

---

## Analyse expérimentale de la fatigue du béton en flexion.

B. Redjel<sup>1</sup> & W. khelifi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Civil, Université Badji Mokhtar de Annaba, BP 12, 23000, Annaba, Algérie (bredjel@yahoo.fr)

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie Civil, Université Badji Mokhtar de Annaba, BP 12, 23000, Annaba, Algérie (walidodo\_28008@hotmail.fr)

---

**RÉSUMÉ.** Des essais de fatigue en flexion 3 points ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques à une fréquence constante de 5 Hz et à différents rapports  $R = \sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ , en utilisant un signal triangulaire. Des jauges de déformation placées sur la partie tendue de l'éprouvette à différents niveaux ont permis de mesurer la déformation au cours du cyclage.

L'analyse et la description des résultats de ces essais de fatigue montrent que dans le cas traité, une courbe de Wöhler peut être dégagée et modélisée. L'évolution des déformations et des flèches au cours de la durée de vie se fait selon 3 stades indépendants de la position des jauges et du rapport R. Le deuxième stade est le plus important en durée de vie et se caractérise par une vitesse de déformation constante. La déformation à la rupture en fatigue s'effectue à un taux indépendant des conditions des essais.

**ABSTRACT.** Fatigue testing in 3-point bending were conducted on prismatic specimens with a constant frequency of 5 Hz and at different ratios  $R = \sigma_{\max}/\sigma_{\min}$  using a triangular waveform. Strain gauges placed on the stretched portion of the specimen at different levels were used to measure the deformation during cycling.

The analysis and description of the results of these fatigue tests show that in the case dealt with a Wöhler curve can be derived and modeled. The evolution of deformation and arrows during the lifetime is in 3 stages independent of the position of the gauges and the ratio R. The second stage is the most important in life and is characterized by a constant strain rate. Deformation at the fatigue failure occurs at a rate independent of test conditions.

**MOTS-CLÉS :** fatigue, déformation, durée de vie, courbe de Wöhler, rupture.

**KEY WORDS :** fatigue, strain, life time, Wöhler's curve, fracture.

---

## 1. Introduction :

Parmi les causes de rupture en service des structures, l'une des plus fréquentes est due à la fatigue des pièces sous l'action des efforts ou des déformations cycliques. L'origine de ces ruptures réside toujours dans une fissuration progressive qui s'est étendue jusqu'à ce que la section transversale restante ne puisse plus supporter l'effort appliqué et conduise à une rupture brutale pouvant provoquer un accident. Celui-ci est d'autant plus à craindre que cette fissuration progressive ne s'accompagne en général d'aucune modification de forme ou d'aspect de la pièce endommagée. C'est pourquoi, depuis que l'on connaît l'existence de ces fissurations progressives, on s'est penché sur le double problème de la détection et de la propagation des fissures fatigue, en vue de prévenir les ruptures accidentelles [1-2].

La détection des fissures fait en général appel à des méthodes d'essais non destructifs utilisées pour les déceler assez tôt et pour connaître avec précision leur étendue. L'aspect complémentaire consiste généralement à étudier les faciès de rupture pour remonter à l'origine de la fissuration et, par suite, permettre de remédier à l'accident [3].

En pratique, la détermination de la limite d'endurance pose un problème particulier par suite du caractère aléatoire des ruptures de fatigue dans ce domaine. C'est pourquoi les seules méthodes rigoureuses de détermination de la limite d'endurance font appel à des méthodes statistiques. Notons enfin que la dispersion des résultats des essais de fatigue est un fait d'expérience. Celle-ci provient en effet de nombreuses causes liées à l'hétérogénéité des matériaux, aux tolérances d'usinage, aux défauts superficiels, à la présence de contraintes résiduelles, aux tolérances de montage sur la machine, aux variations de température et de milieu au cours de l'essai, etc. On peut la réduire en précisant tous les paramètres et en les maintenant dans des limites étroites, mais on ne peut pas l'éliminer par suit, du caractère aléatoire des ruptures par fatigue. C'est pour quoi, sur la courbe de Wöhler, la durée de vie pour une contrainte donnée  $\sigma$  ne peut pas être représentée par un point mais par une distribution du nombre de cycles  $N$  [4].

