



0008-8846(95)00162-X

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA FATIGUE DU BETON EN FLEXION 3 POINTS

B. REDJEL

Laboratoire Matériaux, Institut de Génie Civil
Université de Annaba, BP 12, 23000 Annaba, Algerie

(Refereed)

(Received November 16, 1994; in final form August 14, 1995)

ABSTRACT

The results of fatigue tests under three point bending carried out on concrete prismatic specimens showed a significant scatter in the material life time. This scatter did not allow any prevision of the fatigue life time. The concrete damage through the fatigue history seems to be dependent on the development of deformations that grow at constant rate during a large part of the test.

RESUME

Les résultats des essais de fatigue en flexion 3 points menés sur des éprouvettes prismatiques en béton se caractérisent par une dispersion dans la durée de vie de ce matériau. Cette dispersion empêche toute prévision de durée de vie. L'endommagement du béton au cours de l'histoire de fatigue semble être lié à l'évolution des déformations. Celles-ci évoluent à vitesse constante pendant une bonne partie de l'essai.

Introduction

De nombreux ouvrages fabriqués en béton et en béton armé qui subissent au fil des jours l'action des charges variables et répétées présentent des dommages dus principalement à la fatigue du béton. Le cas des poutres de ponts roulants, des fondations de machines vibrantes, des ponts routes sous le poids répété des véhicules ainsi que les structures offshore sous les sollicitations des vents ou des vagues sont des exemples vivants du phénomène de fatigue. Ce phénomène de fatigue qui entraîne une détérioration progressive de la structure des matériaux puis leur rupture notamment quand les ouvrages sont soumis à des cycles complexes a été observé dès le début du siècle, mais il n'a été

développé que durant ces dernières années. La méthode la plus utilisée pour aborder la fatigue du béton est le relevé de la courbe de WÖHLER. Cependant, les différents travaux entrepris à ce jour n'ont pas permis de mettre en évidence une limite d'endurance de ce matériau. Le béton étant un matériau hétérogène et microfissuré à l'origine, les résultats trouvés dans la littérature se caractérisent par une importante dispersion [1,2,3]. Il semble actuellement difficile de faire des prévisions de durée de vie [3,4]. Pour J. BARON [5], la durée de vie considérée est le nombre de cycles au bout duquel 50% des éprouvettes fabriquées dans les mêmes conditions sont rompues. N.K. RAJU [6] s'est penché sur le côté composite du béton en s'intéressant à chacun de ses éléments constitutifs. Les courbes de WÖHLER réalisées sur des éprouvettes prismatiques de pâte de ciment, de mortier et de béton montrent qu'il n'y a pratiquement pas de différence significative quant au comportement global du béton et de ses principaux constituants. Les études réalisées jusqu'à présent sont essentiellement descriptives et se limitent à des comparaisons de variation de tracé de courbe de WÖHLER. Ainsi l'influence de la fréquence de cyclage [2,7], de l'amplitude de chargement [7], du rapport eau/ciment et des conditions hygrométriques [1] sur la tenue en fatigue du béton a été étudiée à l'aide de ces courbes. Malgré l'intérêt de ces recherches, les mécanismes d'endommagement en fatigue du béton sont encore mal connus. D'un point de vue mécanique, la rupture d'une structure est la conséquence du développement d'un endommagement localisé dans des zones de contraintes élevées [8]. Cet endommagement du béton au cours des essais de fatigue semble être lié à l'évolution des déformations [3]. Le but de ce travail consiste à étudier d'un point de vue expérimental la fatigue du béton sur des éprouvettes prismatiques en flexion 3 points et de caractériser l'évolution de l'endommagement au cours du cyclage. L'intérêt s'est porté sur les résultats des méthodes d'investigation (enregistrement de l'émission acoustique, mesure de la flèche et des déformations longitudinales et transversales) mises en oeuvre en parallèle avec l'essai de fatigue.

Expérimentation

Méthodes d'investigations

Les essais ont été réalisés en flexion 3 points sous sollicitation de fatigue, sur des éprouvettes prismatiques de 10x10x40 cm. La distance entre appuis est de 30 cm. Ces essais ont été menés à charge imposée sur une machine MAYES de capacité maximale 250 KN avec un signal triangulaire afin d'imposer une vitesse de chargement constante. La fréquence de cyclage est de 5 Hz. L'évolution de l'endommagement au cours du cyclage est suivie grâce à 3 mesures:

1- des mesures de déformation longitudinale sont réalisées à l'aide de jauges extensométriques (120 Ω , 6 cm), placées à 3 niveaux dans la zone centrale de la partie tendue sur les deux faces verticales de l'éprouvette afin de moyenner la déformation (figure 1). Les déformations transversales sont mesurées au centre de la face de dessous de l'éprouvette (jauges extensométriques 120 Ω , 3 cm).

