

Contribution à l'Analyse de la Variation de l'Energie de Rupture des Bétons sous Gradient Thermique

F. Belhamel* ; A. Lazazi* et F. Kharchi**

* Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB)
Cité Nouvelle El Mokran-Souidania-Alger. E-mail : Belhamel.dz@yahoo.fr

** Département de Génie civil-Université des Sciences et de la Technologie
Houari Boumediene-USTHB, BP 32 El-Alia-Bab Ezzouar-Alger

Résumé - L'analyse de l'influence de la variation des températures sur les propriétés mécaniques des bétons ordinaires présente un intérêt indéniable surtout pour toutes les réalisations où les aspects sécuritaires sont importants et tributaires des risques d'incendies imprévus et d'élévations incontrôlées et brutales de températures comme c'est généralement le cas dans de très nombreux complexes industriels ou de centrales de production d'énergie.

Le but recherché étant la détermination de l'énergie de rupture des bétons ordinaires (B.O) sous gradient thermique par l'application des concepts de base de la Mécanique de la Rupture (MR) en prolongement des travaux de recherche déjà entrepris qui ont permis la détermination de cette énergie de rupture expérimentalement dans le cas de bétons ordinaires par des essais de flexion trois points sur poutres entaillées en négligeant l'effet du gradient thermique ; l'influence de la température sur la variation de ce paramètre s'est révélée importante à analyser pour compléter l'étude entamée et pour estimer la fissuration superficielle des bétons ordinaires sous gradient thermique.

La caractérisation des essais liés aux effets de température est fonction du temps et donc aléatoire : la loi température-temps utilisée par exemple pour simuler un essai normalisé de comportement vis-à-vis du feu (incendie normalisé) peut être extrapolée pour l'analyse d'un caisson de réacteur nucléaire en béton précontraint (PCR/V : Pre-stressed Concrete Reactor Vessel) à l'état de service ou bien pour toute autre réalisation où les variations de températures sont présentes.

Abstract - This study is a contribution to the analysis of the influence of normal and high temperatures on the mechanical properties of ordinary concretes. The aim of this research is the quantitative, experimental and numerical simulation of a fire, on one hand, and the determination of a fracture energy under thermal gradients applying fracture mechanics basic concepts, on the other hand. This fracture energy has already been experimentally estimated for ordinary concretes by three-point bending tests on notched beams by neglecting the thermal gradient effect. The analysis of the influence of temperature on the variation of this parameter is revealed to be important in order to complete the study already initiated, and to estimate the superficial cracking of ordinary concretes under thermal gradients. The tests characterization on temperature effects varied according to time and is then aleatory: the temperature-time law used to simulate a standardized test to fire behavior (standardized fire) could be extrapolated for the analysis of a Pre-stressed Concrete nuclear Reactor Vessel (PCR/V) at service and ultimate states.

Mots clés : Energie de rupture, Gradient thermique, Essai de flexion trois points, Fissuration superficielle, Béton ordinaire, Essai normalisé, Poutre entaillée

1. INTRODUCTION

Les études relatives à l'influence de la température sur les propriétés mécaniques des bétons ordinaires et armés sont insuffisantes au stade actuel pour élaborer des modèles analytiques ou numériques de simulation fiables pour l'analyse des structures en béton sous gradient thermique.

Le calcul au feu des structures en béton a fait l'objet d'une recherche préliminaire au CNERIB (Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment) afin de développer une réglementation algérienne sur l'incendie [1-2-3] ; celle-ci utilise la synthèse bibliographique du DTU révisé de 1987, où l'incendie est assimilé à une courbe ISO 834 donnant la variation de la température en fonction du temps dans un four agréé du CSTB [4]. Le processus complexe de fissuration des bétons et la distribution interne des contraintes résiduelles au cœur d'une éprouvette soumise au feu sont totalement négligés.

D'autre part le mouvement important d'eau, emprisonnée dans les pores sous pression se trouvant dans la masse du béton peut engendrer le phénomène d'éclatement du béton ayant pour conséquence de faire disparaître une partie de béton dont l'existence est indispensable à la stabilité des structures. Ce phénomène complexe encore mal connu et très mal cerné est actuellement inscrit parmi les programmes de recherche prioritaires importants du CSTB [5] en France.

2. FORMULATION MATHÉMATIQUE

La température du béton d'une structure en tout point et à tout instant est calculée par la résolution de l'équation (1) de Fourier suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{c \mathbf{r}}{I} \Delta T \quad (1)$$

Où : t est le temps ;

c est la chaleur spécifique par unité de masse pour un degré ;

\mathbf{r} est la masse volumique ;

$c \mathbf{r}$ étant la chaleur spécifique par unité de volume pour un degré ;

I est la conductivité thermique ;

Δ est le laplacien ;

T est la température.

