



**Master Sciences de l'Ingénieur, Spécialité Génie Civil
Parcours Structures, Ouvrages et Matériaux du Génie Civil**

MEMOIRE DE STAGE DE MASTER 2^e ANNEE

effectué au LMT Cachan
sous la direction de C. Oliver-Leblond, C. Giry, F. Ragueneau

**FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS
D'ECHELLE**

par

Christian NADER

Soutenu à l'ENS Cachan le 28 juin 2013
61 avenue du Président Wilson, F-94235 Cachan cedex, France

Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps, toute l'équipe pédagogique de l'ENS-Cachan et les intervenants professionnels responsables de la formation SOMGC. Cette année de M2 recherche était très enrichissante au niveau personnel, due principalement au standard d'excellence de cet établissement prestigieux.

Deuxièmement, je tiens à remercier le maître du stage, Mr. Frédéric Ragueneau, Professeur à l'ENS-Cachan et Responsable du Secteur Génie Civil & Environnement au Laboratoire Mécanique et Technologies LMT-Cachan, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce stage, ainsi que pour son aide et ses précieux conseils au cours de ces quartes mois. Je remercie également Madame Cecile Oliver pour sa sympathie, sa disponibilité, ses idées et conseils, ainsi que pour son aide précieuse de tous les jours. Je souhaiterais surtout exprimer ma gratitude à monsieur Cédric Giri pour son aide, sa gentillesse et son soutien tout au long de ce stage.

Je sais infiniment gré aux monsieurs Xavier Pinelli (LMT, secteur mécanique) et Olivier Rateau (ENS, département génie civil) de s'être rendus disponible pour une grande partie de ce stage, notamment leurs grandes connaissance expérimentale.

Je tiens aussi à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler au sein du LMT, et j'en remercie ici tous les membres.

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	v
Liste des tableaux	vii
Introduction	1
I Etude bibliographique	3
1 Effet d'échelle	5
1 Introduction	5
2 Loi en puissance	6
3 Analyse asymptotique dans les poutres entaillées	7
4 Effet d'échelle à l'amorçage de la fissure	8
5 Validation des lois d'effet d'échelle	8
2 Energie de fissuration	11
1 Taux de restitution d'énergie	11
2 Méthode de détermination avec les effets d'échelle	12
3 Corrélation d'image	13
1 Introduction	13
2 Principe	13
3 Discrétisation par éléments finis (Correli Q4)	15
II Procédure expérimentale	17
4 Les échantillons	21
1 Description du matériau	21
2 Géométrie des éprouvettes	22
3 Coffrages	22

4	Matériel et équipement	23
5	Conception d'une gâchée	25
1	préparation des coffres	25
2	Malaxage	26
3	Moulage	26
6	Essai F3P (flexion trois points)	27
1	Introduction	27
2	Machine d'essai : la MTS TTC <i>Melo</i>	28
3	Pilotage	29
III	Étude numériques	31
7	Modélisation	35
1	Modèle de calcul	35
2	Paramètres matériau	35
3	Maillages	36
4	Résultats	38
IV	Résultats et analyse expérimentale	43
8	Identification des paramètres mécaniques	45
1	Procédure	45
2	Mesures	47
9	Les essais	49
1	Montage	49
2	Résultats	52
3	Analyse par la loi d'effets d'échelle	55
3.1	La loi intrinsèque d'effet d'échelle pour les poutres entaillées	55
3.2	La loi d'effet d'échelle pour les poutres non-entaillées	55
3.3	La loi universelle d'effet d'échelle	56
4	Analyse par correlation d'image	57
5	Conclusion	61
V	Bibliographie et Annexe	63
Bibliographie		65

A	67
1 Les coffres	67
2 Les machines	69
3 Les capteurs	71
4 Code CASTEM de la poutre avec une erreur de conception	72

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Table des figures

1.1	Modèle de poutre entaillée, montage en flexion trois points	7
1.2	Effet d'échelle en flexion trois points sur des poutres entaillées	9
1.3	Effet d'échelle en flexion trois points sur des poutres non entaillées	9
1.4	Effet d'échelle sur la contrainte nominale	10
2.1	Taux de restitution d'énergie	11
3.1	Correlation d'images	14
4.1	Géométrie des éprouvettes	22
4.2	plan du coffre	23
4.3	état final des coffres	24
5.1	Préparation des coffres	25
5.2	Le malaxeur, département génie civil	26
5.3	Moulage des poutres et des échantillons cylindriques (pour éviter l'évaporation d'eau de surface on couvre le béton frais d'une feuille de plastique)	26
6.1	Charge limite et mode de pilotage du chargement	27
6.2	La MTS TTC <i>Melo</i>	28
7.1	Courbe expérimentale / Courbe numérique	36
7.2	Maillage poutre entaillée	37
7.3	Poutre avec une erreur de conception	37
7.4	Comparaison des rigidités entre une poutre correcte et une poutre erronée	38
7.5	Résultats numériques sur une poutres non entaillées -modèle RICBET-	38
7.6	Résultats numériques sur des poutres entaillées -modèle RICRAG-	39
7.7	Résultats numériques sur des poutres non entaillées -modèle RICRAG-	39
7.8	Posttraitement, poutres entaillées avec la loi intrinsèque de bažant	41
7.9	Posttraitement, poutres non entaillées avec la loi d'effet d'échelle de bažant	42
8.1	Surfaçage mécanique d'une éprouvette cylindrique, comparaison avant/après	45
8.2	L'extensomètre appliqué à une éprouvette cylindrique	46
8.3	Test de compression uniaxial et mode de rupture	46
8.4	Montage de l'éprouvette pour l'essai brésilien	47

9.1	Scie électrique au DGC	49
9.2	Exemple d'un mouchetis et la texture correspondante	50
9.3	Analyse d'incertitude : taille de la ZOI	50
9.4	Entaille fictive	51
9.5	Essai F3P sur une poutre entaillé	51
9.6	Courbes moyennes en effort et en contrainte en fonction du CMOD ; $\alpha_0 = 0.5$.	52
9.7	Courbes moyennes en effort et en contrainte en fonction du CMOD ; $\alpha_0 = 0.2$.	52
9.8	Courbes moyennes en effort et en contrainte en fonction du CMOD ; $\alpha_0 = 0$.	53
9.9	Plot, loi de Bažant pour $\alpha_0 = 0.2$ (A), $\alpha_0 = 0.2$ (B) et résultats expérimentaux .	55
9.10	Plot, loi de Bažant pour $\alpha_0 = 0$ et résultats expérimentaux	56
9.11	Résultats de l'ajustement des données expérimentales avec la loi universelle de Bažant	57
9.12	Champ de déplacement pour n=5	58
9.13	Partie de la photo à analyser par correlation d'images	58
9.14	Champ de déplacement pour une ordonnée fixe, et calcule de l'ouverture de fissure	59
9.15	Champ de déplacement pour une ordonnée fixe, $n = 1, 2, 3, 4, 5$	59
9.16	Champ d'erreur pour $n = 5$	60
A.1	Plan du coffre réutilisable, poutre $4 \times 16 \times 80$	67
A.2	Plan pour scier la planche de bois standard	68
A.3	Plan pour scier la planche de bois de coffrage	68
A.4	La scie, DGC	69
A.5	Machine d'essai de compression, DGC	70
A.6	La réctifieuse	70
A.7	LVDT, capteur déplacement	71
A.8	Capteur du CMOD	71

Liste des tableaux

4.1	Composition du micro-béton	21
4.2	Granulométrie du sable normalisé	21
4.3	Les dimensions des éprouvettes	22
7.1	Détermination des paramètres d'effet d'échelle pour les échantillons entaillés .	41
7.2	Détermination des paramètres d'effet d'échelle pour les échantillons non entaillés	42
8.1	Paramètres mécaniques des différentes gâchées	48
9.1	Résultats expérimentaux, Force, Flèche, CMOD, et contrainte nominale au pic .	54
9.2	Paramètres d'effet d'échelle pour les échantillons entaillés, application aux résultats expérimentaux	55
9.3	Paramètres d'effet d'échelle pour les échantillons non-entaillés, application aux résultats expérimentaux	56
9.4	Paramètres de la loi universelle d'effet d'échelle, application aux résultats expérimentaux	57

Résumé

Dans ce stage on se propose d'étudier les phénomènes de fissuration dans le cadre d'essais mettant en évidence les effets d'échelle en termes de fissuration. Nous allons devoir en premier temps présenter un protocole expérimental qui expose les effets d'échelle sur des structures cimentaires. Dans le cadre de ce stage on propose une pré-étude numérique qui va servir comme une première identification des paramètres matériau, la validité du modèle numérique vis à vis des effets d'échelle sera également mise en lumière. La campagne expérimentale menée au Laboratoire Mécanique et Technologies (LMT-cachan), consiste en une identification des paramètres expérimentaux, et éventuellement, de tester les éprouvettes. L'idée principale est de récupérer les résultats de l'étude faite sur des poutres en mortier, entaillées et non entaillées, chargées en flexion trois points. Une étude statistique sera faite sur l'ensemble des échantillons, une première approche pour montrer l'effet d'échelle dans les structures consiste en une comparaison directe des résultats expérimentaux, ensuite, nous effectuerons une analyse par les lois d'effet d'échelle de Bažant. Finallement, une analyse par la méthode de correlation d'image sera réalisée, car cette méthode présente un aspect intéressant vis à vis de la détection de la fissure. L'effet d'échelle dans les structures demeure toujours un phénomène difficile à décrire, on espère que notre étude apportera sa contribution pour lever l'ambiguïté entourant l'effet d'échelle.

Mots-clés : Flexion trois points, Béton, Fissure, Effet d'échelle

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Première partie

Etude bibliographique

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Chapitre 1

Effet d'échelle

1 Introduction

L'effet d'échelle dans les matériaux quasi fragiles comme le béton est un phénomène bien connu et il existe un certain nombre d'études expérimentales et théoriques ([Rüsch *et al.*, 1962] ; [Chana, 1981] ; [Kani, 1967] ; [Taylor, 1972] ; [Walsh, 1976] ; [Eligehausen et Ozbolt, 1992] ; [Leonhardt, 1962] ; [Reinhardt, 1981] ; [Hillerborg, 1990]) qui confirment l'existence de celui-ci. Il y a deux aspects de l'effet d'échelle : statistique et déterministe. Dans le passé, l'effet d'échelle a été principalement traité du point de vue statistique [Weibull, 1939]. Cependant, il y a suffisamment de preuves qui montrent que la raison principale de l'effet d'échelle est en partie causée par la libération de l'énergie de déformation due à la croissance de la rupture.

Selon [Bazant, 1984], l'effet d'échelle pour des poutres entaillées, peut être approximativement décrit par la loi d'effet d'échelle :

$$\sigma_N = B f_t (1 + \beta)^{-1/2}; \beta = d/d_0 \quad (1.1)$$

Où ' d ' est une mesure d'une taille caractéristique de la structure (par exemple hauteur de la poutre), f_t = résistance à la traction du béton, B et d_0 sont deux constantes à déterminer, soit expérimentalement, soit par une analyse plus sophistiquée (d_0 est déterminé expérimentalement, B est déterminé analytiquement à partir de la mécanique de la rupture en fonction des caractéristiques géométriques et du type de chargement). Selon l'équation au dessus, la résistance nominale σ_N dans les grandes structures tend vers zéro.

En supposant que les propriétés du matériau sont constantes (le même béton), la dérivation de la loi d'effet d'échelle repose sur quatre hypothèses de base : (1) La propagation d'une fissure ou rupture nécessite une alimentation presque constante en énergie par unité de longueur et largeur (G_F , énergie de fissuration du béton, indépendante de la taille de l'échantillon) (2) l'énergie libérée par la structure en raison de croissance de la rupture est une fonction à la fois de la longueur de rupture et la surface de la zone de fissuration (FPS, Fracture Process Zone) en pointe de fissure. Si la libération d'énergie potentielle est une fonction de la longueur de la fissure seulement, l'effet d'échelle est celui de la LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics),

et si on est dans le cadre de la résistance des matériaux pour des petites tailles, il n'y a pas d'effet d'échelle, car la zone de fissuration est dans les mêmes ordres de taille que la taille de la structure. (3) À la charge limite, les formes et longueurs des fissures dans les structures géométriquement semblables de différentes tailles sont également géométriquement semblables, et (4) la structure ne casse pas à l'amorçage de la fissure, en d'autres termes, la propagation de la fissure doit être possible.

2 Loi en puissance

C'est la base mathématique qui va nous donner la forme des équations qui gèrent les effets d'échelle, [Bazant *et al.*, 2004]

Cherchons à déduire une réponse Y comme fonction de la dimension caractéristique D d'une structure. Imaginons maintenant des structures de trois dimensions D_0 , D_1 et D , avec les réponses correspondantes Y_0 , Y_1 et Y . Étant donné qu'il n'y a pas de longueur caractéristique, on cherche la fonction adimensionnelle $f(\lambda)$ avec $\lambda = \frac{D}{D_0}$, et $\frac{Y}{Y_0} = f(\lambda)$; D_0 est pris comme dimension de référence, cela implique que $\frac{Y_1}{Y_0} = f\left(\frac{D_1}{D_0}\right)$. Ainsi,

$$\frac{Y}{Y_1} = \frac{f(\lambda)}{f\left(\frac{D_1}{D_0}\right)}$$

Et si il n'y a pas de longueur caractéristique, on peut écrire ce qui suit : $\frac{Y}{Y_1} = f\left(\frac{D}{D_1}\right)$, ce qui implique la condition :

$$\frac{f\left(\frac{D}{D_0}\right)}{f\left(\frac{D_1}{D_0}\right)} = f\left(\frac{D}{D_1}\right)$$

On doit la différencier par rapport à D (la seule variable dans le système), ce qui donne :

$$\frac{1}{f\left(\frac{D_1}{D_0}\right)} \cdot \frac{df}{dD}\left(\frac{D}{D_0}\right) \cdot \frac{1}{D_0} = \frac{df}{dD}\left(\frac{D}{D_1}\right) \cdot \frac{1}{D_1}$$

Pour $D_1 = D$ et $\frac{dD}{dD} = \frac{d\lambda}{d\lambda}$ on obtient :

$$\frac{1}{f\left(\frac{D}{D_0}\right)} \cdot df\left(\frac{D}{D_0}\right) = \frac{df}{dD}\left(\frac{D}{D_1}\right) \cdot \frac{dD}{D_1} D_0$$

Par suite

$$\frac{df(\lambda)}{f(\lambda)} = m \cdot \frac{d\lambda}{\lambda}; \text{ avec } m = \frac{df(1)}{d\lambda}$$

Finalement, sa primitive, avec la condition $f(1) = 1$, donne :

$$\ln(f(\lambda)) = m \cdot \ln(\lambda) = \ln(\lambda^m)$$

D'où l'effet d'échelle en puissance : $f(\lambda) = \lambda^m$ (on démontre par intégrale J que $m = -1/2$ pour des grandes tailles)

3 Analyse asymptotique dans les poutres entaillées

La fissuration peut être caractérisée par les variables adimensionnelles $\alpha_0 = \frac{a_0}{D}$, $\alpha = \frac{a}{D}$, $\theta = \frac{c_f}{D}$, dans lesquelles « a » est la longueur équivalente de fissure correspondant à la hauteur d'entaille plus la hauteur du ligament fissuré et avec sa zone d'élaboration ; $c_f = a - a_0$ taille effective de la zone d'élaboration de la fissuration.

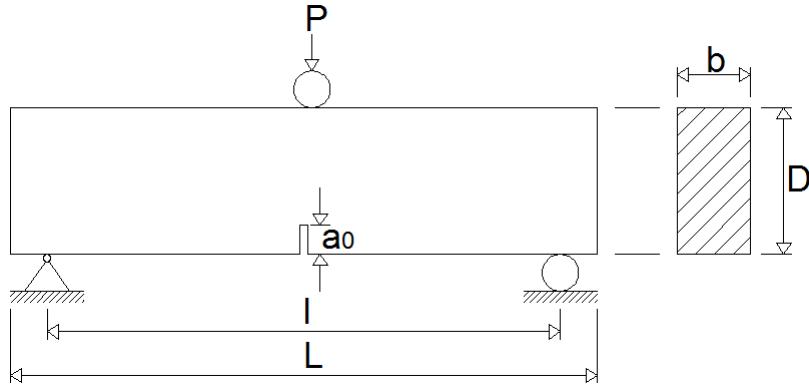


FIGURE 1.1: Modèle de poutre entaillée, montage en flexion trois points

L'énergie restituée par la structure peut être analysée sur la base de la variation de l'énergie complémentaire de la structure : $\Pi^* = \sigma_N^2 \cdot b \cdot D^2 / E \cdot f(\alpha_0, \alpha, \theta)$; ici ' f ' est une fonction adimensionnelle caractérisant la géométrie de la structure. D'autre part, la résistance à la fissuration peut être caractérisée comme $R = G_f \cdot r(\alpha_0, \alpha, \theta)$, à partir de la mécanique de la rupture, où ' r ' est une autre fonction adimensionnelle ayant la propriété : $\lim_{\alpha \rightarrow \alpha_0} r = 1$.

On déduit ainsi le taux de restitution d'énergie $G = (\frac{d\Pi^*}{d\alpha})/b$, et pour un σ_N constant on peut écrire la relation suivante : $\frac{dG}{d\alpha} = \frac{dR}{d\alpha}$

On peut montrer à partir des équations précédentes que la résistance nominale de la structure est donnée sous la forme :

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{E \cdot G_f}{D \cdot g(\alpha_0, \theta)}}$$

où ' g ' est une fonction adimensionnelle exprimée en termes des fonctions ' f ' et ' r ' et leurs dérivées.