2- des mesures de l'évolution de la flèche au cours du cyclage sont relevées au niveau du milieu de l'éprouvette grâce à un capteur piézo-électrique. Une réglette rigide est fixée par des élastiques sur deux vis placées sur l'éprouvette au droit des appuis et au niveau de la fibre neutre. La réglette est solidaire en son milieu du support du capteur inductif.

3- émission acoustique: des capteurs piézo-électriques placés de part et d'autre de l'éprouvette sous contrainte convertissent les ondes mécaniques en ondes électriques:

- capteurs: pastilles titane et zirconate de baryum de fréquence de résonance 300 KHz.
- préamplificateurs réglables: 10, 40, 60 DB.
- bande passante 0 à 10 MHz.
- mémoire visualisable sur scope: 1024 places en abscisse (localisation) et 256 places en ordonnée (comptage cumulé).

La figure 2 montre le dispositif expérimental utilisé.

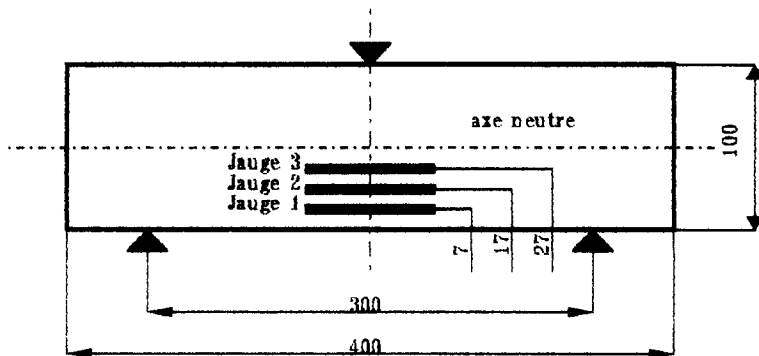


FIG.1
Eprouvette utilisée (jauges longitudinales)

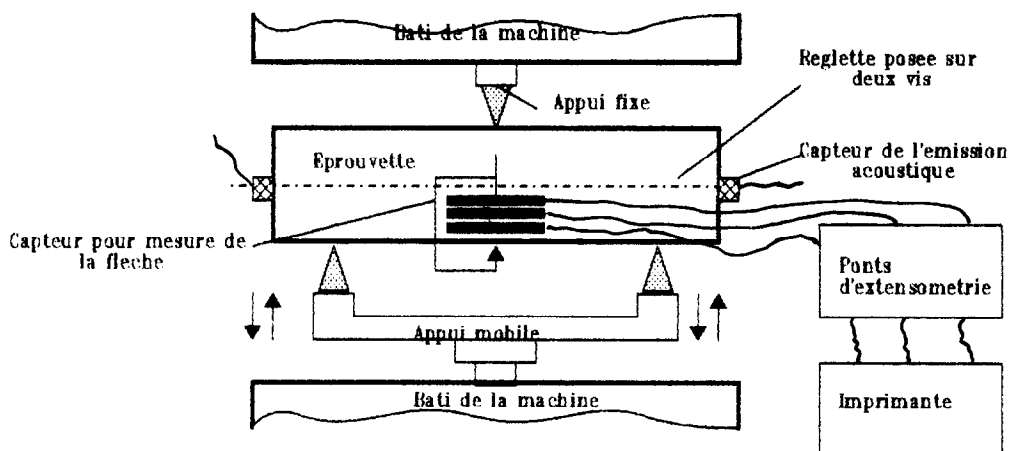


FIG.2
Montage expérimental utilisé

Composition du béton utilisé:

- Gravillon roulé silico-calcaire 4/12 mm de Bichain Yonne (1103 Kg/m³)
- Sable roulé silico-calcaire 0/5 mm de Seine (706 Kg/m³)
- Ciment CEMI (ex CPA 55 HP) usine de la Frette Lafarge Cor-meilles (353 Kg/m³)
- Eau de gâchage (201 Kg/m³)

Essais sur béton frais:

- Temps d'écoulement au maniabilimètre LCL : 12 secondes
- Affaissement au cône d'ABRAHMS : 2.2 cm

Mise en place du béton dans les moules:

- Table vibrante : 150 Hz
- Temps : 20 secondes

Les éprouvettes ont été gâchées, coulées et conservées dans des conditions identiques afin qu'elles présentent les mêmes caractéristiques et permettent de se placer dans des conditions opératoires semblables [4].

