

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ

– BOUIRA –



Faculté des Sciences et Des Sciences Appliquées

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**Melle. RAGUEB Imane**

**Melle. FETTANE Wardia**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 2** en :

**Filière : Génie Civil**

filière : Matériaux en Génie Civil

**Thème**

**Fatigue des bétons fibré par flexion dynamique et  
estimation des paramètres (S-N) par la méthode de trois  
moments et graphique.**

**Devant le jury composé de :**

AIT AHMED Fatiha	MAA	UAMOB	Président
SAOUDI Nacira	MCB	UAMOB	Encadreur
HAMI Brahim	MAA	UAMOB	Examineur

# *Remerciement*

*A l'issue de cette étude nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés dans notre travail*

*Notre sentiment de reconnaissance va plus particulièrement à :*

- *Mdm . SAOUDI Nacira notre promoteur, pour son aide et ses conseils, ainsi que le soutien et la disponibilité dont il a fait preuve à notre égard , du début à la fin de ce travail ;*
- *Messieurs les membres du jury, de nous avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner et de discuter ce travail ;*
- *L'ensemble des enseignants du département Génie civile qui nous ont suivis durant notre formation*

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur dédié du fond du cœur à ceux que nous aimons et remercions, en leur exprimant notre gratitude et notre reconnaissance éternelles*

*Nous dédions ce modeste travail en signe d'amour :*

- *A nos parents pour l'amour et l'affection pour la patience et la compréhension dont –ils n'ont cessé de faire preuve depuis notre venue au monde*
- *A nos frères et sœurs pour leurs apports multiples et leur indéfectible soutien ;*
- *A nos amis et camarades pour leur sympathie et leur soutien permanent*

## **Résumé :**

Dans cette étude, nous avons réalisé un travail expérimentale pour évaluer la performance de la fatigue en flexion par 3 points des bétons renforcé par des fibres métalliques. En mélangeant des fibres d'acier courtes lisses et des fibres à bout crochetés. La majorité des chercheurs montrent que l'inclusion des fibres peut améliorer la performance en fatigue de béton.

Les résultats des essais de fatigue en flexion ont été obtenus à partir de 145 essais de fatigue en flexion par 3 points. Pour étudier les effets de la teneur en fibres sur la performance du béton. Des éprouvettes de  $7 \times 7 \times 27$  cm ont été testées sous chargement de fatigue par flexion en 3 points. En utilisant le Vibrophore HFP 150, sous une fréquence de résonance de 150 Hz. La durée de vie de béton peut être estimée à partir de la distribution de deux paramètres de Weibull en utilisant la méthode graphique et méthode des moments.

## ملخص

في هذا الدراسة أجرينا دراسة تجريبية لتقييم أداء التعب للخرسانة معززة بالألياف المعدنية. عن طريق خلط الألياف الفولاذية القصيرة الملساء والألياف ذات الخطاف، ويوضح معظم الباحثين أن إدراج الألياف يمكن أن يحسن أداء التعب للخرسانة.

تم الحصول على نتائج اختبارات التعب للخرسانة معززة بالألياف المعدنية. من 145 اختبار تعب عبر اختبار الانحناء. لدراسة آثار محتوى الألياف على الأداء الملموس. تم اختبار عينات من  $27 \times 7 \times 7$  سم تحت تحميل باستخدام Vibrophore HFP 150 ، تحت تردد صدق قدره 150 هرتز ، يمكن تقدير عمر الخرسانة من خلال توزيع معلمتين من Weibull باستخدام الطريقة الرسومية وطريقة العزوم الثالثة.

## **Abstract**

In this study, we carried out an experimental study on dynamic behavior of reinforced concrete. By mixing smooth short steel fibers with hooked end fibers, the majority of researchers show that the inclusion of fibers can improve concrete fatigue performance.

The results of the flexural fatigue tests were obtained from 145 bending fatigue tests. To study the effects of fibre content on concrete performance,  $7 \times 7 \times 27$  cm specimens were tested under flexural fatigue loading. By using the Vibrophore HFP 150, under a resonance frequency of 150 Hz. The fatigue life of concrete can be estimated from the distribution of two Weibull parameters using the graphical method and moment method.

# Sommaire

---

## Table des matières

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

### **Chapitre I : Théorie de la fatigue et état L'art**

<b>I. 1 .Introduction à la fatigue par flexion .....</b>	<b>5</b>
I.1.1 Phénomène de fatigue.....	5
I.1.2 Courbe de Wöhler.....	7
I.1.3 Durée de vie.....	7
I.1.4 Essai de fatigue .....	8
<b>I.2 .Détermination des distributions de duré de vie en fatigue.....</b>	<b>9</b>
I.2.1 La méthode graphique .....	10
I.2.2 Méthode des moments .....	11
<b>I.3 Travaux du travail de Arora et Singh (2016) .....</b>	<b>11</b>
I.3.1 Procédure expérimentale .....	12
I.3.3 Essais de fatigue par flexion.....	14
I.3.4 Détermination de la distribution de la résistance à la fatigue.....	16
I.3.5 Résultats et discussion .....	17
I.3.6 Comparaison avec littérature et conclusion.....	21
<b>I.4 Conclusion.....</b>	<b>24</b>

### **Chapitre II : Procédure expérimentale**

<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>26</b>
<b>II.2 Description des éprouvettes .....</b>	<b>26</b>
<b>II.3 Fatigue du béton et la teneur en eau .....</b>	<b>26</b>
II.3.1 Définition de la teneur en eau .....	27
<b>II.4 Essais de fatigue par flexion .....</b>	<b>28</b>

# Sommaire

---

II.4.1 Machine de l'essai de fatigue .....	28
II.4.2 Description générale de Vibrophore .....	29
II.4.3 Les éléments de commande de Vibrowin .....	29
II.4.4 Mise en marche de Vibrophore .....	31
II.4.5 Lancer et terminer VibroWin .....	31
II.4.6 Mise en marche du logicielle d'acquisition .....	32
<b>II.4.7 Procédure d'essai .....</b>	<b>39</b>
<b>II.5 Conclusion .....</b>	<b>40</b>
<b>Chapitre III : Résultats et discussion</b>	
<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>42</b>
III.1.1.La durée de vie en fatigue .....	42
<b>III.2.Résultats et discussions .....</b>	<b>45</b>
III.2.1.Effet de mono-fibre lisse .....	45
III.2.2.L'effet de longueur .....	47
III.2.3.Effet de l'absorption .....	49
III.2.4.Effet d'inter-charge.....	52
<b>III.3.Conclusion .....</b>	<b>56</b>
<b>Conclusion général .....</b>	<b>57</b>

# Liste des figures

---

## Liste des Figures I

Figure I. 1: Une éprouvette fissurée due au phénomène de fatigue. ....	6
Figure I. 2: Courbe de wholer .....	7
Figure I. 3: Schéma représentatif de flexion a trois points.....	8
Figure I. 4 : Essai de flexion à trois points.....	8
Figure I. 5: Comparaison entre le classement de la RCA et NA et la littérature.....	13
Figure I. 6: Courbe de classement des agrégats fins utilisés.....	13
Figure I. 7: Résultats de la résistance moyenne à la compression et de la résistance moyenne à la flexion de béton avec 100%RCA et 100%NA.....	15
Figure I. 8 Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton formulé avec RCA sous chargement $S = 0,85$ .....	18
Figure I. 9 : Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton formulé avec NA sous chargement $S = 0,85$ .....	18
Figure I. 10: Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton formulé avec RCA sous chargements $S = 0,75$ .....	19
Figure I. 11 : Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton formulé avec NA sous chargement $S = 0,75\%$ .....	19
Figure I. 12: Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton fabriqué avec RCA sous chargement $S = 0,65\%$ .....	20
Figure I. 13: Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton fabriqué avec NA sous chargement $S = 0,65\%$ .....	20
Figure I. 14: Comparaison de la résistance statique moyenne à la flexion du béton formulé avec RCA et précédentes.....	22
Figure I. 15: Comparaison du paramètre de forme ' $\alpha$ ' du béton formulé avec RCA et précédentes.....	22
Figure I. 16: Pourcentage d'augmentation de coefficient de variation (COV) du béton avec RCA et antérieures sur le béton avec NA.....	23
Figure I. 17: Comparaison de la limite d'endurance de béton avec RCA avec le béton avec NA et la littérature.....	23



# Liste des figures

---

## Liste des Figures II

Figure II. 1:Vibrophore HFP 150. ....	28
Figure II. 2: éléments de commande de VibroWin. ....	30
Figure II. 3: Commutateur pour déplacement manuel et le bouton d'urgence. ....	30
Figure II. 4 : Ouverture de logiciel (Etape1) . ....	32
Figure II. 5: Insertion des données (Etape2). ....	32
Figure II. 6 : Insertion de poids (Etape3). ....	33
Figure II. 7: Insertion des dimensions (Etape 4). ....	33
Figure II. 8: Insertion de la valeur de charge statique (étape5). ....	34
Figure II. 9 : Insertion de temps de repos (Etape 6). ....	34
Figure II. 10:Insertion de la valeur de la charge dynamique (étape7). ....	35
Figure II. 11 : Insertion de la valeur de nombre de cycle (étape8).....	35
Figure II. 12 : Réglage de la fréquence (étape9) .....	36
Figure II. 13: Contrôle des valeurs maxi sur captures supplémentaire ( étape10). ....	36
Figure II. 14: Sélection des résultats souhaités (étape11) .....	37
Figure II. 15: Choisir les paramètres de PV(étape12) .....	37
Figure II. 16: Activation des canaux de mesure (étape13).....	38
Figure II. 17: Lancement d'opération (étape14).....	38
Figure II. 18: Arrêter l'opération (étape 16).....	39

# Liste des figures

---

## Liste des Figures III

Figure III. 1: Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM275 et 277 au chargement S=70% .....	45
Figure III. 2: Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM287et 108 au chargement S=80% .....	47
Figure III. 3 : Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM281 et 102 au chargement S=80% .....	48
Figure III. 4: Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM 287 a l'état sec et humide au chargement S=80%.....	49
Figure III. 5: Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM 286 a l'état sec et humide au chargement S=80%.....	50
Figure III. 6: Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM297et298au chargement S=70% .....	52
Figure III. 7: Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM286 et 289au chargement S=70% .....	53
Figure III. 8: Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM280 et 282au chargement S=80% .....	54

# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux I

Tableau I. 1 : Les phases de fatigue selon les cycles de chargement (Hsu, 1981). .....	5
Tableau I. 2 : Propriétés physiques RCA. ....	12
Tableau I. 3 : Proportions de mélange de béton formulé avec RCA et NA .....	12
Tableau I. 4 : Résultats des essais de résistance à la compression et de résistance statique à la flexion du béton formulé avec RCA et NA. ....	14
Tableau I. 5 : Durée de vie en fatigue pour le béton formulé avec RCA et NA.....	16
Tableau I. 6 Valeurs des paramètres de forme $\alpha$ et $\mu$ pour les bétons avec RCA et NA.....	17

## Liste des tableaux II

Tableau II. 1:Le pourcentage de la teneur en eau.....	27
---	----

## Liste des tableaux III

Tableau III. 1 : Durée de vie en fatigue BRFM 297 et 298 au chargement $S=70\%$ .....	42
Tableau III. 2: Durée de vie en fatigue de BRFM 289 et 286au chargement $S=70\%$ . ....	42
Tableau III. 3: Durée de vie en fatigue de BRFM 280 et 282au chargement $S=80\%$ .....	43
Tableau III. 4: Durée de vie en fatigue de BRFM 287 à l'état sec et humide .....	43
Tableau III. 5: Durée de vie en fatigue de BRFM 286 à l'état sec et humide .....	43
Tableau III. 6 : Durée de vie en fatigue de BRFM 287 et 108au chargement $S=80\%$ . ....	44
Tableau III. 7 : Durée de vie en fatigue de BRFM 281 et 102au chargement $S=80\%$ .....	44
Tableau III. 8 : Durée de vie en fatigue de BRFM 275 et 277au chargement $S=70\%$ .....	44
Tableau III. 9 : Les paramètres $\alpha$ et $\mu$ obtenues des essais.....	55

# Introduction générale

## Introduction générale

---

Le béton armé est le matériau de construction le plus couramment utilisé. A cause de sa polyvalence, son économie et sa capacité d'être moulé et fini sous différentes formes, c'est un matériau de construction très approprié. Les structures en béton sont conçues pour remplir efficacement leurs fonctions tout au long de leur durée de vie. La plupart des structures ont besoin de réparations et de renforcement pendant leur durée de vie utile prévue. (Al-Osta, Isa, Baluch, et Rahman 2017). Le renforcement des structures en béton est devenu très important non seulement pour les structures en béton qui se détériorent, mais aussi pour le renforcement des nouveaux éléments structuraux en béton afin qu'ils fonctionnent beaucoup mieux en service.

Le renforcement des structures en béton trouve plus d'applications, en particulier dans les structures importantes telles que les centrales électriques, les centrales nucléaires, les structures marines ...etc. qui sont économiquement et techniquement irréalisables pour la démolition, sauf si la réhabilitation et les techniques de renforcement n'ont pas permis d'obtenir les performances nécessaires.

L'utilisation du béton renforcé par de fibres dans les applications d'ingénierie a fait ressortir la nécessité d'étudier son comportement dans le cadre de charge de fatigue. Parmi les applications courantes du béton renforcé par des fibres, mentionnons les suivantes applications de pavage telles que les aéroports, les autoroutes, les ponts, et les sols industriels qui supportent des charges cycliques importantes au cours de leur durée de vie comme les vibrations des machines et la circulation automobile (Krstulovic, Haghayeghi, Haidar, Krauss 1995).

Nombreux ouvrages de génie civil sont généralement soumis à des charges cycliques répétitives. Exemple les structures marines sont soumises au vent et des charges répétées de vagues, Chaussées en béton pour autoroutes ou tabliers de ponts.

Beaucoup d'attention a été accordée par les chercheurs au cours ces dernières années pour les problèmes de fatigue. Pour nombreuses raisons et aussi qu'elles sont en croissant.

## Introduction générale

---

L'exposition aux les charges répétées entraînent une diminution constante de la rigidité de la structure, qui peut éventuellement conduire à défaillance par fatigue. Donc il est nécessaire de comprendre le comportement de la fatigue.

La fatigue peut être définie comme un processus progressif, Les modifications permanentes de la structure interne d'un matériau soumis à des charges répétées. D'une manière, ces changements sont principalement liés à la croissance progressive de des microfissures internes, ce qui conduit à une déformation irréversible.

Les mécanismes du béton fibré ont d'abord été étudiés par Romualdi et Batson (1963). Ils ont proposé que l'augmentation de la résistance à la flexion et ductilité du béton avec des fibres d'acier puisse être imputée par la capacité d'acier pour limiter les fissures (Chang et Chai 1995). Les propriétés du béton ont été améliorées en incorporant de l'acier ou d'autres fibres et l'intervenant dans les structures.

# Chapitre I

## Théorie de la fatigue et état de l'art

### I. 1 Introduction à la fatigue par flexion

La fatigue peut être définie comme un processus de changements structurels internes progressifs et permanents dans un matériau soumis à des charges répétées. Dans le béton, ces changements sont principalement associés à la croissance progressive des microfissures internes, ce qui entraîne une augmentation significative des déformations permanentes (Lee et Barr, 2004). Au niveau macro, cela se manifestera par des changements dans les propriétés mécaniques du matériau. La charge de fatigue est habituellement divisée en deux catégories (Hsu, 1981), c.-à-d. la charge à faible nombre de cycles et la charge à nombre de cycles élevé.