La fonction ' g ' doit être régulière, et donc par développement en série de Taylor jusqu'au 2nd ordre au voisinage de $(\alpha_0, 0)$ on aura :

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{E \cdot G_f}{D}} \cdot (g(\alpha_0, 0) + g_1(\alpha_0, 0) \cdot \frac{c_f}{D} + \dots)^{-1/2}$$

Par conséquent, l'analyse de l'effet d'échelle à l'aide du taux de restitution d'énergie est possible par l'introduction de l'approximation $g(\alpha_0, \theta) = g(\alpha_0 + \theta)$, on obtient ainsi :

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{E \cdot G_f}{c_f \cdot g'(\alpha_0) + D \cdot g(\alpha_0)}} = B \cdot f'_t \left(1 + \frac{D}{D_0}\right)^{-1/2} \quad (1.2)$$

Dans laquelle les paramètres sont donnés par : $D_0 = c_f \cdot \frac{g'(\alpha_0)}{g(\alpha_0)}$, $B \cdot f'_t = \sqrt{\frac{E \cdot G_f}{c_f \cdot g'(\alpha_0)}}$. Cette forme de la loi d'effet d'échelle pour les poutres entaillées sera utiliser dans la suite pour identifié G_f et c_f sur les résultats expérimentaux.

4 Effet d'échelle à l'amorçage de la fissure

En dehors des éprouvettes entaillées, l'analyse précédente ne s'applique qu'aux structures qui contiennent, à la charge maximale, une grande fissure. La ruine à l'amorçage de la fissuration à partir d'une surface plane (éprouvette non entaillée) peut aussi être analysée sur la base des développements à partir des équations précédentes, avec, cependant, une modification. Puisque les développements sont faits par rapport à une valeur nulle de la taille de la zone d'élaboration relative, l'argument de la fonction de restitution d'énergie $g(\alpha)$ est $\alpha = 0$, ce qui signifie que le taux de restitution d'énergie $g(\alpha) = g(0) = 0$. Dès lors, le premier terme du développement aux grandes tailles disparait, il faut dans ce cas inclure le troisième terme du développement asymptotique aux grandes tailles. Ce qui conduit à l'approximation suivante de la résistance nominale de structures dont la ruine apparait dès l'amorçage de la fissuration à partir d'une surface plane :

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{E \cdot G_f}{c_f \cdot g'(\alpha_0) + \frac{1}{2} \cdot g''(\alpha_0) \cdot c_f^2 \cdot D^{-1}}} \quad (1.3)$$

Pour présenter l'effet d'échelle de façon plus détaillée, le comportement des poutres en micro-béton, entaillées et non entaillée, chargées en flexion trois points, sera étudié. Les résultats de la campagne expérimentale seront analysés avec loi d'effet d'échelle afin de déterminer G_f et c_f sur les poutres non-entaillées.

5 Validation des lois d'effet d'échelle

Dans la littérature, un certain nombre de résultats d'essai pour des poutres avec et sans entaille, testées en flexion trois points, ont été rapportés. Dans la Fig. 1.2, les résultats d'essais pour trois spécimens de poutres entaillées mis à l'échelle (ratio taille d'entaille / hauteur de la poutre, $\frac{a_0}{d} = \frac{1}{6}$), réalisées à Northwestern University [Bazant et Kazemi, 1990], sont présentés. Dans la même figure on compare ces résultats avec la loi d'effet d'échelle et les résultats numériques [Eligehausen et Ozbolt, 1992]. La profondeur des poutres a été modifié dans une plage de taille assez faible, soit de $d = 76mm$ à $305mm$ avec une épaisseur constante $b = 38mm$. La

résistance nominale à la rupture est calculée en utilisant la formule de la théorie des poutres $\sigma_N = \frac{15P_u}{4b.d}$ avec P_u étant la charge ultime. D'après la Fig. 1.2, un effet d'échelle significatif est observé, la résistance nominale ' σ_N ' diminue avec l'augmentation de la taille. La loi d'effet d'échelle est en accord avec les résultats expérimentaux.

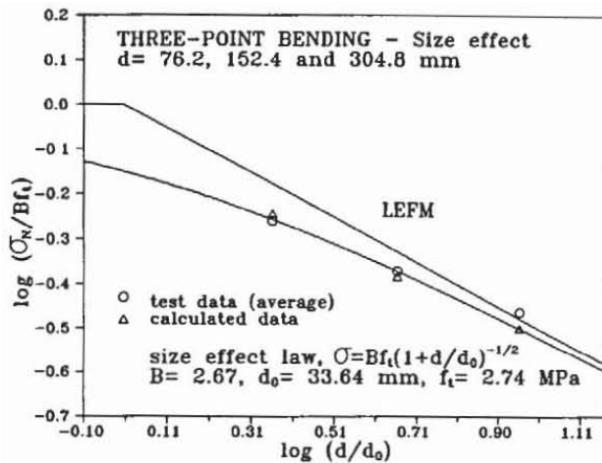


FIGURE 1.2: Effet d'échelle en flexion trois points sur des poutres entaillées ($a_0/d = 1/6$), [Bazant et Kazemi, 1990]

Les résultats des essais pour des échantillons non entaillés en béton ordinaire en flexion trois points sont représentés sur la Fig. 1.3. La plage de hauteur de la poutre s'étendait jusqu'à 1m. Comme on peut le voir sur la Fig. 1.3, les résultats des tests jusqu'à une hauteur de la poutre d'environ $d = 0.5m$, on trouve que la loi d'effet d'échelle est en accord sur cette plage avec les résultats expérimentaux.

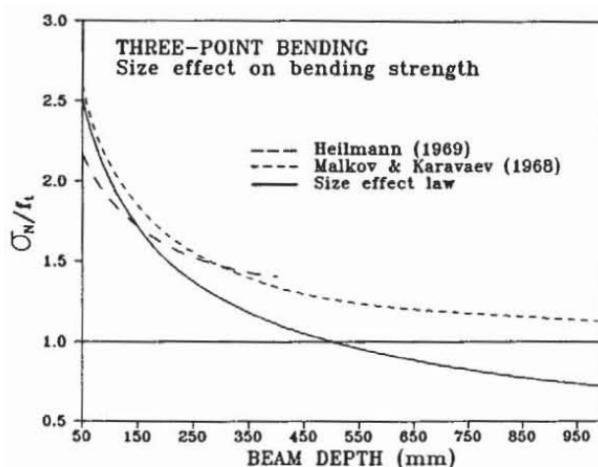


FIGURE 1.3: Effet d'échelle en flexion trois points sur des poutres non entaillées, [Bazant et Kazemi, 1990]

Cependant, pour les plus grands spécimens, la résistance nominale tend à la résistance en traction uniaxiale.

Dans la Fig. 1.4 les résistances nominales des poutres avec une taille constante d'entaille, testées par [Tang *et al.*, 1992] sont tracées en fonction de la hauteur. Comme dans le cas des éprouvettes non entaillées, la résistance nominale des grandes poutres tend vers une valeur constante différente de 0.

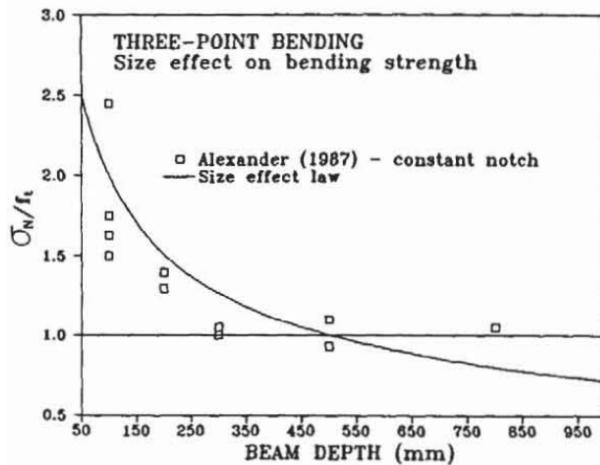


FIGURE 1.4: Effet d'échelle sur la contrainte nominale en flexion trois points sur des poutres entaillées (même taille d'entaille), [Bazant et Kazemi, 1990]

Chapitre 2

Energie de fissuration

1 Taux de restitution d'énergie

« La puissance mécanique disponible pour ouvrir une fissure de surface A est égale à la variation de l'énergie totale V , appelée *taux de restitution d'énergie* »(unité : joule/m^2) :

$$G = \frac{\partial V}{\partial A}$$

- Propagation de la fissure si : $G - 2\gamma^s \geq 0$
- Arrêt si : $G - 2\gamma^s \leq 0$

Avec γ^s énergie spécifique de rupture par unité de surface.

Après son amorçage, la fissure s'arrête, nécessitant plus d'énergie pour reprendre sa propagation (en déplacement imposé, la propagation de la fissure est presque toujours stable).

Dans le cas linéaire, l'énergie stockée est égale à : $V = \frac{1}{2}CF^2$ où F est la force appliquée et C la souplesse de la structure. On déduit que à force imposée :

$$G = -\frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial A} F^2$$

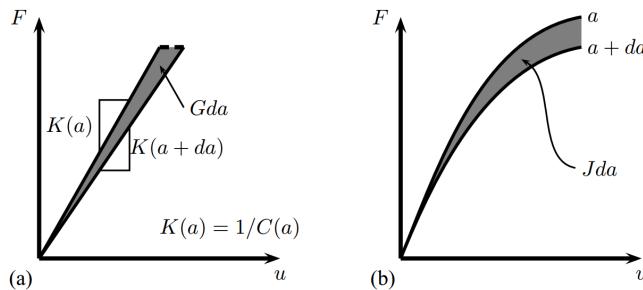


FIGURE 2.1: Taux de restitution d'énergie : (a) cas linéaire, (b) cas non linéaire

2 Méthode de détermination avec les effets d'échelle

L'énergie de rupture G_f qui est obtenu par cette méthode est définie comme l'énergie spécifique (énergie par unité de zone plane de fissuration) nécessaire pour la croissance de la fissure dans un échantillon d'essai infiniment grand. La méthode est décrite ici pour le mode I de rupture uniquement. Les résultats des tests dont on a besoin pour déterminer l'énergie de rupture ne sont que les valeurs de la charge maximale P_1, P_2, P_3 pour les spécimens de différents tailles, D_1, D_2, D_3 , et le module de Young du béton, E . Le module de Young peut être obtenu en utilisant toute autre méthode conventionnelle, par exemple, essais de compression sur des échantillons cylindriques. La technique qu'on présente ici s'applique initialement à la loi d'effet d'échelle donnée par l'équation (1.1).

Procédure de calcul, [Shah, 1991] : Les charges maximales corrigées qui prennent le poids de l'échantillon en compte : $P_j^0 = P_j + \frac{1}{2}m_j \cdot g$, ici m_j c'est la masse du spécimen j , g c'est l'accélération de la pesanteur.

On effectue maintenant une régression linéaire, compte tenu du tracé des ordonnées Y_j contre les abscisses X_j où : $Y_j = (b \cdot d_j / P_j^0)^2$, $X_j = d_j$
Interception de la droite de régression : $Y = AX + C$, avec

$$A = \frac{\sum_j (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_j (X_j - \bar{X})^2}; C = \bar{Y} - A\bar{X}; \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_j X_j; \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_j Y_j$$

Calcul des valeurs auxiliaires pour l'extrapolation : pour $l/d = 4$ (comme notre cas)

$$F_4(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{\pi^{1/2}(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}}$$

Energie libérée :

$$g(\alpha) = \left(\frac{l}{d}\right)^2 \pi \alpha (1.5F(\alpha))^2$$

Energie de fissuration :

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{E_c A}$$

Statistique :

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_j (X_j - \bar{X})^2; S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_j (Y_j - \bar{Y})^2; S_{y|x}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_j (Y_j - Y'_j)^2 = \frac{n-1}{n-2} (S_y^2 - A^2 S_x^2)$$

$$w_{y|x} = S_{y|x} \bar{Y}; w_x = S_x \bar{X}; w_A = \frac{S_{y|x}}{AS_x(n-1)^{1/2}}$$

$$w_C = \frac{S_{y|x}}{C(n-1)^{1/2}} \left(1 + \frac{1}{w_x^2}\right)^{1/2}; m = \frac{w_{y|x}}{w_x}$$

On prend comme approximation : $w_G^2 = w_A^2 + w_E^2$, avec w_E : coef de variation de E_c

Chapitre 3

Corrélation d'image

1 Introduction

La méthode de corrélation d'images numériques a été créé comme un outil stable et fiable pour la mesure des fissures / endommagements ([Lawler *et al.*, 2001] ; [Luo *et al.*, 1993]). La méthode de corrélation d'images a été fréquemment utilisée pour l'étude du mode d'ouverture de la fissure dans les matériaux quasi-fragiles comme le béton. Dans les travaux de [Choi et Shah, 1997], la précision de mesure du déplacement a été estimée à l'aide de trois procédures différentes et l'erreur maximale a été trouvée à environ 1/20 pixels. Il a été constaté que la corrélation d'images est efficace pour déterminer la longueur des fissures et l'emplacement des petites fissures. Contrairement aux méthodes plus traditionnelles, la corrélation d'images est une technique robuste avec un degré élevé de précision de mesure, et elle est beaucoup plus facile à appliquer expérimentalement. Le processus de corrélation consiste à capturé la surface de l'échantillon selon des modes distribués de niveau de gris. L'efficacité du mouchetis peut être déterminée à partir de la quantité de pixels par point noir. Ces schémas, l'un avant et l'autre après la mise en charge, sont imagés par un appareil photo numérique et stocké dans un ordinateur sous un format digital. Pendant le processus de formation d'image, l'intensité de la configuration aléatoire est transformée en un nombre fini d'échantillons sur une grille rectangulaire. Chaque capteur, ou pixel, dans une caméra typique moyenne l'intensité de la lumière incidente sous la forme d'une valeur d'intensité de gris, qui est normalement dans l'intervalle de 0 – 256 (on peut aller plus loin dans la précision en partant avec des photos de haute qualités en *RAW* (image brute) et les convertir de façon à conserver une précision des niveaux de gris, on obtient dans ce cas un spectre qui peut contenir 16000 valeurs ! ; cette méthode est bien sûr plus compliquée et prend trop de temps).

2 Principe

Traitons deux images, qui caractérisent la surface initiale et déformée d'un matériau soumis à une charge connue. Une image est une fonction scalaire de la coordonnée spatiale qui donne le niveau de gris de chaque point discret (ou pixel) de coordonnée X (vecteur position). Les

fonctions de l'image de référence et celle déformée sont appelés respectivement $f(X)$ et $g(X)$. Soit $u(X)$ le champ de déplacement. Ce champ permet de relier les deux images en exigeant la conservation du flux optique

$$g(X) = f(X + u(X))$$

En supposant que l'image de référence est différentiable, un développement de Taylor au premier ordre donne

$$g(X) = f(X) + u(X) \cdot \nabla f(X)$$

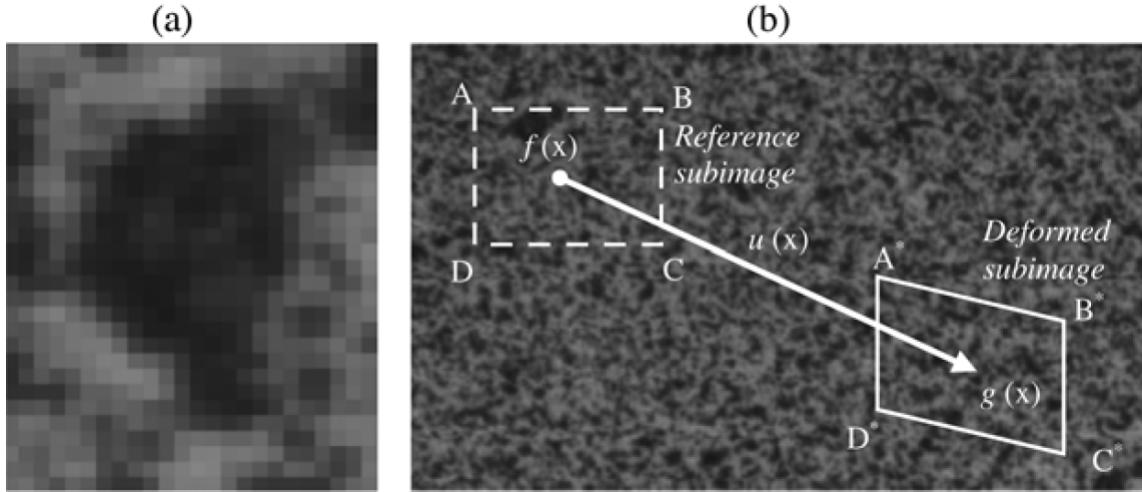


FIGURE 3.1: (a) Zoom sur un motif moucheté. Le modèle speckle est d'environ 15×20 pixels.
(b) Représentation schématique de la déformée et l'image de référence situés sur une photo instantanée, [Alam *et al.*, 2012]

Ensuite, par minimisation on obtient une fonction objective, et en considérant $u(X)$ comme la somme de fonctions scalaires, la minimisation nous donne alors un système linéaire qui ressemble à la relation suivante :

$$M.a = b$$

Avec

$$u(X) = \sum_{\alpha,n} a_{\alpha n} \Psi_n(X) e_\alpha$$

$$\begin{aligned} M_{\alpha n \beta m} &= \int \int_{\Omega} [\Psi_m(X) \Psi_n(X) \partial_\alpha f(X) \partial_\beta f(X)] dX \\ b_{\alpha n} &= \int \int [g(X) - f(X)] \Psi_n(X) \partial_\alpha f(X) dX \end{aligned}$$

3 Discrétisation par éléments finis (Corréli Q4)

Puisque l'image est naturellement divisée en pixels, il convient de choisir une forme carrée ou rectangulaire pour chaque élément. Ce qui nous amène au choix d'éléments finis type Q4 comme base la plus simple. Chaque élément est associé sur le carré $[0; 1]^2$, où les quatre fonctions de base sont $(1 - x)(1 - y)$, $x(1 - y)$, $(1 - x)y$ et xy dans un repère $(x; y)$ local. La décomposition de déplacement est donc particularisée pour tenir compte des fonctions de forme d'une discrétisation par éléments finis, [Hild et Roux, 2008]. Le but est surtout d'obtenir un champ de déplacement du même type que celui généré lors d'un calcul EF. On obtient ainsi :

$$u^e(x) = \sum_{n=1}^{n_e} \sum_{\alpha} a_{\alpha n}^e N_n(x) e_{\alpha}$$

Où n_e est le nombre de noeuds (ici $n_e = 4$), $N_n(x)$ les fonctions de forme, et ' a ', les déplacements nodaux inconnus. La fonction objective est alors reformulée, on obtient la forme discrétisé de la matrice M et du vecteur b

$$M_{\alpha n \beta m}^e = \int \int_{\Omega_e} [N_m(x) N_n(x) \partial_{\alpha} f(x) \partial_{\beta} f(x)] dx$$

$$b_{\alpha n}^e = \int \int [g(x) - f(x)] N_n(x) \partial_{\alpha} f(x) dx$$

Ainsi, il devient possible de calculer pour chaque élément ' e ' les contributions élémentaires de M et b .

