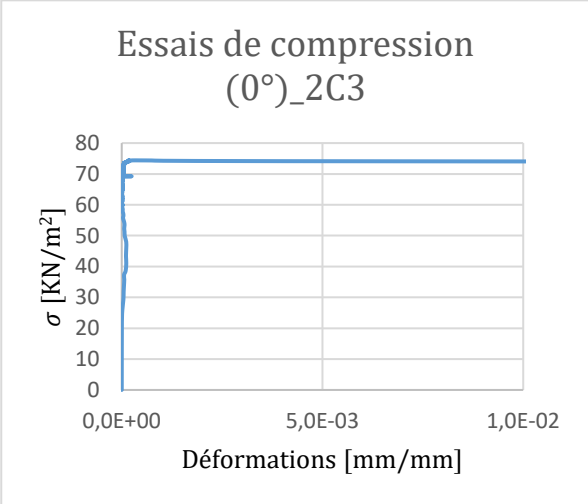
Date de l'essai	15/04/2018 & 02/05/2018
Nature de l'essai	Essai d'information
ID et dimensions de l'éprouvette	2C3 & 2C1
Lieu de fabrication	Laboratoire LEMSC_UCL-LLN
Date de fabrication	18/12/2017

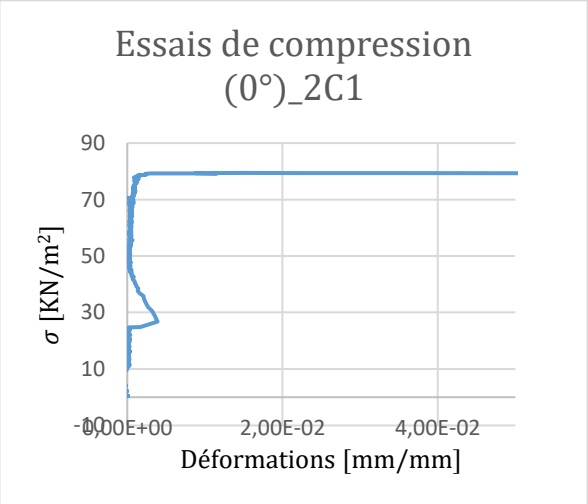
Composition du grout :

Dimensions	Composition	Désignation	E/C	Quantité	Mise en place du grout
$35 \times 50\ mm$	Grout	Groutex 608_ Cloquette	0.112	25 kg	
	Eau			2.8 l	

Résistance à la compression (0°)								
Résultats échantillons	ID	Charge de rupture (KN)	Résistance					
			$\sigma_N[MPa]$	$\sigma_T[MPa]$	Moyenne $[MPa]$		$COV\%$	
Age (+ 7 Jours)	2C3	71,582	74,401	0	76,915	0	8,22	0
	2C1	76,420	79,429	0				

Les courbes de comportement à la compression uni axial du grout :





Module d'élasticité et module sécant :

Eprouvettes	ID.	ID.	ID.
$E\ (MPa) =$	10250	10314	

$E_{moy}\ (MPa) =$10282 MPa

Annexe_X4 : Caractéristiques mécaniques du grout

Nature de l'essai :

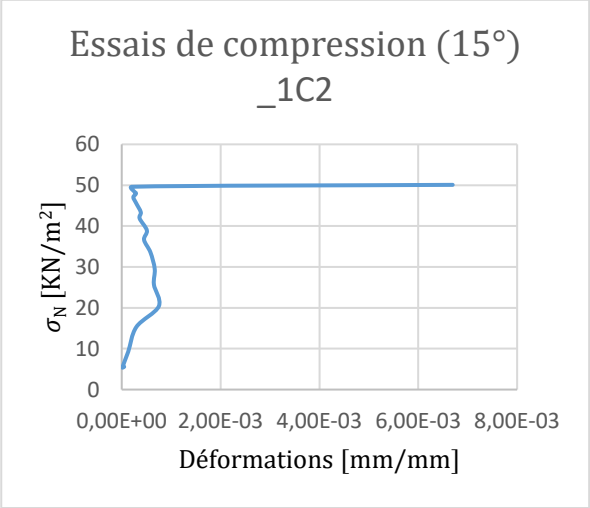
Date de l'essai	26/03/2018
Nature de l'essai	Essai d'information
ID et dimensions de l'éprouvette	1C2 & 3C1
Lieu de fabrication	Laboratoire LEMSC_UCL-LLN
Date de fabrication	18/12/2017

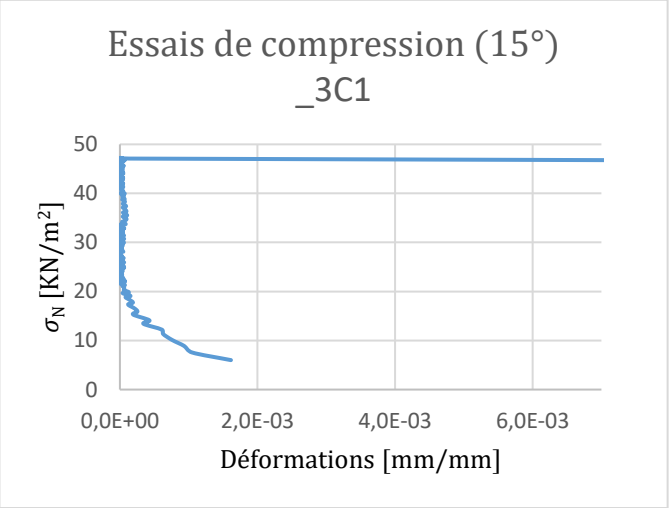
Composition du grout :

Dimensions	Composition	Désignation	E/C	Quantité	Mise en place du grout
$35 \times 50\ mm$	Grout	Groutex 608_ Cloquette	0.112	25 kg	
	Eau			2.8 l	

Résistance à la compression (15°)								
Résultats échantillons	ID	Charge de rupture (KN)	Résistance					
			$\sigma_N[MPa]$	$\sigma_T[MPa]$	Moyenne $[MPa]$		$COV\%$	
Age (+ 7 Jours)	1C2	47,07	47,260	12,660	48.675	13.045	4,12	1,11
	3C1	49,89	50,090	13,421				

Les courbes de comportement à la compression du grout :





Annexe_X5 : Caractéristiques mécaniques du grout _Essai de traction

Nature de l'essai :

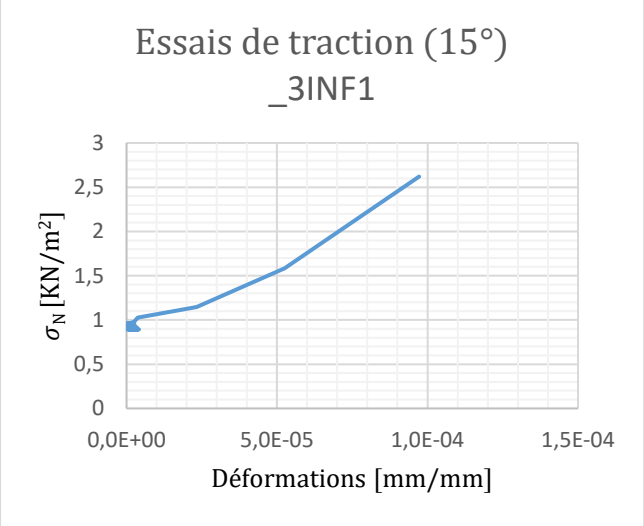
Date de l'essai	27/03/2018
Nature de l'essai	Essai d'information
ID et dimensions des éprouvettes	1INF2 & 3INF1
Lieu de fabrication	Laboratoire LEMSC_UCL-LLN
Date de fabrication	08/12/2017

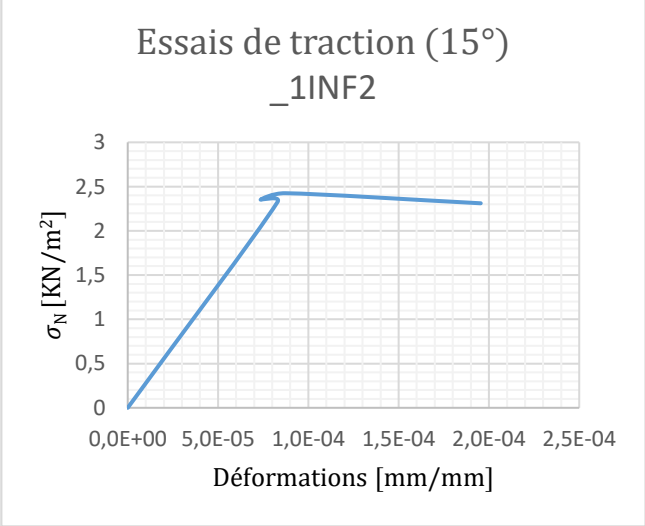
Composition du grout :

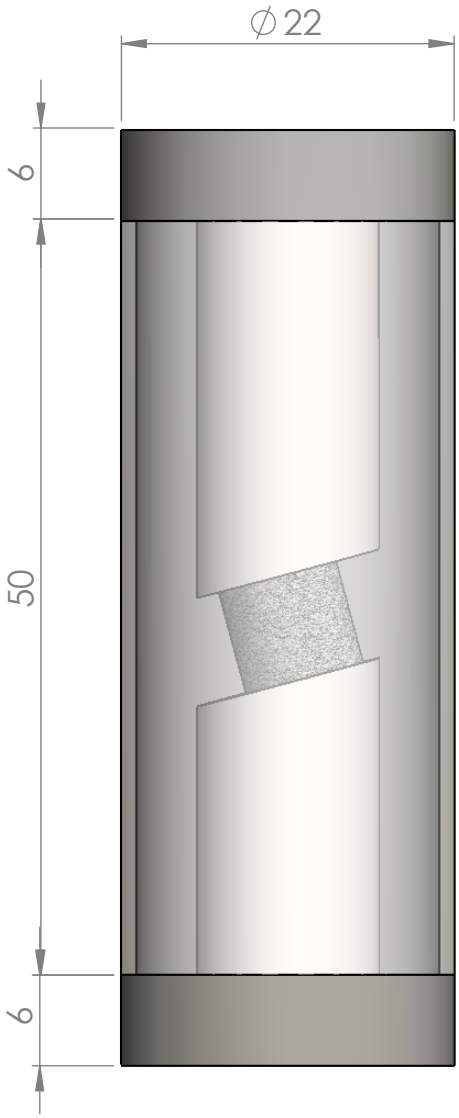
Dimensions	Composition	Désignation	E/C	Quantité	Mise en place du grout
$35 \times 50\ mm$	Grout	Groutex 608_ Cloquette	0.112	25 kg	
	Eau			2.8 l	