La charge à faible nombre de cycles implique l'application de quelques cycles de charge à des niveaux de contrainte élevés. D'autre part, une charge à nombre de cycles élevé se caractérise par un grand nombre de cycles à des niveaux de contrainte plus faibles. Hsu présente une gamme plus large du spectre des cycles de charge de fatigue avec l'inclusion d'une charge à nombre de cycle très élevée (Hsu, 1981 ; Lee et Barr, 2004). Le tableau 1 résume les différentes classes de charges de fatigue.

**Tableau I. 1** :Les phases de fatigue selon les cycles de chargement (Hsu, 1981).

Charge à faible nombre de cycles			Charge à nombre de cycles élevé				Charge à nombre de cycle très élevée		
1	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>
Structure dans des zones sismiques			Piste d'atterrissage d'avion et ponts		Ponts d'autoroute et voies ferrées		Structures pour métro		Structures offshore

#### I.1.1 Phénomène de fatigue

Nombreuses structures sont souvent soumis à des charges cycliques répétitives. Par exemples comprennent les vibrations des machines, les vagues de mer, l'action du vent et la circulation automobile. L'exposition aux ces charges répétées entraînent une diminution constante de la rigidité de la structure, qui peut éventuellement conduire à défaillance par fatigue.



On entend par phénomène de fatigue, la dégradation progressive d'une poutre soumise à des sollicitations variables ou répétées, qui se traduit par l'apparition et le développement de fissures qui progressent avec le nombre de cycles appliqué. Ce processus à caractère irréversible altère les propriétés mécaniques microscopiques du matériau et peut conduire à la rupture pour un niveau de chargement inférieur à sa résistance statique si le nombre de cycles appliqué est suffisant(Berbaoui2010).

Les différents régimes du cycle de chargement produisent différents mécanismes de défaillance dans le béton. Pour la fatigue cyclique faible, le mécanisme dominant est la formation de fissures qui conduisent par la suite des fissures continues. D'autre part, la fatigue à cycle élevé produit des fissures d'adhérence au cours d'un processus lent et graduel.

Les premières études relatives par l'effet de fatigue remontent au début du XIXe siècle. Parmi les étapes essentielles dans l'étude de ce phénomène, on peut citer l'introduction des courbes d'endurance par Wöhler à partir de 1860, puis les travaux de Miner en 1945 sur la prévision de la rupture sous sollicitation de niveau variable. (Berbaoui2010).



**Figure I. 1:** Une éprouvette fissurée due au phénomène de fatigue.

### I.1.2 Courbe de Wöhler

Cette courbe est appelée courbe S-N (Stress-number of cycles) dans les pays anglo-saxons. Universellement connue la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule qui permet de visualiser la tenue de la structure où des matériaux dans tout le domaine de la fatigue.

Chaque poutre est soumise à des cycles d'efforts périodiques, N est le nombre de cycles ou durée de vie au bout duquel la rupture se produit. Pour plus de commodité, ce nombre N est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique et la contrainte est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire. Les courbes S-N constituent les principaux outils permettant aux concepteurs de dimensionner les structures à la fatigue. (Berbaoui2010).

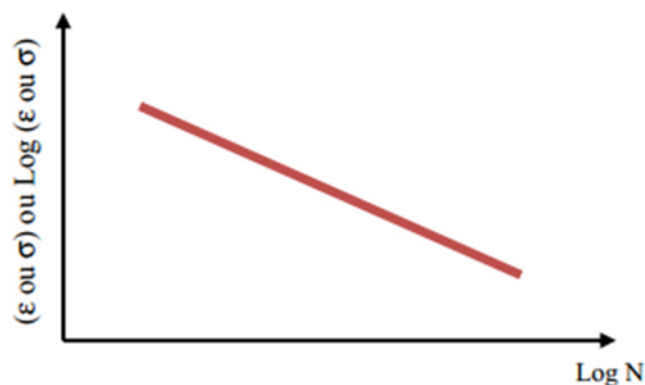


Figure I. 2: Courbe de wholer

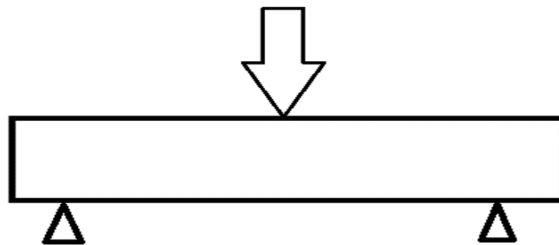
### I.1.3 Durée de vie

La durée de vie est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture N. L'exécution de n cycles ( $n < N$ ) entraîne un certain endommagement de la poutre qu'il est important de chiffrer car il détermine sa capacité de vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer la poutre pour éviter l'accident.

#### I.1.4 Essai de fatigue

Les essais de fatigue en flexion 3-points ont été faits pour déterminer les évolutions des propriétés mécaniques pour des contraintes inférieures à la fin de proportionnalité. Ainsi les contraintes maximales étudiées se trouvent dans l'intervalle correspondant au début d'endommagement déterminé précédemment et la fin de linéarité. (Cordelle, Chapeleau, Drissi-Habti2013).

La flexion trois points est un essai mécanique classique. Il représente le cas d'une poutre posée sur deux appuis simple et doublé soumise à une charge concentrée, appliquée au milieu de la poutre.



**Figure I. 3:** Schéma représentatif de flexion a trois points.



**Figure I. 4 :** Essai de flexion à trois points.

Une surcharge (dynamique) peut conduire à dépasser localement la charge de rupture du matériau et produire un endommagement irréversible sous forme d'une fissure. Ensuite, sous l'effet de la concentration de contrainte qu'elle provoque à son extrémité même une sous contrainte moyenne qui autrement ne provoque pas à rupture : c'est l'effet de sous charge (statique).

## 1.2 Détermination des distributions de durée de vie en fatigue

Beaucoup d'études expérimentales ont été réalisées sur le comportement à la fatigue des bétons fibrés. Des nombreux chercheurs sont adoptés des formules / relations a fin de tracer les courbes de Wholer. En général y a trois relations les plus utilisées. (Sohel, Al-Jabri, Zhang et Liew 2018).

D'abord une relation entre le niveau de contrainte  $S$  ( $f_{max}/f_r$ ) et nombre de cycles  $N$ . La relation établie est connue sous le nom d'équation Wholerest la suivante :

$$S = \frac{f_{max}}{f_r} = A + B \log_{10}(N) \quad (1.1)$$

D'où  $A$  et  $B$  sont les coefficients expérimentaux. Ces coefficients ont été calculés par divers chercheurs pour des valeurs simples.

En suite une formule d'équation de fatigue dérivée par les chercheurs après l'équation de Wholer, dans laquelle le rapport de contrainte  $R$  ( $f_{max}/f_{min}$ ) est incorporé à l'équation de Wholer, la formule est comme suit :

$$S = \frac{f_{max}}{f_r} = 1 - \beta(1-R) \log_{10}(N) \quad (1.2)$$

D'où  $\beta$  est un coefficient de matériau,  $R$  c'est le rapport ( $f_{max}/f_{min}$ )

Cette équation peut être utilisée pour  $0 < R < 1$

La troisième formule d'équation de fatigue donnée par une formule de puissance :

$$S = C_1 (N)^{C_2} \quad (1.3)$$

Cette équation s'applique à condition limite si :

N le nombre de cycle est grande valeur et  $S \rightarrow 0$

Comme la plupart des études sur la fatigue menées sur les bétons renforcés par des fibres d'acier ont porté des relations S-N données sur la fatigue et la durée de vie. En général y a plusieurs modèles mathématiques sur lequel les chercheurs ont choisi pour travailler d'une manière à présenter statistiquement l'évolution des données sur la fatigue.

La plus couramment utilisés est la distribution de Weibull à deux paramètres pour décrire le comportement en fatigue des bétons fibrés.

Pour calculer ces deux paramètres y a deux méthodes (Arora et Singh 2016) :

### I.2.1 La méthode graphique

La méthode graphique qui peut être modélisé à un niveau de stress donnée.

La fonction de fiabilité LN (n) de la distribution de Weibull à deux paramètres peut s'écrire comme suit :

$$\ln(N) = \exp \left[ \frac{n}{u} \right]^\alpha \quad (1.4)$$

Où : n est la valeur spécifique de la variable N

$\alpha$  = forme au niveau de contrainte S

$\mu$  = durée de vie caractéristique au niveau de contrainte S.

On prend le logarithme deux fois des deux côtés d'équation 2 :

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{Ln} \right) \right] = \alpha \ln(n) - \alpha \ln(\mu) \quad (1.5)$$

Ou :  $Y = \alpha X - \beta$

Ainsi :  $Y = \ln \left[ \ln \left( \frac{1}{Ln} \right) \right]$ ,  $X = \ln(n)$  et  $\beta = \alpha \ln(\mu)$

Pour obtenir la courbe de Wohler à partir de l'équation (5), les données la durée de vie en fatigue (nombres de cycle) doivent être classées par ordre croissant. (Singh & Kaushik 2001).

L'étude empirique de fonction de survie peut être calculée à partir de relation suivante :

$$\ln = 1 - \frac{i}{k+1} \quad (1.6)$$

Ou : i est le numéro d'ordre d'éprouvette, et k le nombre d'éprouvettes.

### I.2.2 Méthode des moments

Les deux paramètres de la distribution de Weibull peuvent être calculés en utilisant les relations suivantes :

$$\alpha = (\text{cov})^{-1.08} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{u}{\Gamma(\frac{1}{\alpha} + 1)} \quad (1.7)$$

Où :

u : la moyenne des données de durée de vie.

Cov : c'est le rapport d'écart type et la moyenne.

$\Gamma$  : La fonction gamma.

### I.3 travaux de Arora et Singh (2016)

Arora et Singh (2016) ont réalisés une étude pour analyser la résistance à la fatigue en flexion en béton formulé avec des gros granulats 100 % (RCA) en comparaison avec un béton formulé avec des gros granulats naturels 100 % (NA). La performance en fatigue de béton avec RCA et NA a été évaluée en termes de durée de vie en la fatigue par flexion et la limite d'endurance de deux millions de cycles.

Arora a mené des expériences pour obtenir la durée de vie à la fatigue par flexion sur des éprouvettes en béton avec 100% RCA et 100% NA sous différents niveaux de chargements et comparées à la littérature.

Des éprouvettes de 100 × 100 × 500 mm ont été testées sous chargements de fatigue par flexion en quatre points appliquées à une fréquence de 10 Hz. Il a été démontré que la distribution de durée de vie des bétons formulés de 100 % RCA et 100 % NA peuvent être modélisées par la distribution de Weibull à deux paramètres.

Les valeurs des paramètres de forme de la distribution de Weibull obtenues par Arora et Singh pour le béton avec RCA se sont trouvées inférieures à celles du béton avec NA et aussi pour les études précédentes sur NA, ce qui indique une grande variabilité dans la distribution

de la durée de vie en fatigue par flexion du béton formulé avec RCA vis-à-vis au béton formulé avec NA.

### I.3.1 Procédure expérimentale

Au total, 64 essais de fatigue en flexion et 48 essais statiques complémentaires. Des essais de flexion ont été effectués sur des éprouvettes de poutre de 100 X100 X 500 mm sous chargements en flexion a 4 points .Des essais de résistance à la compression ont également été effectués sur différents gâchés de béton pour vérifier la qualité après 28 jours de durcissement.

### I.3.2 Matériaux et proportions du mélange

Les tableaux suivants présentes les différentes propriétés et caractéristiques physico-chimiques des mélanges utilisés par Arora et Singh dans leur expérience.

**Tableau I. 2 :** Propriétés physiques RCA.

Granulats utilisés	Module de finesse	Densité spécifique	Valeur globale de l'impact (%)	Valeur de broyage d'agrégats (%)	Absorption d'eau (%)
<b>RCA</b>	6.70	2.46	30.43	25.6	5.35
<b>NA</b>	6.93	2.64	16.35	15.8	0.68

**Tableau I. 3 :** Proportions de mélange de béton formulé avec RCA et NA

Granulats utilisés	Ciment (kg)	Cendres volantes(kg)	Agrégats fins(kg)	Gros granulats(kg)	Eau (L)
RCA	343	148	762	935	206
NA	343	148	762	1003	206

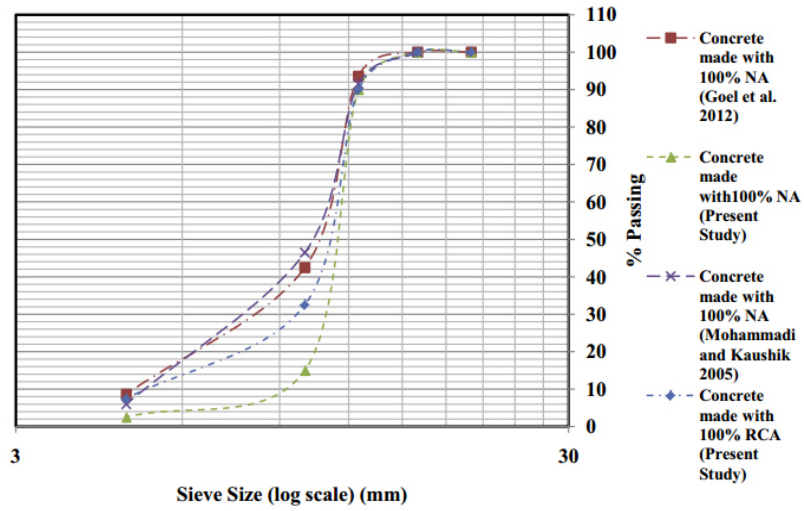


Figure I. 5: Comparaison entre le classement de la RCA et NA et la littérature.

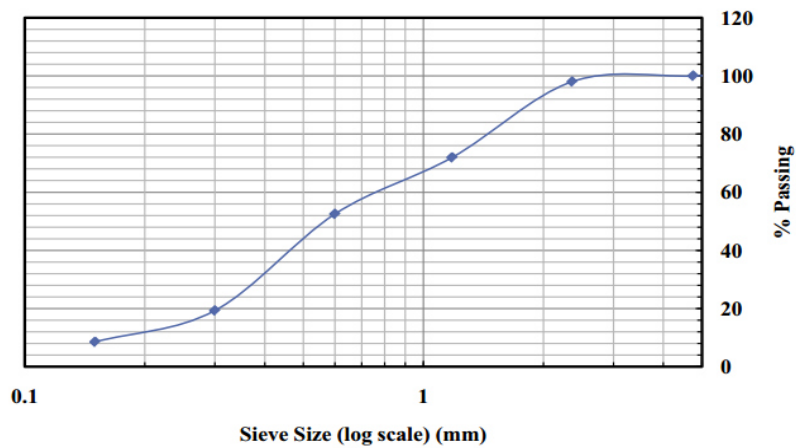


Figure I. 6: Courbe de classement des agrégats fins utilisés.