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Deuxième partie

Procédure expérimentale

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Cette section est consacrée à la présentation de la campagne expérimentale menée sur des poutres homothétiques,
entaillées et non-entaillées
conçues avec le même matériau.

Nous avons considérés trois géométries différentes
afin de prendre en compte les effets d'échelle et les effets de bord.

Chapitre 4

Les échantillons

1 Description du matériau

Dans notre étude on test des éprouvettes de petites dimensions, on a décidé alors d'utiliser un micro-béton (mortier), comme celui utilisé dans le stage de [Hamouche, 2010].

La composition du micro-béton pour $1m^3$ est présenté dans le tableau 1. Le ciment utilisé est un CEM1 52,5N (HOLCIM), et le sable normalisé est conforme ISO679, sa granulométrie est 0/2mm, donnée dans le tableau 2. Le rapport e/c est de 0,46. Cette formulation est tirée de la thèse de [Ouglova, 2004].

Sable(Kg)	Eau(Kg)	Ciment(Kg)
1342	294	631

TABLE 4.1: Composition du micro-béton

Tamis ouverture des mailles (mm)	refus cummulés (%)
0.08	99 \pm 1
0.16	87 \pm 5
0.50	67 \pm 5
1.00	33 \pm 5
1.60	7 \pm 5
2.00	0

TABLE 4.2: Granulométrie du sable normalisé

2 Géométrie des éprouvettes

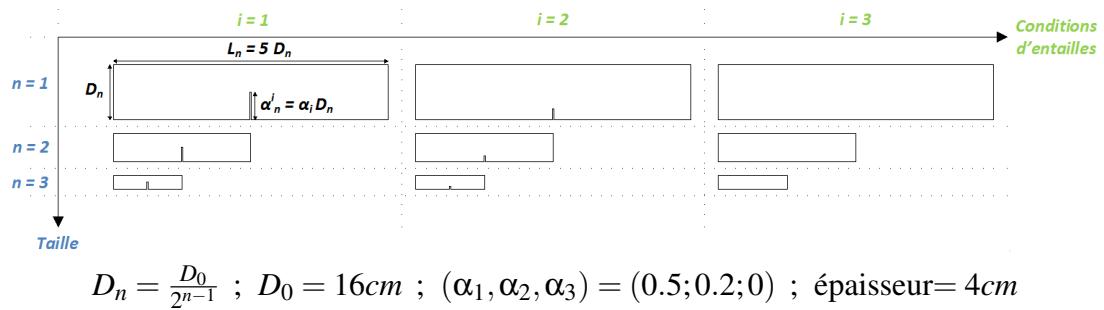
Les essais de flexion seront réalisés sur des poutres de dimensions $B \times D \times L$ ($\text{largeur} \times \text{hauteur} \times \text{longueur}$) avec un rapport $L/D = 5$ constant et B une dimension fixe (restriction du type de test, ici $B = 4\text{cm}$).

Trois tailles différentes sont considérées, toutes ayant un rapport $L/D = 5$, où L est la longueur et D est la hauteur de la poutre. La profondeur, quant à elle, a été choisie constante et égale à $B(4\text{cm})$. Les entailles centrales seront taillées après coulage et non moulées sur les éprouvettes. Trois longueurs d'entaille ont été considérées avec une épaisseur d'entaille constante de 2mm pour tous les échantillons (voir Fig. 4.1).

On propose alors les dimensions suivantes :

taille \ dimension	épaisseur	hauteur	longueur	distance entre appuis
n_1	$B_1 = 4\text{cm}$	$D_1 = 4\text{cm}$	$L_1 = 20\text{cm}$	$I_1 = 16\text{cm}$
n_2	$B_2 = 4\text{cm}$	$D_2 = 8\text{cm}$	$L_2 = 40\text{cm}$	$I_2 = 32\text{cm}$
n_3	$B_3 = 4\text{cm}$	$D_3 = 8\text{cm}$	$L_3 = 80\text{cm}$	$I_3 = 64\text{cm}$

TABLE 4.3: Les dimensions des éprouvettes



$$D_n = \frac{D_0}{2^{n-1}} ; D_0 = 16\text{cm} ; (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (0.5; 0.2; 0) ; \text{épaisseur} = 4\text{cm}$$

FIGURE 4.1: Détails de la géométrie des éprouvettes testées pour la construction d'une base des données expérimentales

3 Coffrages

Types de bois :

- bois standard (BS, joue le rôle de support)
- bois de coffrage (BC, en contact avec le béton)

Pour concevoir le coffrage on utilise des planches de bois standard de $2,5m \times 1,25m$ (épaisseur $1,5cm$), ainsi que des planches de bois de coffrage de $2,5m \times 1,22m$ (épaisseur $1,8cm$), on admet $4mm$ comme trait de coupe. Les coffres seront conçus d'une façon à être réutilisables, on aura besoin alors de serres joints (2 par coffre).

3 coffrages par taille sont réalisés afin d'avoir plusieurs éprouvettes avec la même gâchée de mortier, alors 9 coffres en total mais les coffres des éprouvettes qui ont une même dimension seront exactement pareils.

- Pour les éprouvettes de dimension $4 \times 4 \times 20$ on peut faire un seul coffre de la manière suivante : (N.B. : masse du coffre avec béton environ $6,5Kg$)

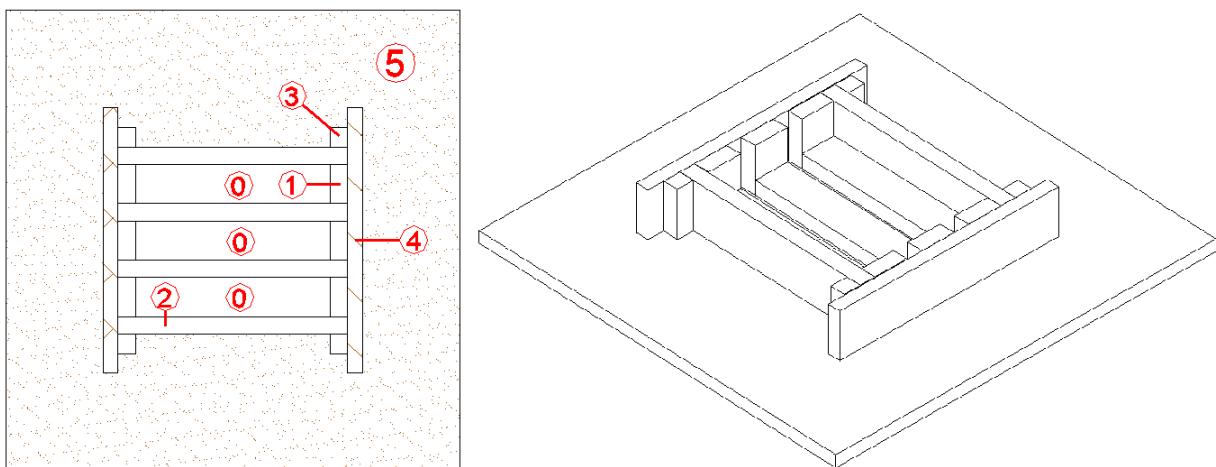


FIGURE 4.2: plan du coffre réutilisable qui va contenire 3 poutres de dimension $4 \times 4 \times 20$ et les parties qui le composent, ainsi qu'une vue en espace du coffre

- (0) $\times 3$: BC $20 \times 4cm$
- (1) $\times 6$: BC $5.8 \times 4cm$
- (2) $\times 4$: BC $23.6 \times 5.8cm$
- (3) $\times 4$: BC $5.8 \times 2cm$
- (4) $\times 2$: BC $27.2 \times 5.8cm$
- (5) $\times 1$: BC $47.2 \times 46.6cm$

- Vous retrouvez les plans pour les autres coffres dans l'ANNEXE A.

4 Matériel et équipement

Composants du micro-béton (perte 15%) :

Calcule du volume total de béton nécessaire pour toute la campagne expérimentale :

- ▷ 27 éprouvettes (poutres) : $v_1 = 60480cm^3$
- ▷ 12 échantillons cylindriques (11×22) pour définir les caractéristiques du béton (9 pour le test de compression uni-axial dont 3 testés avec un extensomètre, 3 pour l'essai brésilien) : $v_2 = 25090cm^3$
- ▷ $+5L$ (cône d'Abrams) $+1L$ (Aréomètre) : $v_3 = 6000cm^3$
- ▷ Volume total : $V = 91570cm^3$
- ▷ $+pertes$: $V_{final} = 0.1053055m^3$

Ainsi, d'après le Tableau 4.1 on peut calculer les quantités des composants du béton :

- Sable : 141.32Kg
- Eau : 30.96Kg
- Ciment : 66.45Kg

Matériels pour le coffrage :

- Une plaque de bois standard
- Une plaque de bois de coffrage
- Serres joints : 10 (2 par coffre)



FIGURE 4.3: état final des coffres

Chapitre 5

Conception d'une gâchée

Cette partie de mon stage se montre très critique et très consommante en termes de temps et d'énergie, pour toute l'équipe. Je pense alors qu'il faut au moins parler des traits principaux de cette 'épisode'. Je vais présenter la procédure comme elle se déroule chronologiquement sur une durée d'une journée.

1 préparation des coffres

Les coffres, comme illustrés dans la Fig. 4.3 page 24, ne sont pas encore près pour contenir le mortier, pour cela, on a recours aux serres joints (Fig. 6.1) pour être sûr que les coffres peuvent tenir le mortier de s'échapper et le bois de se déformer, ce qui peut produire des échantillons erronés.

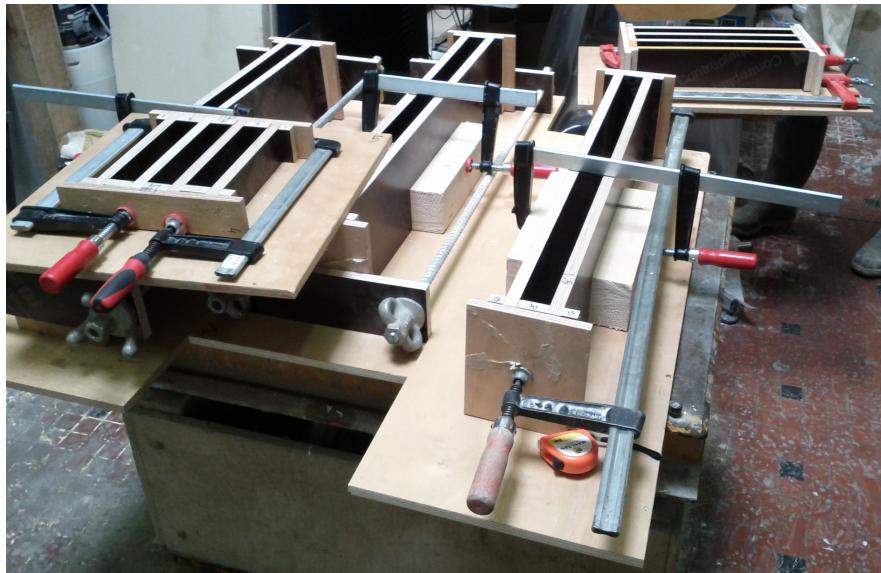


FIGURE 5.1: Préparation des coffres

2 Malaxage

Les 'ingrédients' sont pesés puis introduits dans le malaxeur (Fig. 6.2), d'une manière distincte selon le manuel.



FIGURE 5.2: Le malaxeur, département génie civil

3 Moulage

Pour les poutres, comme pour les échantillons 11×22 , les coffres sont remplis à moitié, vibrés pour 30 sec sur la table vibrante, ensuite ils sont remplis entièrement, puis vibrés encore une fois. Après une long journée de travail, voici le résultat (Fig. 6.3), nous devrions attendre une semaine avant de démouler pour pouvoir lancer la préparation de la seconde gâchée :



FIGURE 5.3: Moulage des poutres et des échantillons cylindriques (pour éviter l'évaporation d'eau de surface on couvre le béton frais d'une feuille de plastique)

Chapitre 6

Essai F3P (flexion trois points)

1 Introduction

La flexion provoque une distribution de contraintes présentant à la fois un gradient et une répartition de contraintes de traction et de compression de part et d'autre de la fibre neutre. L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'une structure posée sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance.

On impose à une éprouvette normalisée une déformation, ou flèche, à vitesse de déformation constante, et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.

L'essai de flexion trois points peut nous fournire les valeurs du module d'élasticité en flexion ' E_f ', contrainte de flexion ' σ_f ', déformation en flexion ' ϵ_f ' et de la réponse contrainte-déformation du matériau. L'avantage principal d'un essai de flexion trois points est la facilité de la préparation et du test du spécimen.

Cependant, cette méthode présente aussi quelques inconvénients : les résultats du test sont sensibles à l'échantillon (matériau et géométrie), le chargement et la vitesse de déformation.

Dans le cas d'un comportement fragile, il existe une charge limite que la structure ne peut pas dépasser. Dans le cas d'un chargement en force, il y a rupture brutale par instabilité plastique (Fig. 5.1).

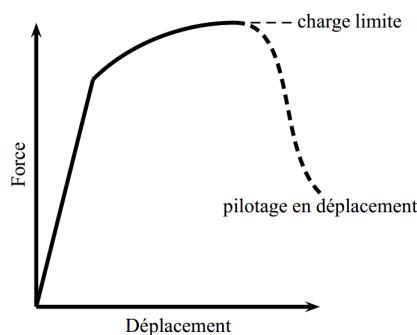


FIGURE 6.1: Charge limite et mode de pilotage du chargement

On distingue plusieurs modes de chargement des structures :

- Chargement monotone
- Chargement cyclique
- Chargement constant

On s'interesse particulièrement dans notre étude au mode de chargement monotone puisqu'on cherche en premier lieu le comportement adoucissant après la charge limite.

Pour un essai sous chargement monotone d'une éprouvette, on peut distinguer différents types de mode de rupture, dans le cas du mortier ça sera un mode de rupture quasi-fragile : Le comportement global est non linéaire. On observe une non linéarité globale à cause de la microfissuration qui se déclenche en pré-pic. Ensuite, il y a une perte de raideur et de charge en post-pic liée à la macro fissure.

2 Machine d'essai : la MTS TTC Melo

Machine d'essai servohydraulique 4 colonnes :

- Bâts MTS 311.11 100KN avec vérin hydraulique MTS monté sur la traverse ; montée et blocage hydraulique de la traverse
- 2 Servovalves MTS ; Servo $15l/min$ & $9l/min$
- Pilotage : contrôleur MTS FLEXTEST 40, logiciel multiusage TestWare (MPT) ; pilotage du système en force, déplacement vérin ou déformation éprouvette ; fréquence de la boucle de pilotage 6kHz
- Type de sollicitations : traction, torsion, compression (TTC)

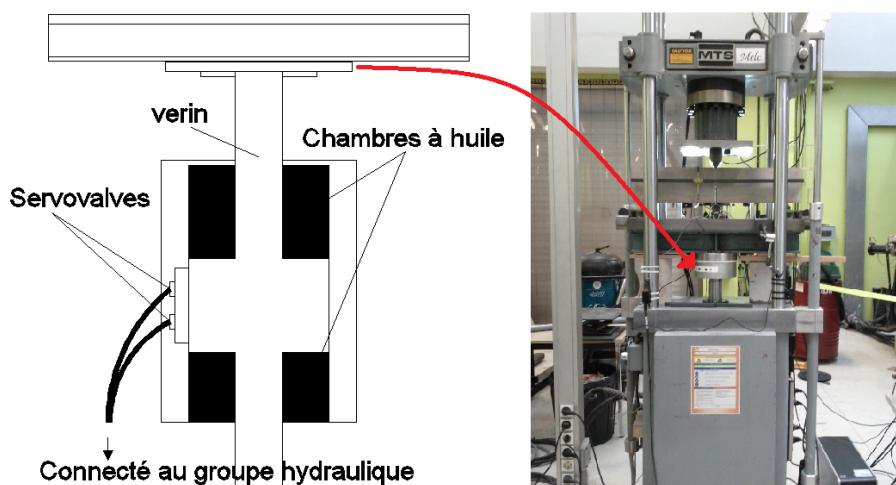


FIGURE 6.2: Modèle simplifié du système de fonctionnement mécanique du vérin / Photo du montage (LMT-cachan)

Le mécanisme de fonctionnement du système hydraulique (en traction/compression) est facile à saisir, et c'est le même utilisé sur les nouvelles machines que celles qui datent des années 70', seul le logiciel et le matériel électronique changent. Le groupe hydraulique consiste d'un piston cylindrique et de 2 chambres indépendantes de part et d'autre, reliées chacune à une servovalve et une fuite qui gèrent électroniquement le débit d'huile entrant et sortant des chambres ce qui permet de déplacer le vérin à une vitesse précise qu'on indique au programme MPT (Fig. 5.2 page 28).

3 Pilotage

Comme on a déjà indiqué, les essais seront réalisées sous un mode de chargement monotone, dans ce cas la charge appliquée croît de façon continue, et elle est gérée par le déplacement du vérin, sauf que ce déplacement à son tour peut consister d'un déplacement imposé, ou une charge imposée (ce genre de pilotage ne nous convient pas parce qu'il ne permet pas de mesurer le post-pic d'une courbe force/flèche ou force/CMOD dans le cas des poutres en béton testées en FP3).