Essai de traction								
Résultats échantillons	ID	Charge de rupture (KN)	Résistance					
			$\sigma_N[MPa]$	$\sigma_T[MPa]$	Moyenne $[MPa]$		$COV\%$	
Age (+ 7 jours)	1INF2	2,42	2,43	0,65	2,52	0,68	0,36	0,06
	3INF1	2,61	2,62	0,70				

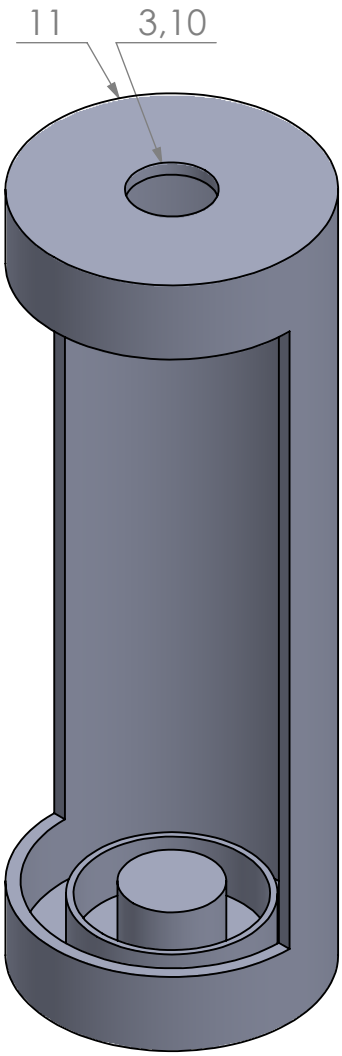
Les courbes de comportement du grout :



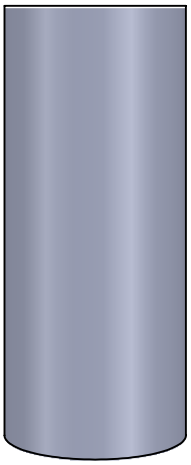


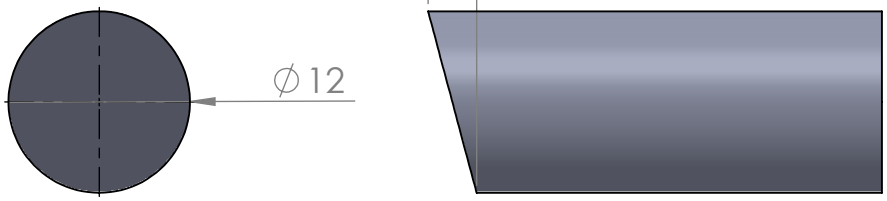


SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS APPLIQUER L'ECHELLE	REVISION		
	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:			
AUTEUR	Oualid Boukerrou	O.BKR	26/2/2018	Combined compression & shear apparatus			
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:	No. DE PLAN		A4
				Acier galvanisé et Plexiglas			
				MASSE:	ECHELLE:1:10	FEUILLE 1 SUR 1	

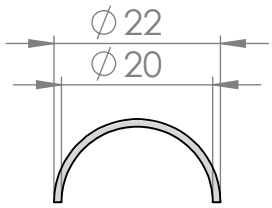


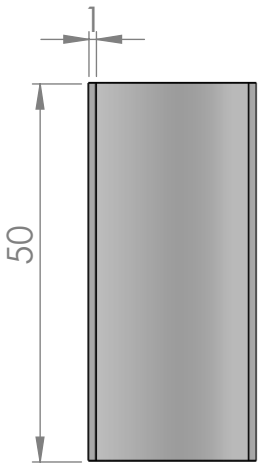
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS APPLIQUER L'ECHELLE	REVISION
	NOM	SIGNATURE	DATE			TITRE:	
AUTEUR	Oualid Boukerrou	O.BKR	26/2/2018			Water container piece	
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN	A4
				Acier galvanisé			
				MASSE:		ECHELLE:1:10	FEUILLE 1 SUR 1

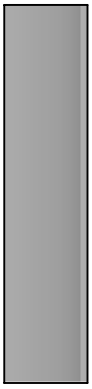




SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS APPLIQUER L'ECHELLE	REVISION		
	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:			
AUTEUR	Oualid Boukerrou	O.BKR	26/2/2018	inclined force application piece			
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:	No. DE PLAN		A4
				Acier galvanisé			
				MASSE:	ECHELLE:1:10	FEUILLE 1 SUR 1	







SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS APPLIQUER L'ECHELLE	REVISION		
	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:			
AUTEUR	Oualid Boukerrou	O.BKR	26/2/2018	plexiglass cover			
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:	No. DE PLAN	A4	
				Acier galvanisé			
				MASSE:	ECHELLE:1:10	FEUILLE 1 SUR 1	

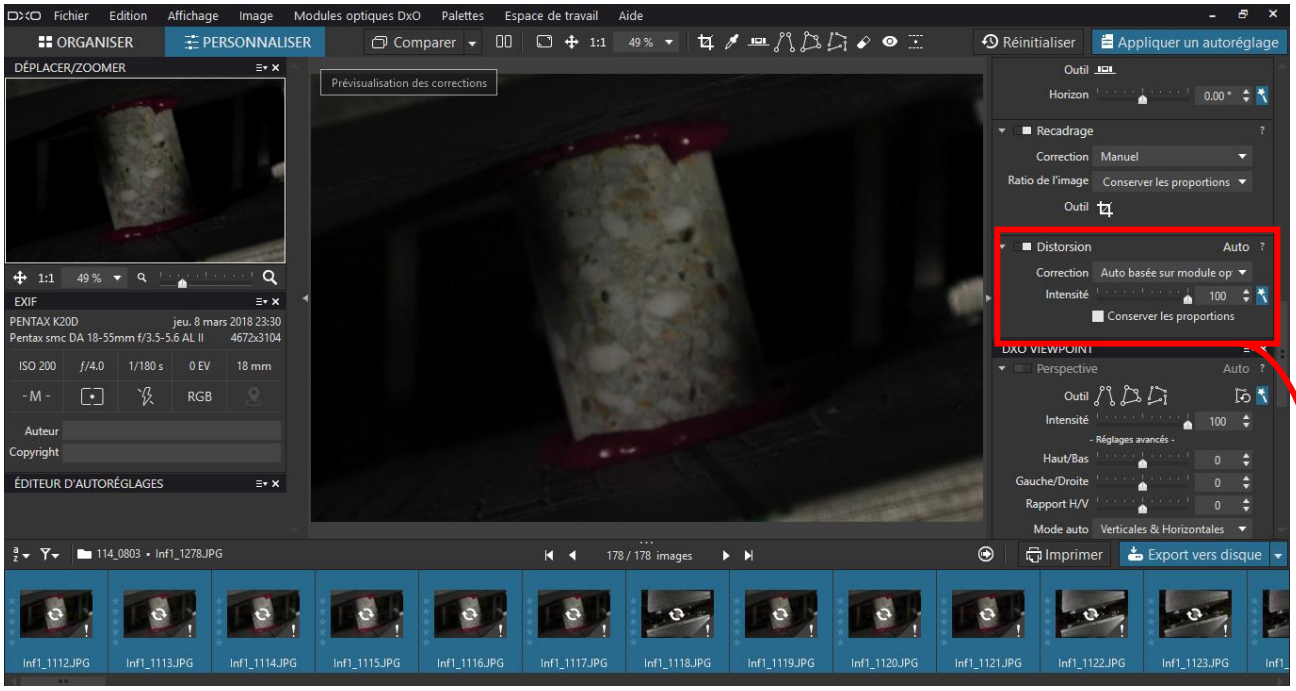
Annexe_X7 :

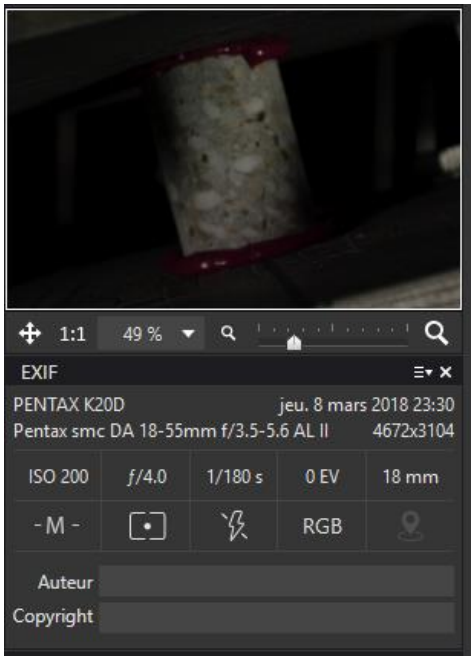
Exemple détaillé de l'analyse et de traitement d'image par la méthode « Digital Image correlation » sur une éprouvette de grout soumise à la fatigue.

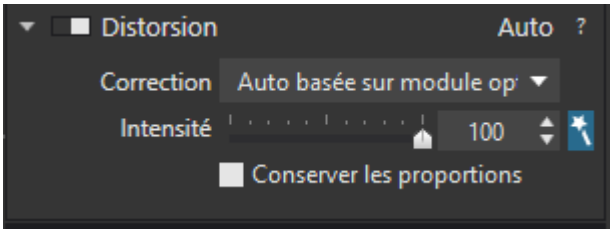
Deux grandes étapes pour réaliser un traitement d'image correct pour la méthode « Digital Image correlation »

- Acquisition des images successives, correction de la distorsion liée à l'objectif de l'appareil photo et correction de la planéité de l'échantillon à l'aide de logiciel DXO_photoLab et ImageJ.
- Traitement des images par Ncorr (Logiciel open source).