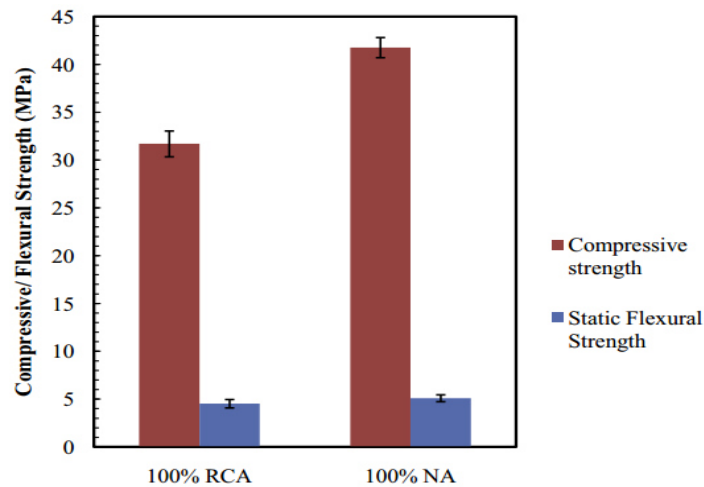
### I.3.3 Essais de fatigue par flexion

Afin de déterminer les limites de charge maximale et minimale à appliqués lors des essais de fatigue par flexion sur les éprouvettes, des essais statiques de flexion ont été réalisés sur les éprouvettes en béton avec RCA avant les essais de fatigue.

Au moins trois échantillons de chaque gâché ont été testés pour déterminer la résistance maximale à la flexion. La valeur moyenne des résistances à la flexion obtenues pour le béton avec RCA et de béton avec NA étaient de 4,53 MPa et 5,1 MPa respectivement (tableau I.4). La représentation graphique de la résistance moyenne à la compression et de la résistance à la flexion montrant l'écart-type moyen pour les deux mélanges de béton testé (la Figure I.7)

**Tableau I. 4 :** Résultats des essais de résistance à la compression et de résistance statique à la flexion du béton formulé avec RCA et NA.

	La résistance à la compression (MPa) après 28 jours		Résistance à la flexion (MPa)	
	RCA	NA	RCA	NA
1	30.24	35.40	4.59	5.953
2	32.09	40.69	4.84	4.897
3	34.52	36.83	4.17	5.286
4	32.87	46.24	4.89	4.454
5	31.66	41.54	4.66	4.888
6	31.10	44.37	4.29	5.217
7	30.56	47.62	3.98	5.050
8	30.47	41.44	4.79	5.024
Moyenne	31.7	41.77	4.53	5.1



**Figure I. 7:** Résultats de la résistance moyenne à la compression et de la résistance moyenne à la flexion de béton avec 100%RCA et 100%NA.

Les autres échantillons d'un gâché particulier ont été soumis à des essais de fatigue par flexion. Les essais de fatigue par flexion ont été effectués sur un servomoteur à servocommande de 100 KN.

Les essais de flexion ont été effectués à différents niveaux de chargement  $S$ , allant de 0,85 à 0,55. Le rapport de contrainte de fatigue  $R$  ( $R = f_{max}/f_{min}$ ) a été maintenu constant à 0,10 pendant toute la durée de l'essai. Tous les essais ont été réalisés à amplitude constante sous forme de charges sinusoïdales appliquées à une fréquence de 10 Hz.

Le compteur de cycles de la machine d'essai de flexion affichait le nombre de cycles jusqu'à la défaillance de chaque éprouvette sous charge de fatigue. Une limite de  $2 \cdot 10^6$  cycles de charge de fatigue a été choisie comme limite supérieure. Tableau I.5 indique le nombre d'échantillons testés à chaque niveau de contrainte.

**Tableau I. 5 :** Durée de vie en fatigue pour le béton formulé avec RCA et NA.

la durée de vie en fatigue 'N'.					
Niveau de contrainte S	Numéro Echantillon	0.85	0.75	0.65	0.55
RCA	1	567	192	67225	478640
	2	789	4353	68738	657390
	3	1054	5615	88969	763984
	4	1188	9382	10371	1167919
	5	1345	9792	120805	-
	6	1765	12829	189763	-
	7	1897	13702	249867	-
	8	2098	14045	261009	-
	9	2156	23020	319551	-
	10	2354	26079	409876	-
NA	1	444	10781	100801	-
	2	1137	13879	142054	-
	3	1367	18489	187623	-
	4	1678	21945	220075	-
	5	1945	25467	260685	-
	6	2271	31256	323068	-
	7	2605	36543	360845	-
	8	2647	42842	456944	-
	9	3096	46951	521089	-
	10	3987	51384	558973	-

### I.3.4 Détermination de la distribution de la résistance à la fatigue

Pour la détermination de deux paramètres de Weibull, Arora et Singh ont utilisés trois méthodes. Tout d'abord, la méthode graphique a été utilisée pour vérifier que les données de durée de vie à la fatigue des bétons avec 100% RCA et 100%NA. Par la suite, méthode de moments et la méthode du maximum de vraisemblance.

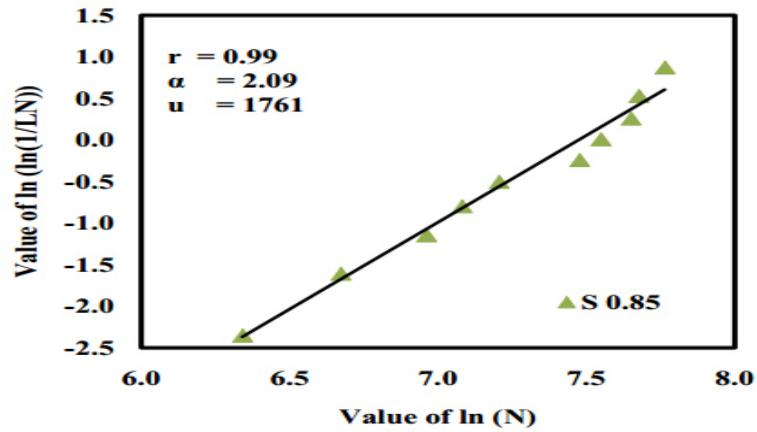
**Tableau I. 6** Valeurs des paramètres de forme  $\alpha$  et  $\mu$  pour les bétons avec RCA et NA.

Granulats utilisés	Méthodes	S=0.85		S=0.75		S=0.65	
		$\alpha$	$\mu$	$\alpha$	$\mu$	$\alpha$	$\mu$
RCA	Méthode graphique	2.09	1761	1.647	15.395	1.424	218.895
	Méthode des moments	2.646	1715	1.898	14.888	1.620	210.449
	la méthode du maximum de vraisemblance	2.934	1712	2.055	14.971	1.752	210.922
	Moyenne	2.556	1792	1.867	15.085	1.598	213.422
NA	Méthode graphique	2.442	2619	1.8810	34.794	1.760	362.629
	Méthode des moments	2.7711	2540	2.2491	33.801	2.0879	349.097
	la méthode du maximum de vraisemblance	2.9505	2587	2.4405	33.909	2.2515	353.990
	Moyenne	2.7212	2582	2.1902	34.168	2.0331	355.239

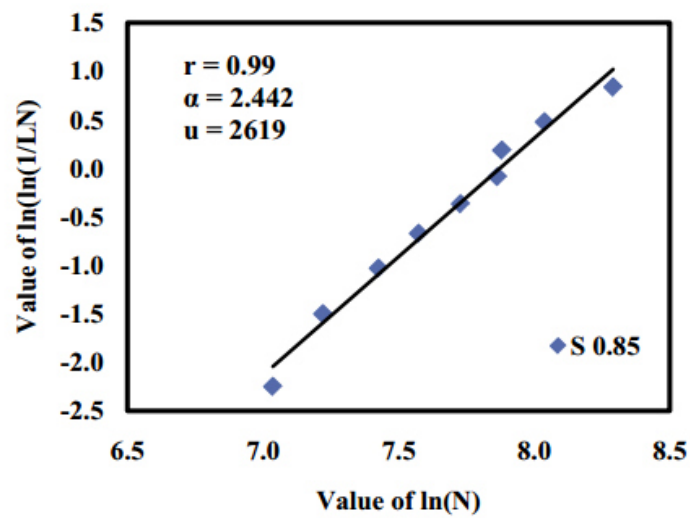
### I.3.5 Résultats et discussion

Une analyse de régression linéaire de chaque ensemble de données ont été réalisées et tracées dans un format semi-logarithmique sous forme de courbes S-N pour déterminer la durée de vie à la fatigue cyclique du béton réalisé avec RCA et NA

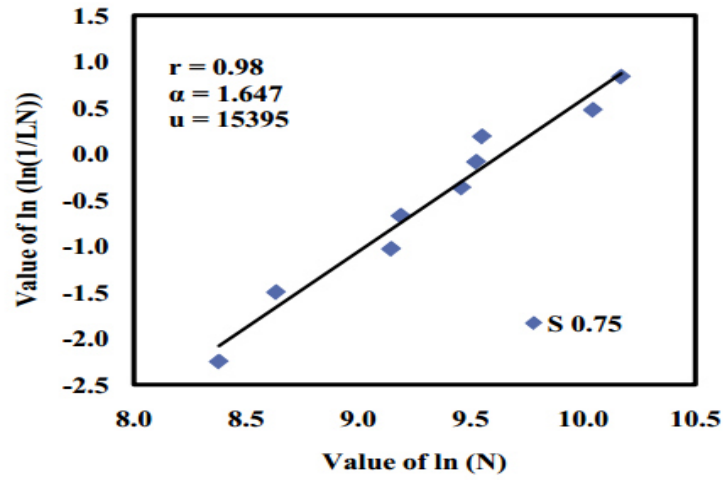
Les figures suivantes montrent les courbes des données sur de durée de vie en fatigue du béton formulé avec RCA et NA .



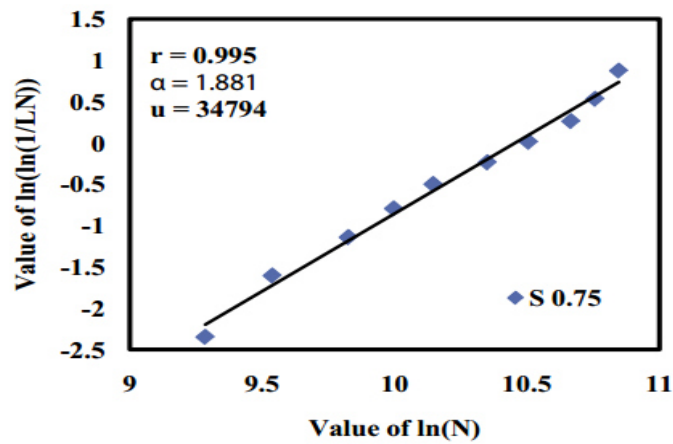
**Figure I. 8** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton formulé avec RCA sous chargement  $S = 0,85$ .



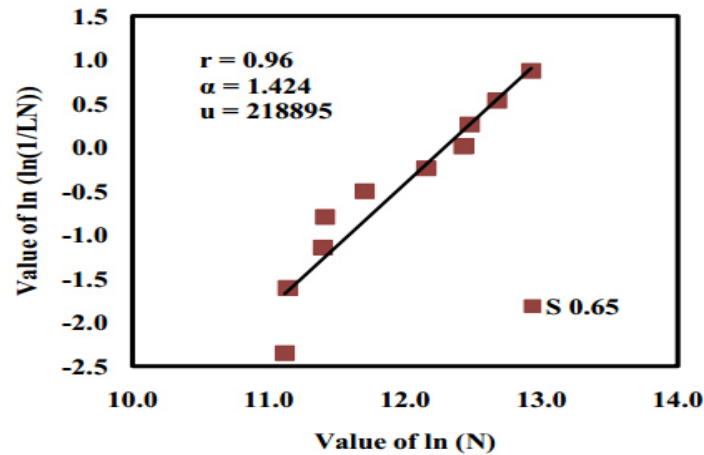
**Figure I. 9** : Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton formulé avec NA sous chargement  $S = 0,85$ .



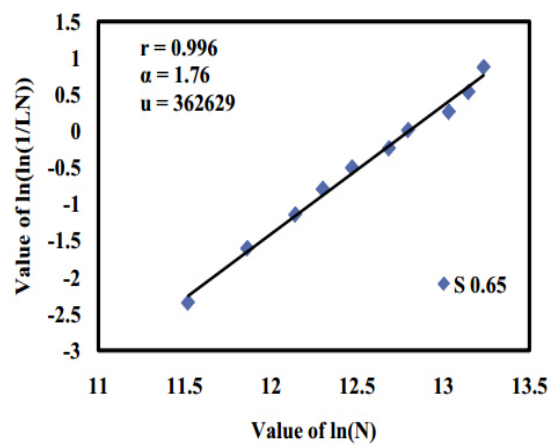
**Figure I. 10:** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton formulé avec RCA sous chargements  $S = 0,75$ .



**Figure I. 11 :** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton formulé avec NA sous chargement  $S = 0,75\%$ .



**Figure I. 12:** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton fabriqué avec RCA sous chargement  $S = 0,65\%$ .



**Figure I. 13:** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du béton fabriqué avec NA sous chargement  $S = 0,65\%$ .

Les figures I (8 et 9) montrent l'analyse graphique des données sur la durée de vie à la fatigue du béton avec RCA et NA respectivement, à des niveaux de chargement ( $S = 0,85$ ). On peut observer que les points de données se situent approximativement le long d'une ligne droite, ce qui indique que la distribution de Weibull à deux paramètres est raisonnablement validée. Pour la répartition de durée de vie du béton fabriqué avec RCA et NA au niveau de contrainte

considéré. De même, les Figures I. (10, 12,11et13) représentent l'analyse des données de durée de vie du béton avec RCA et NA à des niveaux de chargement respectifs de 0,75 et 0,65. Les valeurs correspondantes du coefficient de corrélation R sont de 0,989, 0,982 et 0,957 pour le béton avec du RCA et 0,99, 0,994 et 0,996 et pour le béton avec du NA, aux niveaux de chargement de 0,85 ; 0,75 et 0,65 respectivement.

Les valeurs des paramètres de Wei bull obtenus par cette méthode sont  $\alpha = 2,090$  et  $\mu = 1761$  et  $\alpha = 2,442$  et  $\mu = 2619$  pour les bétons en RCA et NA respectivement au niveau de contrainte  $S = 0,85$ .

Les valeurs de Paramètres de Wei bull ( $\alpha$ et $\mu$ ) obtenus sont été résumés dans le tableau I.6.

La résistance à la fatigue de deux millions de cycles du béton fabriqué avec RCA s'est avérée être environ 50% de la résistance statique à la flexion correspondante qui est environ 8 % de moins que celui du béton avec NA.

La résistance à la fatigue de deux millions de cycles du béton formulé avec NA a été rapportée comme étant 58% de sa résistance statique à la flexion. Ainsi, le béton fait avec 100% de RCA s'est avéré parfait.

### **I.3.6 Comparaison avec littérature et conclusion**

Les résultats de la résistance statique à la flexion des bétons réaliséavec RCA et NA ainsi que les études précédentes sur le béton réalisé avec NA sont représentées sur la Figure I.14.

Les valeurs du paramètre de forme " $\alpha$ " déterminé la durée de vie à la fatiguepour le béton réalisé avec RCA à des niveaux de chargements de 0,85, 0,75 et 0,65 sont de 2,5566, 1,8667 et 1,5984 respectivement, comparé à ceux des années précédentesont représenté sur la Figure I.15.

Les valeurs calculées du COV pour les données sur la durée de vie en fatigue de béton fabriqué avec du RCA ont été comparées à celles du béton avec du NA ainsi que dans les études précédentes. (Figure I.16)



L'augmentation correspondante du COV des données sur la durée de vie du béton avec RCA est de 45,38 % et 34,75 % comparativement à celle de OH 30,3 % et 27,70 % contrairement à Goel est 5,94 % et 24,94 % respectivement.