En réalité, durant l'essai, on enregistre trois valeurs de déplacements différents :

- Déplacement du vérin
- LVDT (capteur flèche)
- Capteur CMOD

On pourrait alors, théoriquement, piloter en ouverture de fissure à vitesse constante (en ce qui va nous permettre de bien voir la propagation de la fissure. Sauf que le cas réel s'avère plus compliqué. Due à de différentes raisons, principalement parce que la valeur du CMOD (ainsi que la flèche) ne commencent à varier d'une manière constante que après avoir appliquer $\approx 10\%$ de la force ultime, on est alors amené à piloter en déplacement vérin jusqu'à $\approx 85\%$ de F_{ultime} (en raison d'aller rapidement à travers la phase élastique ; la valeur est décidée en ce basant sur des calculs analytiques ou simulations numériques (chap. 7)), après on passe en pilotage en ouverture de fissure ou pilotage en flèche.

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Troisième partie

Étude numériques

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Le matériau utiliser dans notre étude est le mortier.

On sait bien que le comportement du mortier est fragile en traction, l'expérimentation sur le mortier est à son tour alors, difficile à gérer.

On a alors recours à modéliser nos essais pour pouvoir prédire le comportement lors du test expérimental,

de cette façon on peut aspirer à des résultats expérimentaux plus fiables (surtout sur la première campagne, les résultats numériques vont nous permettre de calibrer les machines d'essai)

de même ça servira comme outil de vérification pour le modèle de calcul utilisé pour la résolution numérique.

Chapitre 7

Modélisation

1 Modèle de calcul

Pour modéliser la réponse des poutres au chargement statique, on va utiliser un logiciel de simulation numérique utilisé en mécanique des structures : Cast3M (Castem) CAST3M utilise la méthode des éléments finis pour résoudre différents types de problèmes scientifiques, il est à la fois un programme de maillage, un programme de calcul et un programme de visualisation des résultats.

Une fois on a défini le maillage, les paramètres matériaux et les conditions aux limites, on peut choisir le mode de calcul le plus convenable à notre problème.

Les modèles RICRAG [Richard *et al.*, 2010] / RICBET sont tout à fait adaptés dans ce cas vue que Les équations constitutives de ces modèles sont formulées dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles (afin de satisfaire la conservation et les principes d'évolution) et consistent à la base d'un potentiel d'état compatible avec l'élasticité, l'endommagement, le glissement entre les surfaces fissurées et l'écrouissage. En utilisant alors le modèle RICRAG *non local*¹ on aura équitablement le mode de comportement de nos échantillons et on pourra ainsi prédire de la meilleure façon possible le comportement lors de l'expérience.

2 Paramètres matériau

Pour bien prédire numériquement les résultats de l'expérience, on a besoin d'introduire les paramètres qui correspondent à ce matériau, or par manque de données sur certains de ces paramètres (principalement la fragilité en traction) on a recours à une identification par rapport aux essais expérimentaux de [Hamouche, 2010], car il utilise le même mortier. Pour cela on a lancé plusieurs calculs sur des échantillons similaires aux échantillons de l'expérience en géométrie et chargement et on a changé les paramètres d'une façon intuitive pour obtenir au final une courbe force/déplacement similaire aux courbes trouvées expérimentalement (Fig.

1. Une particularité importante qui doit être pris en considération afin d'assurer la robustesse numérique du modèle proposé. son objectif est d'éviter toute localisation de la déformation due à écrouissage négatif.

7.1).

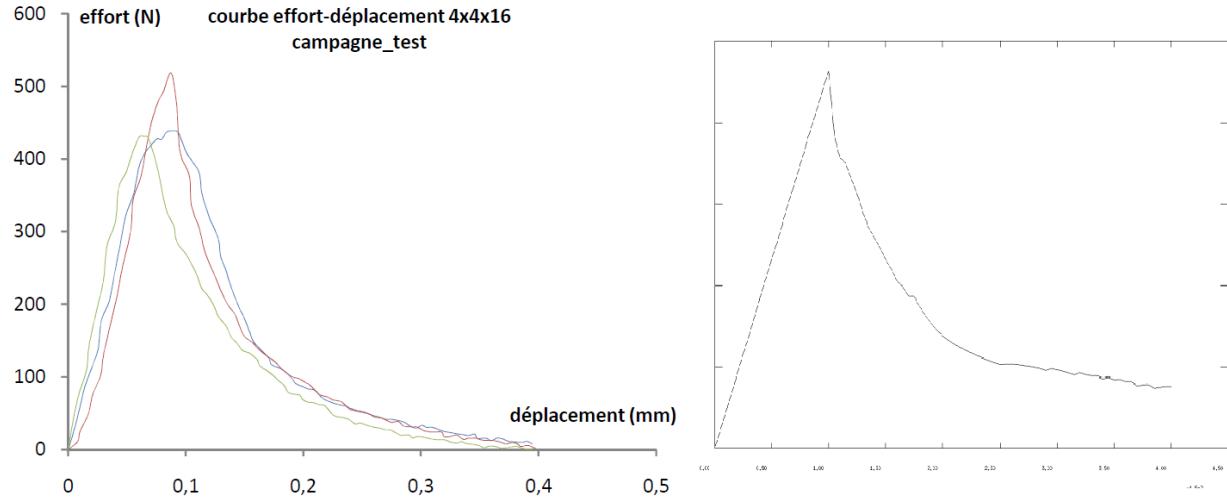


FIGURE 7.1: Les résultats expérimentaux et la courbe obtenue numériquement pour des poutres 4x4x16 entaillés testés en flexion 3 points

Les paramètres qu'on introduira alors dans le modèle numérique seront :

- Module de Young : $38GPa$
- Coefficient de poisson : 0.24
- Résistance en traction : $5MPa$
- Fragilité en traction : $7.9e^{-3}$
- Fragilité en compression : $3.5e^{-4}$
- Module d'écrouissage 1 : $1.5e^7$
- Module d'écrouissage 2 : $7e^{-7}$
- Longueur de corrélation : $4mm$

3 Maillages

On peut utiliser la géométrie des poutres dans notre intérêt, en profitant des symétries, une poutre en 2D avec les conditions au limites correspondants suffira pour modélisé la réponse d'une poutre réel.

Notons qu'on pourrait même prendre une demi-poutre comme modèle valide à cause des symétries, il faudrait par contre faire attentions au conditions au limites à l'interface.

L'option de calcul sera donc en mode 'plan' avec des éléments *qua4* comme éléments de base, on a bien sûr l'intention de densifier le maillage au centre de la poutre, là où on aura la zone endommagé (l'endroit le plus probable d'amorçage de la fissure) et au contraire, un maillage grossier loin du centre :

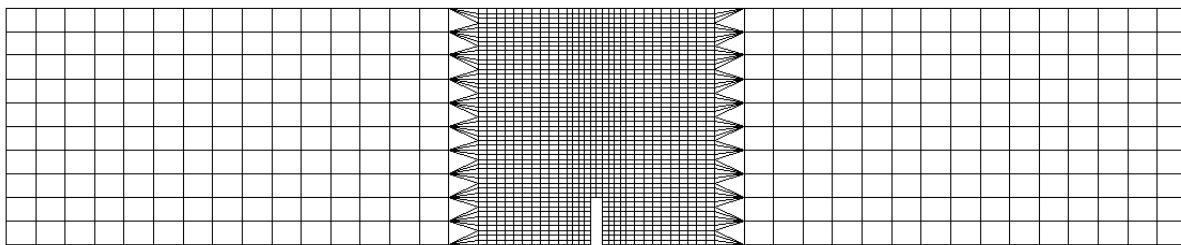


FIGURE 7.2: Maillage d'une poutre $4 \times 4 \times 20$ entaillée à $0.2 \times \text{hauteur}$

Erreur de conception :

Une exactitude parfaite en géométrie de nos poutres moulées au laboratoire est un trait difficile à achevé surtout quand on prend en considération l'erreur sur les coffrages en bois sciés et assembler manuellement, ainsi que différentes difficultés au niveau expérimentale.

En effet, une fois démoulée, on a remarqué des erreurs en mesurant les dimensions des poutres, parmi ces défauts, un à ne pas prendre à la légère : on a mesuré une largueur de 3.6cm à la place de 4cm au milieu d'une poutre $4 \times 16 \times 80$ et seulement sur la face supérieure comme le montre la figure suivante :

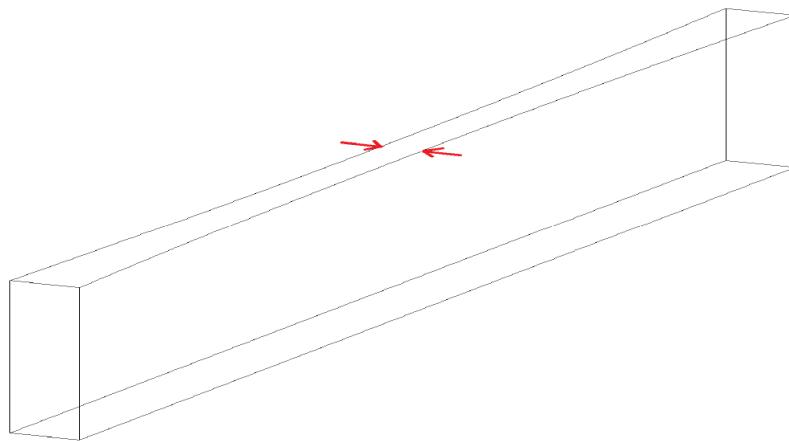


FIGURE 7.3: Poutre avec une erreur de conception

Ceci était causé par les serres jointes (utilisés pour maintenir le coffrage de façon à ne pas permettre au mortier d'évader) et par une surestimation de notre part de la force hydrostatique exercée par le mortier sur le bois.

4 Résultats

Pour mieux voir l'effet de l'erreur de conception sur notre poutre on a décidé de calculer la différence entre les rigidités d'une poutre aux dimensions exactes et une poutre déformée. Compte tenu de la géométrie spéciale de notre poutre déformée, un calcul analytique de ça rigidité en flexion trois points peut s'avérer compliqué, pour cela on crée un modèle pour cette poutre avec un maillage spécifique en prenant des paraboles pour gérer les segments déformées, et on étudie la réponse élastique de ce modèle sous un chargement en flexion trois points. Une même étude faite sur deux poutres, l'une altérée, l'autre non, mais à part cela elles sont identiques à tous les niveaux, révèle une diminution de 7.7% (supposé négligeable, à ne pas prendre en considération dans ce qui suit) de la rigidité de la poutre quand elle est déformée, comme le montre le graphe Force/Flèche suivant :

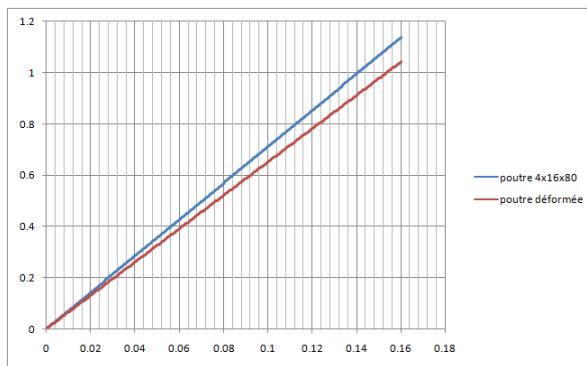


FIGURE 7.4: Comparaison des rigidités entre une poutre correcte et une poutre erronée

On a aussi lancé un calcul dans CAST3M, en utilisant RICBET (ricbet3D) cette fois, modifié pour utiliser la régularisation en G_f (régularisation Hillerborg), sur deux poutres de mêmes géométries, non entaillées, mais dont l'une des deux est 'déformée' (Fig. 6.3 page 37) :

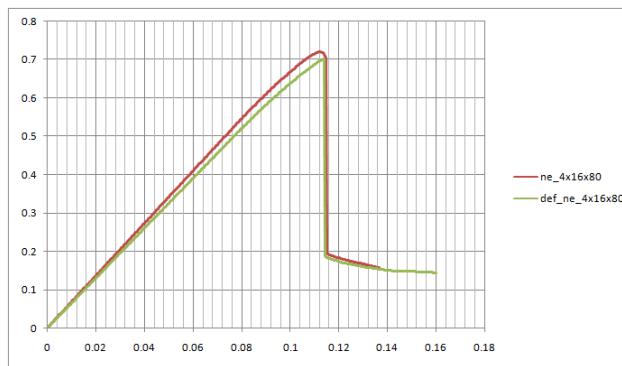


FIGURE 7.5: Résultats numériques sur une poutres $4 \times 16 \times 80$ non entaillées -modèle RICBET-

Dans le but d'estimer les résultats expérimentaux on a calculé la réponse des poutres suite à un chargement en déplacement uniforme, en flexion trois points, en utilisant le modèle RICRAG avec du calcul non local.

Ce modèle nous a permis de lancer les calculs et d'obtenir les résultats sur les poutres de différents dimensions, entaillées ($0.2 \times \text{hauteur}$) et non entaillées. Voici les graphes comparatifs :

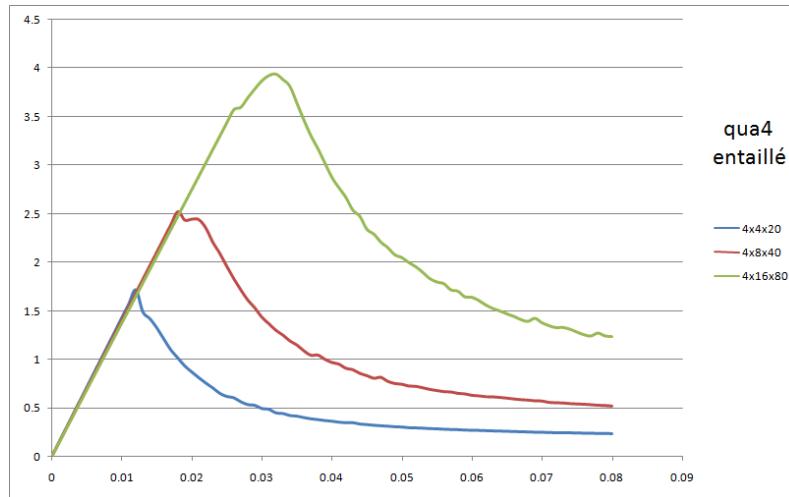


FIGURE 7.6: Résultats numériques sur des poutres entaillées -modèle RICRAG-

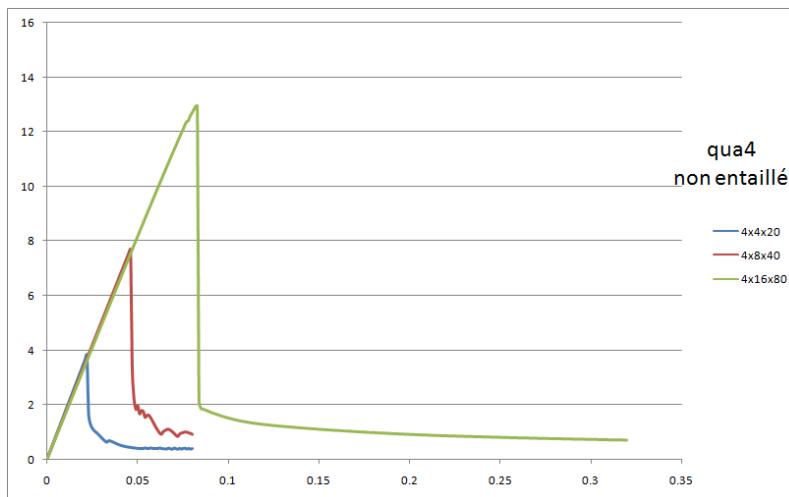


FIGURE 7.7: Résultats numériques sur des poutres non entaillées -modèle RICRAG-

On peut ainsi mener une analyse des effets d'échelle en comparant, pour chaque poutre, la résistance du ligament au pic. La résistance du ligament σ est définie ici comme étant la contrainte maximale dans le ligament (la longueur du ligament c'est la hauteur de la poutre moins l'entaille initiale) :

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{FS}{bh^2}$$

où F, S, b, h et D sont respectivement, le chargement, la portée, la profondeur, la longueur du ligament et la hauteur de la poutre. ainsi pour une poutre entaillé à 0.2 de sa hauteur (sachant que $S = 4D$ et $h = 0.8D$) :

$$\sigma_e = \frac{75}{8} \frac{F}{bD}$$

pour une poutre non entaillé :

$$\sigma_{ne} = \frac{6F}{bD}$$

On peut alors comparer les résultats avec les lois de Bažant :

Loi classique de Bažant pour des structures entaillées : Pour des échantillons homothétiques entaillés, la loi classique de Bažant est donnée par :

$$\sigma_N = \frac{Bf'_t}{\sqrt{1 + \frac{D}{D_0}}} \text{ avec } \sigma = \frac{3}{2} \frac{FS}{bD^2}$$

où B est une constante adimensionnelle liée à la géométrie, D_0 est une longueur caractéristique, f'_t est la résistance à la traction du matériau. Ainsi, pour un rapport entaille/hauteur égale à 0.2 les paramètres de fissuration sont estimés à partir de l'ajustement linéaire :

$$\frac{1}{\sigma^2} = aD + c, \text{ avec } D_0 = \frac{c}{a} \text{ et } Bf'_t = \frac{1}{\sqrt{c}}$$

L'une des grandes limitations de la loi classique d'effet d'échelle est que les paramètres B et D_0 dépendent fortement de la géométrie de la structure et plus particulièrement du rapport a_0/D . Ces paramètres ne peuvent pas être utilisés pour la détermination directe de la résistance ou de l'énergie de fissuration du matériau avec précision. On aura alors recours à la loi intrinsèque d'effet d'échelle. Au lieu d'identifier les paramètres d'effet d'échelle à partir de l'équation précédente, les paramètres de fissuration G_f et c_f , ou d'une façon équivalente K_{Ic} et c_f , sont directement identifiés à l'aide d'une représentation intrinsèque donné par l'équation :

$$\overline{\sigma_N} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{c_f + \overline{D}}}$$

$$\text{avec } \overline{\sigma_N} = \frac{\sigma_N}{c_N} \sqrt{g'(\alpha_0)}, \overline{D} = D \frac{g(\alpha_0)}{g'(\alpha_0)} \text{ et } c_N = \frac{3}{2} \frac{S}{D}$$

L'avantage principal de cette formulation intrinsèque est qu'elle ne dépend pas de la géométrie, ainsi différents échantillons avec des rapports a_0/D différents peuvent être traités ensemble.