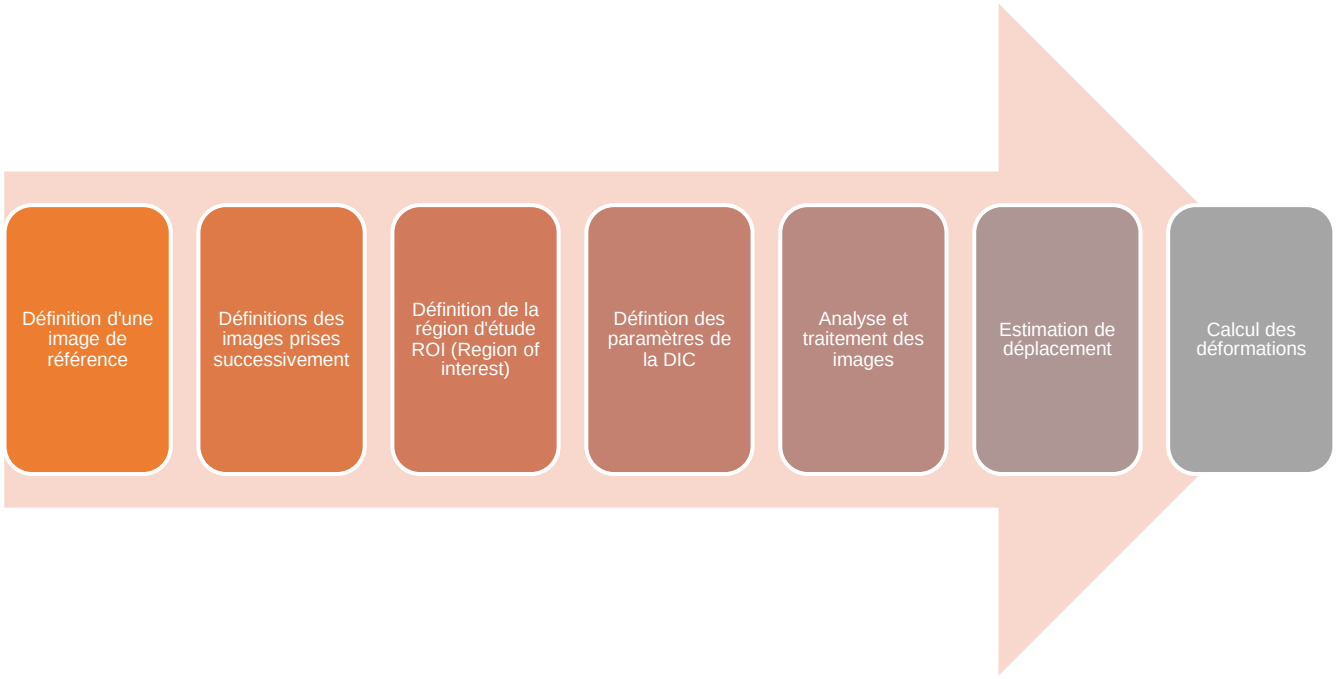
1. Acquisition et correction des images avant traitement avec Ncorr



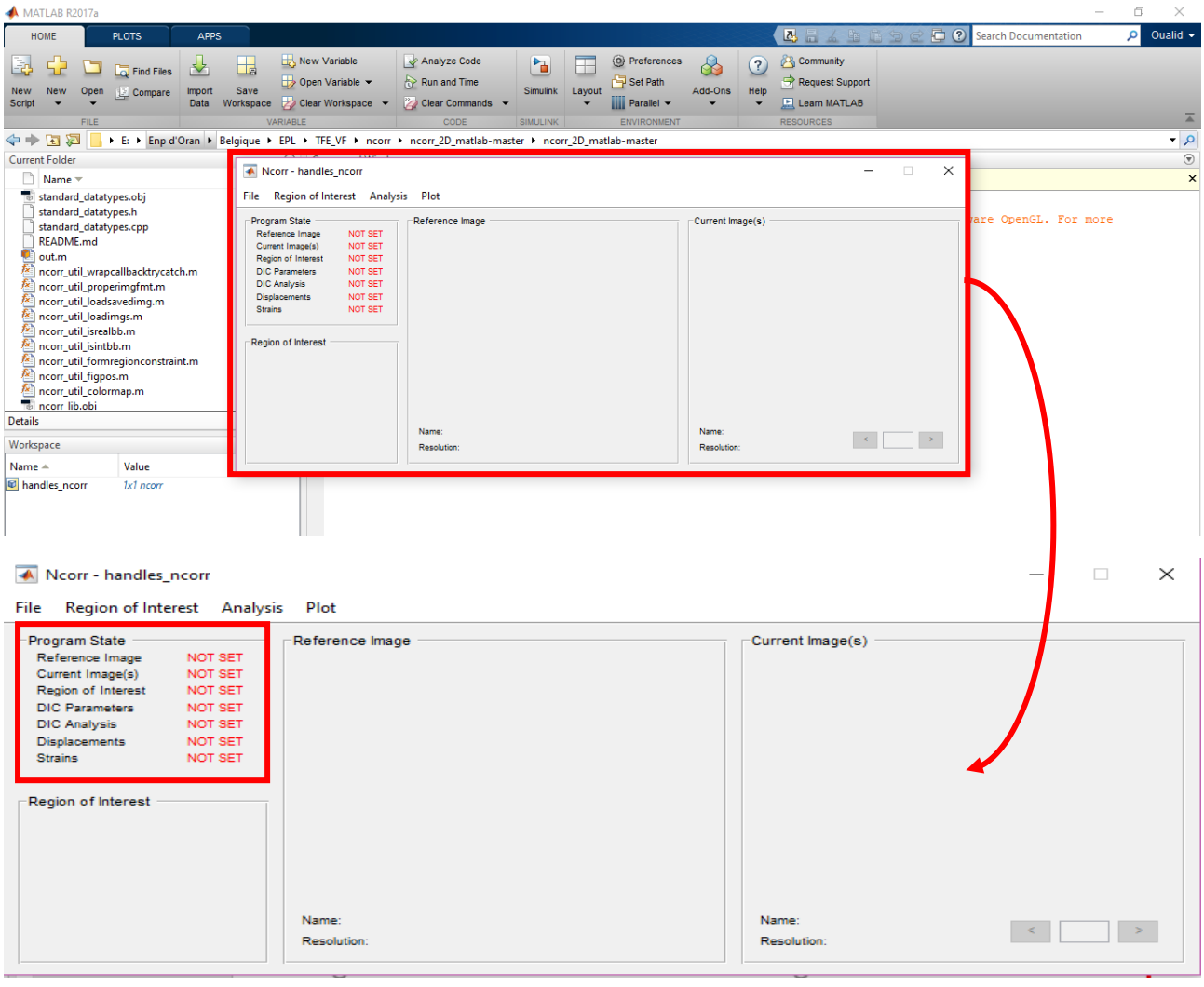




2. Traitement et calcul des déplacements et de déformations avec Ncorr



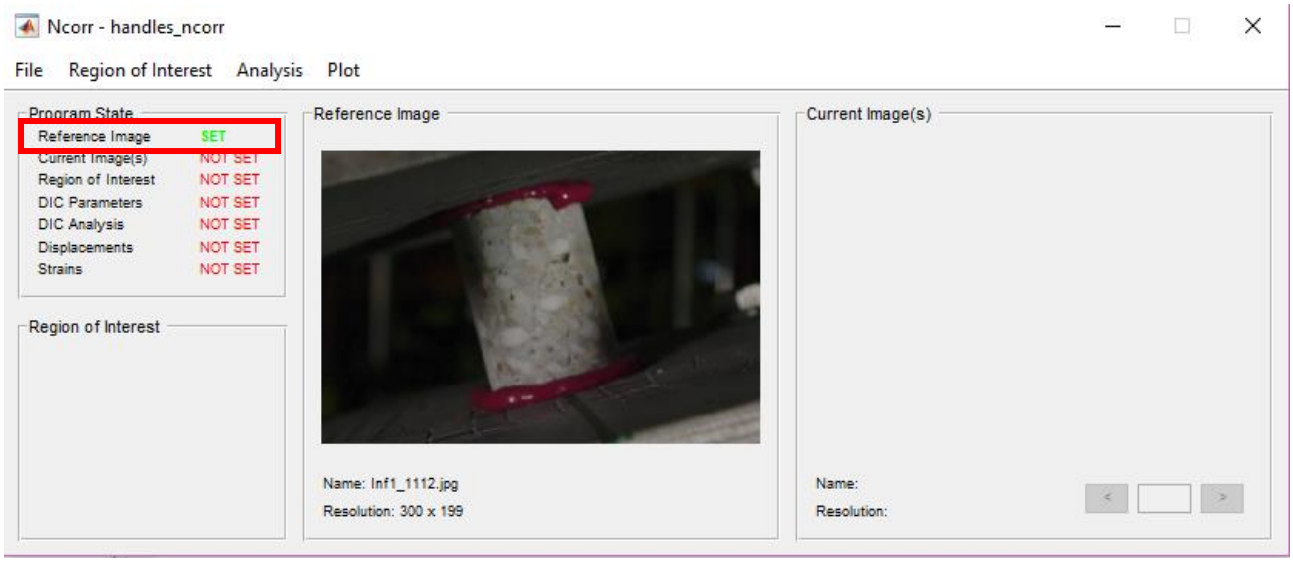
Chacune de ces étapes peut être modifiée à tout moment, tant que les dépendances sont respectées. L'état du programme est visible dans le coin supérieur gauche de l'interface graphique principale de Ncorr, comme illustré ci-dessous :



Cela permet à l'utilisateur de savoir à quel stade il est actuellement et ce qui devrait arriver ensuite. L'état est répertorié dans l'ordre séquentiel pour plus de commodité. Dans l'exemple ci-dessous, l'état indique à l'utilisateur que l'image de référence est chargée et que les images suivantes et la configuration des paramètres DIC doivent se poursuivre ensuite.

2.1. Définition de l'image de référence :

En utilisant l'interface graphique de « Ncorr », en allant sur File > Load a reference image.

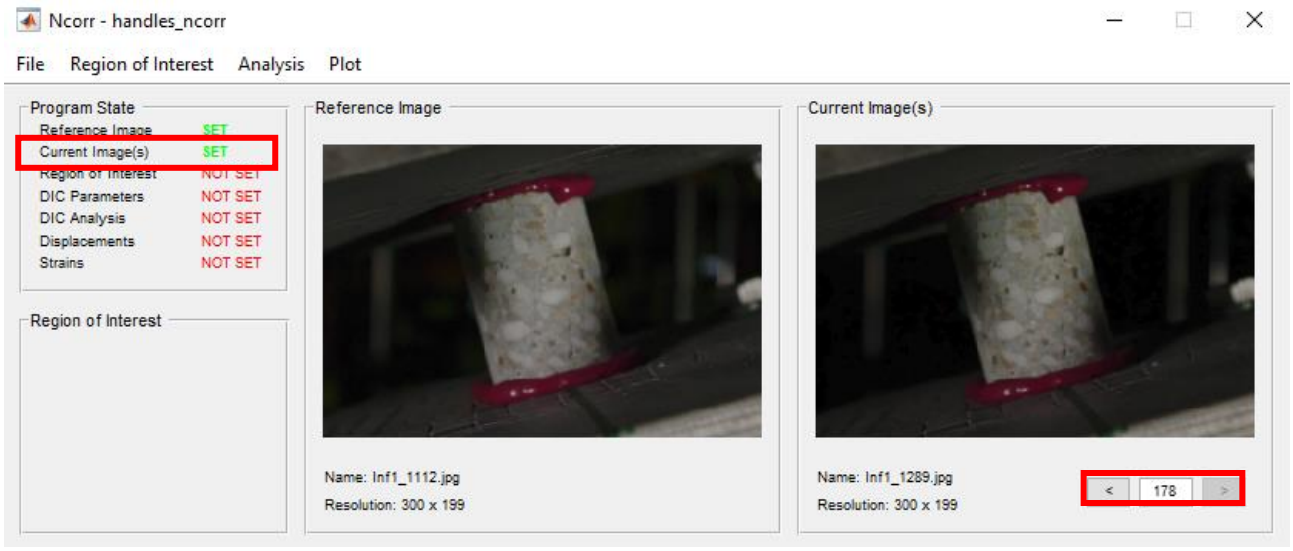


L'une des principales différences entre la définition de l'image de référence et le(s) image(s) en cours par rapport à l'image de référence est que plusieurs images peuvent être chargées pour la configuration actuelle. À cause de cela, le programme a besoin d'un moyen de commander le(s) image(s) actuelles si plus d'un est chargé. Pour ce faire, les images doivent avoir le format de nom indiqué ci-dessous :

Nom _ #. Ext

Où "Nom" est le nom de l'ensemble des images, "#" est un nombre associé à l'image, et "ext" est l'extension de l'image, qui doit être soit .jpg, .tif, .png, ou .bmp (Exp : "Inf1_20.png"). On note que cette convention de nommage n'est requise que si plus d'une image actuelle est chargée via l'interface graphique.

