

Méthode de libération de contraintes appliquée au béton

M. BARBACHI¹, B. GODART², C. ABDUNUR²

¹Equipe Matériaux, Mécanique et Génie Civil (E2MGC), ENSA, Université Ibn Zohr, BP 1136 Agadir - Maroc
Email : m.barbachi@uiz.ac.ma

²Université Paris-Est, IFSTTAR, Département Matériaux et Structures – 14, 20 boulevard Newton - Cité Descartes - Champs-sur-Marne 77447 - Marne-la-Vallée Cedex 2 - France

Résumé

La mesure de contraintes par libération consiste en une suppression locale de celles-ci par création d'une entaille, suivie d'une compensation contrôlée facile à connaître.

Pour accéder au gradient de la contrainte ($\delta\sigma/\delta z$), l'auscultation avance par une alternance de libérations de contraintes et de mesures à des profondeurs successives suffisamment rapprochées. Le profil $\sigma(z)$ s'obtient par la résolution du système d'équations $[C_{ij}][\sigma_j]=[\delta_i]$, C_{ij} étant la matrice de compliance relative dont chaque élément représente le déplacement en surface, calculé sous une contrainte unitaire appliquée à une tranche h de profondeur moyenne z_j , pour une entaille de profondeur z_i (unité $\mu\text{m}/\text{MPa}$), σ_j les contraintes recherchées à différentes profondeurs et δ_i les déplacements correspondants mesurés en surface d'un corps d'éprouve. La résolution du système d'équation proposé nécessite, d'une part, un prétraitement de certaines grandeurs mesurées pour bien fixer les points de départ du calcul, et d'autre part, une adaptation de la méthode de résolution qui peut s'avérer trop sensible à la dispersion des données.

Dans ce travail, le profil des contraintes absolues a été obtenu pour plusieurs cas concrets. Ses composantes ont pu être séparées pour accéder à la contrainte mécanique appliquée de l'extérieur. Celle-ci concorde bien avec les mesures indépendantes des forces appliquées.

Mots clés : *Méthode de libération de contraintes, retrait dans le béton, éléments finis, expérimentation, méthodes numériques.*

1. Introduction

En l'absence de toutes autres voies d'accès direct aux contraintes, une méthode par libération partielle de contraintes a été adoptée.

Bien que son principe soit facilement applicable en mécanique des roches [1], une simple transposition empirique au béton s'est heurtée à des obstacles majeurs et ce pour deux raisons principales [2] :

- la nature difficile du béton en tant que matériau hétérogène, très sensible à la redistribution de la teneur en eau ;
- les complications issues de la miniaturisation obligatoire de l'opération de mesures.

2. Présentation de la méthode

2.1 Son principe

Une entaille est pratiquée dans un plan normal à la direction de la contrainte recherchée. Un vérin ultra-plat

est ensuite introduit et mis en pression croissante jusqu'au rétablissement du champ de déplacement initial d_0 . La mesure de la pression de compensation dans le vérin indique une valeur approchée de la contrainte de compression (Fig.1).

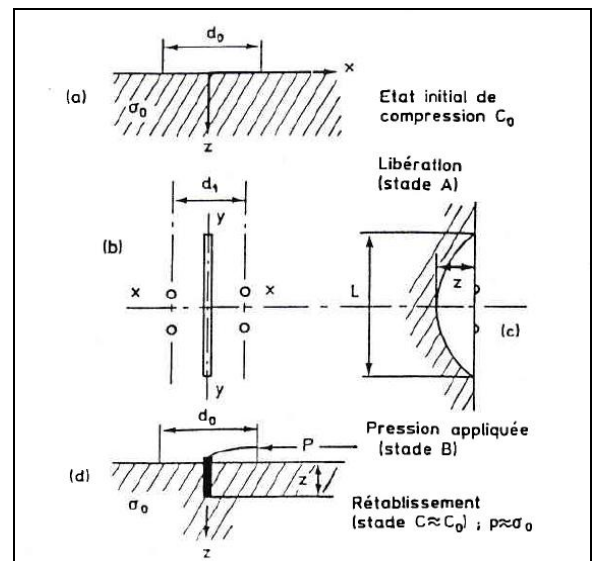


Fig.1 : Etapes de mesure de contraintes.