Résultats et discussionsCourbe de durée de vie

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 Réalisés.

N°essai	Pmax	Pmin	$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$	$R = P_{\min} / P_{\max}$	NR (cycles)
1	12	6	6	0.5	30171
2	12	6	6	0.5	4555
3	12	6	6	0.5	39862
4	12	1.2	10.8	0.1	7
5	12	3.6	8.4	0.3	247
6	12	4.8	7.2	0.4	210
7	12	4.8	7.2	0.4	1220
8	12	5.4	6.6	0.45	4120

Les résultats de durée de vie pour les différentes amplitudes de charge ΔP utilisées sont illustrés sur la figure 3. Dans cette étude, la charge maximale de cyclage a été maintenue constante pour tous les essais. Seule la charge minimale et par conséquent l'amplitude de charge ont varié par l'intermédiaire du rapport R. Ces charges sont exprimées en KN.

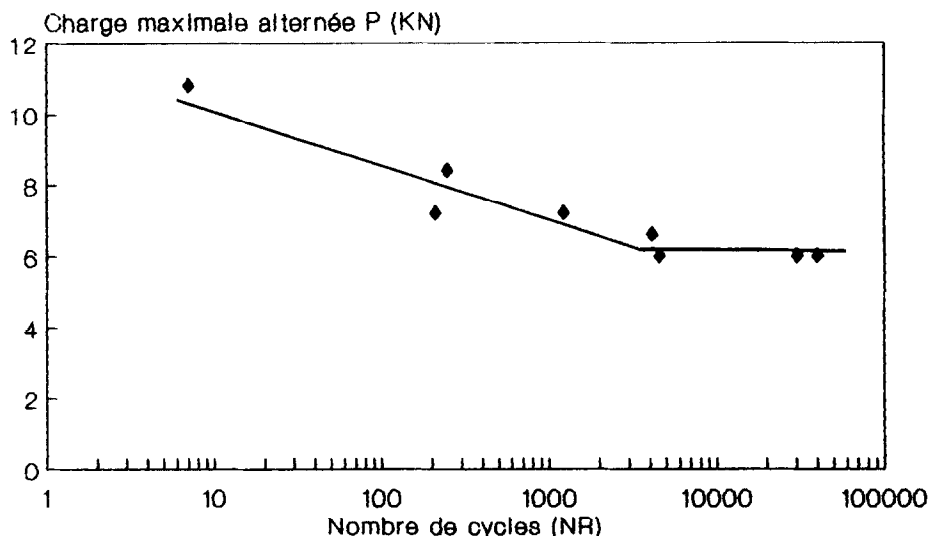


FIG. 3
Courbe de WÖHLER

Il semble apparaître un palier à partir de 4000 cycles mais le nombre d'essais n'est pas suffisant et la dispersion des résultats trop importante pour aboutir à des résultats certains. Ce phénomène de dispersion est une caractéristique du matériau étudié. 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 l'éprouvette 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 de vie entre les éprouvettes soumises à un même niveau de chargement. Pour J.D. ANTRIM [9] tous les événements précédents la rupture en fatigue de la pâte de ciment durcie dépendent d'une série de processus aléatoires et ce serait la raison d'une dispersion remarquable des résultats obtenus. Ainsi, la courbe de WOHLER dans le cas des matériaux hétérogènes ne permet pas de donner une prévision de durée de vie avec une bonne probabilité et ne peut être utilisée que pour des études comparatives [3].

Influence du rapport $R = P_{min} / P_{max}$ sur la durée de vie

La figure 4 montre l'influence du rapport R sur la durée de vie des éprouvettes essayées. Malgré le phénomène de dispersion,

il semble que lorsque R augmente le nombre de cycles à la rupture augmente et inversement et ceci pour une valeur de P_{max} constante. Cette constatation rejoint celle de M.E. AWARD et H.K. HILSDORF [7] sur une série de bétons. Il faut noter que le nombre de cycles diminue considérablement quand R tend vers 0 (à partir de 0.1). Dans ce cas l'essai de fatigue est très proche de l'essai de rupture statique. Le temps pendant lequel l'éprouvette subit la charge est alors plus significatif que le nombre de cycles à la rupture. Quand R augmente et atteint la valeur de 0.5, la durée de vie devient alors plus importante. J.D. ANTRIM [1] signale que pour les grandes valeurs de R qui tendent vers 1, le nombre de cycles à la rupture cesse d'être une mesure pertinente de la durée de vie et il faudrait alors tenir compte plutôt de la durée même de l'essai et de la fréquence de chargement.