Par rapport à l'étude sur NA à des niveaux de stress de 0,85 et de 0,75 ; 0,65 respectivement. Les données ont été tracées sur la Figure I.16. Cela indique que le béton formulé avec du béton 100 % RCA présente une plus grande variabilité dans la distribution de durée de vie à différents par rapport au béton contenant du NA.

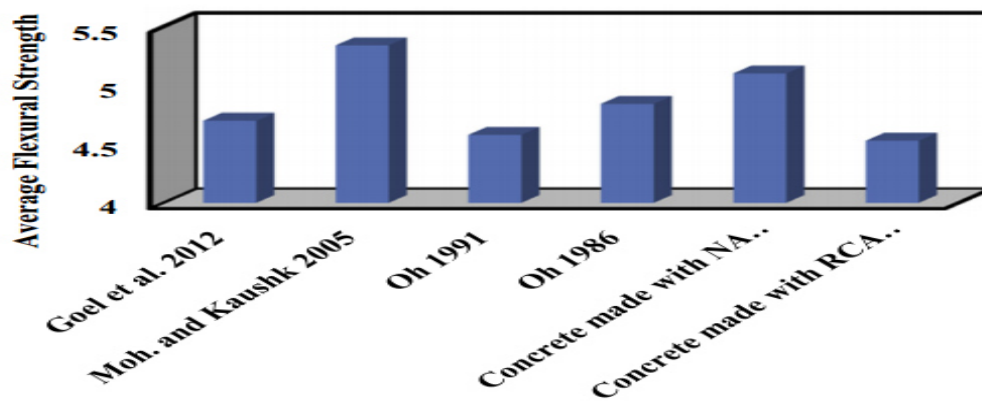


Figure I. 14: Comparaison de la résistance statique moyenne à la flexion du béton formulé avec RCA et précédentes.

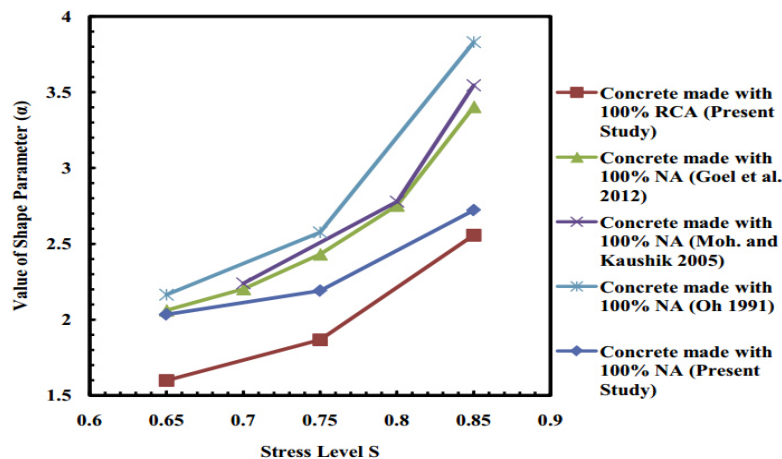
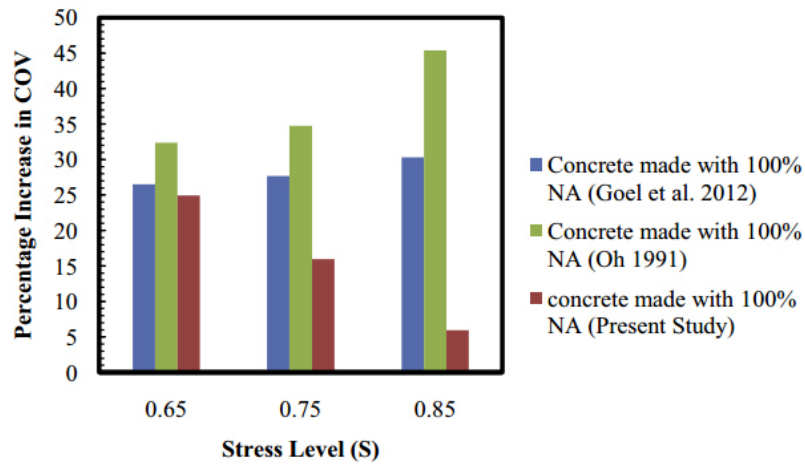
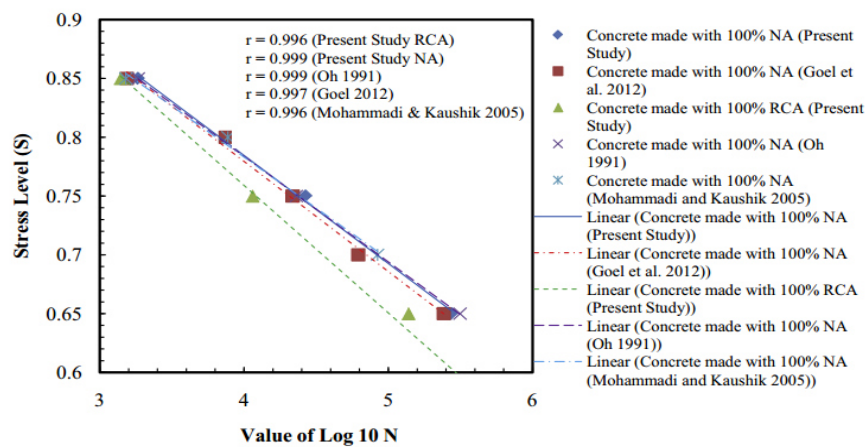


Figure I. 15: Comparaison du paramètre de forme 'α' du béton formulé avec RCA et précédentes.



**Figure I. 16:** Pourcentage d'augmentation de coefficient de variation (COV) du béton avec RCA et antérieures sur le béton avec NA.

*S. Arora, S.P. Singh/Construction and Building Materials 102 (2016) 782–791*



**Figure I. 17:** Comparaison de la limite d'endurance de béton avec RCA avec le béton avec NA et la littérature.

La performance en fatigue par flexion a été évaluée en termes de distribution des données de durée de vie à la fatigue et de limite d'endurance à la fatigue de deux millions de cycles des bétons fabriqués avec RCA et NA.

Les résultats des essais indiquent que la distribution probabiliste de durée de vie des mélanges de béton fabriqués à l'aide de RCA et de NA a une concentration de niveau de chargement  $S$ , peut être modélisé approximativement par la distribution de deux paramètres de Weibull.

Des valeurs obtenues de paramètre de forme pour la durée de vie pour le béton réalisé avec RCA inférieures à celles de béton avec NA, ce qui indique une plus grande variabilité dans la distribution de la résistance à la fatigue en flexion du béton fabriqué avec du RCA. L'augmentation maximale de la COV des données de durée de vie du béton fabriqué avec du RCA a été de 45,38 % à un niveau de contrainte de 0,85 comparativement à celui du béton avec du NA. L'incorporation de RCA à 100 % dans le béton au lieu de NA a également eu une faible performance en fatigue en termes de limite d'endurance ou résistance à la fatigue de deux millions de cycles.

La limite d'endurance de deux millions de cycles pour les bétons formulés avec 100 % RCA représente environ 50 % de la résistance statique à la flexion, alors qu'il en représente 58 % pour le béton formulé avec du NA et environ 57 % les études précédentes.

### **I.4 Conclusion**

Nous avons présenté les notions théoriques sur le phénomène de fatigue ainsi que les différentes méthodes d'estimation des deux paramètres de forme ou dites paramètres de Weibull et aussi nous avons présenté un travail d'Arora et Singh qui ont fait une étude semblable à la nôtre.

# **Chapitre II**

## **Procédure expérimentale**

## Chapitre II : Procédure expérimentale

---

### II.1 Introduction

Le phénomène de fatigue d'un béton fibré se caractérise par sa rupture après application d'un nombre de chargement cyclique dont l'amplitude de chargements est inférieure à la résistance de béton à la rupture enstatique. Ce phénomène est rencontré dans les structures, soumises à des charges cycliques dans le temps.

Pour caractériser le béton fibré en fatigue, nous soumettons des éprouvettes en béton fibré par des fibres d'acier à des sollicitations imposées. Afin de déterminer sa durée de vie. Cette dernière est exprimée en fonction de nombre de cycle.

### II.2 Description des éprouvettes

Notre étude a été réalisée pour estimer la durée de vie des bétons renforcés par des fibres métalliques. 145 échantillons de dimension 7×7×28cm, âgés de quatre ans, conservaient à l'air libre, Contenaient des fractions volumiques de 0,25% ; 0,5 % ; 0,75 % ; 1% ; 1,25 % ; 1,5 % ; 1,75 % et 2% de fibres d'acier mono et hybride (lisses et fibre à crochets).

Ces éprouvettes ont été moulées à partir de différent mélanges à différent dosage. Le premier mélange contenait de fibres d'acier courtes et lisses de diamètres 15mm et fibre à crochets de diamètres 35mm, par la suite le deuxième mélange contenait des fibres courtes et lisses de diamètres 15 mm et fibres crochets de diamètre 30mm. et au final troisième mélange contenait seulement des fibres courtes et lisses de diamètre 15mm.

### II.3 Fatigue du béton et la teneur en eau

Pour étudier l'effet de la teneur en eau sur la fatigue, on a plongé 10 éprouvettes dans l'eau pendant 84 jours. Afin de voir si l'humidité influe sur la durée de vie de béton fibré veillé.

## Chapitre II : Procédure expérimentale

---

### II.3.1 Définition de la teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec, exprimé en pourcentage(%).

$$\omega(\%) = \frac{Pe - Ps}{Ps}$$

Ou :

$\omega$  : Teneur en eau (%)

Pe : poids humide.

Ps : poids sec.

**Tableau II. 1:**Le pourcentage de la teneur en eau.

Indice Eprouvette	Pourcentage de fibre	Poids sec (g)	Poids humide (g)	Teneur en eau ( $\omega$ %)
1	1.25% <sub>f-liss</sub> +0.25% <sub>f-crochet</sub>	3341	3566	<b>6.73</b>
2	1.25% <sub>f-liss</sub> +0.25% <sub>f-crochet</sub>	3486	3611	<b>3.58</b>
3	1.25% <sub>f-liss</sub> +0.25% <sub>f-crochet</sub>	3304	3624	<b>9.68</b>
4	1.25% <sub>f-liss</sub> +0.25% <sub>f-crochet</sub>	3421	3530	<b>3.18</b>
5	1.25% <sub>f-liss</sub> +0.25% <sub>f-crochet</sub>	3298	3590	<b>8.85</b>
6	1% <sub>f-liss</sub> +0.25% <sub>f-crochet</sub>	3407	3510	<b>3.02</b>
7	1% <sub>f-liss</sub> +0.25% <sub>f-crochet</sub>	3416	3441	<b>0.73</b>
8	1% <sub>f-liss</sub> +0.25% <sub>f-crochet</sub>	3306	3594	<b>8.71</b>
9	1% <sub>f-liss</sub> +0.25% <sub>f-crochet</sub>	3376	3413	<b>1.09</b>
10	1% <sub>f-liss</sub> +0.25% <sub>f-crochet</sub>	3482	3509	<b>0.77</b>

## Chapitre II : Procédure expérimentale

---

### II.4 Essais de fatigue par flexion

#### II.4.1 Machine de l'essai de fatigue

On distingue plusieurs machines d'essai de fatigue, selon le mode de sollicitation (flexion plane, flexion rotative, torsion, traction compression, etc.), et selon les facteurs d'influence (température, fatigue sous corrosion, etc.). La machine utilisé c'est le Vibrophore HFP150

- Courant alternatif : 220 V.
- Fréquence : 100 Hz.
- Charge maximale : 150 KN.
- Environnement : air ambiant.
- Température : ambiante.

L'essai a été réalisé dans laboratoire mécanique d'unité de recherche de génie des matériaux de l'université de M'hamedBougara a Boumerdes par un vibraphone HFP 150.



**Figure II. 1:** Vibrophore HFP 150.

## Chapitre II : Procédure expérimentale

---

### II.4.2 Description générale de Vibrophore

- Vibrowin comprend l'interface utilisateur graphique (software) ainsi que l'électronique de mesure et l'électronique de régulation (hardware).
- Le Vibrowin est une application de Windows. Pour utiliser le Vibrowin, un pc compatible est requis, sur le quel Windows fonctionne correctement.
- Vibrowin est l'interface utilisateur à l'aide de laquelle l'utilisateur peut commander et surveiller un essai de fatigue par oscillations.

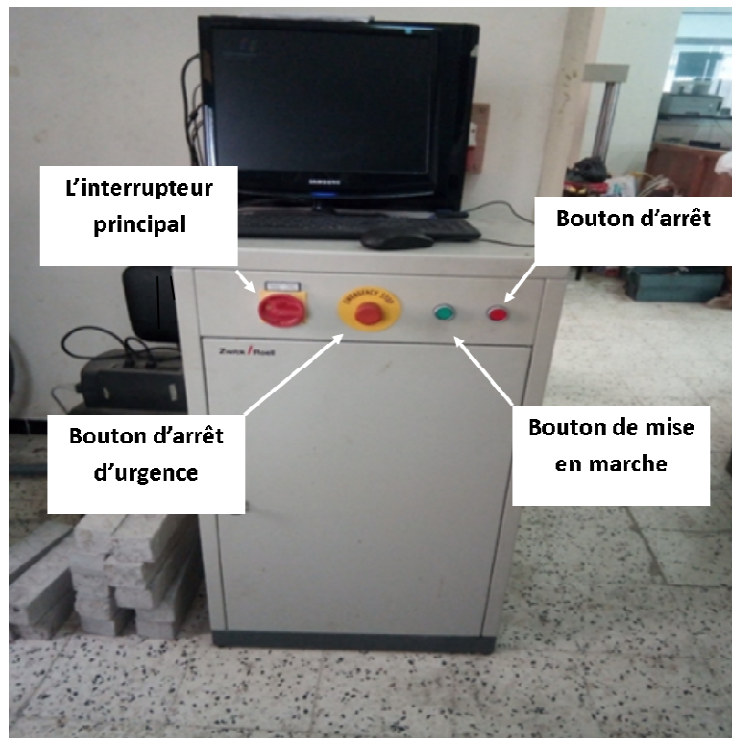
### II.4.3 Les éléments de commande de Vibrowin

- L'interrupteur principal.
- Bouton de mise en marche (bouton on /vert).
- Bouton d'arrêt (bouton off/ rouge).
- Bouton d'arrêt d'urgence.
- Commutateur pour déplacement manuel de la traverse supérieure.