2.2 Matériel utilisé

Le vérin de compensation, instrument essentiel pour la mesure, doit concilier miniaturisation, résistance et minimisation de sa raideur propre. Un prototype a été mis au point à Ifsttar. Il est en forme de segment de disque de 150mm de rayon ; son épaisseur est de 4mm et sa résistance de 10MPa au minimum. La souplesse des bords a été particulièrement soignée, Fig.2



Fig.2 : Vérin de compensation

3. Accès aux contraintes dans le béton

3.1 Profil dans le béton

La contrainte absolue est une grandeur à composantes multiples. L'accès à la contrainte extérieure appliquée, qui seule intéresse l'ingénieur, passe par l'élimination et

donc la connaissance approfondie des autres composantes parasites de la contrainte absolue mesurée. Les objectifs principaux de ce travail consiste donc à :

- connaître au mieux la composante parasite dominante ; celle due au retrait de dessiccation du béton [3] [4].
- déterminer la contrainte absolue avec une précision accrue.

3.2 Application de la méthode de libération

Le profil des contraintes est déterminé par la résolution du système linéaire suivant : $[C_{ij}(K)][\sigma_j] = [\delta_i(K)]$
 σ_j et $\delta_i(K)$ sont respectivement les contraintes recherchées et les déplacements mesurés en surface pour des profondeurs successives z_i de l'entaille. $C_{ij}(K)$ est la matrice de compliance relative dont chaque élément représente le déplacement en surface, calculé sur la base K , sous une contrainte unitaire appliquée à une tranche h de profondeur moyenne z_j , pour une entaille de profondeur z_i (unité $\mu\text{m}/\text{MPa}$).

Avec $i=1,11$; $j=1,11$; $K= 1, 2, 3$ (b_1, b_2, b_3) ;
 $z_i=2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, \dots, 80$ mm ;
 et module d'Young E supposé égal à 35 000MPa

Les éléments de la matrice, appelés coefficients d'influence sont issus d'un calcul tridimensionnel aux éléments finis effectué par le logiciel CESAR-LCPC (Fig.3).

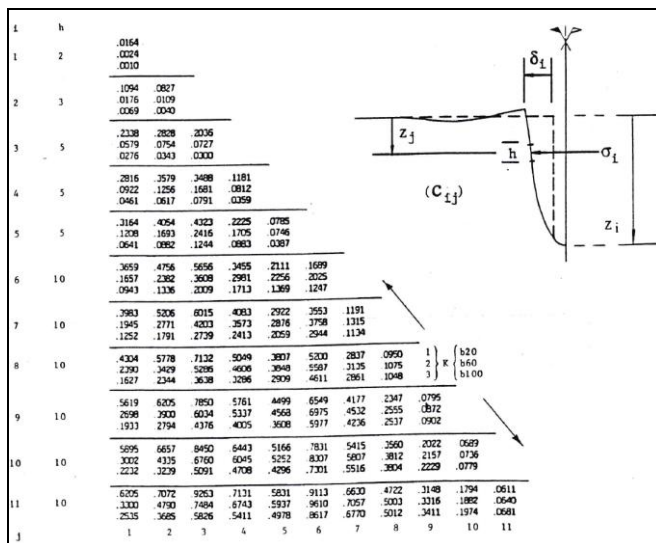


Fig.3 : Matrice de compliance

3.3 Méthodes de résolution

3.3.1 Résolution directe

Une résolution directe du système d'équations que l'on vient de décrire conduit à des solutions aberrantes. En effet, d'après les résultats du calcul des coefficients $C_{ij}(K)$, il faut un appareil de précision de quelques centièmes de micron pour que les déplacements provoqués par la libération d'une contrainte de 1 MPa à des petites profondeurs de l'entaille soient mesurables. Ceci dépasse la performance du matériel, limitée actuellement à quelques dixièmes de micron.