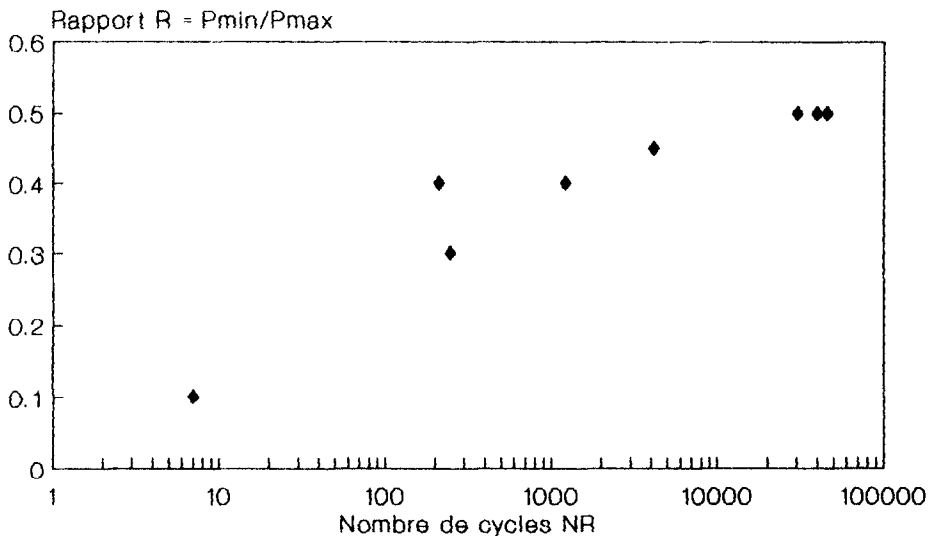


FIG.4
Influence du rapport R sur la durée de vie

Evolution des déformations

La figure 5 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: une première phase au cours de laquelle l'amplitude de déformation par cycle $d(\Delta\epsilon)/dN$ ou vitesse de déformation décroît, une deuxième au cours de laquelle elle reste constante et enfin une troisième d'accroissement rapide de l'amplitude de déformation par cycle, précédant la rupture. Il faut noter simplement que les déformations transversales évoluent peu pendant l'essai de fatigue. En pourcentage de durée de vie, ces 3 phases auxquelles différents mécanismes de déformation peuvent être associés se chiffrent ainsi:

- phase I: 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 étant un matériau hétérogène et poreux, il est probable que pendant ce régime certaines discontinuités susceptibles de se propager sous la charge appliquée le font dès les premiers cycles puis se stabilisent du fait de l'énergie considérable nécessaire à une plus grande propagation. Pour notre cas, cette phase nous semble correspondre à une adaptation du matériau à la sollicitation et à des réarrangements initiaux près des appuis.

- phase II: environ 75% de la durée de vie. C'est la plus importante en durée de vie. Elle est caractérisée par une vitesse de l'amplitude de déformation constante mais dont la valeur diffère d'un essai à l'autre. La nature répétitive du chargement induit des endommagements multiples de la matrice cimentaire sous forme de microfissures ainsi que la décohesion progressive de l'interface granulat-matrice. C'est la phase d'amorçage des microdéfauts et des discontinuités locales induites par les déformations importantes à l'échelle microscopique. Cet endommagement diffus se développe dans tout le volume de l'éprouvette et a déjà été rapporté par plusieurs auteurs lors de chargement statique d'éprouvettes en béton [8,9,10].

- phase III: environ 10% de la durée de vie. Ce régime est caractérisé 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 macrofissure ou 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. Il est à signaler que le phénomène de localisation de l'endommagement dans le béton a été décrit et mis en évidence par PIJAUDIER-CABOT [8].