On peut maintenant estimer K_{Ic} et c_f par régression linéaire, en utilisant MATLAB ou bien manuellement en ce référent aux équations du Chapitre.2, section.2, avec $\frac{1}{\sigma_N^2} = \frac{1}{K_{Ic}} \bar{D} + \frac{c_f}{K_{Ic}}$ comme droite de regression.

Loi de Bažant pour des structures non-entaillées : Pour des échantillons homothétiques non-entaillés la loi d'effet d'échelle de Bažant est donnée par l'expression suivante :

$$\sigma_N = \sigma_B \left(1 + \frac{1}{\gamma + \frac{D}{2l_{f0}}} \right), \text{ avec } \sigma_N = \sigma_{ne} = \frac{6F}{bD}$$

σ_B représente la résistance à la flexion, l_{f0} est un paramètre de longueur lié à la taille de la FPZ, γ est une constante positive qui doit être calibrée expérimentalement (on va tester numériquement plusieurs valeurs pour γ afin d'estimer laquelle est la plus adéquate).

Tous calculs fait, les résultats obtenus sont les suivants :

Poutres entaillées		pic			Paramètres, Bažant		
maillage	dimension	force(KN)	$\sigma_N(MPa)$	$\bar{\sigma}_N$	K_{Ic}	C_f	σ_N
qua4 entaillée	$4 \times 4 \times 20$	0.875	5.17	10.733	0.8365	0.001634	4.7051
	$4 \times 8 \times 40$	1.2645	3.696	7.673	0.8365	0.001634	3.5294
	$4 \times 16 \times 80$	1.97	2.886	5.991	0.8365	0.001634	2.5793

TABLE 7.1: Détermination des paramètres d'effet d'échelle pour les échantillons entaillés

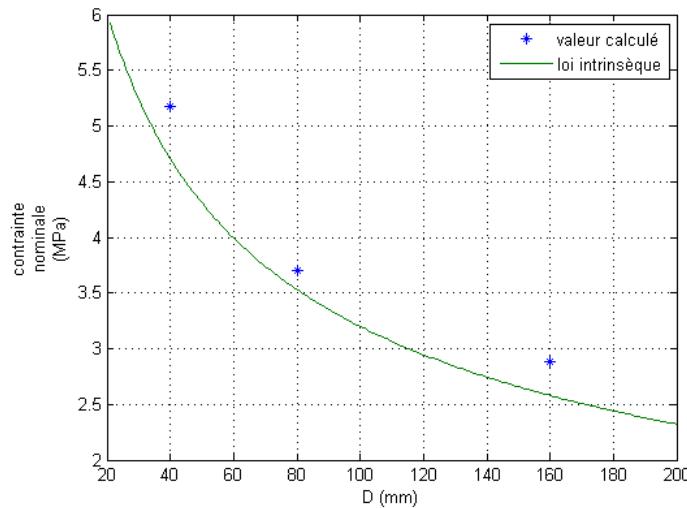


FIGURE 7.8: Postraitemment, poutres entaillées avec la loi intrinsèque de bažant

De même, pour les poutres non entaillées, on estime les paramètres :

Poutres non entaillées		pic		Paramètres, Bažant		
maillage	dimension	force(KN)	$\sigma_N(MPa)$	γ	$l_{f0}(mm)$	σ_B
qua4 non entaillée	$4 \times 4 \times 20$	2.37	8.978	0.55	53.2736	3.86623
	$4 \times 8 \times 40$	3.85	7.218	0.55	53.2736	3.86623
	$4 \times 16 \times 80$	6.475	6.07	0.55	53.2736	3.86623

TABLE 7.2: Détermination des paramètres d'effet d'échelle pour les échantillons non entaillés

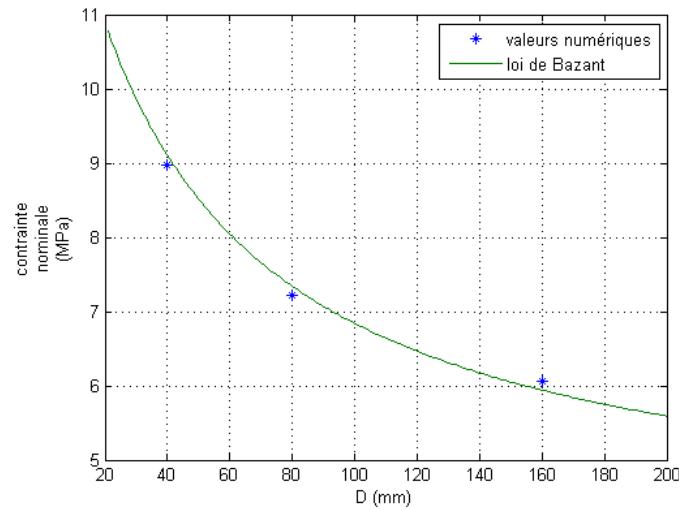


FIGURE 7.9: Postraitement, poutres non entaillées avec la loi d'effet d'échelle de bažant

Quatrième partie

Résultats et analyse expérimentale

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Chapitre 8

Identification des paramètres mécaniques

1 Procédure

Les paramètres mécaniques qu'on va déterminer expérimentalement sont :

- Le module de Young (module d'élasticité)
- Résistance en compression
- Résistance en traction

Différents essais ont été effectués pour permettre la connaissance des différentes entités intrinsèques au micro-béton utilisé. Ces essais sont menés sur des éprouvettes cylindriques $11 \times 22\text{cm}^2$, 28 jours après coulage, mais avant de les tester, il faut réctifier les éprouvettes des imperfections en surface, par la méthode de surfacage mécanique effectuée à l'aide d'une réctifieuse (image disponible dans l'ANNEXE A), en conséquent, on obtient :



FIGURE 8.1: Surfaçage mécanique d'une éprouvette cylindrique, comparaison avant/après

Pour l'instant, on peut procéder par la détermination des grandeurs physiques expérimentalement.

Module de Young : La mesure du module d'élasticité est faite à l'aide d'un extensomètre comme dans la figure suivante.



FIGURE 8.2: L'extensomètre appliqué à une éprouvette cylindrique

L'extensomètre consiste de 2 couronnes indépendantes qui viennent se fixer sur l'éprouvette, et ainsi, pendant l'essai de compression uniaxiale, les capteurs verticaux mesurent le déplacement *réel*, ce qui nous permet alors de calculer le module d'Young exacte. Par contre, si on vient mesurer directement cette grandeur par le rapport entre la contrainte et la déformation en tête, cela conduirait à une surestimation du module d'élasticité et ceci à cause des phénomènes de frettage.

Contraintes de ruptures : La contrainte limite de compression peut être déterminée par essai de compression uniaxial, jusqu'à rupture des éprouvettes. Après la rupture, la force de compression maximale appliquer sur l'éprouvette. Durant l'essai est récupérée, ce qui permet de calculer f_c .



FIGURE 8.3: Test de compression uniaxial et mode de rupture

La contrainte limite de traction est déterminée par l'essai de fendage (ou essai brésilien) qui permet d'apprécier avec une bonne précision la contrainte ultime de traction f_t . Une représentation de l'essai est donnée sur la Fig. 8.4.



FIGURE 8.4: Montage de l'éprouvette pour l'essai brésilien

2 Mesures

Durant les essais pour déterminer les contraintes limites de rupture, on récupère la force maximale F_{max} qui a causée la rupture, puis en fonction de la géométrie de l'éprouvette et du test effectuer, on calcule la contrainte de rupture correspondante.

$$\text{- Contrainte limite en compression : } f_c = \frac{F_{max}}{S}$$

$$\text{- Contrainte limite en traction : } f_t = \frac{20F_{max}}{\pi a h}$$

avec S , a et h sont la surface circulaire, le diamètre et la hauteur.

Finalement j'ai regrouper tous les informations dans le tableau 8.1. Notons qu'il existe d'autres façon pour déterminer ces paramètres, par exemple, pour le module de Young, on pouvait faire une mesure par transmission d'ondes ultrasonores (en fait on trouve un module d'Young dynamique mais il existe des formules pour obtenir E_{mca} à partir de E_{dyna} , cette méthode permet aussi d'estimer le coefficient de poisson). Egalement, la contrainte limite de traction pourrait être mesurer par un essai de traction direct sur une poutre entaillée...

gâchée #	date de moule (dd/MM/yy)	Aéromètre %	Affaissement (cm)	Résistance en (MPa) compression	Résistance en (MPa) traction	Module de Young(GPa)
1	26/04/13	2.4	1.1	51.114	4.283	
				48.52	3.5	—
				44.351	3.6	
2	06/05/13	2.65	1.35	46.673		
				46.542	—	—
				47.702		
3	14/05/13	—	—	45.482		39.6
				50.851	—	36.4
				45.28		39.6

TABLE 8.1: Paramètres mécaniques des différentes gâchées

Statistiques :

$$\bar{f}_c = 47.390 \text{ MPa} ; S_{fc} = 5.0870$$

$$\bar{f}_t = 3.8940 \text{ MPa} ; S_{ft} = 0.0822$$

$$\bar{E} = 38.533 \text{ GPa} ; S_E = 2.2755$$

Chapitre 9

Les essais

1 Montage

Avant de lancer les tests sur les poutres il faut les 'équiper' pour qu'on puisse en sortir les informations souhaiter.

•*L'entaille* : elle était produite après 28 jours du coulage, à l'aide d'une scie comme le montre la figure suivante.



FIGURE 9.1: Scie électrique au DGC

•*Le mouchetis* : c'est une étape nécessaire si l'on envisage de faire une analyse par corrélation d'image. Sans le mouchetis, l'algorithme ne pourrait pas différencier entre les différents ZOI (zone of interest), et finalement les calculs ne convergeront pas. En fait l'objet du mouchetis est de permettre aux photos d'avoir un spectre de gris qui s'étend d'une manière régulière entre le blanc et le noir. Une preuve du succès d'un mouchetis, pour un premier approche, serait un étude de la texture de la partie de l'éprouvette qui va être photographier, si les niveaux de

gris sont répartis sur le spectre noir/blanc comme dans la Fig. 9.2 alors notre mouchetis est OK.

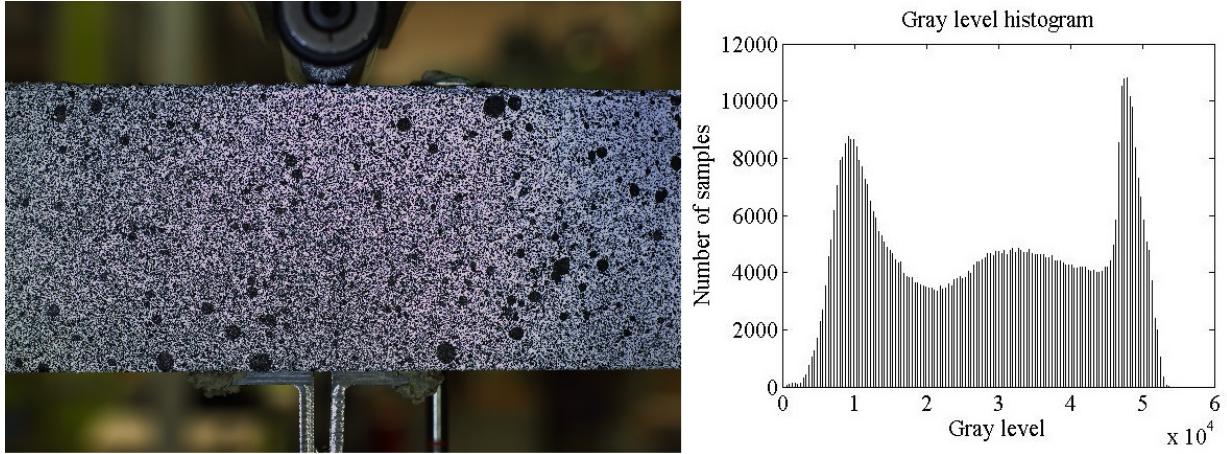


FIGURE 9.2: Exemple d'un mouchetis et la texture correspondante

Une autre analyse plus sophistiquée peut être faite sur Correli_Q4 pour mieux prévoir la convergeance des itérations, cela est possible par une analyse d'incertitude. Le principe de cette analyse est facile à saisir, une fois dans Correli, on choisit la photo à étudier et sur cette photo on indique la partie à analyser, sur cette partie Correli applique un déplacement de 1 pixel (on obtient ainsi une deuxième image) puis il étudie le champs de déplacement entre les figures initial/final et calcul l'erreur et l'incertitude en fonction de la taille de la ZOI, (Fig.9.3) et du déplacement. Les figures présentées là résultent de l'étude d'incertitude sur le même échantillon dans la Fig. 9.2. On remarque que pour une ZOI de taille 16×16 pixels l'erreur sur le déplacement est de $0.01p \approx 0.00013mm$ ce qui est, dans mon avis, satisfaisant pour l'étude de propagation de la fissure.

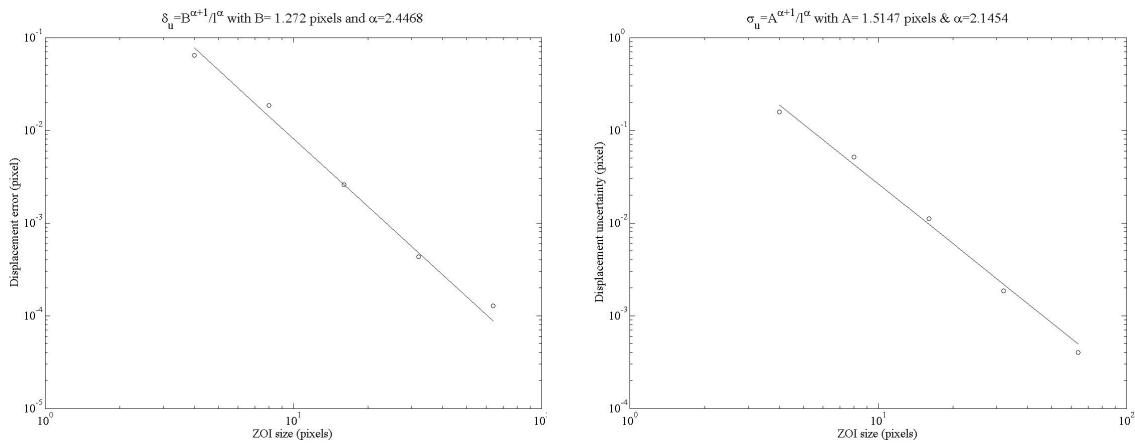


FIGURE 9.3: Analyse d'incertitude : taille de la ZOI

• *Système flèche/CMOD* : la mesure du déplacement du vérin ne peut pas être admise comme une mesure exacte de la flèche à cause de l'écrasement du béton aux niveaux des appuis, donc le capteur LVDT qui mesure la flèche doit être fixer sur la poutre elle-même de manière à mesurer le déplacement de la fibre neutre. Eventuellement, pour ne pas gêner la propagation de la fissure on a décidé de mesurer la flèche à une distance $L/10$ du centre. Sur les poutres les plus petites il est difficile de mesurer la flèche, on mesure plutôt le déplacement du vérin.

Pour le capteur CMOD, lui peut être placé tout simplement sur l'entaille dans le cas des poutres entaillées, sinon on va coller 2 pièces métalliques sur la surface inférieure de la poutre de façon à créer une 'entaille fictive' où le capteur vient se fixer (Fig 9.4). Notons que la colle doit être appliquée loin du centre pour s'assurer que la fissure peut s'initier entre les deux points de la colle.

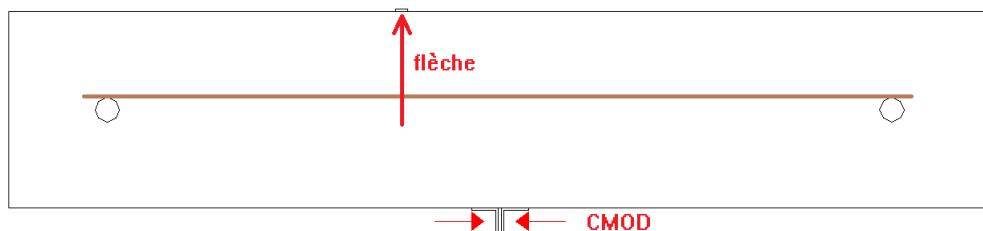


FIGURE 9.4: Entaille fictive, les plaques métalliques sont collés aux extrémités pour ne pas intervenir dans l'amorçage de la fissure

Finalement, l'installation est en place, nous sommes prêts à tester.



FIGURE 9.5: Essai F3P sur une poutre entaillé

2 Résultats

•*Eprouvettes entaillées, $\alpha_0 = 0.5$* : neuf éprouvettes de ce type ont été testées. La Fig. 9.6 montre l'évolution du chargement et de la contrainte maximale dans le ligament en fonction du CMOD sur toutes les poutres de cette même géométrie (pour chaque groupe de poutres $[D, \alpha_0]$ on affiche la courbe moyenne force/CMOD). On remarque que la contrainte nominale dépend de la taille de la structure, et comme prévus, les structures les plus petites sont les plus résistantes.