Après le téléchargement des images actuelles, des boutons en bas à droite de l'interface graphique Ncorr sont activés et permettent de faire défiler les images comme indiqué ci-dessous :



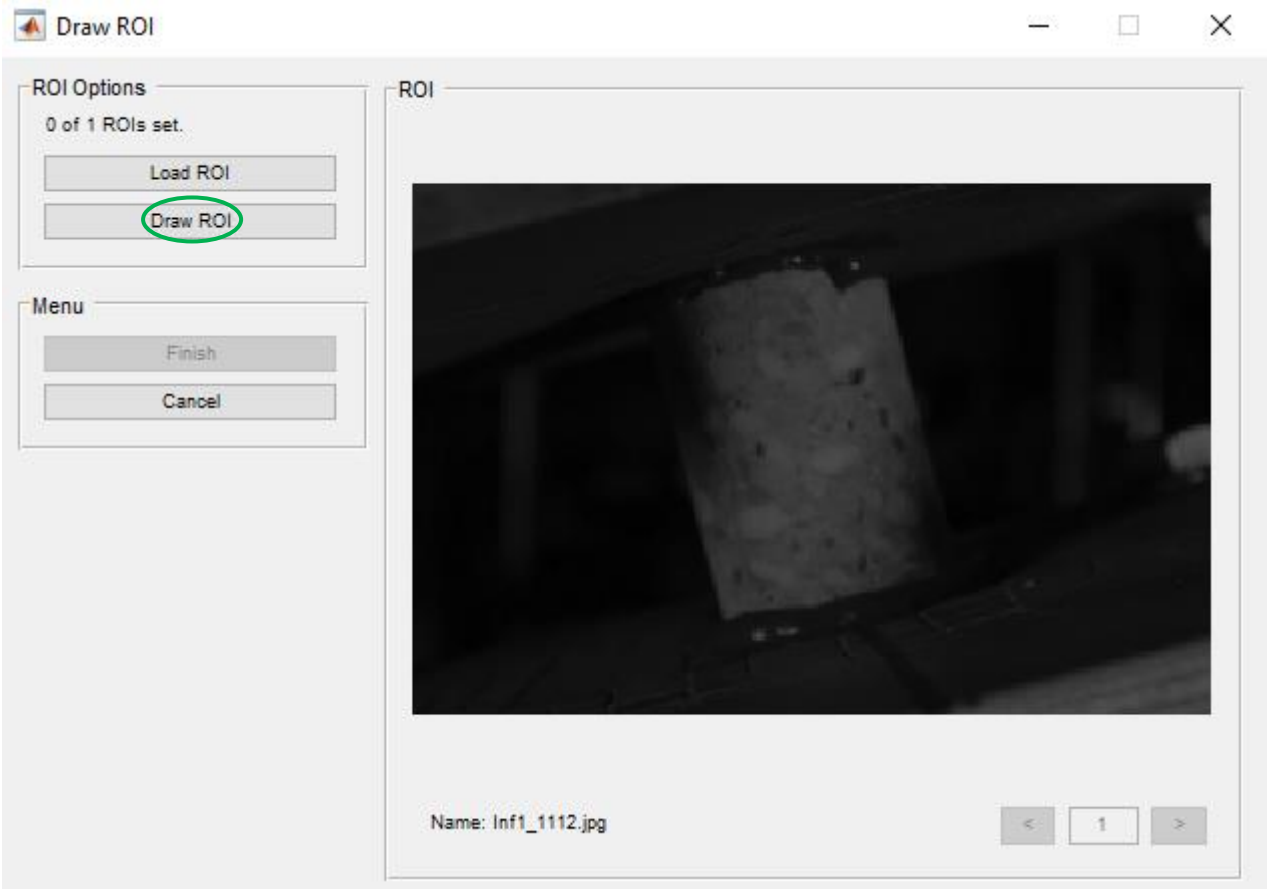
Les images actuelles doivent être classées correctement en fonction de leur numéro, et la dernière image de la séquence apparaîtra initialement par défaut. Il est préférable de les parcourir afin de s'assurer que la commande est correcte.

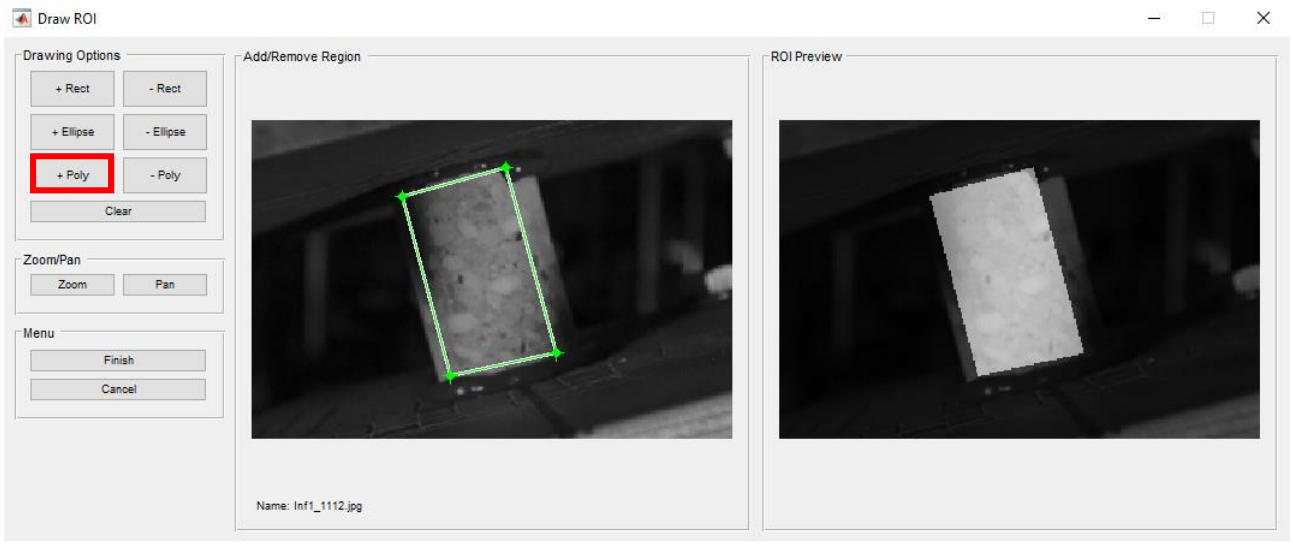
2.2. Définition des limites géométriques de la zone d'étude

Deux façons de définir la région d'intérêt (ROI) : via l'interface graphique ou via le terminal MATLAB. Le ROI devrait être un tableau de la même taille que l'image de référence ou l'image actuelle (cela dépend du type d'analyse choisi, expliqué plus en détail dans les sections suivantes. Le ROI est défini par rapport à l'image de référence). En outre, les régions blanches représentent la zone d'étude, et les régions noires sont en dehors du ROI. Il est également recommandé de laisser une bordure noire près des bords de l'image.

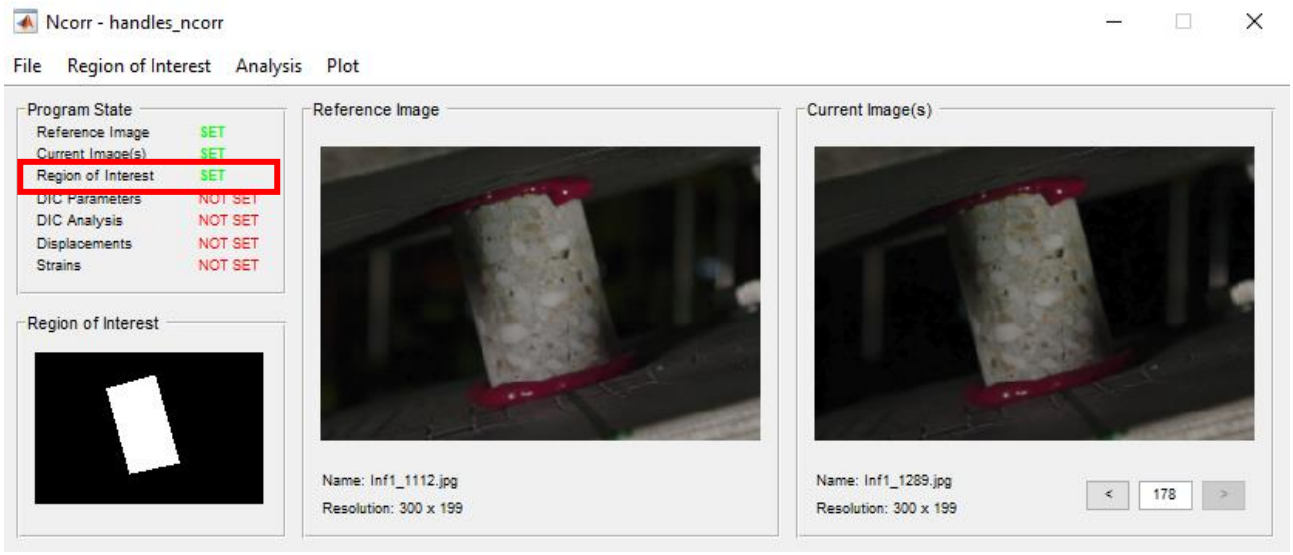
Charger le ROI : La première façon de définir la région d'étude consiste à le charger depuis une image en allant sur : Region of interest > Define reference ROI et en appuyant sur le bouton Load the ROI. C'est la manière recommandée de définir une ROI car vous pouvez utiliser un programme comme Photoshop pour tracer avec précision un aperçu de l'échantillon afin d'obtenir le meilleur ROI. Le seul problème avec cette méthode est que cela peut être fastidieux.