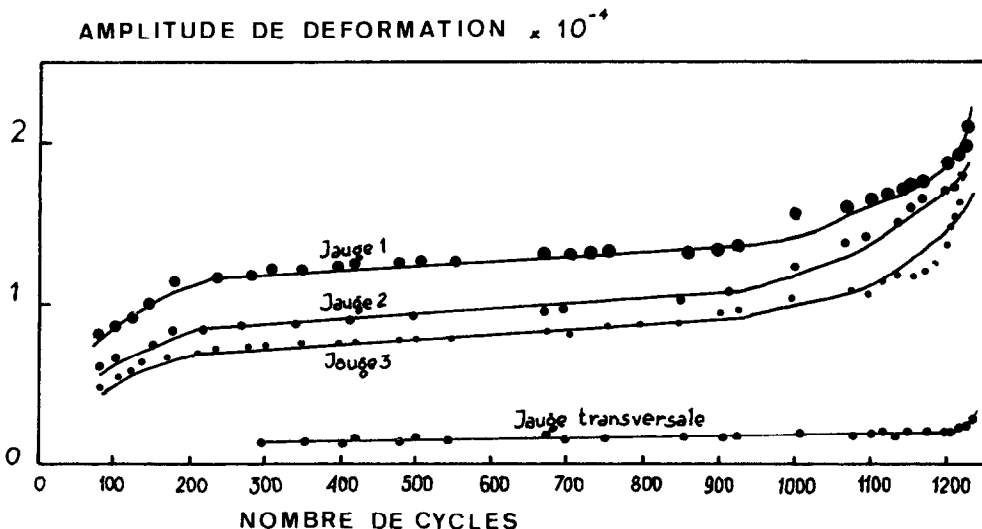


FIG.5

Amplitude de déformation en fonction du cyclage

Toutes les éprouvettes se sont rompues à des niveaux d'amplitude de déformation $\Delta\epsilon$ assez voisins. Celle-ci est en moyenne de $\Delta\epsilon = 2.62 \cdot 10^{-4} \pm (0.604 \cdot 10^{-4})$. Cette constatation est en accord avec les résultats de J.W. MURDOCK et C.E. KESLER [11] qui suggèrent que la rupture en fatigue se produit à une déformation constante, indépendamment du niveau de contrainte appliquée ou du nombre de cycles nécessaire pour produire la rupture, ainsi que ceux de A. ALLICHE [3] sur la pâte de ciment durcie. Il est à signaler que pour J.W. MURDOCK et C.E. KESLER [11], la valeur de cette déformation à rupture en fatigue est plus grande que celle enregistrée lors de la rupture en statique. Les courbes $\Delta\epsilon=f(NR)$ relatives aux enregistrements des différentes jauges sont parallèles et se maintiennent à égale distance l'une de l'autre pendant toute la durée de l'essai. Ce résultat semble indiquer que les déformations en flexion sur la face tendue de l'éprouvette sont proportionnelles à la distance à l'axe neutre pendant tout l'essai de fatigue. D'après ces courbes, le deuxième régime caractérisant l'évolution lente de l'amplitude de déformation au cours du cyclage est le plus long en durée de vie. Il est caractérisé par une vitesse de déformation $d(\Delta\epsilon)/dN$ constante. Le tableau 2 regroupe pour tous les essais les valeurs des pentes de ces droites relatives aux enregistrements des 3 jauges longitudinales.

Tableau 2
Valeurs de l'Amplitude de Déformation par Cycle $\times 10^{-8}$

Essai	1	2	3	4	5	6	7	8
Jauge1	0.127	0.20	0	-	14	65	3.73	0.7
Jauge2	0.123	0.21	0	-	-	48	3.38	0.48
Jauge3	0.116	0.42	0	-	14.2	44	3	-

Comme A. ALLICHE [3] avait montré dans le cas de la fatigue de la pâte de ciment durcie que le nombre de cycles à la rupture était bien en corrélation avec la variation de la déformation par cycle au cours du régime II, nous avons reporté sur la figure 6 les différents points expérimentaux obtenus: en ordonnée l'amplitude de déformation par cycle $d(\Delta\epsilon)/dN$ correspondante à la jauge la plus déformée (jauge 1) et en abscisse le nombre de cycles à la rupture NR. Il ressort que l'amplitude de déformation par cycle est importante quand le nombre de cycles à la rupture est faible et inversement. Il semble bien qu'une relation analogue à celle d'ALLICHE existe. Les différents points $d(\Delta\epsilon)/dN$ sont approximativement disposés sur une droite et peuvent être approchés par une corrélation linéaire. Ce résultat semble être plus intéressant que le relevé de la courbe de WÖHLER qui montre une dispersion beaucoup plus importante. Ainsi, la déformation longitudinale pourrait caractériser la tenue à la fatigue du béton et la durée de vie de ce matériau dépendrait donc principalement de sa capacité de déformation.