Un des principaux problèmes dans le génie de construction reste l'établissement de critère fiable de prévision de la durée de vie des structures travaillant en fatigue. Ce problème est surtout lié à la nature hétérogène des matériaux qui induit une forte dispersion dans les durée de vie des éprouvettes identiques soumises aux mêmes conditions d'expérimentation durant l'histoire de fatigue ce qui empêche toute prévision de la durée de vie à partir de la courbe de Wöhler [5-6-7-8-9].

Pour des applications pratiques, il est intéressant de disposer de lois qui donneraient la durée de vie caractérisant la tenue en fatigue d'un matériau soumise à un niveau de contrainte.

Contrairement aux matériaux métalliques pour lesquels diverses relation empiriques comme l'équation linéaire de la courbe de Wöhler, la relation de Basquin ou celle de manson-coffin [8], on été développées pour prédire la durée de vie sous des sollicitations cycliques, le comportement en fatigue du béton reste difficile à étudier à cause principalement de la complexité de ce matériau ( rupture de la matrice, rupture des granulats, déchaussement aux interfaces granulats-ciment) [9-10-11]. Ainsi, toute prédiction du comportement nécessite la compréhension des phénomènes physiques à l'origine de l'endommagement ainsi que l'acquisition des données quantitatives.



## 2. Expérimentation

### 2.1 Matériaux utilisés :

La composition du béton utilisé est représenté est la suivante :

Gravillon roulé silico-calcaire 4/12 mm	1103 Kg/m <sup>3</sup>	Volume : 419,4 cm <sup>3</sup>
Sable roulé silico-calcaire 0/5 mm	706 Kg/m <sup>3</sup>	Volume : 266,4 cm <sup>3</sup>
Ciment CEM1 (ex CPA 55 HP)	353 Kg/m <sup>3</sup>	Volume : 113,14 cm <sup>3</sup>
Eau de gâchage	201 Kg/m <sup>3</sup>	Volume : 201 cm <sup>3</sup>
	2363 Kg/m <sup>3</sup>	Volume : 1000 cm <sup>3</sup>

### 2.2 Epreuve d'essai et dispositif des jauges

Les éprouvette ont été gâchées, coulées et conservées dans des conditions identiques afin qu'elles présentent les mêmes caractéristiques et permettent de se placer dans les mêmes conditions d'expérimentation.

Des mesures de déformation longitudinale sont réalisées à l'aide des jauges extenso métriques (résistance = 120  $\Omega$  et de longueur = 6 cm). Ces jauges son placées à 3 niveaux dans la zone centrale de la partie tendue sur les deux faces verticales de l'éprouvette. On prend la moyenne des déformations. La figure 01 montre le schéma du dispositif utilisé.

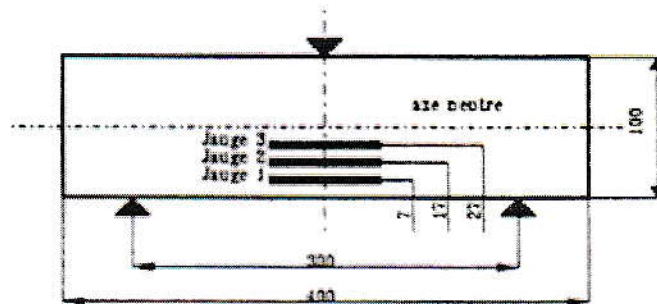


Figure 1. Epreuve utilisée et jauge de déformation

### 2.3 Conditions d'essai

Les essais de fatigue ont été réalisés à charge imposée, en flexion 3 points sur des éprouvettes prismatique de 10x10x40 (cm). La distance entre appuis est de 30cm.

Les essais ont été menés à charge imposé sur une machine de capacité maximale 250 KN et en utilisant un signal triangulaire afin d'imposer une vitesse de chargement constante.

la fréquence de cyclage a été fixée à 5 Hz, (5cycles / seconde) .