Pour remédier à ce problème de mesure, une solution partielle peut être envisagée. Elle consiste à résoudre le

système en fusionnant toutes les premières profondeurs d'entaille. Les résultats sont assez raisonnables. Le seul gros inconvénient est le manque de renseignements sur les petites profondeurs (champ d'action du séchage superficiel) et, par conséquent, l'impossibilité de séparer les contraintes qui en résultent (contraintes de retrait) et la contrainte appliquée de l'extérieur.

3.3.2 Résolution par ajustement

- 1^{ère} version de la résolution

Afin d'avoir une solution globale (à toutes les profondeurs de l'entaille) des aménagements dans la résolution du système seront pris comme suit :

1. Résoudre le 1er (ou ième) sous-système (3éq. à 3 inconnues)
 2. Ajuster les 3 grandeurs solutions du sous-système (3x3) par une fonction logarithmique
 3. Extraire la première valeur de l'ajustement correspondant à la 1^{ère} solution de sous système (3x3). Cette valeur est la première (ou ième) solution du système.
 4. Glisser d'une unité suivant une ligne et une colonne de la matrice du système, tout en gardant un pas égal à (3éq. à 3 inconnues).
 5. Faire passer la ou les valeurs extraites de l'ajustement (point3) au second membre du système.
 6. Reprendre la résolution à partir de 1, tant que l'on n'a pas toutes les solutions.
- Le système est ainsi résolu
7. Lissage des résultats par une fonction logarithmique.

Inconvénients : Le nuage de points de la solution définitive présente une très grande dispersion, donc un mauvais lissage final ; la cause essentielle de cette dispersion est due à l'ajustement partiel et indépendant.

- 2^{ème} version de la résolution

Elle consiste à renforcer l'ajustement au fur et à mesure qu'on progresse dans la résolution du système. En effet, cette fois-ci l'ajustement tient compte, non seulement des 3 valeurs calculées du sous-système de 3 équations à 3 inconnues mais aussi des valeurs retenues comme solutions du système à chaque glissement suivant la diagonale de la matrice.

3.3.3 Application de la résolution au béton

a. Les corps d'épreuves

L'expérience porte sur des dalles, en béton non armé, présentées sur la figure 4, de dimension $L=140\text{cm}$, $l=60\text{cm}$, $e=15\text{cm}$. Elle a été effectuée sous différents paramètres, à savoir :

- La contrainte extérieure appliquée : 0, 6, 12MPa
- L'orientation de l'entaille par rapport à la contrainte appliquée : 90°, 45°
- Conditions de séchage :
 - . Exposition des 2 faces opposées
 - . Exposition d'une seule face ; entaille côté exposé ou côté revêtu
 - . Bases extensométriques de mesures : b_1, b_2, b_3

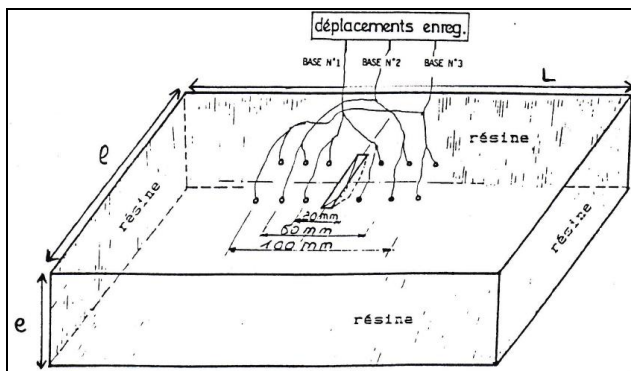


Fig.4 : Schéma des essais de la libération de contraintes

b. Présentation des résultats

L'exploitation des données expérimentales par le système d'équations linéaire proposé, dont les résultats sont regroupés sur le tableau 1 et le tableau 2, montre que :

- Les contraintes moyennes déduites sont très voisines de la contrainte extérieure réellement appliquée sur la dalle.
- La différence moyenne entre les profils absolus pour les entailles à 90° et à 45° est très proche de la moitié de la contrainte appliquée, confirmant ainsi une certaine isotropie des contraintes de retrait.
- Les résultats paraissent cohérents dans leur ensemble sauf pour les bases 3. Celles-ci ont une grande raideur et la moindre imprécision de mesures de déplacements se traduit par une grande dispersion des valeurs des contraintes.