La structure à étudier est décrite par la section droite et le problème se ramène pour l'analyse des poutres, poteaux et dalles à l'étude d'un problème plan (2D). Mathématiquement, la solution de l'équation différentielle précédente est recherchée numériquement par la méthode des différences finies, en tenant compte que les caractéristiques des bétons varient avec la température.

L'espace à étudier est généralement découpé en rectangles élémentaires (Δx_i , Δy_i) qu'il soit en ambiance froide ou en ambiance chaude; la température T_{ij} à calculer au temps t sera déterminée au centre de chaque rectangle élémentaire du maillage (fig. 1).

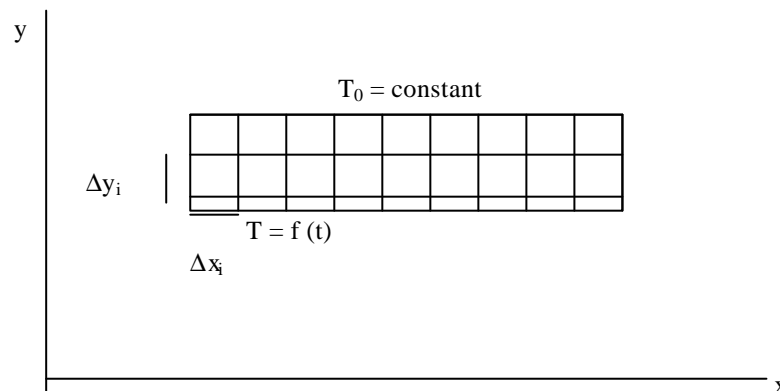


Fig.1 : maillage de la section dans le plan (x, y)

Dans le cas de l'analyse d'une structure au feu, la courbe de montée des températures du côté de la face exposée au feu est la courbe standard d'équation (2) suivante :

$$T - T_0 = 345 \log_{10} (8t + 1) \quad (2)$$

Où : T est la température au temps t exprimée en minutes ;

T_0 est la température au temps initial.

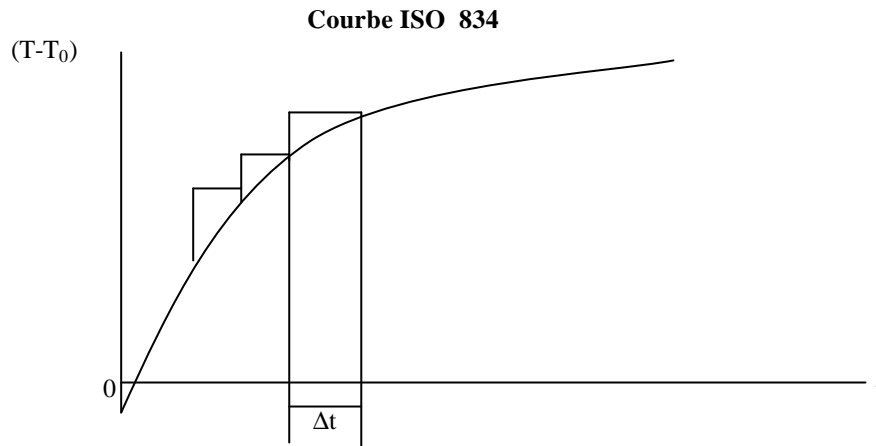
La température de la face non exposée est supposée maintenue à la valeur T_0 .

Comme exemple, la face exposée au feu est la sous-face pour les planchers et toute la surface pour les poteaux. Pour le calcul par différences finies, le temps t est divisé en intervalles Δt , ce qui ramène à une courbe discrétisée en escalier encadrant par excès la courbe ISO 834 (Fig.2).

La conductivité thermique du béton dépend de la température de celui-ci ; on adopte $\lambda = 1.4 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ à zéro degré et $\lambda = 0.5$ à 1000°C . Le calcul des températures par la méthode des différences finies pose le problème de la convergence que l'on règle en agissant sur le choix de l'intervalle de temps Δt ; généralement on adopte un intervalle de temps aussi petit que le sont Δx et Δy .

Le partage de la section étudiée en carrés de côtés $\Delta x = \Delta y$ et un partage du temps en intervalles $\Delta t =$

$\frac{c\mathbf{r}}{4I} \Delta x^2$ donnent des résultats satisfaisants.