Dessiner le ROI : La deuxième façon de définir le ROI consiste à dessiner le ROI directement dans MATLAB en utilisant Region of Interest > Set ROI de référence, puis en appuyant sur le bouton Draw ROI. C'est la méthode préférée pour l'analyse préliminaire car elle peut être faite rapidement. Un exemple de ROI est montré ci-dessous et a été construit en utilisant "+ Poly"





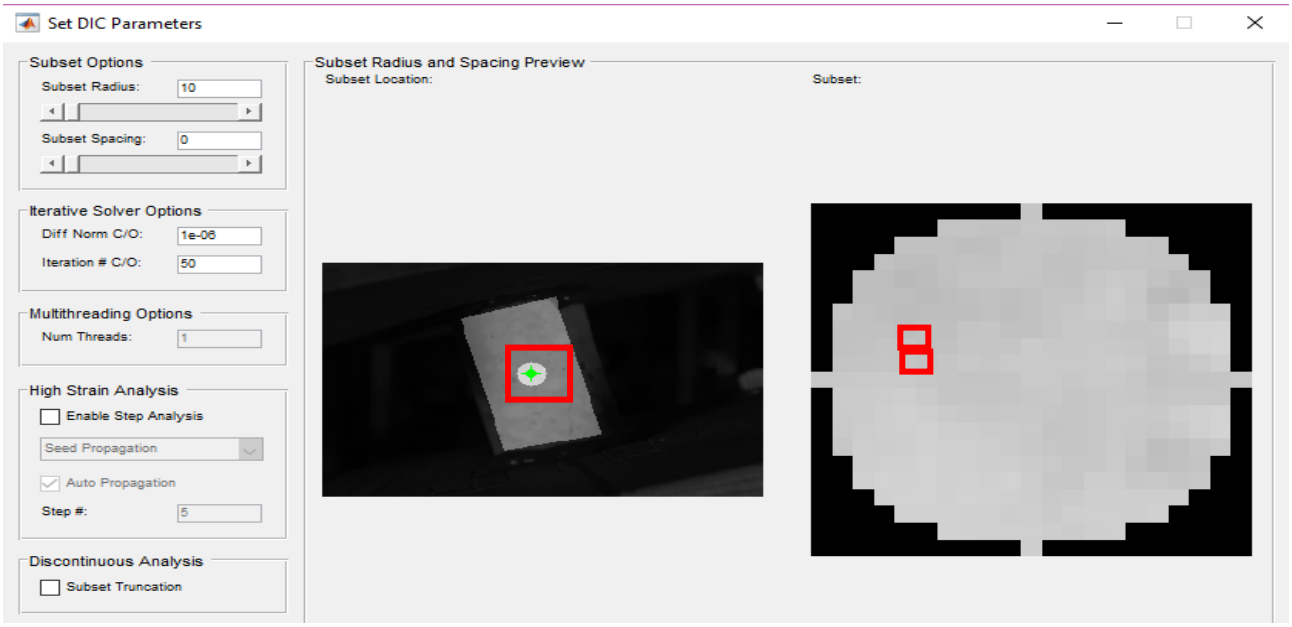
(*) Le polygone est en vert, cela signifie que la zone d'étude est entièrement incluse dans le même matériau (grout dans ce cas).



2.3. Définition des paramètres DIC

Les paramètres DIC peuvent être définis en allant à Analysis > Set DIC Parameters. L'algorithme DIC principal utilisé dans Ncorr est basé sur le cadre RG-DIC de Bing Pan. RG-DIC est également très robuste et efficace sur le plan des calculs. Plus de détails peuvent être trouvés dans l'article de Bing Pan sur RG-DIC ainsi que la section "DIC Algorithms" sur le site ncorr.com.

Une interface graphique doit apparaître comme indiqué ci-dessous



(*) l'espacement des sous-ensembles de 0 est montré dans la figure pour mieux illustrer les points espacés sur le sous-ensemble zoomé, un tel espacement de sous-ensembles a été utilisé pour obtenir des résultats de résolution plus élevés.

Il y a plusieurs paramètres à régler dans cette interface graphique. Le premier est évidemment les menus sur la gauche, mais il est également important de noter que l'aperçu du sous-ensemble est interactif. Un point vert (mis en évidence par un carré rouge) est placé dans les axes étiquetés "Emplacement du sous-ensemble". Ce point est déplaçable et constitue le point central du sous-ensemble représenté à droite. Le sous-ensemble sur la droite donne une idée de ce que l'espacement des sous-ensembles (espace entre les deux points dans les carrés rouges) et des sous-ensembles.

Options de sous-ensemble : Ces options sont les principaux composants de l'analyse DIC. Ils dictent la taille des sous-ensembles et l'espacement entre eux. La composante d'espacement est utilisée pour réduire la charge de calcul. Il y a des valeurs par défaut pour les deux options, mais c'est à l'utilisateur de sélectionner les paramètres les plus optimaux. L'option la plus importante pour obtenir un rayon du sous-ensemble correct. Il existe une abondante littérature disponible pour la sélection de la taille du sous-ensemble, ainsi que les effets de la taille des sous-ensembles sur l'analyse DIC, mais la plupart des conclusions de ces études reposent souvent sur des heuristiques et des observations empiriques. Dans l'ensemble, l'idée principale est de sélectionner le plus petit sous-ensemble possible qui n'aboutit pas à des données de déplacement bruyantes (car les sous-ensembles plus importants tendent à avoir un effet de lissage). Certaines itérations peuvent être nécessaires pour obtenir cette option.

Options de solveur itératif : Le solveur itératif utilisé dans l'analyse DIC est la technique d'alignement d'image de composition inverse (Un bon article sur ce sujet est Baker et al et Bing Pan sur son adaptation pour cette technique DIC). Les critères de sortie pour ce solveur itératif sont la norme du vecteur de différence ainsi que le nombre d'itérations. Les options par défaut pour le solveur itératif sont en réalité assez strictes, mais elles peuvent être assouplies si une analyse plus rapide est souhaitée en réduisant le seuil de nombre d'itérations ainsi qu'en augmentant la norme de la coupure du vecteur de différence.

Options Multithreading : Ncorr a la capacité d'utiliser le multithreading pour accélérer le processus de calcul. Le nombre de threads par défaut est le nombre de cœurs spécifié par l'utilisateur lors de l'installation, même si le choix de modifier ce nombre à nouveau disponible via cette interface graphique.

Analyse de grandes déformations : Dans l'exemple utilisé spécifiquement dans cette section, une analyse de déformation élevée n'est pas requise. Cependant, l'analyse des contraintes élevées fonctionne en mettant à jour l'image de référence (ainsi que le ROI), puis en ajoutant des champs de déplacement. Si ce paramètre est activé, la mise à jour peut s'effectuer de deux manières différentes : Dans le cas de l'option "propagation de seeds", l'image de référence sera mise à jour en fonction du coefficient de corrélation et du nombre d'itérations. Si ceux-ci dépassent certains seuils heuristiques, l'image de référence sera mise à jour. Pour l'approche "leap frog", l'utilisateur peut sélectionner manuellement le nombre d'images à utiliser avant de mettre à jour l'image de référence. Pour les deux options, si la case à cocher "Propagation automatique" est activée, les seeds seront placées automatiquement pour l'image de référence mise à jour en fonction de leurs déplacements précédents et l'analyse DIC se poursuivra automatiquement jusqu'à la fin. Si cette case n'est pas cochée, l'utilisateur devra remplacer les seeds manuellement chaque fois que l'image de référence est mise à jour.

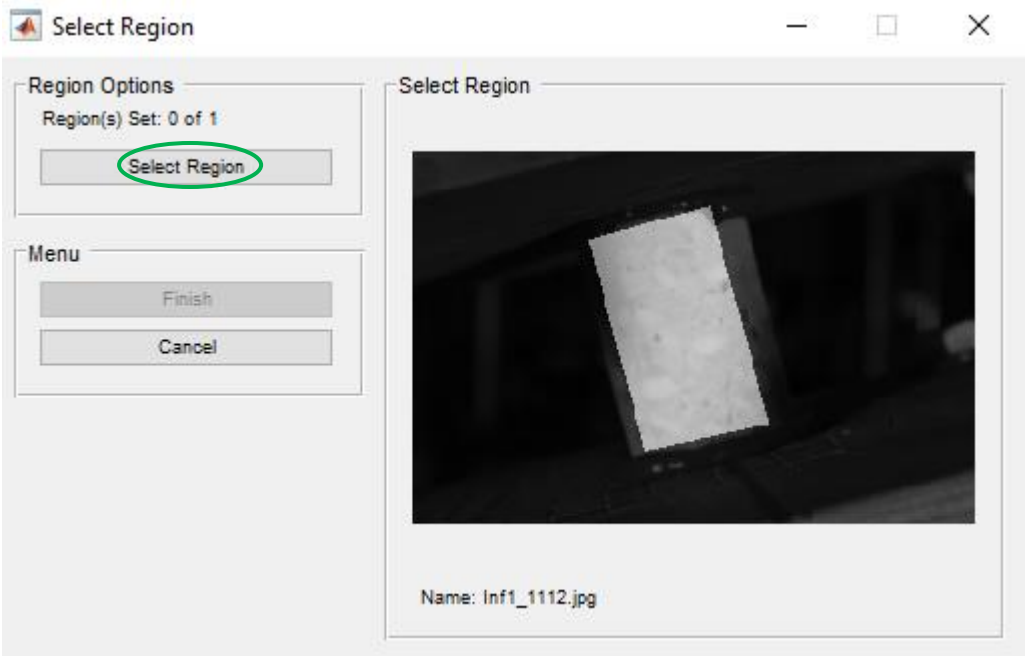
Analyse discontinue : Pour cet exemple, les déplacements discontinus ne sont pas anticipés, donc cette fonctionnalité n'est pas utilisée. Quoi qu'il en soit, la troncature de sous-ensembles est une caractéristique qui empêche les sous-ensembles de s'enrouler autour d'un fond de fissure, ce qui peut causer des distorsions près du bout de fissure. Cette caractéristique est développée dans la section des déplacements discontinus.

2.4. Analyse DIC

L'analyse DIC réelle est effectuée en accédant à Analysis> Perform a DIC Analysis dans l'interface graphique principale de Ncorr. La première étape consiste à sélectionner une région (définie comme une région contiguë) comme indiqué ci-dessous.