Toutefois, les résultats du tableau 2 se distinguent par une exposition dissymétrique au séchage. Il en résulte que :

- La face protégée, correspondant à l'essai 8, développe des contraintes superficielles de traction sans atteindre le point de rupture, réduisant ainsi la compression appliquée
- La face opposée correspondant aux essais 5, 6, et 7, complètement exposée au séchage, développe des contraintes qui dépassent rapidement la résistance du béton. La fissuration qui s'en suit supprime toutes les tractions qui s'étaient développées et 'laisse passer' toute la compression appliquée.

En conclusion, la face exposée est plus comprimée que la face protégée.

Tableau 1 : Récapitulatif des résultats des essais et calculs en cas d'exposition des 2 faces opposées

N° essai	Contraintes appliquées réelles (MPa)	Orientation entaille	Contraintes moyennes déduites (MPa)		
			b ₁	b ₂	b ₃
1	0	90°	-0,39	-	-
2	6	90°	6,35	6,54	6,55
3	12	90°	11,72	12,44	11,64
4	12	45°	4,95	5,92	6,10

Tableau 2 : Récapitulatif des résultats des essais et calculs en cas d'exposition d'une seule face

N° essai	Contraintes appliquées réelles (MPa)	Orientation entaille	Contraintes moyennes déduites (MPa)		
			b ₁	b ₂	b ₃
5	6	90°	6,92	6,45	-
6	6	45°	3,63	3,29	2,63
7	12	90°	11,01	-	-
8	12	90°	10,01	-	-

4. Conclusion et perspectives

La résolution du système par ajustement renforcé s'avère très satisfaisante à plus d'un titre :

- Elle donne, en fonction de la profondeur, une distribution beaucoup plus cohérente et précise des contraintes absolues.

A partir de ce profil de contraintes, et connaissant les propriétés de la composante « parasite » du retrait, il est possible d'accéder à la contrainte appliquée de l'extérieur qui constitue la grandeur principale demandée dans la pratique.

- Le même profil permet également de déceler la fissuration de peau quand elle existe. En effet, quand la contrainte superficielle de retrait dépasse la résistance du béton à la traction, la discontinuité qui en résulte se traduit par une suppression locale de contraintes visible sur le profil.

D'autres voies, moins rigoureuses mais plus stables, pourraient être parallèlement explorées. A titre d'exemple, nous pourrions envisager :

- Une analyse statistique de la corrélation : pression de compensation/contraintes appliquées.
- Une construction d'abaques représentant, pour plusieurs profils de contraintes, l'évolution des déplacements sur les différentes bases d'extensométrie.

Références

- [1] M. Rocha, J.B. Lopes, J.N. Da Silva, *A new technique for applying the method of the flat jack in the determination of stress inside rock masses*, LNEC, Lisbonne 1969.
- [2] C. Abdunur., J. L. Duchene, F. Derkx, E. Merliot, M. Joly, *Suivi direct des contraintes dans les structures en béton : dispositifs pour ouvrages existants et en construction*. *Instrumentation, Mesure, Métrologie*, RS série I2M, vol. 3, n° 1-2/2003, PP 37-51.
- [3] B. Biao, *Effets mécaniques dus au retrait de dessiccation du béton*, thèse de l'ENPC, Paris 1988.
- [4] C. Abdunur, P. Acker, B. Miao, *Retrait superficiel du béton : évaluation et modélisation*, Symposium international de l'AIPC, Lisbonne, 1989.