Fig.2 : découpage du temps t en intervalles Δt

Les calculs effectués sur des poutres, dalles et poteaux à différentes durées d'exposition au feu, allant de 1/2h à 3h sont concordants avec les valeurs de températures données dans les abaques du DTU et ceux obtenus par certains auteurs [1, 2,3].

Il est évident que les températures calculées ne coïncident pas exactement avec celles des essais car les éléments de structures en béton contiennent toujours de l'eau libre qui absorbe une partie du flux pour se vaporiser ; sachant qu'on ne connaît pas la teneur exacte en eau et le mouvement de celle-ci au cœur d'une structure en fonction de l'utilisation des ouvrages, il n'est pas encore possible de maîtriser judicieusement ce phénomène.

Il ne suffit pas d'effectuer des calculs de prévision en balayant l'espace et le temps pour calculer des températures ; la caractérisation thermo-mécanique du béton est complexe et nécessite des essais de validation plus réalistes.

L'essai SDM (Stiffness Damage Method) n'a pu être réalisé au CNERIB, faute de moyens onéreux ; celui-ci est l'essai le plus représentatif pour l'analyse de l'endommagement des bétons au feu [6, 7].

Les études effectuées au CNERIB, relatives au comportement au feu des structures en béton ont montré leur insuffisance quant à l'estimation de la variation de l'énergie de rupture des bétons sous l'effet de la température. Ce paramètre étant très important pour établir des critères de fissuration thermo-mécaniques selon les concepts de la Mécanique de la Rupture appliqué au béton [8-9-10].

L'analyse des caissons en béton (PCRIV) des centrales nucléaires, qu'elles soient à l'état de service ou à l'état ultime, utilise ces critères pour des raisons de sécurité [11].

3. VARIATION DE L'ÉNERGIE DE RUPTURE DES BETONS SOUS GRADIENT THERMIQUE

3.1. Essai de flexion trois points à température ambiante

L'essai le plus utilisé actuellement pour quantifier l'énergie de rupture des bétons est l'essai de flexion trois points sur poutres entaillées selon les recommandations de la Rilem [8-9].

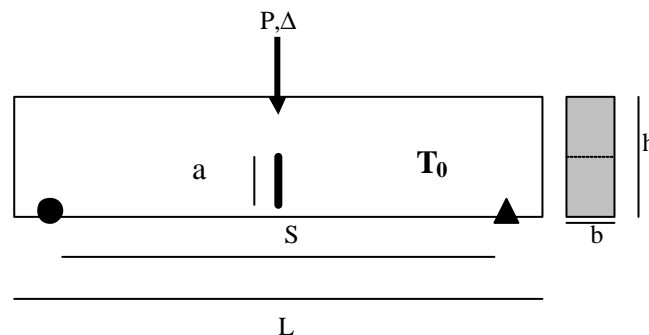


Fig.3 : flexion trois points sur éprouvette entaillée d'après [8, 9]

L'entaille est pratiquée au milieu de l'éprouvette et permet de simuler une fissure préexistante dans le béton. Cette entaille pratiquée reproduit le mode d'ouverture d'une fissure (opening) en mode I de traction. Les résultats des essais effectués au CNERIB sur les éprouvettes entaillées sont la courbe charge – flèche (P- Δ) ou contrainte – ouverture de fissure (σ - w) ; celles-ci sont indispensables pour la détermination expérimentale de l'énergie de rupture lorsque l'essai est stable.

L'essai est dit « stable » lorsque les courbes (P- Δ) ou (σ - w) sont obtenues totalement jusqu'à la fin des essais sans aucune discontinuité jusqu'à la séparation de l'éprouvette en deux. Ces essais doivent être à déplacement contrôlé.

Les figures 3, 4, 5 illustrent le modèle expérimental de flexion trois points et l'exploitation des résultats, lorsque le béton est à la température ambiante.

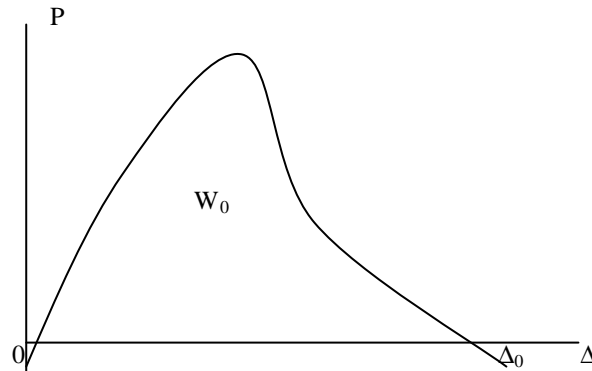


Fig.4 : courbe charge – flèche (P- Δ)