Cette étape implique la sélection d'une région contiguë à traiter. Dans cet exemple, une seule région sera traitée (car une seule est présente), mais il est possible d'avoir plus d'une région lors de la création du ROI. Appuyez sur le bouton "Select Region" et placez le point n'importe où dans la région pour le sélectionner pour le traitement, comme indiqué ci-dessous :

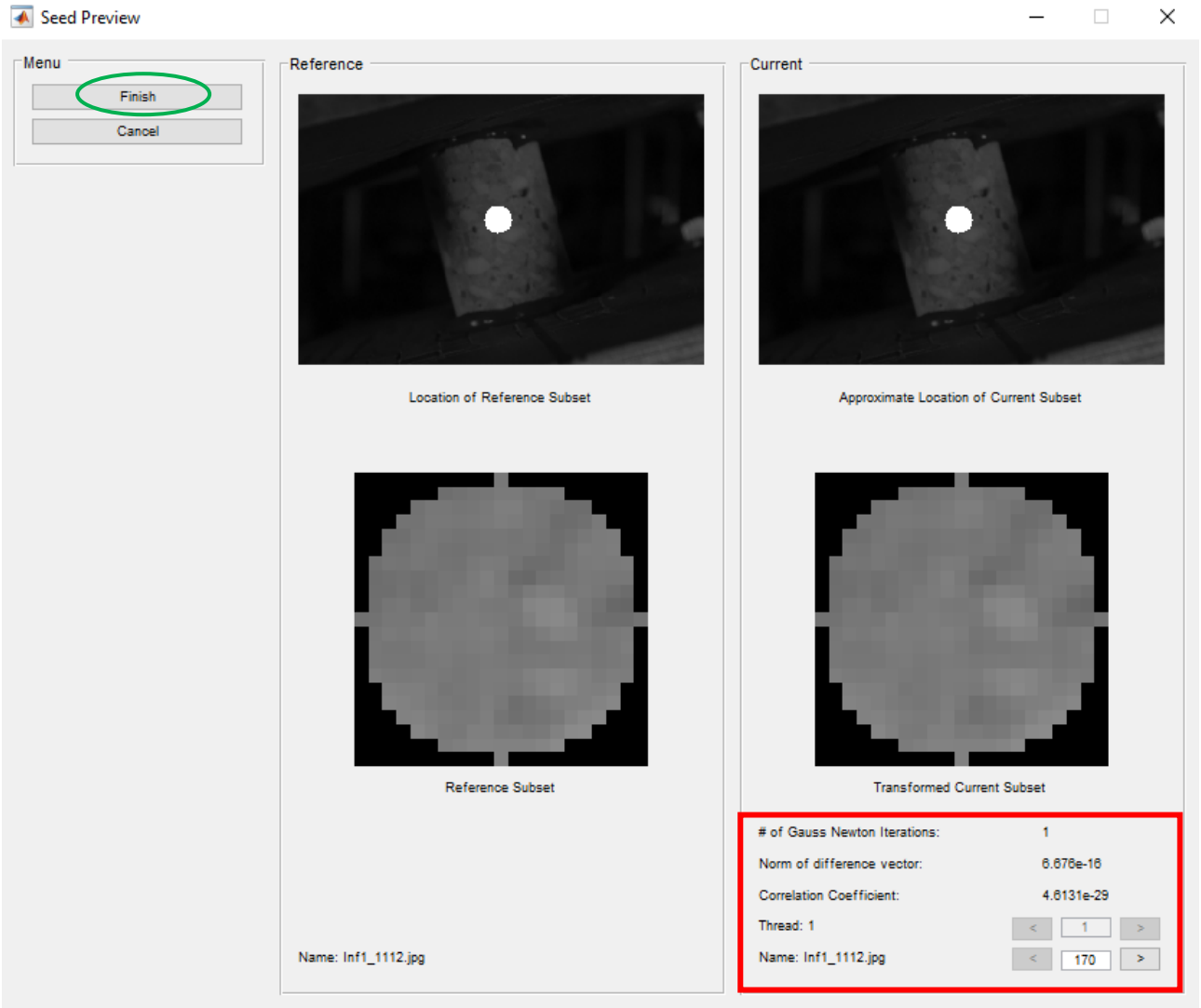
Placement des points.



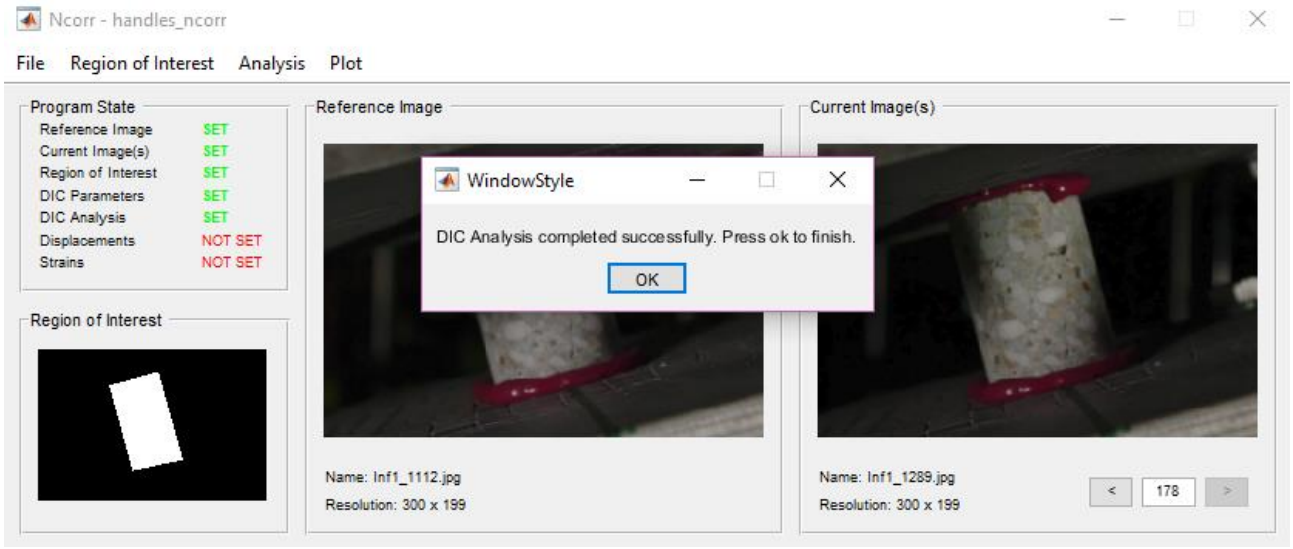
Choix de la région : Le processus de placement des seeds sert à trois fins: 1) il fournit des estimations initiales pour l'analyse RG-DIC, 2) il partitionne le ROI de sorte que chaque partition peut être calculée en parallèle si le multithreading est activé, et 3) dans le cas de l'analyse de l'étape de déformation (avec la propagation de seeds sélectionnés), elle met à jour l'image de référence en

fonction de certains seuils heuristiques pour les itérations aux coefficients de convergence et de corrélation des seeds. Ainsi, le placement des seeds est très important. Pour satisfaire à la première exigence, les seeds doivent être placées de manière à ne pas sortir du champ de vision (FOV) pendant la déformation. Pour la deuxième exigence, les seeds doivent être placées de telle sorte que le ROI soit réparti uniformément. Pour la troisième exigence, les seeds doivent être placées dans des régions de forte déformation de sorte que l'image de référence soit mise à jour de manière appropriée.

Aperçu de seeds : Une fois le placement des seeds terminé, un aperçu apparaît. Il est important que l'utilisateur vérifie les seeds via cette interface graphique car il est possible que les seeds puissent être traitées de manière incorrecte. Les raisons principales de l'erreur de seeds peuvent être soit un défaut de convergence (cela arrive rarement tant qu'il n'y a pas de grandes rotations ou déformations), soit que les seeds se déplacent en dehors de l'image courante au fur et à mesure que l'échantillon se déforme. Un exemple d'aperçu de seeds appropriés est illustré ci-dessous :

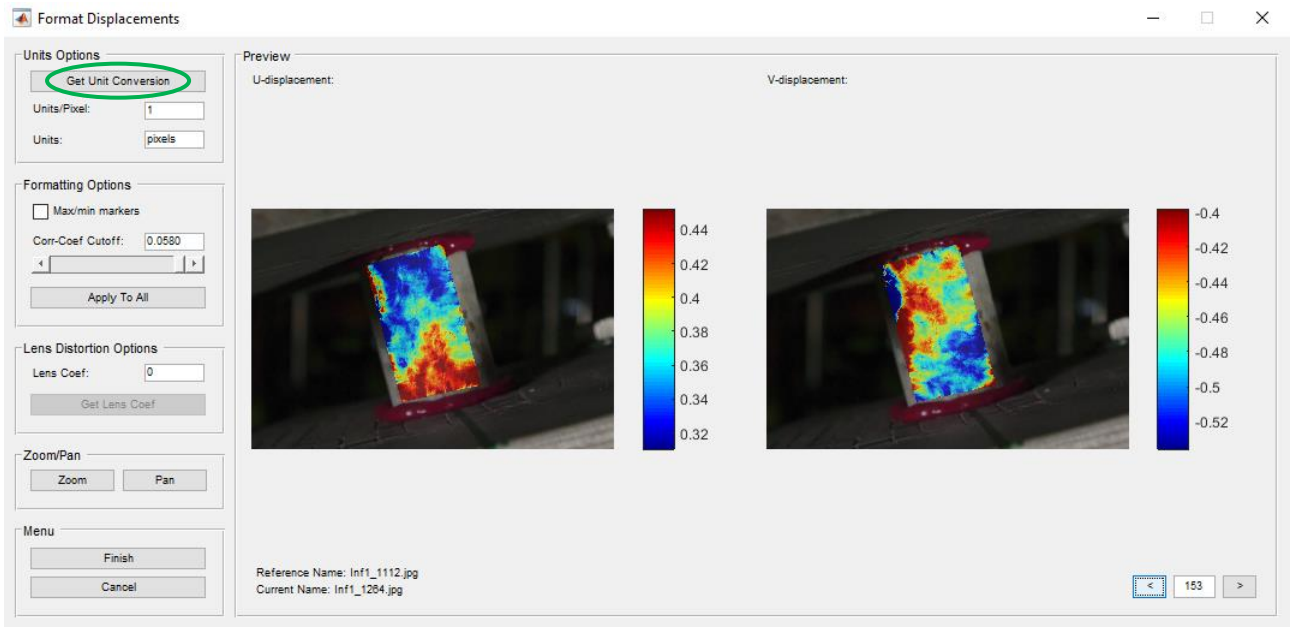


On note que tous les emplacements de seeds dans l'image de référence semblent correspondre de manière appropriée aux emplacements dans l'image actuelle. De plus, le sous-ensemble de référence et le sous-ensemble des images courantes transformées semblent très similaires. Enfin, le nombre d'itérations à la convergence était bien inférieur au seuil, et le coefficient de corrélation relativement faible impliquait toutes les deux un bon placement des seeds.