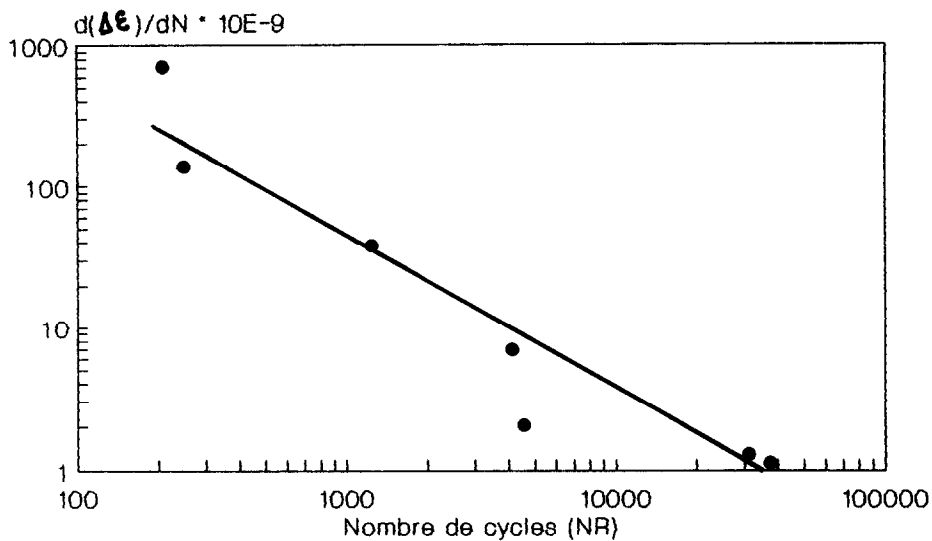


FIG. 6

Amplitude de déformation par cycle en fonction de NR

Evolution de la flèche

La figure 7 montre un exemple de l'évolution de la flèche en fonction du nombre de cycles. Comme pour les mesures des déformations, cette évolution de la flèche au cours du cyclage se décompose en 3 étapes similaires à celles de l'évolution des déformations durant l'histoire de fatigue.

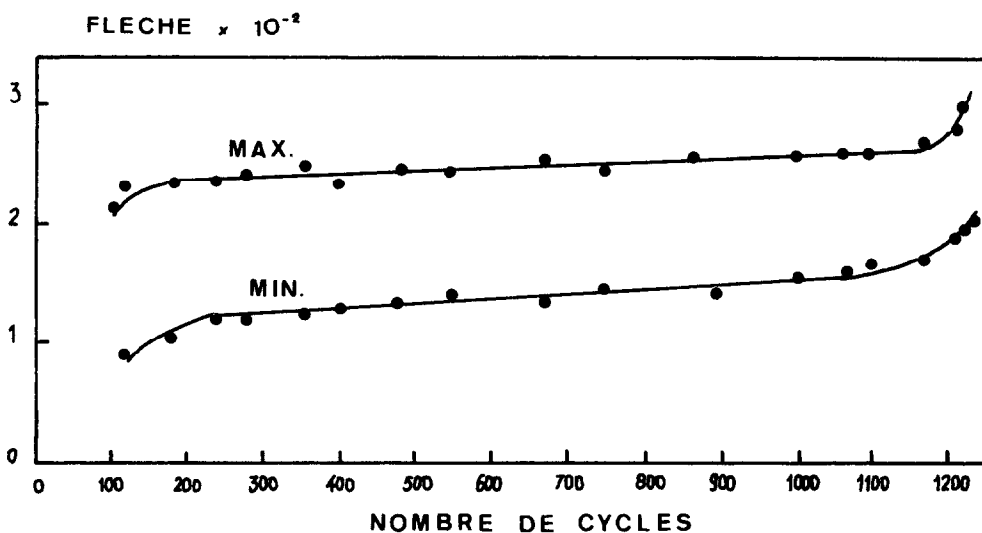


FIG. 7

Evolution de la flèche en fonction du nombre de cycles

Il semble donc que les résultats obtenus à l'aide de cette méthode d'investigation sont en corrélation satisfaisante avec ceux obtenus par l'enregistrement des déformations longitudinales.