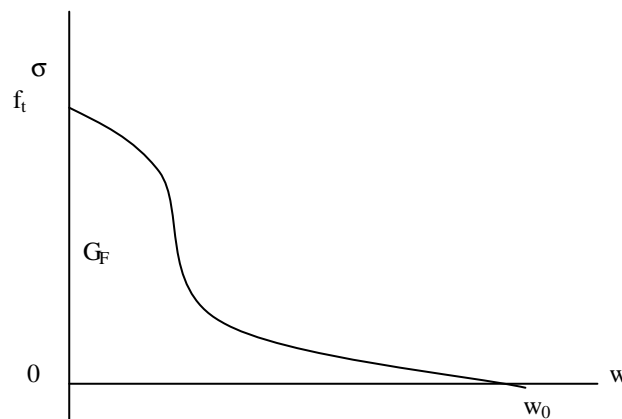


Fig.5 : courbe expérimentale contrainte – ouverture de fissure (σ - w)

L'énergie de rupture G_F du béton est donnée par les deux équations (3) et (4) suivantes :

$$G_F = \frac{W_0}{b(h-a)} \text{ si courbe (P-}\Delta\text{)} \quad (3)$$

Où :

$$W_0 = \int_0^{\Delta} P(\Delta) d\Delta \text{ est l'aire sous la courbe (P- } \Delta \text{)}$$

$b(h-a)$ est l'aire à fissurer.

Dans le cas où l'on tient compte de l'ouverture w de l'entaille de profondeur a , on a :

$$G_F = \int_0^{w_0} \mathbf{s}(w) dw \quad (4)$$

Pour des raisons de simplifications des calculs numériques, on approche la courbe ($\sigma - w$) par une droite linéaire (Fig.6).

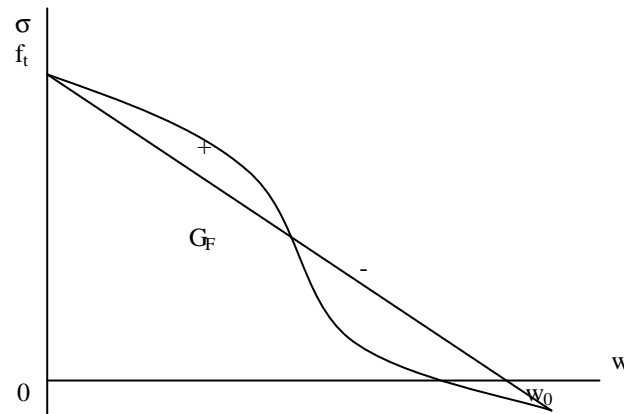


Fig.6 : approximation de la courbe contrainte – ouverture de fissure ($\sigma - w$) par une droite

L'énergie de rupture G_F est l'aire du triangle ($f_t 0 w_0$) donnée par l'équation (5) suivante :

$$G_F = \frac{1}{2} f_t w_0 \quad (5)$$

La formule (5) montre que l'énergie de rupture est proportionnelle à la résistance à la traction du béton f_t et à l'ouverture w_0 maximale de l'entaille. L'étude de la variation de l'énergie de rupture des bétons sous gradient thermique revient donc à connaître les caractéristiques thermo-mécaniques du béton et plus particulièrement la variation de la résistance à la traction du béton en fonction de la température [4].

3.2. Essais de flexion trois points à températures moyennes

Des essais effectués sur des éprouvettes entaillées en flexion trois points sous gradients thermique, à des températures moyennes de 25°C, 50°C et 100°C ont montré que lorsque la température dépasse 50°C, la diminution de l'énergie de rupture des bétons devient sensible et diminue rapidement lorsque les températures deviennent très élevées. Les résultats de ces essais sont présentés dans la figure 7