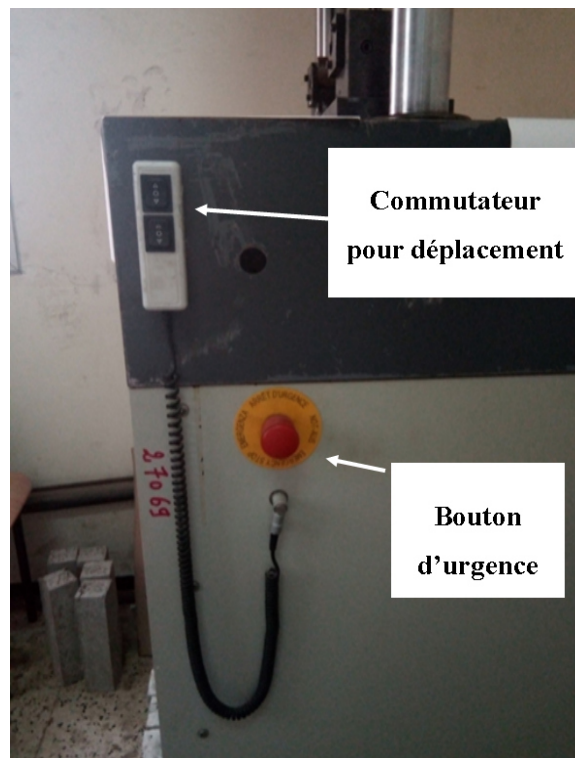


## Chapitre II : Procédure expérimentale

---



**Figure II. 2:** Éléments de commande VibroWinde.



**Figure II. 3:** Commutateur pour déplacement manuel et le bouton d'urgence.

## Chapitre II : Procédure expérimentale

---

### II.4.4 Mise en marche de Vibrophore

- Mise en marche d'interrupteur principal.
- Allumer le PC et l'écran.
- Appuyer sur la touche verte pour mise en marche.
- Si la touche de la lumière s'éteint de nouveau lors de relâchement, cela peut-être que le bouton d'urgence est toujours enfoncé, dés enclencher la touche d'arrêt d'urgence.

### II.4.5 Lancer et terminer VibroWin

Après avoir allumé le PC, où le logiciel est déjà installé sur notre ordinateur. On peut démarrer le VibroWin de la manière suivante :

- Ouvrir le groupe de programme dans lequel VibroWin a été installé.
- Lancer le programme de communication.
- Démarrer le VibroWin.
- Sélectionner options-call-master dans la barre de menu.
- Si c'est nécessaire, acquitter le message d'erreur dans statuts machine. Activer pour ceci le bouton (reset) dans la fenêtre apparaissant.

Pour terminer le programme, vous devez d'abord couper de nouveau la connexion vers le module de communication. Ceci s'opère via OPTIONS-HUNG UP.

On peut ensuite quitter le Vibrowin via le menu fichier terminer.

## Chapitre II : Procédure expérimentale

### II.4.6 Mise en marche du logiciel d'acquisition

-ouvrir le logiciel testXpert.



Figure II. 4 :Ouverture de logiciel (Etape1).

-Cliquer sur la boîte ‘Assistant’.

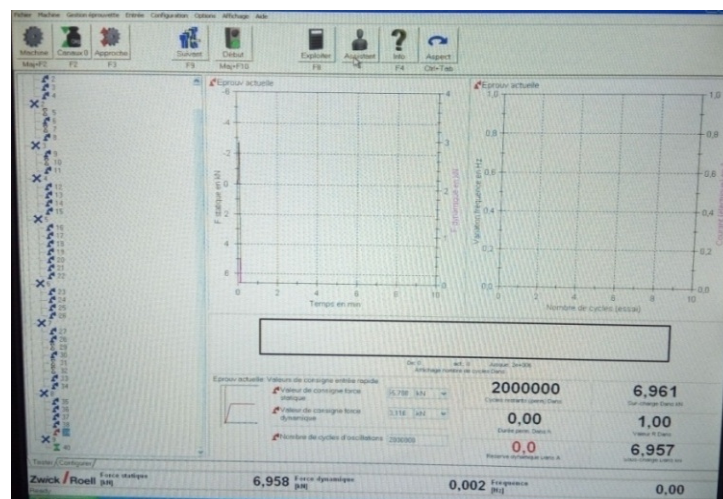


Figure II. 5:Insertion des données (Etape2).

## Chapitre II : Procédure expérimentale

-Faire entrer le poids de l'éprouvette.

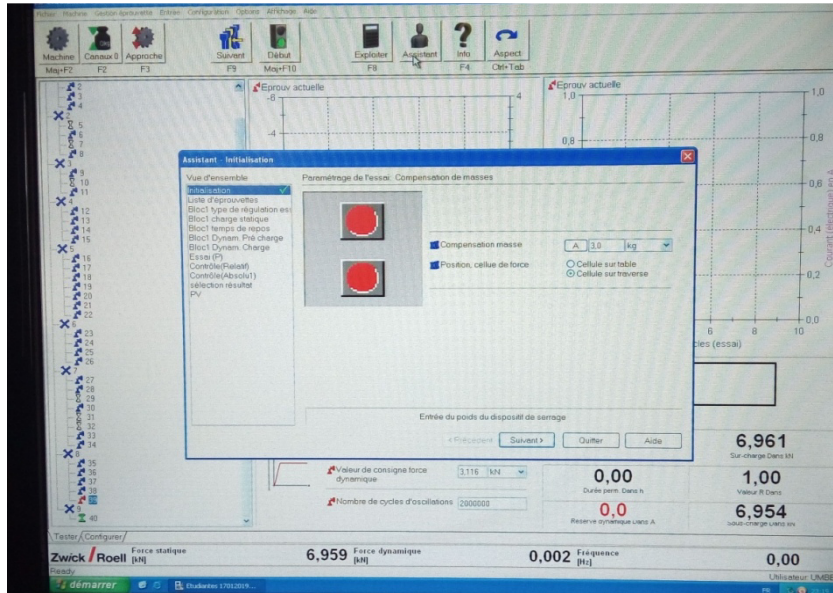


Figure II. 6 : Insertion de poids (Etape3).

-Faire entrer les dimensions d l'éprouvette.

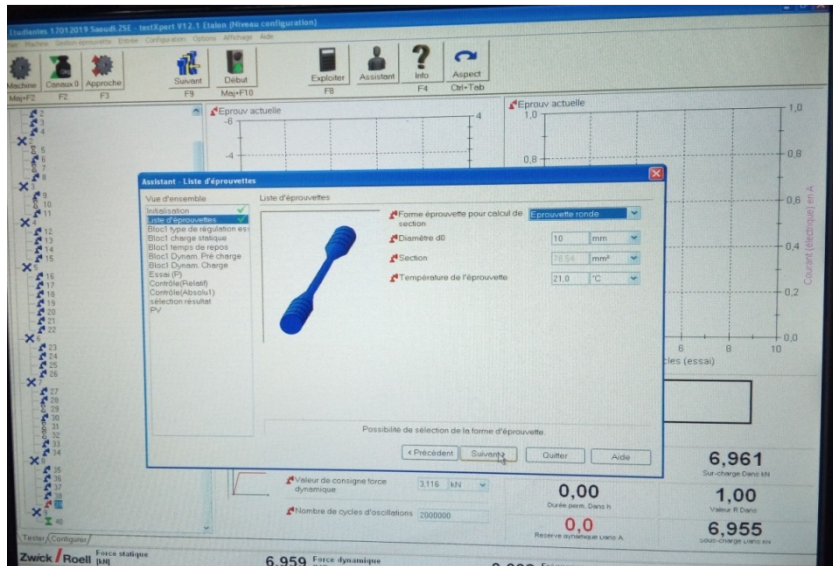


Figure II. 7: Insertion des dimensions (Etape 4).

## Chapitre II : Procédure expérimentale

-entrer la valeur de la charge statique.

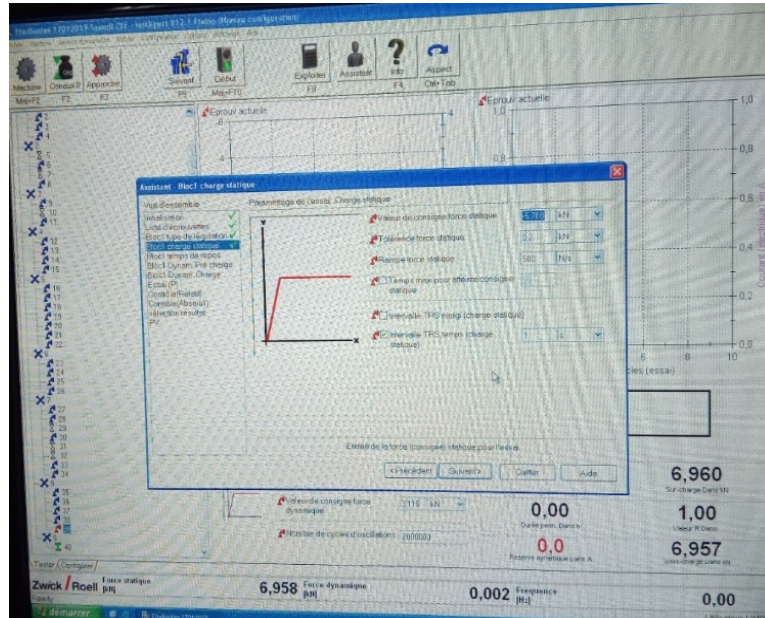


Figure II. 8: Insertion de la valeur de charge statique (étape5).

-Enter le temps de repos

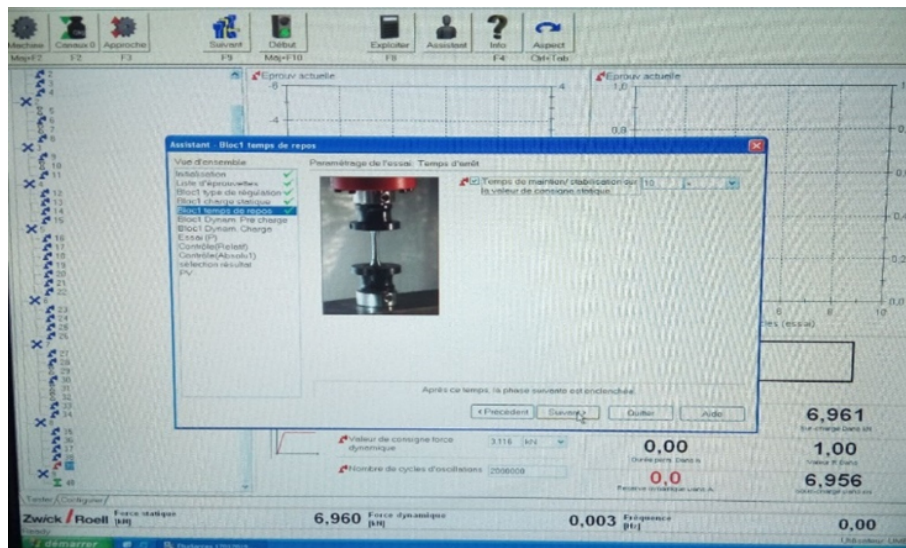


Figure II. 9 :Insertion de temps de repos (Etape 6).

## Chapitre II : Procédure expérimentale

-Enter la valeur de la charge dynamique.

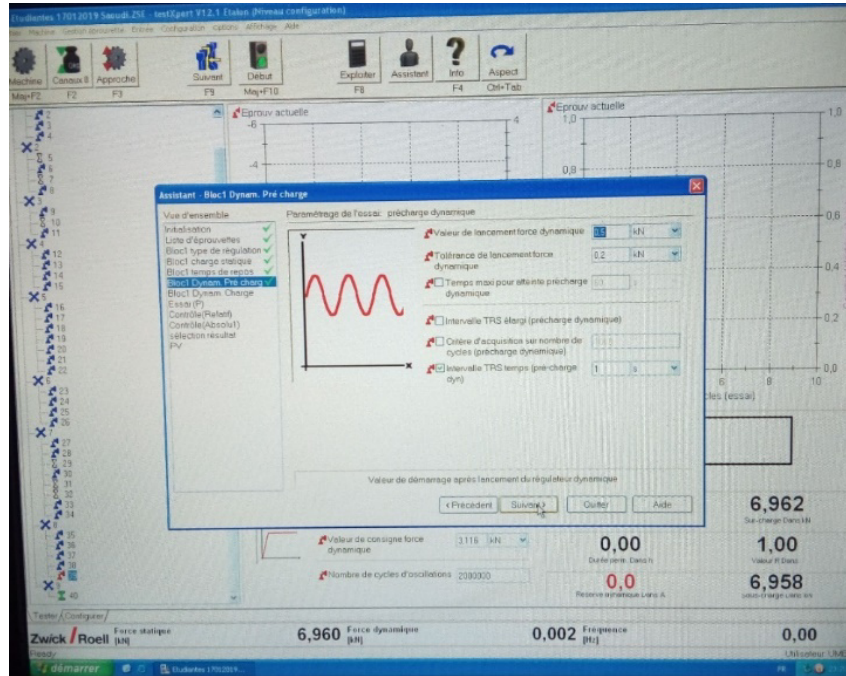


Figure II. 10: Insertion de la valeur de la charge dynamique (étape7).

-Entrer la valeur de nombre de cycle.

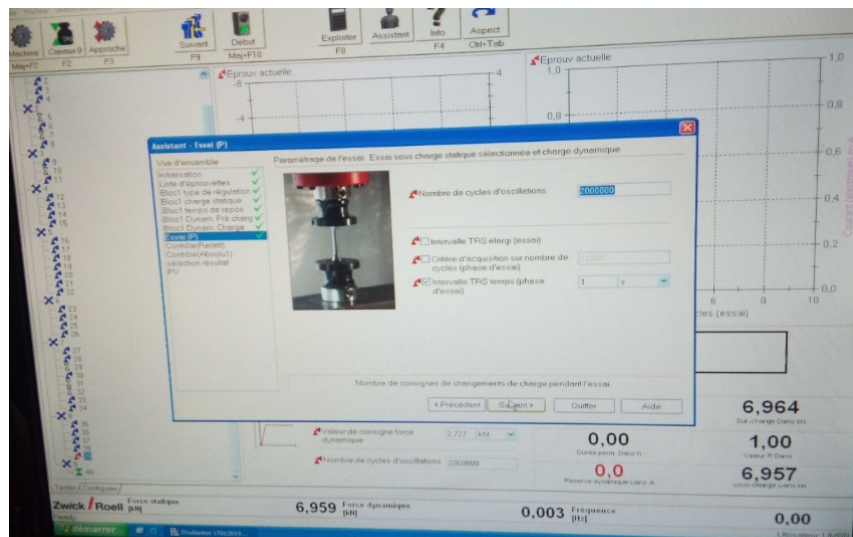


Figure II. 11 : Insertion de la valeur de nombre de cycle (étape8).

## Chapitre II : Procédure expérimentale

-Régler la fréquence.

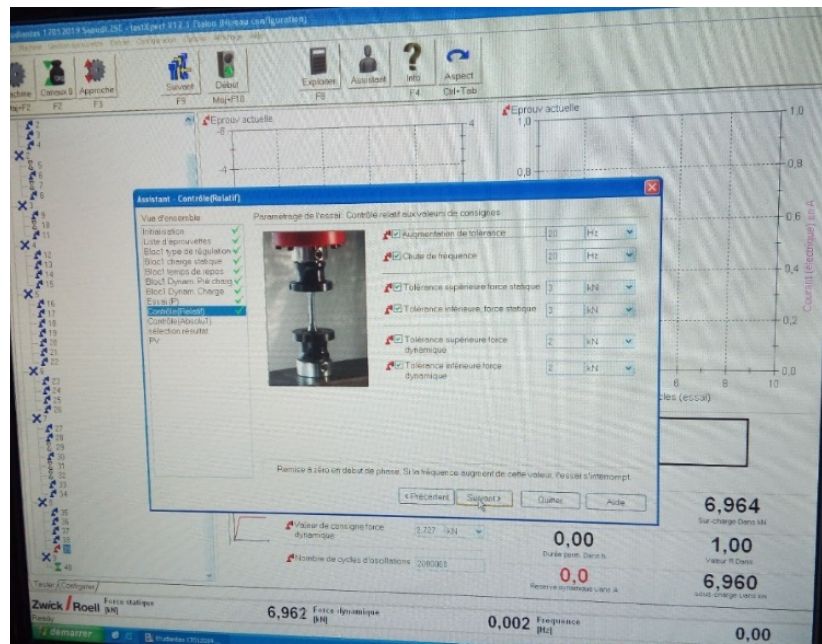


Figure II. 12 :Réglage de la fréquence (étape9).