Enregistrement de l'émission acoustique

La figure 8 présente un exemple de l'évolution de l'émission acoustique localisée au cours du cyclage. En ordonnée, est porté le nombre d'événements et en abscisse la position de la source entre les deux capteurs. La technique de localisation linéaire a été utilisée pour préciser la position des sources d'émission acoustique lors des essais. Notons que l'application de cette technique à la détection de l'endommagement du béton a fait l'objet de nombreuses études au laboratoire sur des éprouvettes soumises à des chargements statiques en traction [10,12,13] ou en compression [14] et a permis d'obtenir des informations sur les phénomènes intérieurs. Il apparaît qu'au début de l'essai, des événements sont enregistrés de façon assez dispersée le long de l'éprouvette et qu'au contraire vers la fin, ils se regroupent tous au droit de la charge appliquée, là où se produit la fissuration finale. Cette intense émission acoustique est localisée à l'endroit où a eu lieu la rupture, ce qui pourrait correspondre à la propagation d'une fissure qui a pour origine la densification des micropores et des microfissures se rejoignant par concentration de contraintes à leurs extrémités.

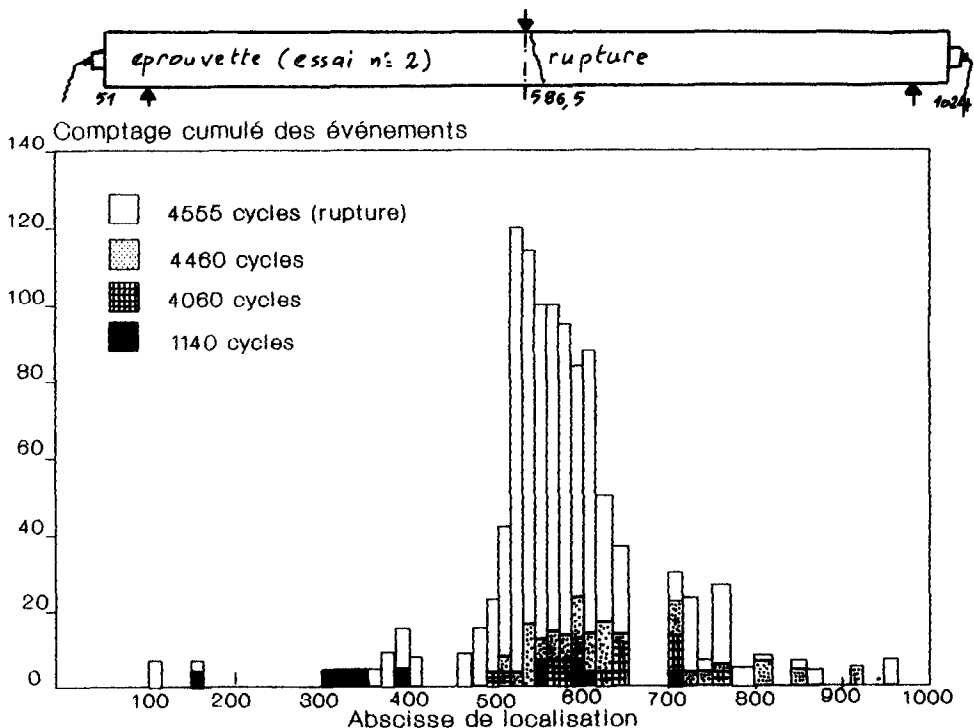


FIG.8
Histogramme des images de localisation durant le cyclage

L'évolution du taux d'émission cumulé en fonction du nombre de cycles suit une allure similaire à celle des enregistrements des déformations comme le montre la courbe de la figure 9. Cette courbe révèle 2 parties de pentes différentes qui pourraient correspondre aux régimes II et III de la courbe $\Delta\epsilon = f(NR)$:

- une partie où l'émission acoustique est réduite correspondante à une évolution lente de l'endommagement (régime II).
- une dernière partie caractérisée par une augmentation du nombre de signaux, ce qui correspondrait à la propagation des discontinuités. Cette intense émission acoustique annonce la rupture de l'éprouvette.

Il est à signaler que le béton étant un matériau hétérogène, les ondes émises peuvent se réfléchir sur chaque obstacle rencontré. Elles sont atténuées et déformées pendant leur cheminement dans le matériau. Elles peuvent aussi être tellement faibles qu'elles n'atteignent pas les capteurs ce qui pourrait expliquer le fait de ne pas observer le premier stade d'endommagement sur ces courbes. D'autre part, la technique utilisée repose sur un comptage d'événements acoustiques dont l'amplitude dépasse un certain seuil et non sur une analyse de l'énergie des événements et de leur contenu fréquentiel. C'est peut-être la raison pour laquelle l'émission acoustique reste plus un moyen d'information ou de contrôle que de mesure [13,15]. Y. BERTHAUD [14] signale qu'il faut être prudent dans l'interprétation des résultats de mesure et confirme que l'utilisation des résultats acoustiques dans la prédiction du comportement mécanique des matériaux nécessite une analyse rigoureuse des mécanismes responsables de la dégradation.