## 3. Résultats et discussion

### 3.1 Courbe de durée de vie: détermination de la courbe de Wöhler

Tous les essais ont été menés jusqu'à la rupture complète des éprouvettes. Ces essais ont été réalisés dans des conditions qui sont rassemblées dans le tableau 1 :

Tableau 1. paramètres des essais de fatigue et relevé des durées de vie.

Essais	P <sub>max</sub> (KN)	σ <sub>max</sub> (MPa)	P <sub>min</sub> (KN)	σ <sub>min</sub> (MPa)	ΔP(KN)	Δσ(MPa)	R	N <sub>R</sub>	Ln(N <sub>R</sub> )
01	12	5,4	06	2,7	06	2,7	0,5	30171	10,31
02	12	5,4	06	2,7	06	2,7	0,5	4555	8,42
03	12	5,4	06	2,7	06	2,7	0,5	39862	10,59
04	12	5,4	1,2	0,54	10,8	4,86	0,9	7	1,94
05	12	5,4	3,6	1,62	8,4	3,78	0,7	247	5,50
06	12	5,4	4,8	2,16	7,2	3,24	0,6	210	5,34
07	12	5,4	4,8	2,16	7,2	3,24	0,6	1220	7,10
08	12	5,4	5,4	2,43	6,6	2,97	0,55	4120	8,32

Les contraintes maximale et minimale ont été calculées par la formule suivante :

$$\sigma = 3/2 \left( \frac{P \cdot L}{B \cdot W^2} \right)$$

L : Distance entre les appuis égal à 30cm.

B : Epaisseur de l'éprouvette égal à 10cm.

W : Largeur de l'éprouvette égale 40cm.

P : la charge appliquée.

Le nombre de cycles à la rupture est relevé à l'aide d'un compteur encastré dans la machine.

Les résultats de durée de vie pour les différentes amplitudes de contrainte Δσ utilisées sont rassemblés sur le tableau1. Dans cette étude, la contrainte maximale σ<sub>max</sub> de cyclage à été maintenue constante pour tous les essais. Seule la contrainte minimale σ<sub>min</sub> et par conséquent l'amplitude de charge ont été varié par l'intermédiaire du rapport R. /  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

Ces contraintes sont exprimées en MPa.

Tous ces résultats sont tracés sur la figure 2 qui montre les points expérimentaux de l'amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles à la rupture.

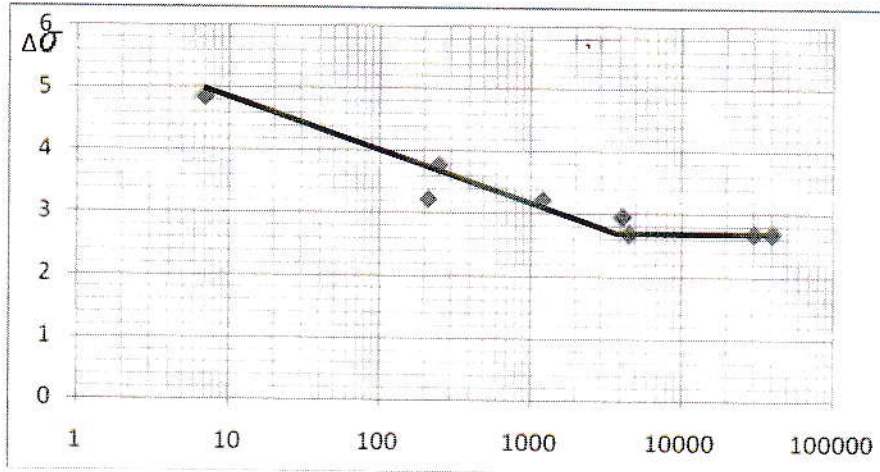


Figure 2. Tracé de la courbe de Wöhler.

$N_R$

On remarque qu'à partir 4000 cycles un palier semble se dessiner dans cette situation mais le nombre d'essai n'est pas suffisant et la dispersion des résultats trop importante pour aboutir à des interprétations certaines.