-contrôler les valeurs maxi.

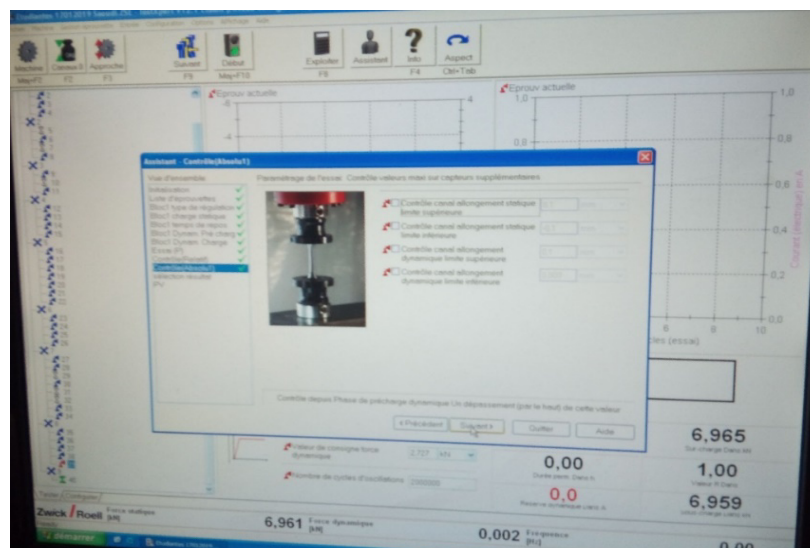


Figure II. 13:Contrôle des valeurs maxi sur captures supplémentaire (étape10).

## Chapitre II : Procédure expérimentale

-Sélectionner les résultats souhaités.

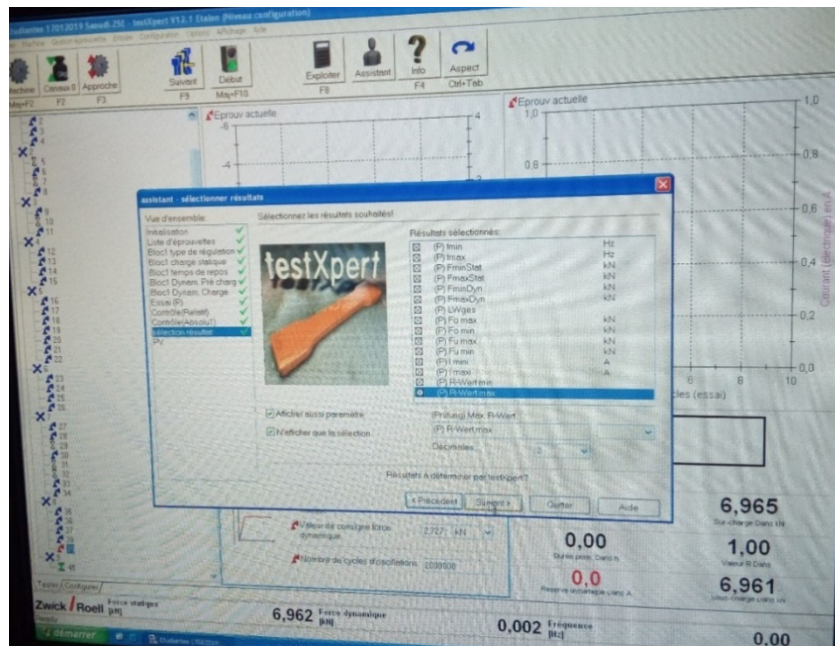


Figure II. 14: Sélection des résultats souhaités (étape 11).

-Cocher les paramètres de PV.

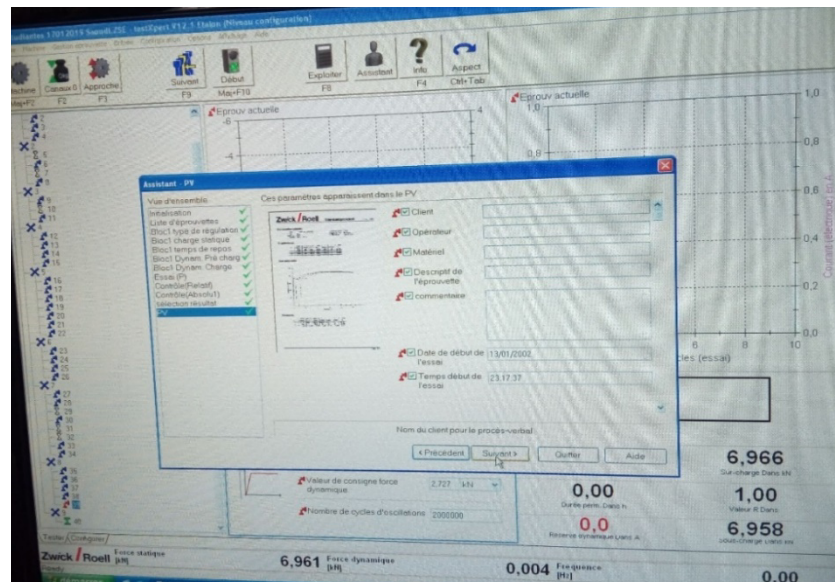


Figure II. 15: Choisir les paramètres de PV (étape 12).



## Chapitre II : Procédure expérimentale

-Appuyer sur la boîte "canaux" et cocher sur les deux premières.

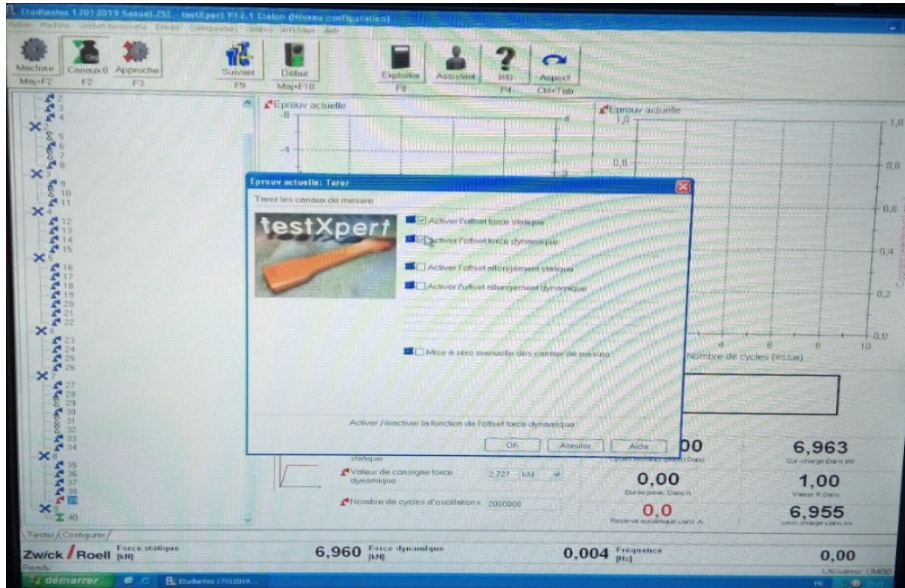


Figure II. 16: Activation des canaux de mesure (étape13).

-Après avoir entré les données nécessaires, cliquer sur la boîte "début" pour commencer l'opération.

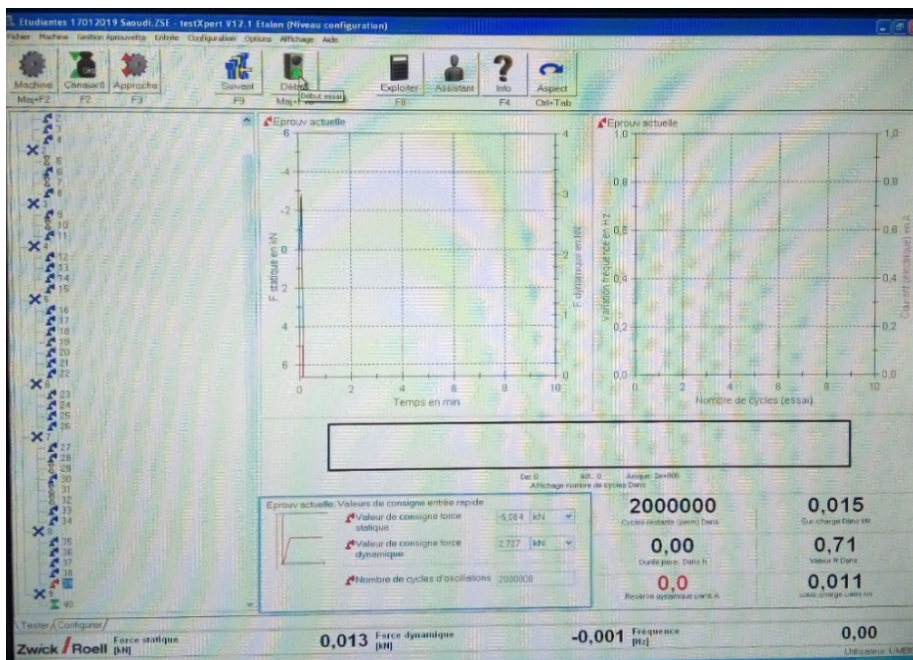


Figure II. 17: Lancement d'opération (étape14).

## Chapitre II : Procédure expérimentale

-Une fois l'éprouvette est fissurée, appuyer sur la boîte "arrêt" pour finir l'opération



Figure II. 18: Arrêter l'opération (étape 16).

### II.4.7 Procédure d'essai :

- Lors de mise en place de l'éprouvette, il faut la posé droitement et bien alignée.
- Une fois l'éprouvette posée, la face lisse doit devant et la face rude face au mur.
- Faut descendre le dispositif de haut doucement, et créer un léger contact pour ne pas l'endommager.

## Chapitre II : Procédure expérimentale

---

### II.5 Conclusion

Dans cette partie du travail, nous avons réalisé des essais de fatigue sur un béton renforcé par fibres d'acier en flexion 3 points à l'aide d'un Vibrophore HEP150 Pour déterminé le comportement des éprouvettes.

L'essai de fatigue est simple consiste à soumettre une éprouvette à un chargement cyclique pour différents niveau de charge et a une fréquence derésonance, et à noter le nombre de cycles au bout duquel la rupture se produit.

Pendant notre période des essais, y avait des coupures d'électricité alors il fallait redémarrer le programme. Et recopier les données pour contenu l'essai et ne pas perdre les données précédentes.

Aussi lors d'insertion des nouvelles données, avant de lancer le programme faut vérifier les données correspondantes à la nouvelle éprouvette car par fois il travaille avec des anciennes données.

# Chapitre III

## Résultats et discussion

## Chapitre III : Résultats et discussion

---

### III.1 Introduction

Les essais de fatigue en flexion trois points ont été effectués sur plusieurs éprouvettes, Pour chaque niveau de chargement appliqué. Ces essais ont été réalisés à charge imposée avec une fréquence de résonance de 100HZ.

Au cours d'essai, l'évolution des nombres de cycle ont été enregistrée à l'aide d'un ordinateur connecté à la machine. Les valeurs du nombre de cycle (N) obtenues pour les éprouvettes testés sont illustrées sur les tableaux III. [1...8]

Nous avons illustré sur les figures III. [1...8] avec une échelle semi-logarithmique les courbes de fatigue pour les BRFM avec différents dosage de fibres.

#### III.1.1. La durée de vie en fatigue

Les résultats des essais de fatigue par flexion à différents niveaux de chargements sont résumés par les tableaux suivants :

**Tableau III. 1 :** Durée de vie en fatigue BRFM 297 et 298 au chargement  $S=70\%$ .

la durée de vie en fatigue par flexion au chargement $s=70\%$		
Échantillons	$297=1\%_{f-liss}+0.75\%_{f-crochet}$	$298=0.75\%_{f-liss}+1\%_{f-crochet}$
1	1465	12
2	1786	7082
3	48228	96569
4	0*	253624
5	/	0*
6	/	0*

**Tableau III. 2:** Durée de vie en fatigue de BRFM 289 et 286 au chargement  $S=70\%$ .

la durée de vie en fatigue par flexion au chargement $s=70\%$		
Échantillons	$289=0.25\%_{f-liss}+1.25\%_{f-crochet}$	$286=1.25\%_{f-liss}+0.25\%_{f-crochet}$
1	4454	3034
2	5869	4906
3	6415	174712
4	0*	/

## Chapitre III : Résultats et discussion

---

**Tableau III. 3:** Durée de vie en fatigue de BRFM 280 et 282 au chargement  $S=80\%$

Échantillons	la durée de vie en fatigue par flexion au chargement $s=80\%$	
	$280=0.75\%_{f-liss}+0.5\%_{f-crochet}$	$282=0.5\%_{f-liss}+0.75\%_{f-crochet}$
1	2950	4242
2	4793	4507
3	5007	4562
4	/	4867
5	/	8070
6	/	0*

**Tableau III. 4:** Durée de vie en fatigue de BRFM 287 à l'état sec et humide

Échantillons	la durée de vie en fatigue par flexion au chargement $s=80\%$	
	$287=1\%_{f-lisse} +0.25\%_{f-crochet}$	
	Etat sec	Humide
1	606	3690
2	4143	5124
3	9987	12998
4	0*	0*

**Tableau III. 5:** Durée de vie en fatigue de BRFM 286 à l'état sec et humide

Échantillons	la durée de vie en fatigue par flexion au chargement $s=80\%$	
	$286=1.25\%_{f-lisse} +0.25\%_{f-crochet}$	
	Etat sec	Humide
1	1260	702
2	3472	3690
3	10301	4268

## Chapitre III : Résultats et discussion

---

**Tableau III. 6 :** Durée de vie en fatigue de BRFM 287 et 108 au chargement  $S=80\%$ .

	la durée de vie en fatigue par flexion au chargement $s=80\%$	
Échantillons	$287=1\%_{f-liss}+0.25\%_{f-crochet}$	$108=1\%_{f-liss}+0.25\%_{f-crochet}$
1	606	1746
2	4143	4743
3	9987	5209
4	0*	0*

**Tableau III. 7 :** Durée de vie en fatigue de BRFM 281 et 102 au chargement  $S=80\%$

	la durée de vie en fatigue par flexion au chargement $s=80\%$	
Échantillons	$281=0.75\%_{f-liss}+0.75\%_{f-crochet}$	$102=0.75\%_{f-liss}+0.75\%_{f-crochet}$
1	1076	3066
2	2830	21900
3	332743	163796
4	0*	0*

**Tableau III. 8 :** Durée de vie en fatigue de BRFM 275 et 277 au chargement  $S=70\%$

	la durée de vie en fatigue par flexion au chargement $s=70\%$	
Échantillons	$275=1.75\%_{f-liss}$	$277=1.25\%_{f-liss}$
1	2536	0*
2	2536	0*
3	3254	0*
4	3560	0*

## Chapitre III : Résultats et discussion

### III.2. Résultats et discussions

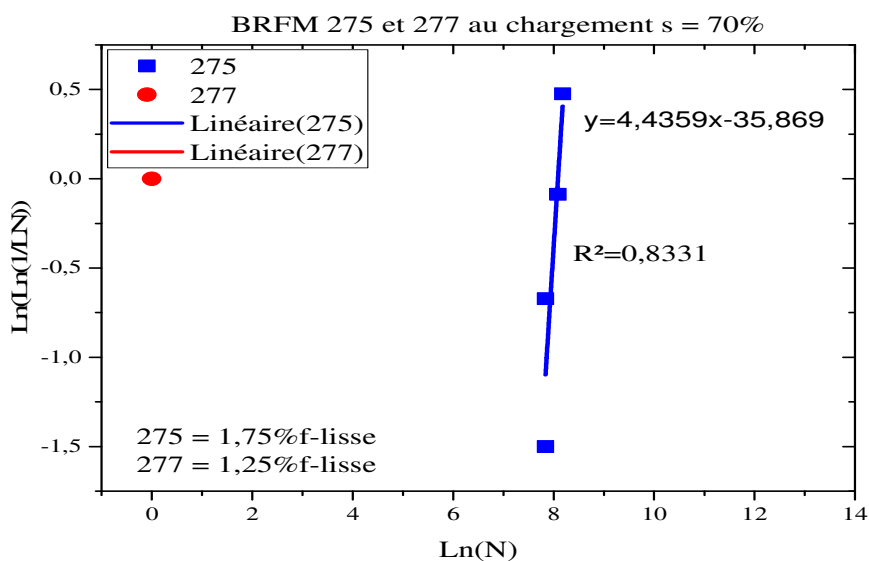
Dans notre étude, on a étudié l'effet des fibres d'acier sur le béton en fatigue (mono-microfibre ethybride).