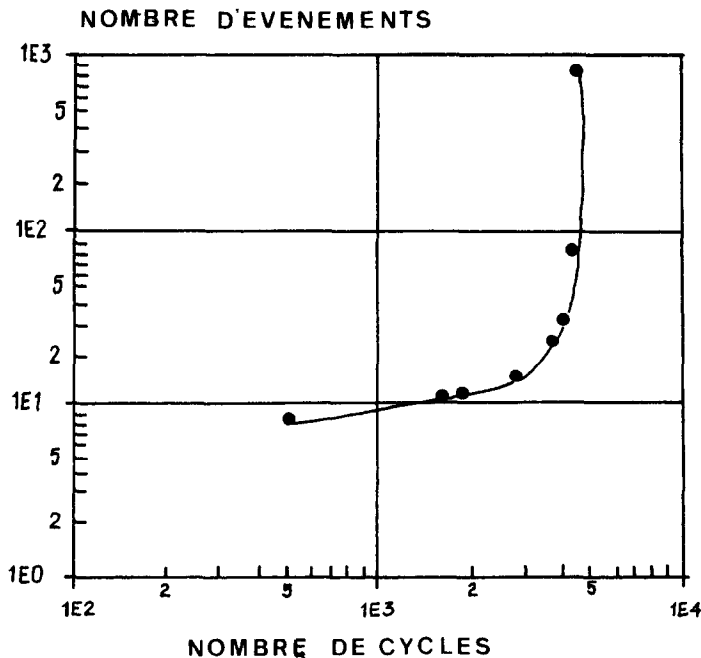


FIG. 9

Evolution du taux d'émission cumulé durant le cyclage.

Conclusions

La courbe de WÖHLER dans le cas de la fatigue du béton se caractérise par une importante dispersion, ce qui empêche toute prévision de durée de vie. L'amplitude de déformation longitudinale évolue selon 3 régimes pendant l'essai de fatigue. Le second stade qui est le plus important en durée de vie se caractérise par une pente constante. Celle-ci est importante quand le nombre de cycles à la rupture est faible et inversement. Ainsi, les critères d'endommagement en fatigue par flexion du béton devraient porter sur les déformations et précisément sur les déformations maximales d'extension. Un modèle fondé sur l'accumulation progressive d'un dommage à chaque cycle pourrait décrire la prévision du comportement en fatigue du béton.

Remerciements

Ce travail qui entre dans le cadre du contrat DGRST n° 81 P 0713 a été effectué à la division mécanique de l'Université de Technologie de Compiègne (France). Il a bénéficié des conseils et des encouragements du Professeur D. FRANCOIS (Ecole Centrale de Paris) à qui l'auteur adresse ses plus vifs remerciements.

Références

1. J.D. Antrim, Highway Research Record, Vol. 210, p.95 (1968).
2. H. Weigler & W. Freitag, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 247, Berlin, (1975).
3. A. Alliche, Thèse de DDI, GM, U.T.Compiègne, (1981).
4. B. Redjel, Rapport DEA, GM, U.T.Compiègne, 7 Juillet (1983).
5. J. Baron, La fatigue du béton hydraulique Chap. 20 in "Le béton hydraulique", Presses de l'ENPC, Paris (1982).
6. N.K. Raju, J. of American Concrete Institute, June, (1970).
7. M.E. Award & H.K. Hilsdorf, Publication SP 41, ACI, Committee 215 (1973).
8. G. Pijaudier-Cabot, Thèse 3^{ème} cycle, Paris 6 (1985).
9. J. Mazars & Y. Berthaud, Comptes Rendus de l'Académie des Sci. Serie 2, Vol. 308, N°7, pp. 579-584, (1989).
10. Z.P. Bazant, Appl. Mech. Rev., N°39, pp. 675-705, (1986)
11. J.W. Murdock & C.E. Kesler, T. and A.M. Report n° 587, University of Illinois, August (1960).
12. J. Mazars, Thèse de Doct. d'état, Paris 6, (1984).
13. D. Walter, Thèse de DDI, GM, UTCompiègne, (1982).
14. Y. Berthaud, thèse de Doct. de l'Université de Paris 6, (1988).
15. P. Rossi, J.L Robert, J.P Gervais & D. Bruhat, Materials and Structures / matériaux et Construction, 22, pp. 374-384, (1989).