Ce phénomène de dispersion est connu dans le béton et représente une caractéristique de tous les matériaux granulaires

Il peut être expliqué par la nature hétérogène du béton ainsi que par sa structure poreuse. La présence de pores de différentes dimensions, distribués de façon aléatoire dans le volume de la structure est à l'origine de la rupture de cette dernière. Cette rupture peut être amorcée à différents niveaux de contrainte selon l'orientation, la localisation et la dimension des défauts, ce qui conduit à une dispersion dans les valeurs de la résistance à la rupture statique et dans la durée vie entre les éprouvettes soumises à un même niveau de chargement.

On remarque d'après la disposition des points expérimentaux sur le graphe de la figure 2 que les 6 premiers points sont disposés selon une droite ce qui nous oriente à modéliser la courbe de Wöhler ainsi obtenue [12].

Ainsi l'équation de Wöhler pour le cas de ces essais peut être exprimée par le modèle suivant dans un plan semi-logarithmique :

$$\begin{cases} \sigma = A \log N_R + B & \text{pour } N_R \leq 4555 \\ \sigma = \text{constante} & \text{pour } N_R \geq 4555 \end{cases}$$

A est la pente de la droite de Wöhler.

B correspond à la contrainte de rupture dans le cas statique.

Une régression linéaire a été réalisée sur les 6 premiers points en utilisant la méthode des moindres carrés pour approcher le nuage des points.

L'équation trouvée est exprimée par la relation :

$$\Delta\sigma = -0,3 \log N_R + 5,3$$

Avec un coefficient de détermination exprimé par  $r^2 = 0,904$ .



Ce qui donne un coefficient de corrélation  $r = 0,95$ .

Ce coefficient semble être satisfaisant car il s'approche de 1. La corrélation linéaire est donc bonne.

Pour la détermination de la limite d'endurance, il semble donc apparaître un palier à partir de 4555 cycle.

Nous avons par conséquent pris la valeur moyenne des 3 derniers essais dont les résultats sont disposés selon une constante.

$$\sigma_D = \frac{2,7+2,7+2,7}{3} = 2,7 \text{ MPa}$$

Ainsi la prévision de la durée de vie du béton modélisée selon l'équation de Wöhler peut être donnée par l'approche suivante.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Delta\sigma = -0,3 \log N_R + 5,3 & \text{pour } N_R \leq 4555 \text{ cycles} \\ \Delta\sigma = 2,7 \text{ MPa} & \text{pour } N_R \geq 4555 \text{ cycles} \end{array} \right.$$

### 3.2 Description de l'évolution des déformations

La figure 3 présente un exemple d'enregistrement de courbes d'évolution de l'amplitude de déformation fournie par les différentes jauges en fonction du cyclage. Concernant l'évolution des déformations longitudinales, ces courbes font apparaître en général 3 phases comme l'indique le relevé sur la courbe.

AMPLITUDE DE DEFORMATION  $\times 10^4$

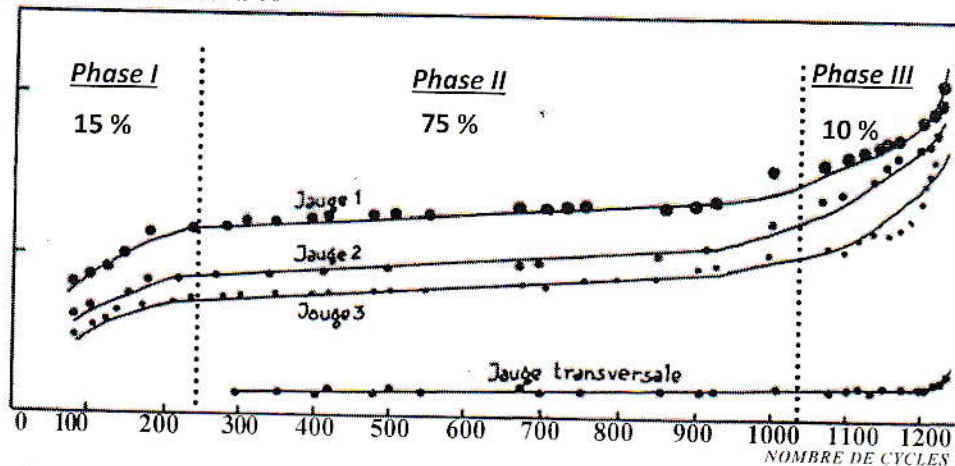


Figure 3. Amplitude de déformation en fonction du cyclage.