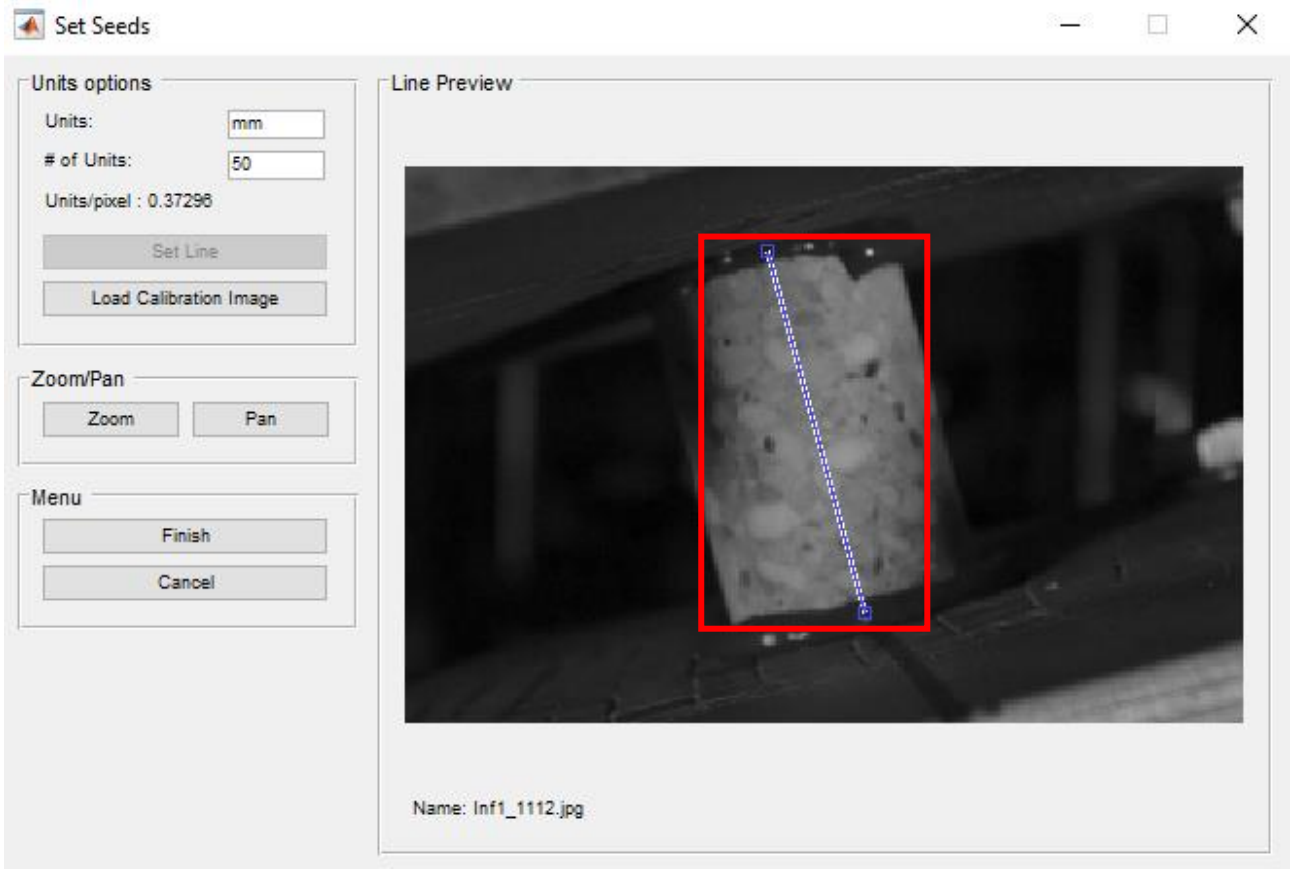


2.5. Calcul des déplacements

Les déplacements peuvent être visualisés après le calcul en allant dans Analysis > Format Displacements dans l'interface graphique de Ncorr. Cette dernière devrait ressembler à ceci :



Unités Options : Ces options sont utilisées pour convertir les déplacements des pixels en unités réelles. La valeur peut être introduite directement si les dimensions sont connues, ou en cliquant sur le bouton "Get Unit Conversion" pour charger une image avec une dimension connue. La plupart des tests sont effectués avec une caméra standard sur un échantillon, la manière la plus simple de profiter de cette fonctionnalité est de remplacer l'échantillon par une règle après l'expérience pour pouvoir mesurer la conversion de l'unité. Un exemple de l'interface graphique est illustré ci-dessous

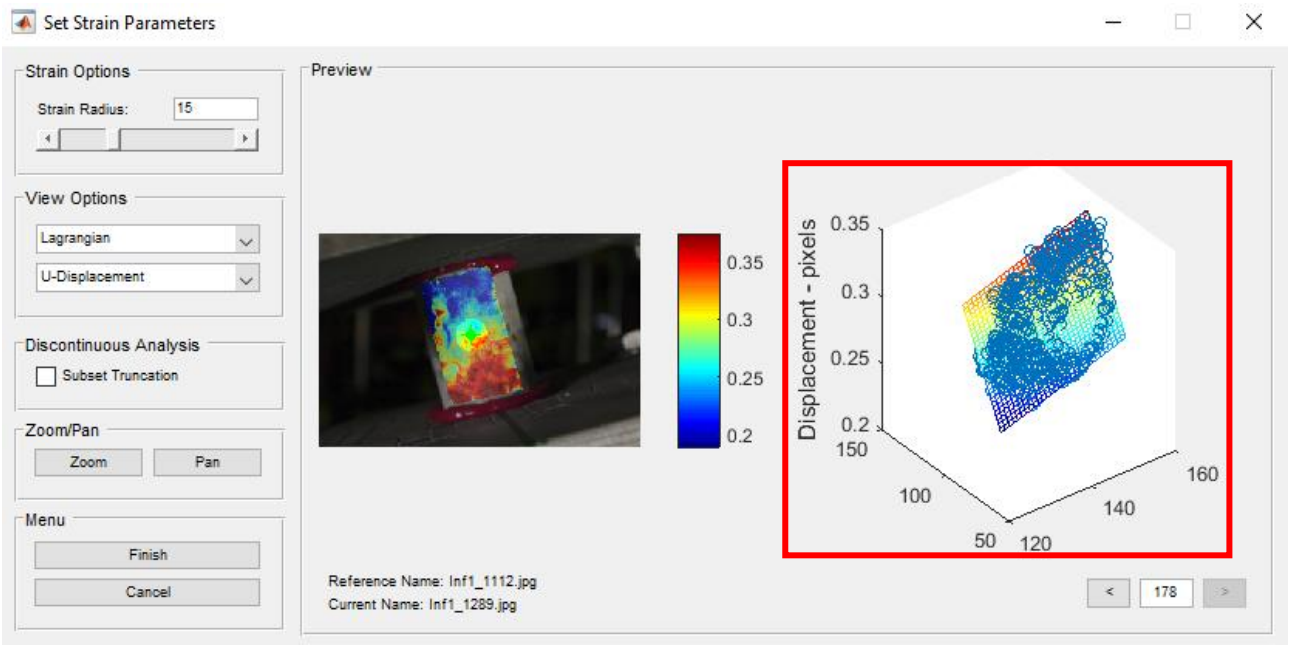


2.6. Calcul des déformations

L'analyse des déformations commence par la section Analysis > Calculate deformations dans l'interface graphique principale Ncorr. Les déformations sont calculées à partir des données de déplacement en utilisant un plan des moindres carrés ajusté à un groupe local de points de données qui est basé sur le travail de Bing Pan sur le calcul de la déformation. Les gradients de déplacement sont ensuite trouvés à partir des paramètres du plan ; ces gradients sont utilisés pour calculer les déformations Green-Lagrangian et Eulerian-Almansi. Une description plus détaillée est donnée dans la section "Algorithmes DIC" sur le site ncorr.com.

Options de déformation : Le seul paramètre qui peut être modifier ici est le rayon de déformation. C'est le rayon d'un cercle qui sélectionne un groupe de points pour s'adapter à un plan. Un aperçu est fourni afin que l'utilisateur puisse visualiser le plan. Le choix du rayon de déformation idéal est similaire à la sélection du rayon de sous-ensemble idéal, en ce sens que le plus petit rayon est souhaité, ce qui ne donne pas de données de déformation bruyantes. Le rayon par défaut est défini sur 15, mais il appartient à l'utilisateur de sélectionner le rayon le plus optimal pour ses données.

Le données mises en rectangle rouge dans la boîte rouge est déplaçable et met à jour l'ajustement du plan indiqué sur le côté droit. La méthode recommandée pour utiliser cette analyse consiste à faire glisser le point vers des zones de fortes déformations et à voir si l'ajustement de la courbe est toujours raisonnable. Un exemple de ceci est montré ci-dessous :

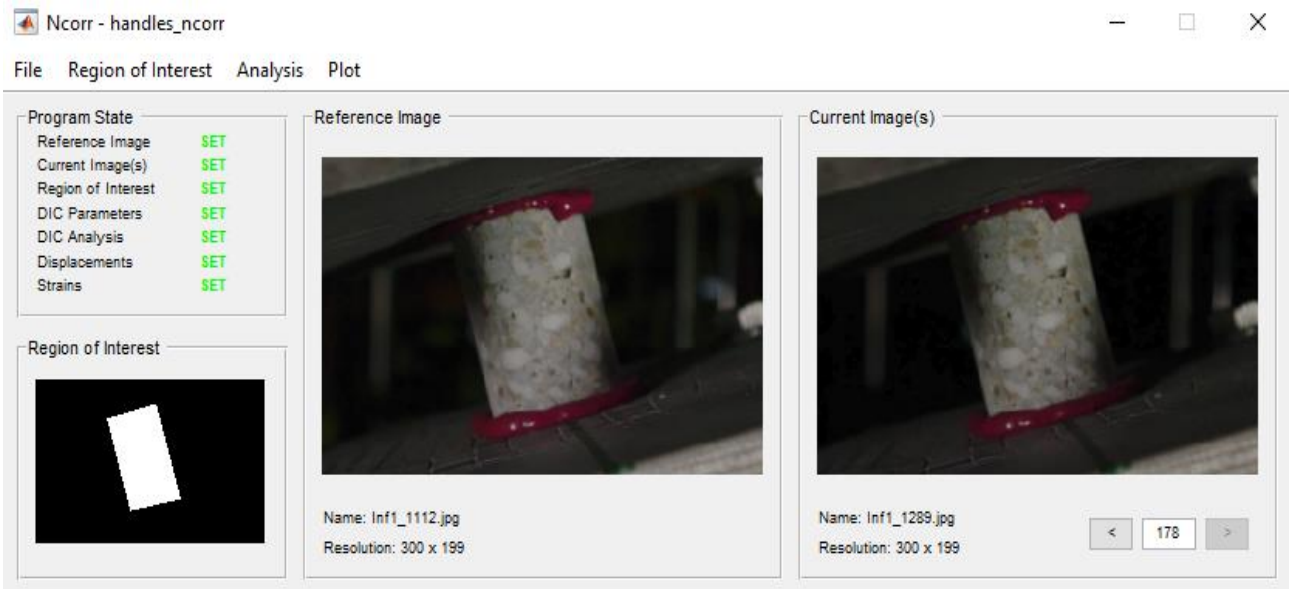


(*) Les points sur le graphique doivent être séquent sur le plan.