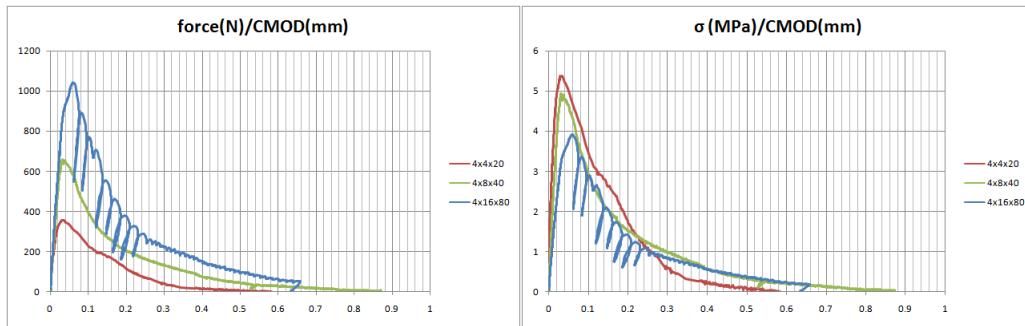


FIGURE 9.6: Courbes moyennes en effort et en contrainte en fonction du CMOD ; $\alpha_0 = 0.5$

•*Eprouvettes entaillées, $\alpha_0 = 0.2$* : de même, La Fig. 9.7 montre l'évolution du chargement et de la contrainte maximale dans le ligament en fonction du CMOD.

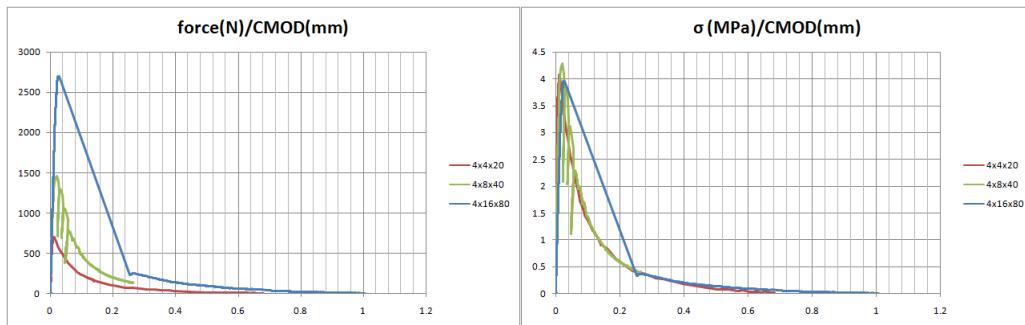


FIGURE 9.7: Courbes moyennes en effort et en contrainte en fonction du CMOD ; $\alpha_0 = 0.2$

•*Eprouvettes non entaillées, $\alpha_0 = 0$* : comme dans les deux cas précédents, la figure 9.8 présente la charge maximale et la contrainte dans le ligament en fonction de l'ouverture d'entaille moyennée sur toutes les éprouvettes de la même géométrie. Encore une fois, l'effet d'échelle est observé. La résistance du ligament décroît quand la taille de la structure augmente. Malheureusement, en raison de difficultés techniques, nous n'avons pas pu obtenir des données expérimentales sur la phase post-pic, mais ça n'empêche pas l'étude d'effet d'échelle, en ce qui concerne les lois de Bažant, on n'aura besoin que de la valeur au pic.

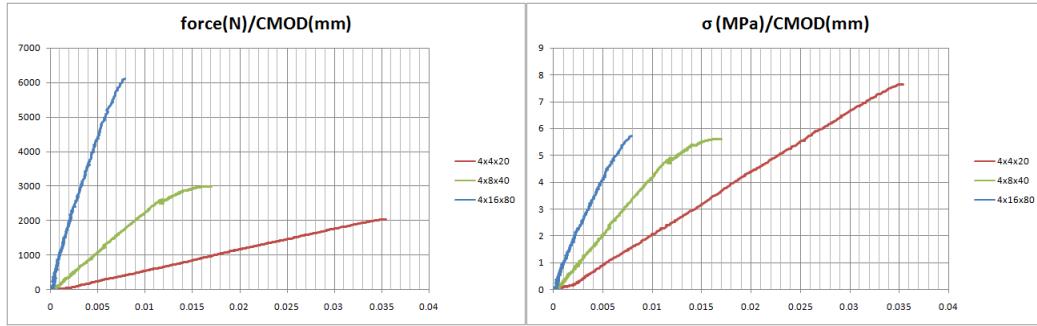


FIGURE 9.8: Courbes moyennes en effort et en contrainte en fonction du CMOD ; $\alpha_0 = 0$

Les valeurs intéressantes pour l’analyse en effet d’échelle sont présenter dans le tableau 9.1, notamment les valeurs au pic de la force, la flèche, le CMOD et la contrainte nominale. Rappelons que la valeur de la ’flèche’ pour les poutres de petites dimension ($D = 40mm$) est en réalité une mesure du déplacement du vérin.

Dans l’étape suivante on va analyser l’effet d’échelle sur les poutres entaillées et non-entaillees en utilisant la loi classique, la loi intrinsèque et la loi d’effet d’échelle universelle, on sera mené alors à déterminer les paramètres liés à la géométrie et au matériau dans les équations de Bažant, et comparer finalement avec les résultats expérimentaux.

Dimension D (mm)	géométrie α_0	valeur au pic			
		force (KN)	flèche (mm)	CMOD (mm)	σ_N (MPa)
40	0	2.035	0.087	0.035	7.632
		2.031	0.081	0.035	7.615
		—	—	—	—
	0.2	0.629	0.091	0.012	2.358
		—	—	—	—
	0.5	0.698	0.097	0.012	2.620
		0.358	0.113	0.030	1.342
		—	—	—	—
		0.322	0.120	0.030	1.210
80	0	3.594	—	0.019	6.740
		3.187	0.050	0.013	5.975
		2.983	0.040	0.017	5.593
	0.2	1.392	0.032	0.019	2.610
		1.462	0.049	0.020	2.742
		1.682	0.036	0.018	3.155
	0.5	0.170	0.064	0.066	—
		0.678	0.037	0.038	1.272
		0.659	0.031	0.031	1.236
160	0	6.545	0.068	0.069	6.136
		—	—	—	—
		6.112	0.066	0.068	5.730
	0.2	2.694	0.054	0.023	2.530
		—	—	—	—
		—	—	—	—
	0.5	1.021	0.052	0.051	0.957
		—	—	—	—
		1.042	0.050	0.058	0.977

TABLE 9.1: Résultats expérimentaux, Force, Flèche, CMOD, et contrainte nominale au pic

3 Analyse par la loi d'effets d'échelle

3.1 La loi intrinsèque d'effet d'échelle pour les poutres entaillées

Cette démarche est déjà développée dans le chapitre 7, alors pour l'instant je vais seulement rappeler l'équation :

$$\overline{\sigma_N} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{c_f + D}}$$

On cherche alors les paramètres K_{Ic} , et c_f par régression linéaire, les valeurs sont données dans le tableau 9.2.

Poutres entaillées					
α_0	K_{Ic}	c_f (mm)	$B(\alpha_0)$	D_0	G_f (N/m)
0.2	1.7045×10^5	2.03	2.4285	11.295	42.62
0.5	1.1556×10^5	1.10	0.4264	6.9531	41.51

TABLE 9.2: Paramètres d'effet d'échelle pour les échantillons entaillés, application aux résultats expérimentaux

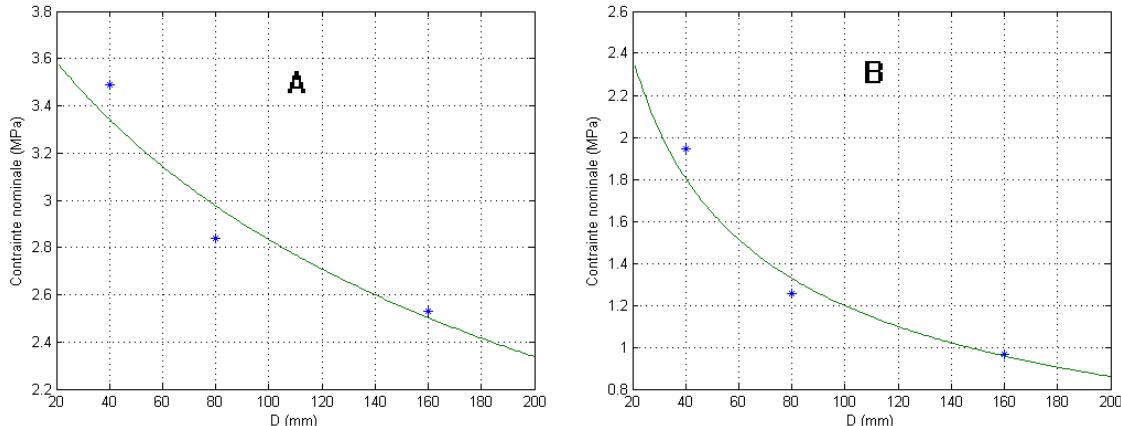


FIGURE 9.9: Plot, loi de Bažant pour $\alpha_0 = 0.2$ (A), $\alpha_0 = 0.2$ (B) et résultats expérimentaux

3.2 La loi d'effet d'échelle pour les poutres non-entaillées

L'équation est la suivante :

$$\sigma_N = \sigma_B \left(1 + \frac{1}{\gamma + \frac{D}{2f_0}} \right)$$

De même, on cherche les paramètres σ_B , γ et l_{f0} mais cette fois par une identification non-linéaire. Les résultats sont représentés là dessous.

Poutres non-entailles			
α_0	σ_B (MPa)	γ	l_{f0} (mm)
0	2.05	0.165	108.413

TABLE 9.3: Paramètres d'effet d'échelle pour les échantillons non-entailles, application aux résultats expérimentaux

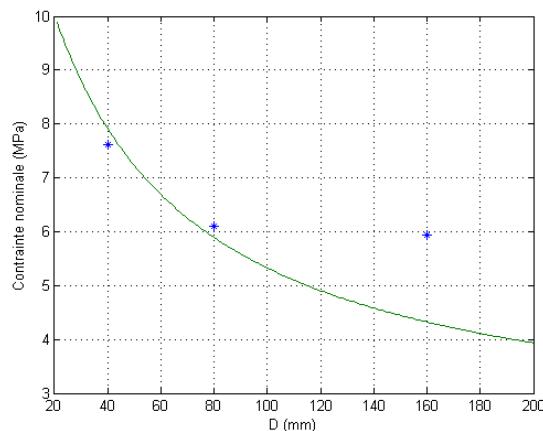


FIGURE 9.10: Plot, loi de Bažant pour $\alpha_0 = 0$ et résultats expérimentaux

3.3 La loi universelle d'effet d'échelle

On a déjà fait une analyse d'effet d'échelle par la loi classique et la loi intrinsèque pour les structures entaillées, et la loi de Bažant pour les structures non-entailles, sur la campagne expérimentale, aussi sur les résultats numériques au Chapitre 7. Il est temps maintenant de faire l'analyse d'effet d'échelle en utilisant la loi universelle.

La *Loi Universelle d'effet d'échelle*, [Bažant et Yu, 2009], est donnée par l'équation :

$$\sigma_N(D, \alpha_0) = \sqrt{\frac{E'G_f}{g'(\alpha_0)c_f + g(\alpha_0)D}} \left(1 - \frac{rc_f^2 g''(\alpha_0)e^{-k\alpha_0^2}}{4(l_p+D)(g(\alpha_0)D + g'(\alpha_0)c_f)} \right)^{1/r}$$

avec

$$\sigma_N = \frac{3}{2} \frac{PS}{bD^2}$$

et

$$g(\alpha_0) = \pi \alpha_0 c_N^2 (F(\alpha_0))^2 \quad ; \quad E' = \frac{E}{1 - v^2}$$

Les paramètres G_f (l'énergie de fissuration), c_f (la longueur effective de la FPZ), r et k (des paramètres libres) et l_p (longueur caractéristique du matériau) seront tous déterminés par un ajustement non-linéaire de Levenberg-Marquardt. g et F , deux fonctions liées à la géométrie, sont définies dans le Chapitre 2. On note que les valeurs initiales introduites dans l'algorithme d'identification (développé par Cécile) doivent être physiques, c'est à dire proches de la valeur finale. Les résultats sont données ci dessus (paramètres : Tableau 9.4 , comparaison : Fig. 9.11).

Poutres entaillées et non entaillées				
c_f (mm)	r	k	l_p (mm)	G_f (N/m)
27.7	0.5	115	2.05	80

TABLE 9.4: Paramètres de la loi universelle d'effet d'échelle, application aux résultats expérimentaux

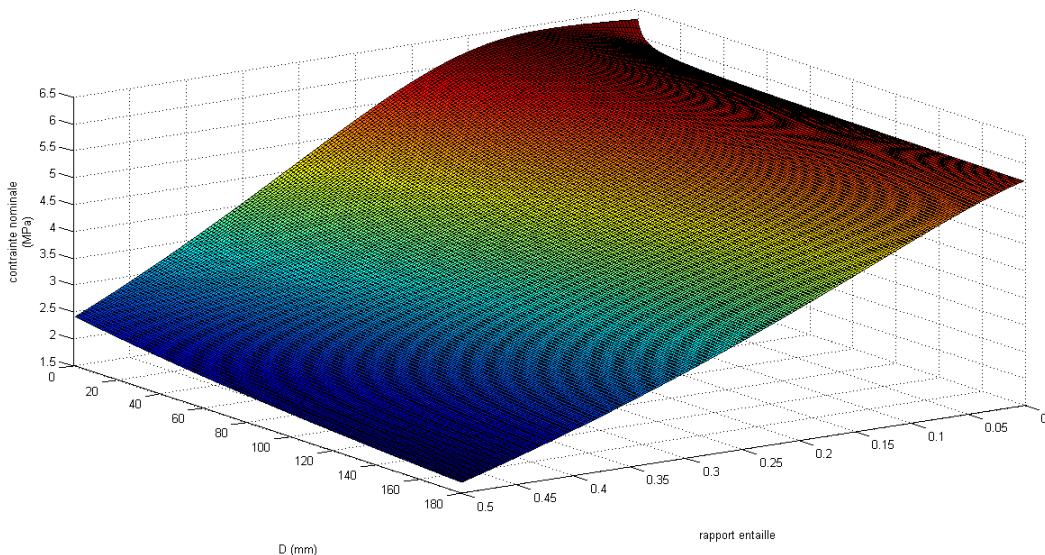


FIGURE 9.11: Résultats de l'ajustement des données expérimentales avec la loi universelle de Bažant

4 Analyse par correlation d'image

Cette partie du mémoire a pour intérêt de montré les avantages, ainsi que les limitations, de l'analyse par correlation d'images, pour cela, et principalement à cause de la contrainte du temps, je ne vais pas exploité le totale des images (2421 photos, 277 Gbytes !), plutôt je

vais donner une idée sur comment se déroule l’analyse par correlation d’images. Ceci dit, une analyse du champs de déplacement par correlation d’images sur Correli_Q4 est réalisée sur la poutre ‘ M_4 ’ (gâchée #2, $\alpha_0 = 0.5$, $D = 80mm$). Les résultats présentés dérivent de l’étude faite sur un totale de 6 photos (une photo de référence et cinq photos de comparaison). La photo de référence tombe just avant le pic (comme ça on pourra observé l’initiation de la fissure, 10 secondes de temps entre chaque photo). La zone qui va être étudier est choisi comme suivant : Une fois le calcul est terminé, on peut tracer les différents vecteurs qu’on a obtenu en output.

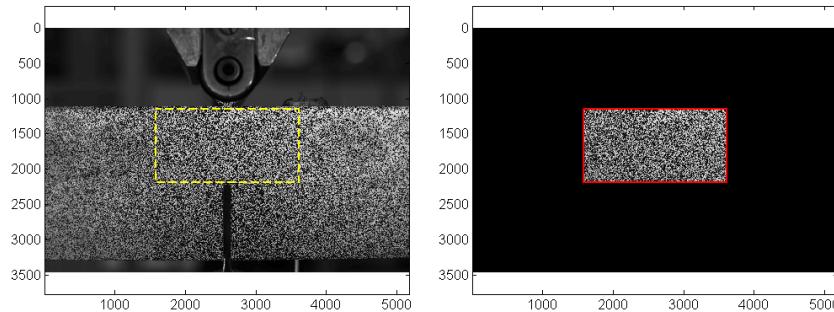


FIGURE 9.12: Champ de déplacement pour $n=5$

Ces vecteurs (champs de déplacement, contrainte, erreur etc..) ont la forme suivante : $f(x, y, n)$ telque $x()$ et $y()$ sont respectivement l’abscisse et l’ordonnée (discrétisés en pixels) et ‘ n ’ un entier qui indique la photo (donc $f(i, j, k)$ c’est la valeur de f au point $(i; j)$ de la photo k). Un graphe du déplacement horizontal calculé sur la photo $n = 5$ (comparée bien sûr à $n = 0$, l’image de référence), montre clairement l’ouverture de la fissure (Fig .9.13). D’après le saut observé on pourrait estimer la largeur de la fissure, environ $0.6p$ (pixels).