En pourcentage de durée de vie, ces 3 phases auxquelles différents mécanismes de déformation peuvent être associés se chiffrent ainsi selon un calcul prévisionnel que nous avons réalisés approximativement :

- **phase I:** Elle est estimée à environ 15% de la durée de vie. Elle est caractérisée par une augmentation rapide de l'amplitude de déformation dès les premiers cycles suivie d'un ralentissement. Le béton est un matériau hétérogène et poreux. Alors toutes les microfissures en phase de se propager sous la charge appliquée le font à ce moment puis se stabilisent.

- **phase II:** Elle est d'environ 75% de la durée de vie. C'est la plus importante en durée de vie. Elle est caractérisée par une augmentation lente de la déformation. Des endommagements multiples de la matrice cimentaire sous forme de microfissures, la décohérence progressive de l'interface granulats-matrice, la rupture de certains granulats

aussi sont les mécanismes qui peuvent se produire faire durant cette phase. C'est la phase d'amorçage des micros défauts et des discontinuités locales induites par les déformations importantes à l'échelle microscopique. L'endommagement se développe dans tout le volume de l'éprouvette pendant cette phase.

- **phase III:** Elle est d'environ 10% de la durée de vie. Cette phase est caractérisée par une augmentation brusque de l'amplitude de déformation et des vitesses de déformation. La densification et la multiplication rapide des microfissures qui se rejoignent par concentration de contraintes à leurs extrémités donnent naissance au développement d'une fissure principale. Plus la pente de cette partie de la courbe devient verticale et plus le dommage s'intensifie. Ce régime correspond aux derniers cycles de durée de vie de l'éprouvette. La propagation brutale de la fissure principale annonce la rupture soudaine de l'éprouvette. Le tableau 2 regroupe les mesures des déformations fournies par les 3 jauges pour tous les essais durant les 3 phases

**Tableau 2.** Les mesures des déformations fournies par les 3 jauges pour tous les essais durant les 3 phases.

N°	Stade I (15% N <sub>R</sub> ) Augmentation rapide de $\Delta\varepsilon$ pendant les premiers cycles jusqu'à :	Stade II (75% N <sub>R</sub> ) Augmentation lente de $\Delta\varepsilon$ jusqu'à :	Stade III (10% N <sub>R</sub> ) Augmentation très rapide de $\Delta\varepsilon$ annonçant la rupture de l'éprouvette:
01	0,71.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon = 0,64.10^{-4}$ jauge 2 0,41.10 <sup>-4</sup> jauge 3	0,87.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon = 0,71.10^{-4}$ jauge 2 0,53.10 <sup>-4</sup> jauge 3	
02	1,20.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon =$ - jauge 2 0,50.10 <sup>-4</sup> jauge 3	- jauge 1 $\Delta\varepsilon =$ - jauge 2 0,67.10 <sup>-4</sup> jauge 3	
03	1,00.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon = 0,70.10^{-4}$ jauge 2 0,40.10 <sup>-4</sup> jauge 3	$\Delta\varepsilon$ : semble rester constante.	
04	Rupture en 7 cycles empêchant tout enregistrement.		
05	1,83.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon =$ - jauge 2 1,10.10 <sup>-4</sup> jauge 3	2,12.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon =$ - jauge 2 1,28.10 <sup>-4</sup> jauge 3	2,70.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon_{rup} =$ - jauge 2 - jauge 3
06	1,10.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon = 0,45.10^{-4}$ jauge 2 0,33.10 <sup>-4</sup> jauge 3	1,30.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon = 0,90.10^{-4}$ jauge 2 0,75.10 <sup>-4</sup> jauge 3	3,44.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon_{rup} =$ - jauge 2 - jauge 3
07	1,15.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon = 0,80.10^{-4}$ jauge 2 0,70.10 <sup>-4</sup> jauge 3	1,35.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon = 1,05.10^{-4}$ jauge 2 0,85.10 <sup>-4</sup> jauge 3	2,28.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon_{rup} =$ - jauge 2 - jauge 3
08	2,12.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon =$ 0,81 jauge 2 - jauge 3	1,30.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon = 0,92.10^{-4}$ jauge 2 - jauge 3	2,07.10 <sup>-4</sup> jauge 1 $\Delta\varepsilon_{rup} = 1,97.10^{-4}$ jauge 2 - jauge 3