- Effet de mono fibre lisse
- Effet de longueur
- Effet d'absorption
- Effet de linter change

D'après les essais on a obtenus les résultats suivants :

#### III.2.1. Effet de mono-fibre lisse

Le béton renforcé par  $277=1.25\%f$ -lisse et  $275=1.75\%f$ -lisse



**Figure III. 1:** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM275 et 277 au chargement  $S=70\%$ .



## Chapitre III : Résultats et discussion

---

La figure présente les courbes S-N pour le BRFM contenant 1.75% fibres lisses (N 275) et pour le béton 277 contenant 1.25% fibres lisses, sous chargement de  $S=70\%$ .

Les deux paramètres de Weibull obtenus par la méthode graphique sont de  $\alpha=4,4359$  et  $\mu=3248,8958$  pour le béton 275. Par la suite, la méthode des moments nous avons obtenus  $\alpha=6,5947$  et  $\mu=3186,5894$ .

Le BRFM 275 a donné un nombre de cycle élevé par rapport au BRFM 277. Pour le béton 277, les éprouvettes ont été endommagées des premiers instants. Un renforcement d'un béton avec un taux de 1,25 et un âge de quatre ans a montré l'absence de résistance vis-à-vis de la fatigue par flexion.

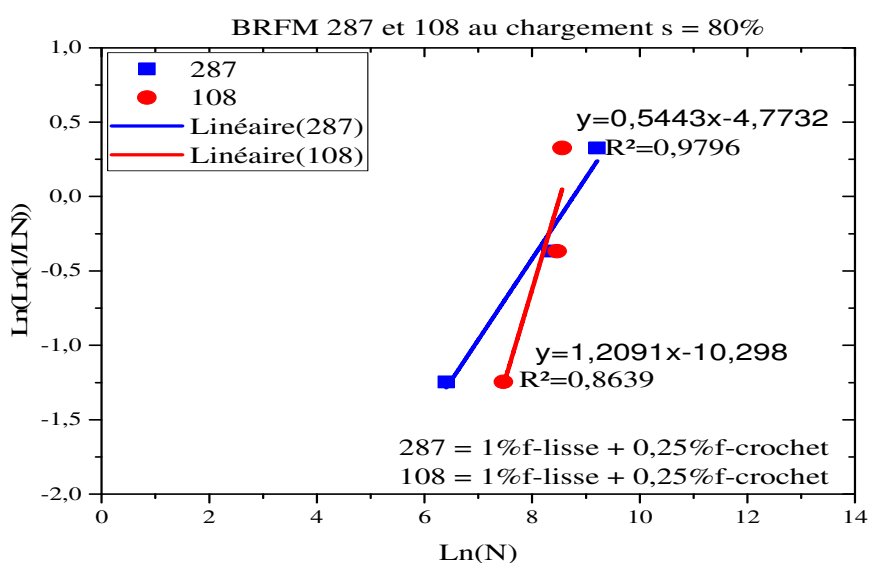
Par contre une résistance notée dans le renforcement de 1.75% f-lisse, qui est représenté par un nombre de cycle.

## Chapitre III : Résultats et discussion

### III.2.2.L'effet de longueur

Dans cette partie, une comparaison entre le renforcement par fibre hybride, avec un changement de longueur de fibre a crochet.

**287=1% f-lisse+0.25% f-crochet (35mm) et 108=1% f-lisse+0.25% f-crochet (30mm)**



**Figure III. 2:** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM287et 108 au chargement  $S=80\%$ .

La figure présente les courbes S-N pour le BRFM 287 et le béton 108 contenant un mélange de (1% fibres lisses et 0.25% fibres crochet) sous chargement de  $S=80\%$ .

Les deux paramètres de Weibull obtenus par la méthode graphique sont de  $\alpha= 0,5443$  et  $\mu= 6434,4948$  pour le béton 287, pour le béton 108  $\alpha= 1,2091$  et  $\mu= 4999,42817$ .

Ces paramètres calculer par la méthode des moments résume que  $\alpha= 1,0398$  et  $\mu= 4989,8112$  pour le béton 287 et pour le béton 108  $\alpha = 2,1995$  et  $\mu= 4402,9206$ .

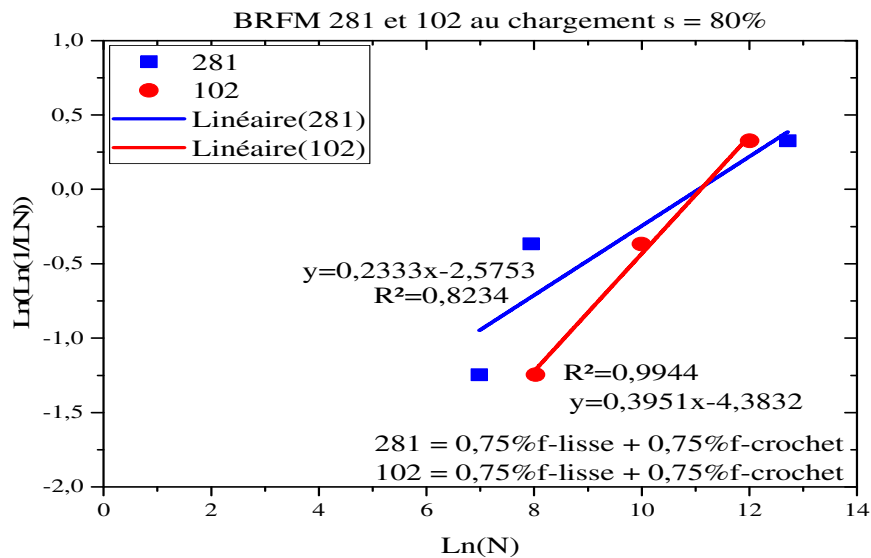
## Chapitre III : Résultats et discussion

Les coefficients de corrélation  $R^2$  sont proche de l'unité (1) 0.8639 pour béton 108 et 0.9796 pour le béton 287.

Le BRFM 287 a donné un nombre de cycle plus élevé par rapport au BRFM 108.

D'après les courbes obtenues, il semble qu'y a une légère dégradation lors de changement (réduction) de longueur pour les fibres à crochet. Pour l'hypothèse d'estimation de la durée de vie le BRFM 108 peut donner une durée plus précise par rapport à BRFM 287.

**281=0.75% f-liss+0.75% f-crochet et 102=0.75% f-liss+0.75% f-crochet**



**Figure III. 3 :** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM281 et 102 au chargement  $S=80\%$ .

La figure présente les courbes S-N pour le BRFM contenant un mélange de 0.75% fibres lisses et 0.75% fibres crochet pour le béton 281 et de même pour le béton 102 sous chargement de  $S=80\%$ .

Les deux paramètres de Weibull obtenus par la méthode graphique sont de l'ordre de  $\alpha = 0,233$  et  $\mu = 63119,7944$  pour le béton 281. Pour le béton 102  $\alpha = 0,3951$  et  $\mu = 65768,7630$ .

## Chapitre III : Résultats et discussion

Par la suite méthode des moments nous avons obtenus  $\alpha= 0,563098707$  et  $\mu= 68297,17773$  pour le béton 281 et pour le béton 102  $\alpha= 0,697214793$  et  $\mu= 49517,89578$ .

Les coefficients de corrélation  $R^2$  sont proche d l'unité (1) 0.9944 et 0.8234 pour béton 102 et 281 respectivement.

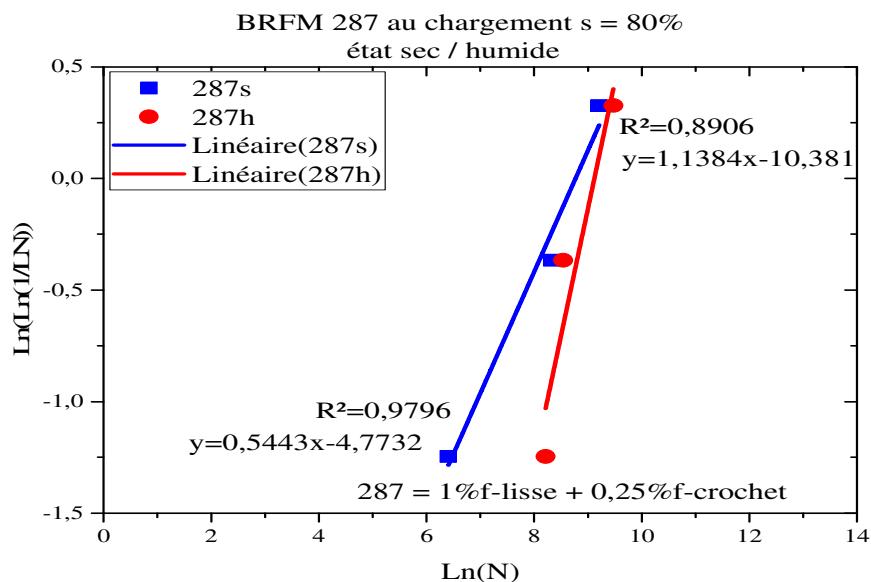
Le changement dans le paramètre de longueur a un effet sur le nombre de cycle des mélanges vieillir, BRFM 281 enregistre un nombre de cycle plus élevé par rapport au BRFM 102.

De point de vu statistique, les courbes de BRFM 281 et 102 convient avec la distribution de Wei bull, la représentativité des données sont fiable dans le cas de 102.

### III.2.3.Effet de l'absorption

Dans cette partie, on compare entre des échantillons mis dans l'eau durant 84 jours et a l'air libre.

#### Béton 287 = 1% f-lisse + 0,25% f-crochet



**Figure III. 4:** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM 287 à l'état sec et humide au chargement  $S=80\%$ .

## Chapitre III : Résultats et discussion

La figure présente les courbes S-N pour le BRFM contenant un mélange de 1% fibres lisses et 0.25% fibres crochet pour le béton 287 pour deux cas : sec et humide, sous chargement de  $S=80\%$ .

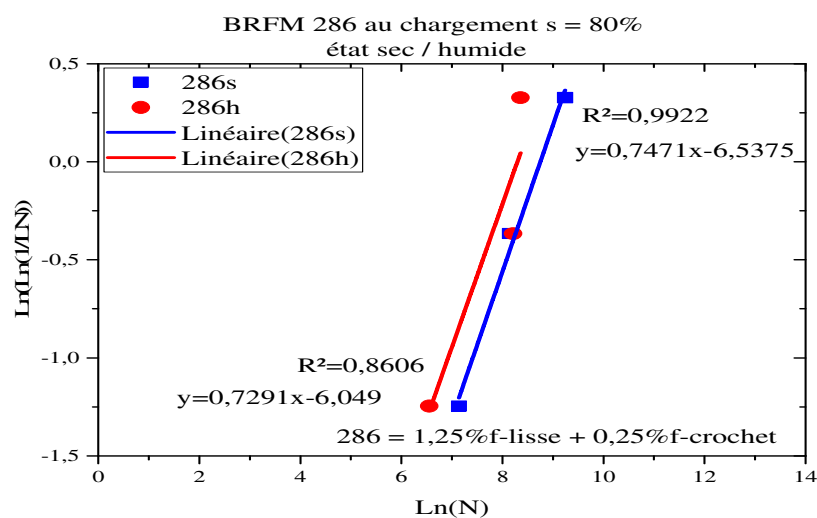
Les deux paramètres de Wei bull obtenus par la méthode graphique à l'état sec et humide sont de  $\alpha = 0,5443$  et  $\mu = 6434,4948$  ;  $\alpha = 1,1384$  et  $\mu = 9126,5119$  respectivement.

Nous avons obtenus pas la méthode des moments  $\alpha = 1,0398$  et  $\mu = 4989,8112$  à l'état sec et  $\alpha = 1,4946$  et  $\mu = 8050,4146$  à l'état humide. Les coefficients de corrélation  $R^2$  de béton 287 à l'état sec et humide sont 0.9796 et 0.8901 respectivement.

La présence de l'eau dans les pores ( $w=2,1\%$ ) des BRFM 287 donne un nombre de cycle plus élevé par rapport aux éprouvettes des bétons à l'état sec, un léger remplissage des pores par l'eau a permis au bétons de résister à la fatigue par flexion.

On note pour BRFM 287 à l'état humide que les paramètres de forme  $\alpha$  pour les deux méthodes sont proches, dans ce cas l'estimation de durée de vie sera plus précise et exacte.

### Béton 286 = 1.25% f-lisse + 0.25% f-crochet



**Figure III. 5:** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM 286 à l'état sec et humide au chargement  $S=80\%$ .

## Chapitre III : Résultats et discussion

---

La figure présente les courbes S-N pour le BRFM contenant un mélange de 1.25% fibres lisses et 0.25% fibres crochet pour le béton 286 pour deux cas : sec et humide sous chargement de  $S=80\%$ .

Les deux paramètres de Wei bull obtenus par la méthode graphique sont de  $\alpha= 0,7471$  et  $\mu= 6313,8564$  à l'état sec et  $\alpha= 0,7291$  et  $\mu= 4009,9336$  à l'état humide.

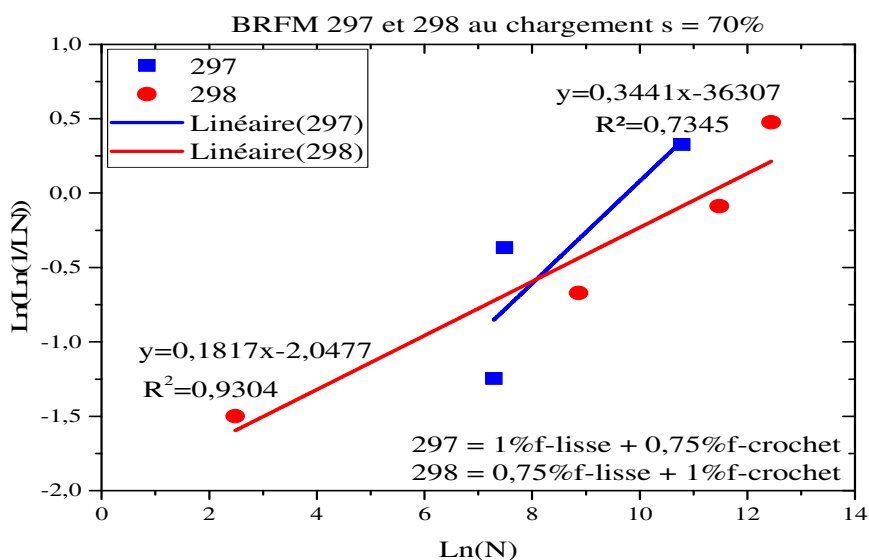
Nous avons obtenus  $\alpha= 1,0684$  et  $\mu= 5141,7375$  ;  $\alpha= 1,5586$  et  $\mu= 3211,4405$  respectivement, état sec et humide par méthode des moments.