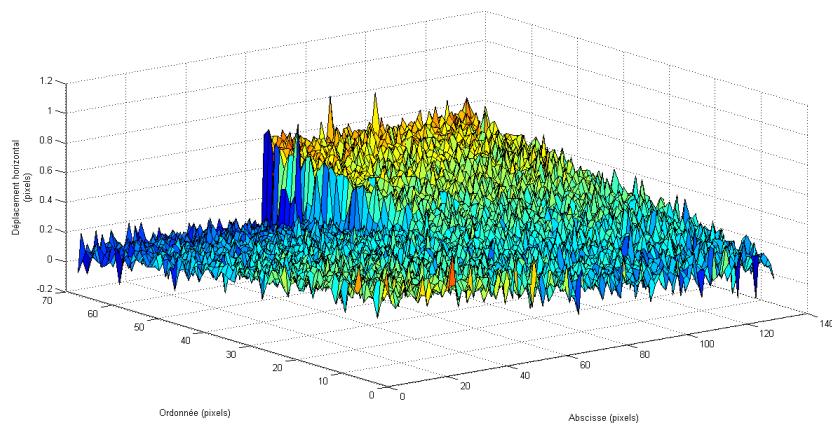


FIGURE 9.13: Partie de la photo à analyser par correlation d’images

Une manière plus exacte pour calculer l'ouverture de fissure est de tracer le champ de déplacement pour une ordonnée fixe (Fig. 9.14). Dans ce cas, une solution approchée pour calculer la fissure, est de tracer les deux droites de regressions, avant et après la fissure, et puis mesurer la distance qui les sépare. D'après le calcul : $CMOD = 0.4254p$

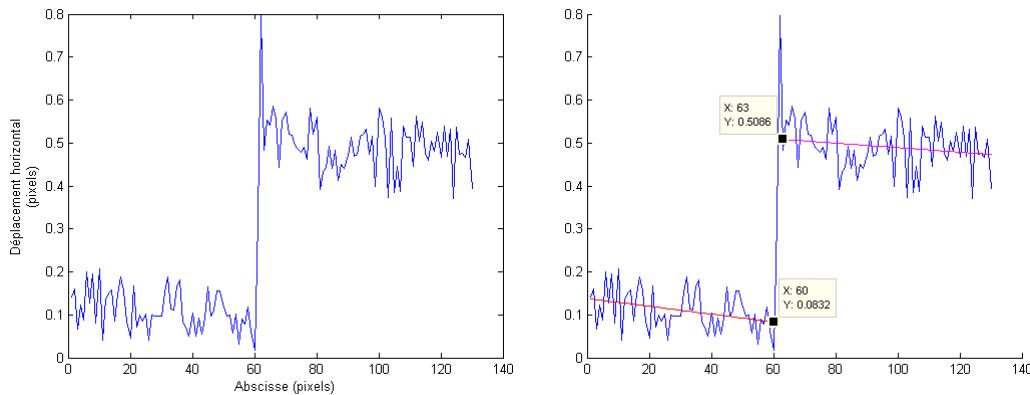


FIGURE 9.14: Champ de déplacement pour une ordonnée fixe, et calcule de l'ouverture de fissure

Sur la Fig. 9.15 on observe la propagation de la fissure, ici on a tracé toutes les courbes $n = 1$ à 5 pour $y = 60p$, de cette façon on peut calculé la propagation de la fissure à plusieurs pas de temps, ce qui peut nous accorder, pour une large base de données, de divers informations comme la vitesse de propagation de la fissure etc...

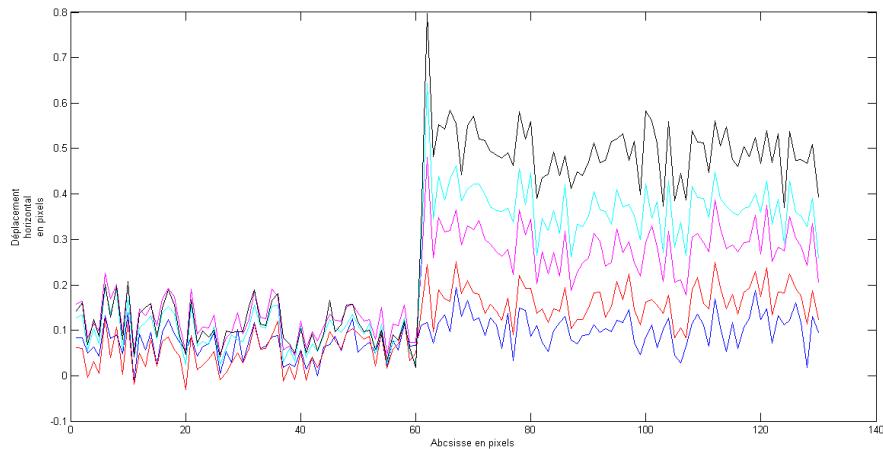


FIGURE 9.15: Champ de déplacement pour une ordonnée fixe, $n = 1, 2, 3, 4, 5$

Finalement, on peut visualiser la fissure (Fig. 9.16) en traçant le champs d'erreur sur une photo donnée (on peut même distinguer un écrasement du béton au niveau de l'appuit), mais on constate que le maillage est trop grossier se qui nous empêche de discerner la pointe de fissure.

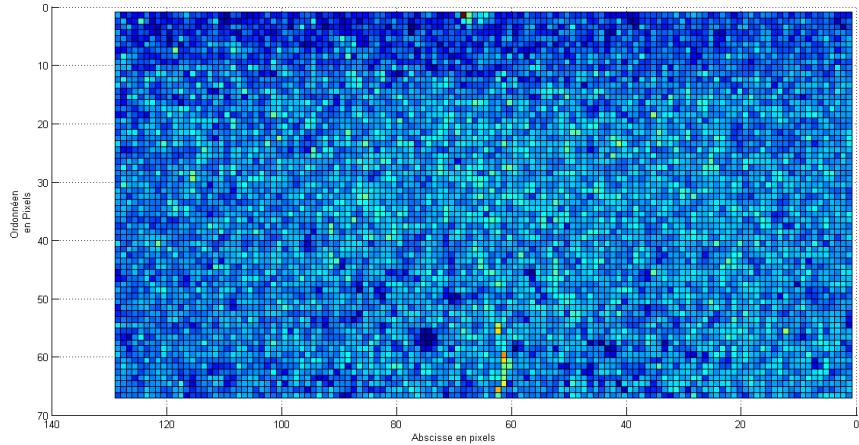


FIGURE 9.16: Champ d'erreur pour $n = 5$

5 Conclusion

Cette étude expérimentale a été dépouillée en terme d'effets d'échelle. On a pu montrer que la loi universelle de Baant décrit correctement la rupture en terme de contraintes maximales au pic sur diverses tailles d'éprouvettes et trois géométries différentes (trois rapports entaille/hauteur différents). Ceci dit, le rendement de la campagne expérimentale pourrait être plus efficace, si on règle quelques incertitudes sur nos essais, notamment, les coffres en bois à mon avis ne sont pas adaptés pour des analyse d'effet d'echelle à cause de la déformation du bois même, et surtout le fait que les coffres soit réutilisables fait que l'exactitude des dimensions est doutée. Un autre aspect, presque impossible à prévoir et dur a géré, est celui du comportement de la machine sous un pilotage en fonction d'un capteur extérieur, dans ce cas il faut faire surtout attention à la stabilité du montage durant le test. En ce qui concerne la correlation d'image, c'est sans doute un outil magnifique, mais ne parvient toujours pas à identifier la pointe de la fissure. Malheureusement on n'a pas réussit a obtenir des résultats fiables en post-pic concernant les poutres non entaillée. Par contre je dirais que ce stage s'est achevé avec succès sur tous les autres niveaux expérimentaux.

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Cinquième partie

Bibliographie et Annexe

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Bibliographie

- [Alam *et al.*, 2012] ALAM, S., LOUKILI, A. et GRONDIN, F. (2012). Monitoring size effect on crack opening in concrete by digital image correlation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(7):818–836.
- [Bazant et Kazemi, 1990] BAZANT, Z. et KAZEMI, M. (1990). Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete. *International Journal of Fracture*, 44(2):111–131.
- [Bazant, 1984] BAZANT, Z. P. (1984). Size effect in blunt fracture : concrete, rock, metal. *Journal of Engineering Mechanics*, 110(4):518–535.
- [Bažant et Yu, 2009] BAŽANT, Z. P. et YU, Q. (2009). Universal size effect law and effect of crack depth on quasi-brittle structure strength. *Journal of engineering mechanics*, 135(2):78–84.
- [Bazant *et al.*, 2004] BAZANT, Z. P., ZUBER, B. et PIJAUDIER-CABOT, G. (2004). *Introduction aux effets d'échelle sur la résistance des structures*. Lavoisier.
- [Chana, 1981] CHANA, P. (1981). *Some aspects of modelling the behaviour of reinforced concrete under shear loading*. Numéro Monograph.
- [Choi et Shah, 1997] CHOI, S. et SHAH, S. (1997). Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation. *Experimental Mechanics*, 37(3):307–313.
- [Eligehausen et Ozbolt, 1992] ELIGEHAUSEN, R. et OZBOLT, J. (1992). Size effect in concrete structures. *Applications of Fracture Mechanics to Reinforced Concrete*, pages 17–44.
- [Hamouche, 2010] HAMOUCHE, A. (2010). Etude des caractéristiques d'un mortier pour un essai nooru-mohamed. *Rapport Stage M2 recherche, LMT Cachan*.
- [Hild et Roux, 2008] HILD, F. et ROUX, S. (2008). Correli q4 : A software for-finite-element-displacement field measurements by digital image correlation. *Rapport interne LMT Cachan*, 269.
- [Hillerborg, 1990] HILLERBORG, A. (1990). Fracture mechanics and the concrete codes. *ACI Special Publication*, 118.
- [Kani, 1967] KANI, G. (1967). How safe are our large reinforced concrete beams ? In *ACI Journal Proceedings*, volume 64. ACI.
- [Lawler *et al.*, 2001] LAWLER, J. S., KEANE, D. T. et SHAH, S. P. (2001). Measuring three-dimensional damage in concrete under compression. *ACI Materials Journal*, 98(6).

- [Leonhardt, 1962] LEONHARDT, F. (1962). Beitrage zur behandlung der schubprobleme im stahlbetonbau. *J. BETON-UND STAHLBETONBAU*, 7:161–173.
- [Luo *et al.*, 1993] LUO, P., CHAO, Y., SUTTON, M. et PETERS III, W. (1993). Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision. *Experimental Mechanics*, 33(2):123–132.
- [Ouglova, 2004] OUGLOVA, A. (2004). *Etude du comportement mécanique des structures en béton armé atteintes par la corrosion*. Thèse de doctorat.
- [Reinhardt, 1981] REINHARDT, H. (1981). Similitude of brittle fracture of structural concrete. *Advanced Mechanics of Reinforced Concrete*, pages 201–210.
- [Richard *et al.*, 2010] RICHARD, B., RAGUENEAU, F., CREMONA, C. etADELAIDE, L. (2010). Isotropic continuum damage mechanics for concrete under cyclic loading : stiffness recovery, inelastic strains and frictional sliding. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(8):1203–1223.
- [Rüsch *et al.*, 1962] RÜSCH, H., HAUGLI, F. R. et MAYER, H. (1962). *Schubversuche an Stahlbeton-Rechteckbalken mit gleichmäßig verteilter Belastung*. Wilhelm Ernst & Sohn.
- [Shah, 1991] SHAH, S. (1991). Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete. *rilem draft recommendations*, 23:461–465.
- [Tang *et al.*, 1992] TANG, T., SHAH, S. P. et OUYANG, C. (1992). Fracture mechanics and size effect of concrete in tension. *Journal of structural engineering*, 118(11):3169–3185.
- [Taylor, 1972] TAYLOR, H. (1972). Shear strength of large beams. *Journal of the Structural Division*, 98(St 11).
- [Walsh, 1976] WALSH, P. (1976). Crack initiation in plain concrete. *Magazine of Concrete Research*, 28(94):37–41.
- [Weibull, 1939] WEIBULL, W. (1939). Phenomenon on rapture in solids. *Ingenjörsvetenskapsakad Handl*, 153:1–55.

Annexe A

1 Les coffres

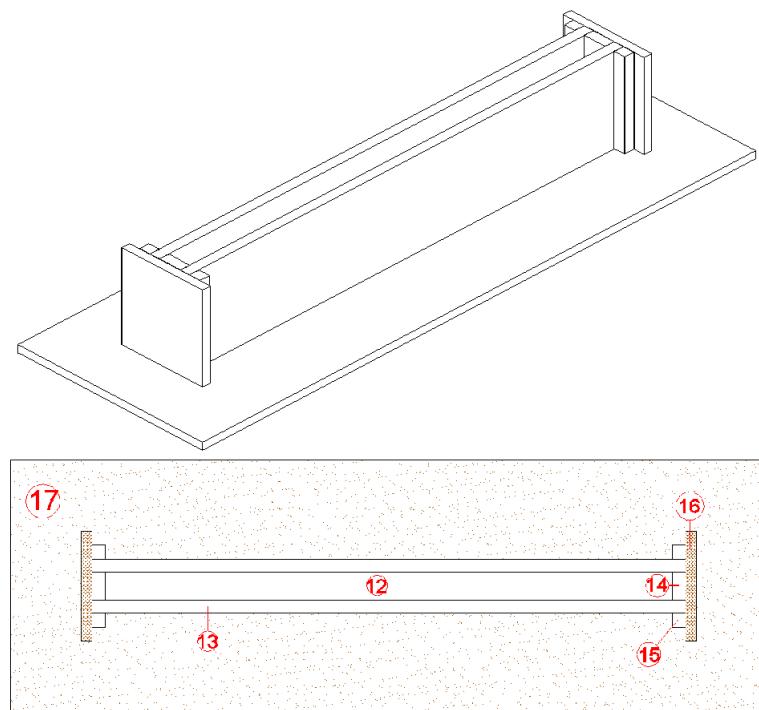


FIGURE A.1: Plan du coffre réutilisable, poutre $4 \times 16 \times 80$

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

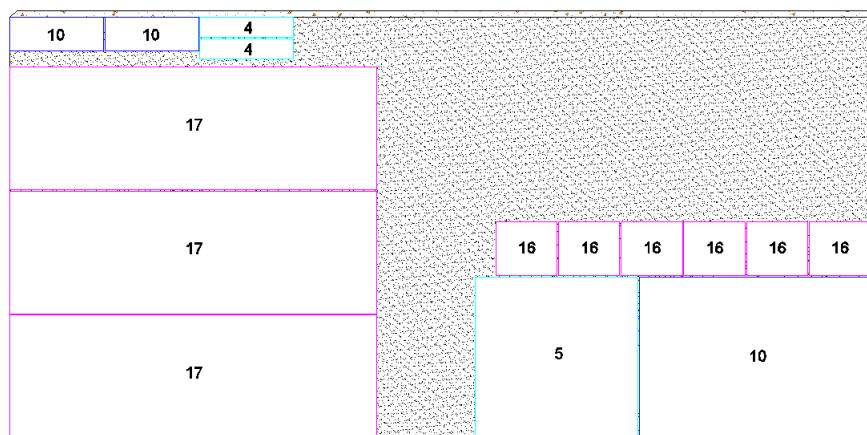


FIGURE A.2: Plan pour scier la planche de bois standard

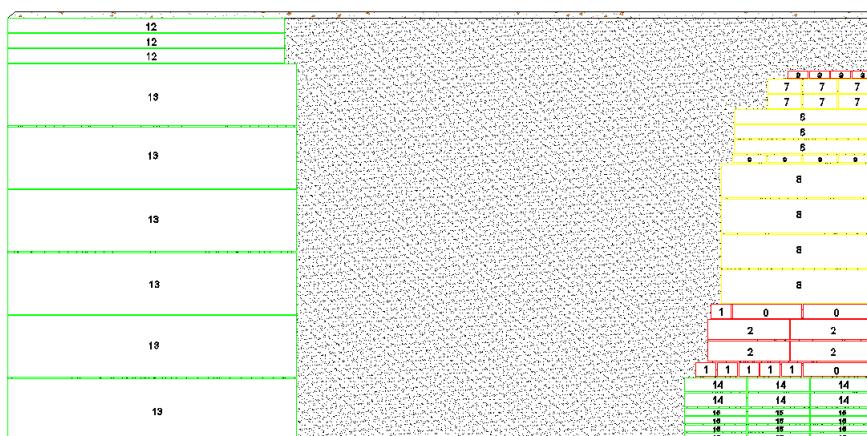


FIGURE A.3: Plan pour scier la planche de bois de coffrage

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

Dimensions des différents plaques (en cm^2) :

- . (0) \times 3 : BC 20×4
- . (1) \times 6 : BC 5.8×4
- . (2) \times 4 : BC 23.6×5.8
- . (3) \times 4 : BC 5.8×2
- . (4) \times 2 : BS 27.2×5.8
- . (5) \times 1 : BS 47.2×46.6
- . (6) \times 3 : BC 40×4
- . (7) \times 6 : BC 9.8×4
- . (8) \times 4 : BC 43.6×9.8
- . (9) \times 4 : BC 9.8×2
- . (10) \times 2 : BS 27.2×9.8
- . (11) \times 1 : BS 67.2×46.6
- . (12) \times 3 : BC 80×4
- . (13) \times 6 : BC 83.6×17.8
- . (14) \times 6 : BC 17.8×4
- . (15) \times 12 : BC 17.8×2
- . (16) \times 6 : BS 17.8×15.6
- . (17) \times 3 : BS 106.6×35.6