Toutes les éprouvettes se sont rompues à des niveaux d'amplitude de déformation assez voisins. En effet les mesures données par la jauge I pour tous les essais sont proches.

La valeur moyenne est

$$\Delta\varepsilon = \frac{2,7 + 3,44 + 2,28 + 2,07}{4}$$

Cette valeur est alors estimée à :

$$\Delta\varepsilon = 2,62 \cdot 10^{-4} \pm (0,604 \times 10^{-4}).$$

Ainsi il semble que la déformation à la rupture en fatigue du béton est indépendante des conditions



d'essai. Elle peut donc être une caractéristique de ce matériau.

#### 4. Conclusion

A la base de ce travail nous pouvons donner les conclusions suivantes :

1. Wöhler. La durée de vie du béton peut être approchée par une courbe de
2. Une limite d'endurance peut caractériser le béton en fatigue.
3. L'évolution de la déformation longitudinale en fatigue se fait selon 3 stades indépendants des conditions expérimentales.
4. Le stade II est le stade le plus important en durée de vie et il se caractérise par une pente constante.
5. La déformation à la rupture en fatigue du béton se fait à un taux constant indépendant des conditions d'essai. Elle peut donc être aussi une caractéristique de ce matériau.

#### 5. References

- [1] D. Cazau, G. Pomey, P. Rabbe & Ch. Janssen « La fatigue des métaux ». Dunod, 5<sup>e</sup> édition, Paris, 1969.
- [2] H. Leiris, A. Nouvet « Techniques de l'ingénieur, Métallurgie », Vol I. Essais non destructifs, M. 110, Paris 1971.
- [3] G. Pomey, P. Rabbe « Ruptures de fatigue de pièces de machines. Classification et analyse », Dunod, Paris 1968.
- [4] H. Johnson « étalonnage du dispositif potentiométrique d'étude de la propagation lente d'une fissure (Calibrating the electric potential method for studying slow crack growth) », Materials Research and Standards, Septembre 1965, 5, n° 9, pp 442-445.
- [5] J.D. Antrm « Highway Research Record », Vol 2, 1968, p.95.
- [6] H.A.W Comelissen, H.W Reinhard « Magazine of Concrete Research », Vol 36, 1984, p 126.
- [7] H. Nayeb Hasbemi, M.D. Cohen, T. Erturk « Cement and Concrete Research », Vol 15, 1985, p 879-888.
- [8] A. Alliché, D. François « Cement and Concrete Research », Vol 16, 1986, pp 199-206.
- [9] B. Redjel « Cement and Concrete Research », Vol 25, n°8, 1995, pp 1655-1666.
- [10] H.D. Bui, M. Terrien, P. Acker, P. Rossi, J. Mazars, D. Legendre, D. François, B. Redjel « rupture du béton hydraulique en traction », Rapport, Contrat DGRST n° 81, 1984, pp 77-101.
- [11] P.R. Sparcks « ACI Publication », SP 75, Detroit, 1982.
- [12] W. Khelifi « Modélisation de l'endommagement du béton en fatigue », mémoire de Master 2 option structures, Département de Génie Civil, Université de Annaba, 24 Juin 2010.