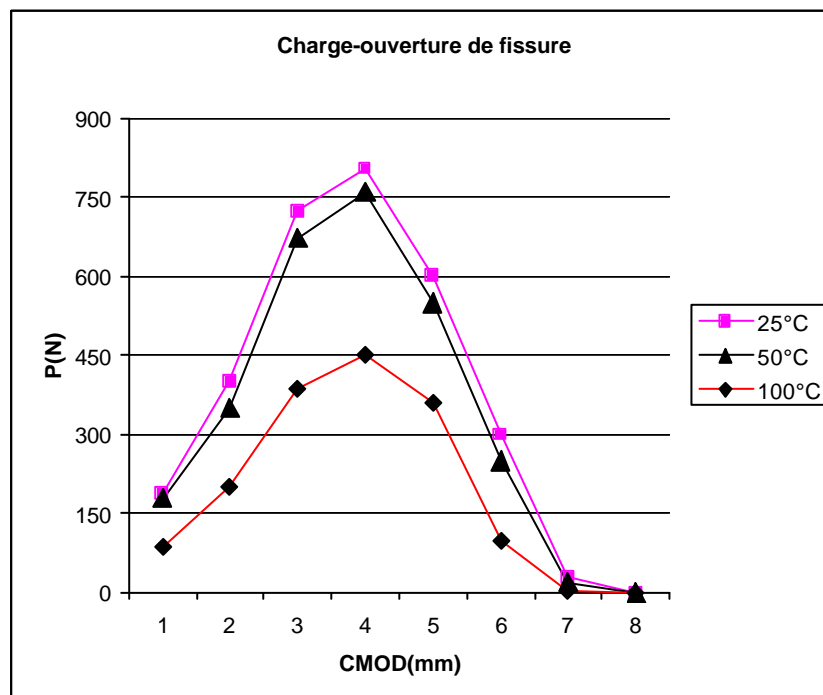


Fig.7 : variation de l'énergie de rupture en fonction de la température

4. CONCLUSION

Cet article est une contribution à l'analyse des propriétés thermo-mécaniques du béton. Il présente les résultats des recherches effectuées pour simuler un incendie et appliquer les règles de prévision et de calcul au feu des éléments de structures de génie-civil tels que poutres, poteaux et dalles. La courbe de simulation adoptée est la courbe température-temps ISO 834 relative à un incendie normalisé ayant fait l'objet d'une étude préliminaire sur le comportement au feu des structures en béton.

Le modèle numérique de calcul aux différences finies utilisé pour la résolution de l'équation de Fourier a été exploité pour déterminer les températures au centre des rectangles résultant du maillage adopté pour une meilleure convergence des résultats. Les résultats obtenus avec ce modèle sont satisfaisants pour des calculs préliminaires de prévision du comportement au feu des structures en béton.

Cependant pour l'analyse de la fissuration et de l'endommagement des bétons sous gradient thermique, le modèle numérique s'est avéré insuffisant et le recours à l'application des concepts de base de la Mécanique de la Rupture devient indispensable.

L'analyse à la fissuration des bétons a été déterminée par l'une des méthodes expérimentales SDM (Stiffness Damage Method) pour l'estimation de l'indice d'endommagement ou celle permettant le calcul de l'énergie de rupture des bétons sur éprouvettes entaillées. Notre étude a été orientée spécialement vers cette dernière car elle est d'application multiple et peut être utilisées pour les matériaux ductiles tels que les aciers ou les matériaux composites.

REFERENCES

- [1] F. Belhamel et A. Lazazi, "Comportement au feu des structures en béton : Phase I : synthèse bibliographique", Rapport interne CNERIB
- [2] F. Belhamel et A. Lazazi., "Comportement au feu des structures en béton : Phase II : Prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton ». Rapport interne CNERIB
- [3] F. Belhamel et A. Lazazi., "Comportement au feu des structures en béton : Phase III : Recommandations de prévention contre l'incendie", Rapport interne CNERIB.
- [4] DTU-Règles FB, "Méthodes de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton", cahier CSTB 1642 d'avril 1980 révisé CSTB 1987.
- [5] P. Kalifa, F. D. Menneteau and D. Quenard., " Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures" Cement and Concrete Research,30(2000) 1-13.
- [6] A. Y. Nassif, E. Burley. and S. Rigden, "A new quantitative method of assessing fire damage to concrete structures"- Magazine of Concrete Research, 1995, 47, N°172, Sept., 271-278.
- [7] T. M. Crisp. et al, " the Stiffness Damage test - a quantitative method of assessing Damaged concrete", Proc. Life of Structures Conf. Brighton, 1989, Institute of Structural Engineers.
- [8] A. Hillerborg, M. Modeèr, and P. E. Petersson, "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements" Cement and Concrete Research, 1976, 6,773-782.
- [9] F. Belhame, K. Hisham. et F. Karchi, "Méthode expérimentale de détermination de l'énergie de rupture des bétons ordinaires", Matériaux et Constructions- Rilem- Vol.35, N°247, avril 2002.
- [10] Yeou-Shang Jenq and Pei Liu "Characteristics of fracture responses of rate dependant and temperature-sensitive materials like asphalt concrete", Fracture Mechanics of Concrete Structures- Z.P. Bazant -FramCos1-1992.
- [11] J. C. Maréchal, "Creep of concrete as a function of temperature" in ACI Special Publication SP 34, Concrete for nuclear reactors", (Concrete American Institute, Détroit, 1972) pp.547-564.