2 Les machines



FIGURE A.4: La scie, DGC



FIGURE A.5: Machine d'essai de compression, DGC



FIGURE A.6: La réctifieuse

FISSURATION D'ELEMENTS EN BETON ET EFFETS D'ECHELLE

3 Les capteurs

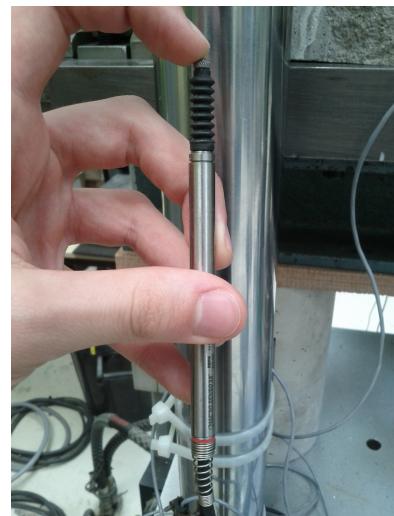


FIGURE A.7: LVDT, capteur déplacement

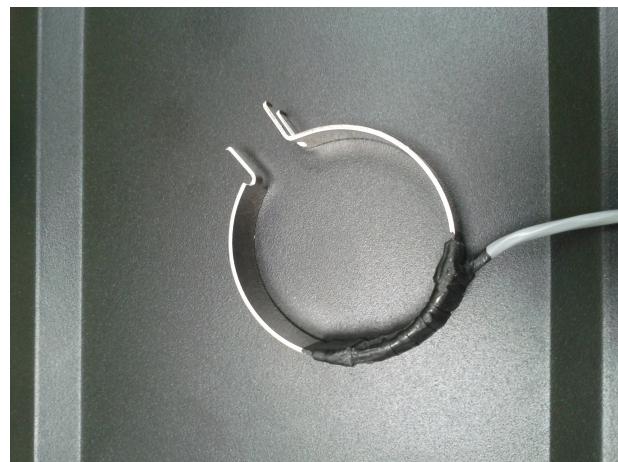


FIGURE A.8: Capteur du CMOD

4 Code CASTEM de la poutre avec une erreur de conception

```
opti dime 3 elem cub8 mode trid;
opti trac open;
*
*----- Definition de la geometrie -----
*

*---- coefficient
coe = 1;
**coe = 2;
**coe = 4;

*---- Hauteur de l'éprouvette
Dt = 0.04*coe;

*---- Longueur de l'éprouvette
Lt = 0.2*coe;

*---- Epaisseur de l'éprouvette
Bt = 0.04;

*---- Distance entre les appuis
La = 0.16*coe;

*---- Hauteur de l'entaille
De = 0.2*Dt;

*---- Largeur de l'entaille
Le = 0.002;

*---- Longueur de la zone fine
Lf = Lt/40;

*---- Erreur de conception en mètres
Er = 0.002;

*
*-----geometrie-----
*
dens (1./25.) ;

P1 = 0 0 0;
```

```

P2 = 0 ((0.425*lt)) 0;
P3 = 0 ((0.5*lt)-(0.5*le)) 0;
P4 = (0-((de/dt)*er)) ((0.5*lt)-(0.5*le)) (de);
P5 = (0-((de/dt)*er)) ((0.5*lt)+(0.5*le)) (de);
P6 = 0 ((0.5*lt)+(0.5*le)) 0;
P7 = 0 ((0.575*lt)) 0;
P8 = 0 (lt) 0;
P9 = 0 0 (dt);
P10 = ((0-0.9775*er)) (0.425*lt) (dt);
P11 = ((0-0.99999375*er)) ((0.5*lt)-(0.5*le)) (dt);
P12 = ((0-0.99999375*er)) ((0.5*lt)+(0.5*le)) (dt);
P13 = ((0-0.9775*er)) (0.575*lt) (dt);
P14 = 0 (lt) (dt);

PT1 = ((0-0.85*er)) (0.2125*lt) (dt);
PT2 = ((0-0.9997394068*er)) (0.462065678*lt) (dt);
PTM = ((0-1.00011875*er)) (lt/2) (dt);
PT3 = ((0-0.9997394068*er)) (0.537934322*lt) (dt);
PT4 = ((0-0.85*er)) (0.7875*lt) (dt);

n1 = enti (4*coe);
n2 = enti (5*coe);
n3 = enti (3*coe);
n4 = enti (1*coe);

L1 = d n1 p1 p2;
L2 = d n2 p2 p3;
L3 = d n4 p3 p4;
L4 = d 2 p4 p5;
L5 = d n4 p5 p6;
L6 = d n2 p6 p7;
L7 = d n1 p7 p8;

L9 = PARA n1 p9 Pt1 p10;
L10 = PARA n2 p10 Pt2 p11;
L11 = PARA 2 p11 PtM p12;
L12 = PARA n2 p12 Pt3 p13;
L13 = PARA n1 p13 Pt4 p14;

Lf1 = d n3 p1 p9;
Lf2 = d n3 p2 p10;
Lf3 = d n2 p3 p11;
Lf4 = d n2 p6 p12;

```

```

Lf5 = d n3 p7 p13;
Lf6 = d n3 p8 p14;
Lm1 = d n1 p4 p11;
Lm2 = d n1 p5 p12;

S1 = dall lf1 11 lf2 19 quelconque;
S2 = dall lf2 12 lf3 110 quelconque;
S3 = dall lm1 14 lm2 111 quelconque;
S4 = dall lf4 16 lf5 112 quelconque;
S5 = dall lf5 17 lf6 113 quelconque;

Sfront = S1 et S2 et S3 et S4 et S5;
elim Sfront 1.e-6;
*trac Sfront;

* * *

P1b = (0-bt) 0 0;
P2b = (0-bt) ((0.425*lt)) 0;
P3b = (0-bt) ((0.5*lt)-(0.5*le)) 0;
P4b = ((de/dt)*er-bt) ((0.5*lt)-(0.5*le)) (de);
P5b = ((de/dt)*er-bt) ((0.5*lt)+(0.5*le)) (de);
P6b = (0-bt) ((0.5*lt)+(0.5*le)) 0;
P7b = (0-bt) ((0.575*Lt)) 0;
P8b = (0-bt) (Lt) 0;
P9b = (0-bt) 0 (dt);
P10b = ((0.9775*er)-bt) (0.425*lt) (dt);
P11b = ((0.99999375*er)-bt) ((0.5*lt)-(0.5*le)) (dt);
P12b = ((0.99999375*er)-bt) ((0.5*lt)+(0.5*le)) (dt);
P13b = ((0.9775*er)-bt) (0.575*lt) (dt);
P14b = (0-bt) (lt) (dt);

PT1 = ((0.85*er)-bt) (0.2125*lt) (dt);
PT2 = ((0.9997394068*er)-bt) (0.462065678*lt) (dt);
PTM = ((1.00011875*er)-bt) (lt/2) (dt);
PT3 = ((0.9997394068*er)-bt) (0.537934322*lt) (dt);
PT4 = ((0.85*er)-bt) (0.7875*lt) (dt);

L1b = d n1 p1b p2b;
L2b = d n2 p2b p3b;
L3b = d n4 p3b p4b;
L4b = d 2 p4b p5b;
L5b = d n4 p5b p6b;

```

```

L6b = d n2 p6b p7b;
L7b = d n1 p7b p8b;

L9b = PARA n1 p9b Pt1 p10b;
L10b = PARA n2 p10b Pt2 p11b;
L11b = PARA 2 p11b Ptm p12b;
L12b = PARA n2 p12b Pt3 p13b;
L13b = PARA n1 p13b Pt4 p14b;

Lb1 = d n3 p1b p9b;
Lb2 = d n3 p2b p10b;
Lb3 = d n2 p3b p11b;
Lb4 = d n2 p6b p12b;
Lb5 = d n3 p7b p13b;
Lb6 = d n3 p8b p14b;
Lm1 = d n1 p4b p11b;
Lm2 = d n1 p5b p12b;

S1 = dall lb1 11b lb2 19b quelconque;
S2 = dall lb2 12b lb3 110b quelconque;
S3 = dall lm1 14b lm2 111b quelconque;
S4 = dall lb4 16b lb5 112b quelconque;
S5 = dall lb5 17b lb6 113b quelconque;

Sback = S1 et S2 et S3 et S4 et S5;
elim Sback 1.e-6;
*trac Sback;

* * *

L1c = d n4 p1 p1b;
L2c = d n4 p2 p2b;
L3c = d n2 P3 p3b;
L4c = d n2 P4 p4b;
L5c = d n2 P5 p5b;
L6c = d n2 P6 p6b;
L7c = d n4 p7 p7b;
L8c = d n4 p8 p8b;

S1d = dall L1c L1 L2c L1b quelconque;
S2d = dall L2c L2 L3c L2b quelconque;
S3d = dall L3c L3 L4c L3b quelconque;
S4d = dall L4c L4 L5c L4b quelconque;

```

```
S5d = dall L5c L5 L6c L5b quelconque;
S6d = dall L6c L6 L7c L6b quelconque;
S7d = dall L7c L7 L8c L7b quelconque;

Sbot = s1d et s2d et s3d et s4d et s5d et s6d et s7d;
```

* * *

```
L9c = d n4 p9 p9b;
L10c = d n4 p10 p10b;
L11c = d n2 P11 p11b;
L12c = d n2 P12 p12b;
L13c = d n4 p13 p13b;
L14c = d n4 p14 p14b;
```

```
S9d = dall L9c L9 L10c L9b quelconque;
S10d = dall L10c L10 L11c L10b quelconque;
S11d = dall L11c L11 L12c L11b quelconque;
S12d = dall L12c L12 L13c L12b quelconque;
S13d = dall L13c L13 L14c L13b quelconque;
```

```
Stop = s9d et s10d et s11d et s12d et s13d;
```

* * *

```
sgau = dall L1c Lf1 L9c Lb1 plane;
Sdro = dall L8c Lf6 L14c Lb6 plane;
```

```
stot = sfront et sback et sbot et stop et sgau et sdro;
elim stot 1.e-6;
```

* * *

```
voll = stot volu;
elim voll 1.e-6;
```

```
*trac voll;
```

```
*
*                               MODELE ET MATERIAU
*
* Necessite d'utiliser le modele RICBET avec regularisation en GF
```

```
* _____  
*  
  
modtot=MODE vol1 mecanique elastique isotrope endommagement RICBET;  
  
*Modele elastique  
*modtot = MODE stot MECANIQUE ELASTIQUE ISOTROPE;  
  
*  
*----- Paramètres matériaux -----  
*  
  
* Module d'Young  
* * * youngn = 38E+9;  
  
* Coefficient de Poisson  
* * * nun = 0.24;  
  
* Résistance en traction  
* * * ftn = 5e6;  
  
* Fragilité en traction  
* * * aldin = 7.9e-3;  
  
* Fragilité en compression  
* * * alinn = 3.5e-4;  
  
* Module d'écrouissage 1  
* * * gamln = 1.5E7;  
  
* Module d'écrouissage 2  
* * * a1n = 7.0e-7;  
  
* Longueur de corrélation lc1  
lc1 = 0.004;  
  
* * * mattot = MATE modtot YOUN youngn NU nun FT ftn  
* * * ALIN alinn GAM1 gamln A1 a1n ALDI aldin;  
  
* Materiau elastique  
*mattot = MATE modtot YOUN youngn NU nun;
```

```
* PROCEDURE CALCUL TAILLE MINIMALE *
* -----
* Entrees
* -----
DIMENS1 = VALE 'DIME';

* Creation du champs
* -----
CHAMLO = MANU 'CHML' modtot 'LONG' 1.0 'STRESSES';

* Calcul de la longueur par element
* -----
CHAML1 = INTG 'ELEM' modtot CHAMLO 'LONG';
CHAML2 = CHAML1** (1./DIMENS1);
CHAML3 = CHAN 'STRESSES' modtot CHAML2;

* Parametres materiau
* -----
* Young's Modulus
YG = 38E+9;

* Poisson ratio
nuu = 0.24;

* Tension strength limit
ftn = 5e6;

* Energie de fissuration Gf
GF = 100;

* Closure stress
srefn = -3e6;

* Compression strength (initial)
fcn = 6e6;

* Asymptotic stress in compression
sigun = -4e6;

* Yield surface 1
```

```
afn = 0.7;

* Yield surface 2
bfn = 0.3;

* Plastic potential 1
agn = 0.6;

* Plastic potential 2
bgn = 0.45;

* Yield hardening 1
acn = 3.2e10;

* Yield hardening 1
bcn = 700.0;

* Kinematic hardening modulus 1
gam1n=1.5E7;

* Kinematic hardening modulus 2
aln=7.0E-7;

* Brittleness in tension
aldin = CHAML3*ftn/GF ;

mattot=MATR modtot 'YOUN' YG      'NU' nuu 'RHO'  2.3E+03 'FT'    ftn
                  'GAM1' gam1n 'A1' aln 'ALDI' aldin   'SREF'  srefn
                  'AF'   afn   'BF' bfn 'AG'   agn   'BG'   bgn
                  'AC'   acn   'BC' bcn 'SIGU' sigun 'FC'   fcn;

*
*----- Définition des conditions aux limites -----
*----- et des déplacements imposés -----
*

*Pclg1 = vol1 POIN PROC (0. ((Lt-La)/2) 0.);
*Pclg2 = vol1 POIN PROC (Bt ((Lt-La)/2) 0.);
Ptest1 = 0. ((Lt-La)/2) 0.;
Ptest2 = (0-Bt) ((Lt-La)/2) 0.;
Pclg1 = vol1 POIN PROC Ptest1;
```

```

Pclg2 = voll POIN PROC Ptest2;
Pclg = (voll POIN 'DROIT' Pclg1 Pclg2) COUL ROUG;

clgy=BLOQ pclg UY;
clgz=BLOQ pclg UZ;
clgpx=BLOQ pclg1 UX;

Ptest1 = 0. ((Lt+La)/2) 0.;
Ptest2 = (0-Bt) ((Lt+La)/2) 0.;
Pcld1=voll POIN PROC Ptest1;
Pcld2=voll POIN PROC Ptest2;
Pcld= (voll POIN 'DROIT' Pcld1 Pcld2) COUL ROUG;
cldz=BLOQ pcld UZ;
cldpx=BLOQ pcld1 UX;

Ptest3 = (0-er) (Lt/2) Dt;
Ptest4 = (er-Bt) (Lt/2) Dt;
pclfl1=voll POIN PROC Ptest3;
pclf2=voll POIN PROC Ptest4;
pclf=(voll POIN 'DROIT' Pclf1 Pclf2) COUL ROUG;
clfcz=BLOQ pclf UZ;

cltot = clgy et clgz et cldz et clfcz et clgpx et cldpx;
f1 = DEPI clfcz -1;

.*.*TRAC (voll et PCLG et PCLD et PCLF);

** Calcul elastique
cltot1 = clgy et clgz et cldz et clgpx et cldpx;
rigil = RIGI modtot mattot;
rigtot = rigil et cltot1;
forcl = FORC (0. 0. (-1.e-3)) pclf;
DEP1 = RESO rigtot forcl;

def1 = DEFO DEP1 voll;
.*.*trac def1;

*
*----- Définition du cas de charge -----
*

tempsl=PROG 0. pas 5.e-7 16.0e-5;
evoll=evol manu (prog 0. 1.) (prog 0. 1.);
```

```
char1=chargement f1 evoll dimp;  
  
*  
*----- Calcul par l'operateur PASAPAS -----  
*  
  
tab1=table;  
tab1.blocages_mecaniques=cltot;  
tab1.caracteristiques=mattot;  
tab1.modele=modtot;  
tab1.changement=char1;  
tab1.mova='D';  
tab1.temps_calculs=temps1 ;  
*conn1 = connec modtot lc1 'NORMAL' 'INTERIEUR' ;  
*tab1.conn = conn1;  
tab1.'LCAR' = lc1 ;  
tab1.lviam = mots epti;  
*tab1.'NON_LOCAL' = faux ;  
  
pasapas tab1;  
  
opti sauv format 'cub8_def_ricbet.save';  
sauv format;  
  
*  
*----- Courbe force-fleche -----  
*  
evol2 = @global tab1 clfcz evol1 fz;  
uu1 = extr evol2 deplac ;  
uu2 = uu1 * 1e3;  
ff1 = extr evol2 effort ;  
ff2 = -1 * ff1 * 0.1 / 1000;  
evfu = evol manu uu2 ff2;  
*-*dess evfu;  
  
*  
*----- Courbe force-CMOD -----  
*  
ptg = 0.0 ((Lt-Le)/2) 0.0;  
geog = 'MANU' 'POI1' ptg;  
ptd = 0.0 ((Lt+Le)/2) 0.0;  
geod = 'MANU' 'POI1' ptd;
```

```
cmod = prog;
i=0 ;
ntot=dime tab1.temps;
repeter myloop ntot ;
chpti = tab1.deplacements.i;
PTEST1 = STOT POIN 'PROC' ptg;
PTEST2 = STOT POIN 'PROC' ptd;
ugi = EXTR chpti 'UY' PTEST1;
udi = EXTR chpti 'UY' PTEST2;
cmodi = udi - ugi;
cmodi = cmodi * 1e6;
cmod = cmod et (prog cmodi);
i=i+1 ;
fin myloop ;
evfcmod = evol manu cmod ff2;
*-*dess evfcmod;

@EXCEL1 evfcmod 'f(cmod).txt';
@EXCEL1 evfu 'f(u).txt';
@EXCEL1 evfcmod 'fcmoprec2.xls';
@EXCEL1 evfu 'fdepprec2.xls';

*
----- Output -----
*

DEBPROC @EXCEL2 EV1*EVOLUTION FICOUT*MOT;
PROG1=EXTR EV1 ABSC;
PROG2=EXTR EV1 ORDO;
NB=DIME PROG1;
I=0;
ii=vale impr;
OPTI IMPR 10 IMPR FICOUT;
REPETER BOU1 (NB -1);
I=I+1;
X1=EXTR PROG1 I;
Y1=EXTR PROG2 I;
MESSAGE X1 ' ' Y1 ;
FIN BOU1;
OPTI IMPR II;
FINPROC;

@EXCEL2 evfcmod 'fcmod_f3p_nl_stress_D1.dat';
```

```

@EXCEL2 evfu 'fu_f3p_nl_stress_D1.dat';

I = 0;
ntot=dime tab1.temps;
repeter boul (ntot-1);
I = I + 1;
cheltdi = exco tab1.variables_internes.(I) 'D';
chptdi = 'CHANGER' 'CHPO' modtot cheltdi;
opti sort (CHAINE 'endo_f3p_nl_stress_cub8_def_ricbet_' I '.inp');
sort avs chptdi stot;
fin boul;

***déformée

i=0;
ntot=dime tab1.temps;
repeter myloop (ntot-1);
defi = defo tab1.deplacements.(i) stot 'ROUG';
def0 = defo tab1.deplacements.(i) stot 0.;
-*trac (defi et def0);
i=i+1;
fin myloop;

***contrainte

i=0;
ntot=dime tab1.temps;
repeter myloop (ntot-1);
sigi = tab1.constraints.i;
-*trac sigi modtot;
i=i+1;
fin myloop;

***endommagement

i=0;
ntot=dime tab1.temps;
repeter myloop (ntot-1);
endoi = exco tab1.variables_internes.(i) 'D';
-*trac endoi modtot;
i=i+1;
fin myloop;

```

*fin;