Les coefficients de corrélation  $R^2$  de béton 286 à l'état sec et humide sont 0.9922 et 0.8606 respectivement.

L'absorption de 6.4% a un effet inverse au cas précédent .Le BRFM 286 à l'état sec donne un nombre de cycle plus élevé par rapport à ce de l'état humide

### III.2.4.Effet d'inter-change (teneur des fibres)

297=1% f-lisse+0.75% f-crochet et 298 =0.75% f-lisse+1% f-crochet



**Figure III. 6:** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM297et298au chargement  $S=70\%$ .

La figure présente les courbes S-N pour le BRFM contenant un mélange de 1% fibres lisses et 0.75% fibres crochet pour le béton 297 contrairement le béton 298 contenant un mélange 0.75%fibres lisses et 1%fibres crochet sous chargement de  $S=70\%$ .

Les deux paramètres de Wei bull obtenus par la méthode graphique sont de  $\alpha=0,3441$  et  $\mu=17442,0215$  pour le béton 297 ainsi pour le béton 298  $\alpha=0,1817$  et  $\mu=78407,5332$ .

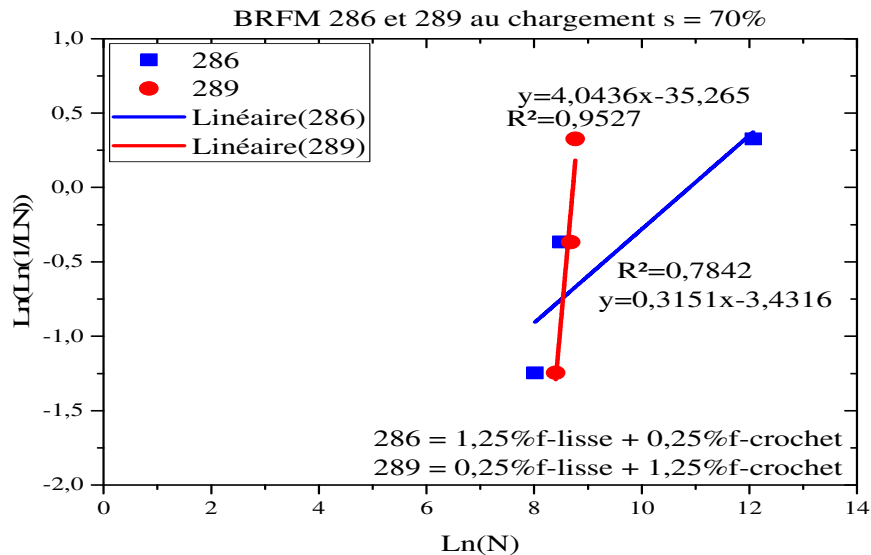
Par méthode des moments nous avons obtenus  $\alpha=0,6152$  et  $\mu=6535,88$  et  $\alpha=0,74014$  et  $\mu=74194,9735$  pour le béton 297 et 298 respectivement.

Les coefficients de corrélation  $R^2$  de béton 298 et 297 sont respectivement  $R=0.9304$  et  $R=0.7345$ .

## Chapitre III : Résultats et discussion

Pour un renforcement de fibre hybride d'un total de 1,75%, l'inter change dans le pourcentage des deux composants a influencé sur la distribution de nombre de cycle.

**286=1.25% f-liss+0.25f-crochet et 289=0.25% f-liss+1.25f-crochet .**



**Figure III. 7:** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM286 et 289 au chargement S=70%.

La figure présente les courbes S-N pour le BRFM contenant un mélange de 1.25% fibres lisses et 0.25% fibres crochet pour le béton 286 contrairement le béton 289 contenant un mélange 0.25% fibres lisses et 1.25% fibres crochet sous chargement de S=70%.

Les deux paramètres de Wei bull obtenus par la méthode graphique sont de  $\alpha = 4,0436$  et  $\mu = 6131,4653$  pour le béton 289 et  $\alpha = 0,3151$  et  $\mu = 53664,7128$  pour le béton 286.

Par la méthode des moments nous avons obtenus pour le béton 289 de  $\alpha = 6,3194$  et  $\mu = 5996,9476$  et 286  $\alpha = 0,5942$  et  $\mu = 39955,4794$  pour le béton.

Les coefficients de corrélation  $R^2$  de béton 289 est  $R = 0.9527$  et  $R = 0.7842$  pour béton 286.

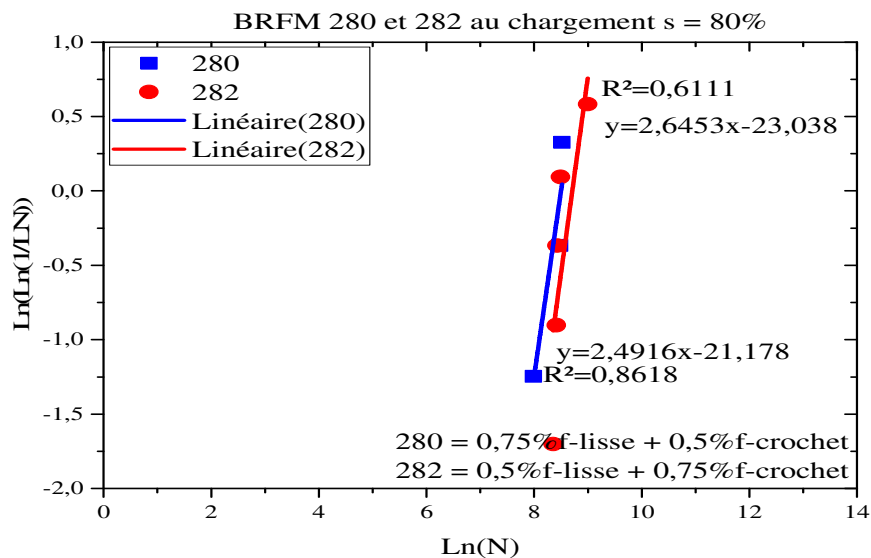


## Chapitre III : Résultats et discussion

Les droites de distributions se rapproche légèrement .Pour un chargement de 70% de la charge de rupture des bétons renforcés par fibre hybride la distribution de nombre de cycle BRFM289 convient avec la distribution de Wei bull parla méthode graphique.

Une confirmation de l'effet de l'inter change des fibres est noté dans ces échantillons.

**280=0.75% f-lisse+0.5% f-crochet et 282 =0.5% f-lisse+0.75% f-crochet**



**Figure III. 8:** Analyse graphique des données de résistance à la fatigue du BRFM280 et 282 au chargement  $S=80\%$ .

La figure présente les courbes S-N pour le BRFM contenant un mélange de 0.75% fibres lisses et 0.5% fibres crochet pour le béton 280 contrairement le béton 282 contenant un mélange 0.5% fibres lisses et 0.75% fibres crochet sous chargement de  $S=80\%$ .

Les deux paramètres de Wei bull obtenus par la méthode graphique sont de  $\alpha = 2,4916$  et  $\mu = 4913,5854$  pour le béton 280 et  $\alpha = 2,6453$  et  $\mu = 6057,370729$  pour le béton 282.

## Chapitre III : Résultats et discussion

---

Par la méthode des moments nous avons obtenus  $\alpha = 4,177912134$  et  $\mu = 4677,207438$  pour le béton 280 et pour le béton 282  $\alpha = 3,627234225$  et  $\mu = 5823,351893$ .

Les coefficients de corrélation  $R^2$  sont de 0.8618 pour le béton 280 et 0.6111 pour béton 282.

On remarque que plus le taux de renforcement par fibre hybride n'est réduit, l'effet de l'interchange se minimise, ce qui se traduit par le rapprochement des deux courbes.

Le tableau III.9 présente les paramètres  $\alpha$  et  $\mu$  calculés à partir des données expérimentales d'essai de la fatigue obtenues par la méthode graphique et méthode des moments.

**Tableau III. 9 : Les paramètres  $\alpha$  et  $\mu$  obtenues par les essais.**

BRFM	Méthode graphique		Méthode des moments	
	$\alpha$	$\mu$	$\alpha$	$\mu$
297(70%)	0,3441	17442,02155	0,615211911	6535,880061
298(70%)	0,1817	78407,53324	0,740141941	74194,97359
286(70%)	0,3151	53664,71289	0,594237662	39955,47947
289(70%)	4,0436	6131,46531	6,319400124	5996,947642
280(80%)	2,4916	4913,585462	4,177912134	4677,207438
282(80%)	2,6453	6057,370729	3,627234225	5823,351893
287( sec)80%	0,5443	6434,494897	1,039828309	4989,811242
287(humide)80%	1,1384	9126,511984	1,494611514	8050,414617
286(sec) 80%	0,7471	6313,856495	1,068484658	5141,737546
286(humide)80%	0,7291	4009,933628	1,558655731	3211,440572
108 (80%)	1,2091	4999,42817	2,199599301	4402,920645
281(80%)	0,233	63119,79448	0,563098707	68297,17773
102(80%)	0,3951	65768,76302	0,697214793	49517,89578

## Chapitre III : Résultats et discussion

---

### III.3 : Conclusion

Les essais d'endurance ont permis de tracer la courbe de Wöhler en utilisant la durée de vie (le nombre de cycle  $N$ ) correspondant à la rupture totale de l'éprouvette, à partir de ces courbes, on a estimé les deux paramètres de Weibull.

D'après les résultats obtenus par les essais de fatigue en flexion on trois points, nous avons estimé que :

- Le changement dans le paramètre de longueur a un effet sur le nombre de cycle.
- Un léger remplissage des pores par l'eau a permis aux bétons de résister à la fatigue par flexion.
- plus le taux de renforcement par fibre hybride est réduit, l'effet de l'inter change se minimise, ce qui se traduit par le rapprochement des deux courbes.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

---

Nous avons effectué des essais de fatigue par flexion sur des éprouvettes de dimension 7×7×28 cm en béton renforcé par deux types de fibres métalliques, dans le but d'estimer la durée de vie de béton.

La résistance à la fatigue par flexion de béton renforcé par les fibres d'acier représenté par le nombre de cycles est modélisée par la courbe de Wohler pour différents niveaux de chargement (stress S-N).

Lorsque le niveau de chargement est voisin de celui de la rupture en statique, une rupture brusque dès les premiers cycles est constatée. Par contre, pour des faibles niveaux de chargement la rupture n'est pas atteinte même au-delà de  $2 \times 10^6$  cycles, à cette étape des travaux de recherche confirment la consolidation de l'échantillon.

Ce phénomène de fatigue a été étudié récemment par Arora et Singh, afin de le rapprocher statistiquement par différentes équations, l'étude menée par ce dernier sur un béton formulé par des gros granulats recyclés 100 % (RCA) et le comparait avec un béton formulé avec des gros granulats 100 % naturels (NA). Pour notre initiation à la recherche, consiste en fatigue de béton renforcé par fibres d'acier vieillis (âgé de quatre ans), les paramètres pris en considération sont l'effet de l'inter change de dosage de fibres (lisses et crochets), l'effet de changement de longueur pour les fibres crochets et aussi l'effet de l'absorption de l'eau sur la fatigue.

L'ensemble des résultats sur la résistance à la fatigue par flexion trois points suit une ligne droite représenté par l'équation  $\ln[\ln(\frac{1}{L_n})] = \alpha \ln(n) - \alpha \ln(\mu)$ . La performance en fatigue par flexion a été évaluée en termes de distribution de deux paramètres de Weibull.

Selon les courbes S-N tracées par les résultats des essais de fatigue, les valeurs de paramètre Weibull obtenues pour la résistance à la fatigue montrant que :

- Le changement dans le paramètre de longueur a un effet sur le nombre de cycle.
- Un léger remplissage des pores par l'eau a permis aux bétons de résister à la fatigue par flexion.

## Conclusion générale

---

- Les pourcentages de renforcement des bétons par les fibres métalliques, soit mono ou hybrides , nous permis de conclure que, la saturation est marquée lors de l'ajout de 2% de fibres d'acier.
- Plus le taux de renforcement par fibre hybride est réduit, l'effet de l'inter change se minimise, ce qui se traduit par le rapprochement des courbes.

Dans le cas des valeurs écartées, qui ne sont pas proche entre elles comme nos résultats, on fait une moyenne des valeurs des paramètres de forme et estimer la durée de vie plus.

Notre étude se déroule sur la fatigue de béton renforcé par des fibres d'acier par flexion trois points reste a critiquer a savoir le nombre des échantillons réalisés et autres types de fibres tels que les fibres de carbone, de verre, plastique ...

---

## Références

---

### Références

1. Romualdi and GA Batson (1963), *Mechanics of crack arrest in concrete*, *J. Am. Stnss Corros. Eng. EM3 (1%3b)* 147-168.
2. Lee, M. K., & Barr, B. I. G. (2004). *An overview of the fatigue behaviour of plain and fiber reinforced concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 299-305.
3. Berbaoui, R. (2010). *Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires à base polymère (Doctoral dissertation, Le Mans)*.
4. Cordelle, A., Chapeleau, X., & Drissi-Habti, M. (2013). *Comportement en flexion 3-points d'un matériau composite instrumenté par capteur à réseaux de Bragg*. *Revue des composites et des matériaux avancés*, 1(23), pp-155.
5. Arora, S., & Singh, S. P. (2016). *Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% coarse recycled concrete aggregates*. *Construction and building materials*, 102, 782-791.
6. Al-Osta, M. A., Isa, M. N., Baluch, M. H., & Rahman, M. K. (2017). *Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete*. *Construction and Building Materials*, 134, 279-296.
7. Arora, S., & Singh, S. P. (2016). *Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% coarse recycled concrete aggregates*. *Construction and building materials*, 102, 782-791.
8. Arora, S., & Singh, S. P. (2018). *Flexural fatigue performance of concrete made with recycled concrete aggregates and ternary blended cements*. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 7(3), 182-202.
9. Chang, D. I., & Chai, W. K. (1995). *Flexural fracture and fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete structures*. *Nuclear Engineering and Design*, 156(1-2), 201-207.
10. Cordelle, A., Chapeleau, X., & Drissi-Habti, M. (2013). *Comportement en flexion 3-points d'un matériau composite instrumenté par capteur à réseaux de Bragg*. *Revue des composites et des matériaux avancés*, 1(23), pp-155.

## Références

---

11. *Krstulovic-Opara, N., Haghayeghi, A. R., Haidar, M., & Krauss, P. D. (1995). Use of conventional and high-performance steel-fiber reinforced concrete for bridge deck overlays. Materials Journal, 92(6), 669-677.*
12. *Sohel, K. M. A., Al-Jabri, K., Zhang, M. H., & Liew, J. R. (2018). Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete. Construction and Building Materials, 173, 90-100.*