Enfin, le rayon de déformation doit être sélectionné par rapport à la dernière image actuelle (qui est affichée en premier par défaut), car cette image aura très probablement les gradients de déplacement les plus élevés.

Options d'affichage : Ces menus déroulants vous permettent de passer des déplacements U aux déplacements V et vice versa. Ils vous permettent également de passer de la perspective lagrangienne à la perspective eulérienne. Par défaut, les déformations Green-Lagrangian et Eulerian-Almansi sont calculées.

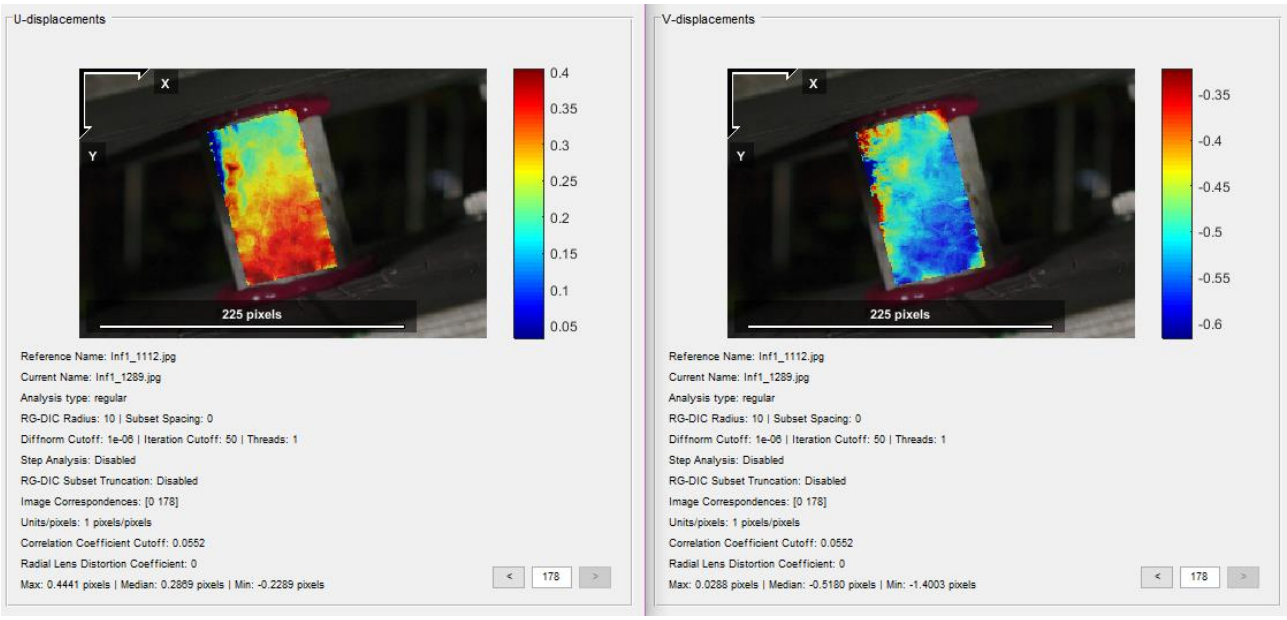
Analyse discontinue : Tout comme pour la méthode DIC, il existe également une option pour utiliser la troncature de sous-ensembles pour les calculs de déformation. Cette caractéristique empêche les sous-ensembles de s'enrouler autour d'un fond de fissure, ce qui peut provoquer des distorsions à proximité du cracktip.



2.7. Résultats graphiques des déplacements et déformations

À ce stade, on suppose que les déplacements et les déformations ont été calculé. Le tracé peut être obtenu en allant dans View Displacement Plots or Plot > View Strain Plots dans l'interface graphique

principale de Ncorr. C'est la dernière étape de l'analyse. Un exemple des tracés est illustré ci-dessous :

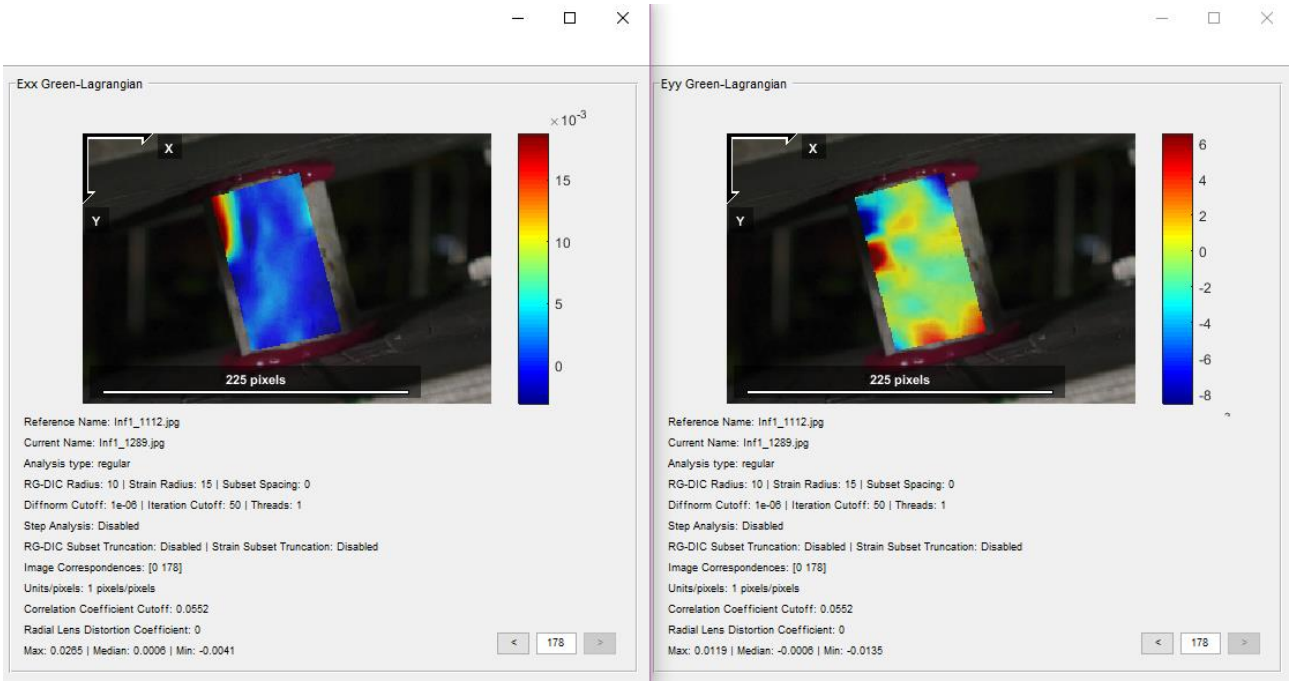


Options d'affichage : Encore une fois, ces options sont assez explicites. Ceux-ci permettent de basculer entre les perspectives lagrangiennes et eulériennes. Pour les déformations, celles-ci alterneront entre les déformations Green-Lagrangian et les tenseurs Eulerian-Almansi. Cette option affectera toutes les courbes de données ouvertes.

Options de la barre d'échelle : Ceci affecte la visibilité et la longueur de la barre d'échelle (affichée en bas à gauche de la courbe). Cette option affectera toutes les courbes de données ouvertes.

Options des axes : Cette option affecte la visibilité des axes (affichée en haut à gauche de la courbe). Cette option affectera toutes les courbes de données ouvertes.

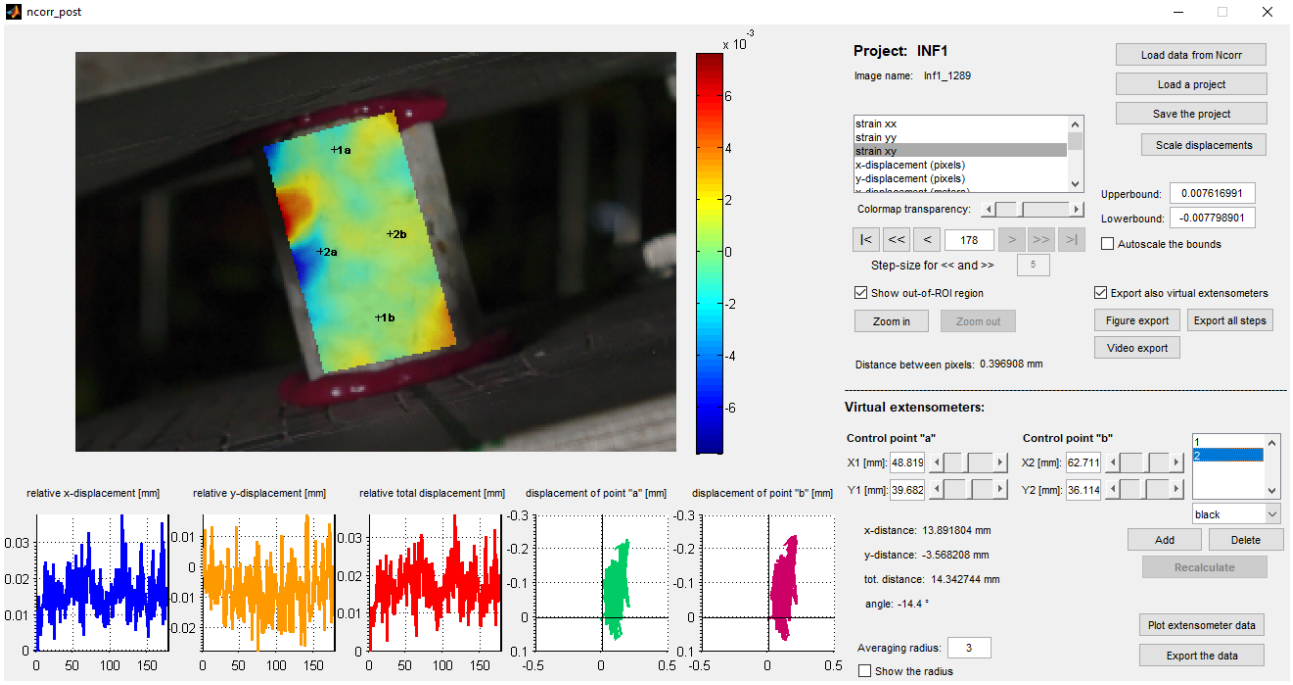
Sauvegarde de la figure : Pour enregistrer une figure en allant dans File > Save Image > Save Image Without Info, File > Save Image > Save Image With Info dans la fenêtre graphique. Cela permettra d'enregistrer les données intéressantes pour les publications, les sites Web ou tout autre but.



2.8. Post-traitement à l'aide de Ncorr_post

L'utilisation d'un complément de Ncorr le Ncorr_post permet de créer un nombre infini d'extensomètres virtuels et d'extraire les données numériques des résultats de déplacements et de déformations de l'éprouvette étudiée.

L'interface graphique de ce complément est présentée dans la figure ci-dessous :



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