



**RENFORCEMENT DE DALLES EPAISSES  
VOLET NUMERIQUE**

**Rapport préliminaire  
GCT-2009-08  
Département de génie civil**

**Présenté à  
Sylvain Goulet ing.  
Chargé de projet  
Ministère des transports du Québec**

**Par  
Josée Bastien, ing. PhD, responsable  
Patrice Goulet, professionnel de recherche, REGAL  
Mario Fafard, ing, PhD, REGAL**

**5 juin 2009**





# Table des matières

<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>I</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>II</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>II</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>1. MODÈLE NUMÉRIQUE PAR ÉLÉMENTS FINIS</b>	<b>2</b>
1.1. Généralité	2
1.2. Modèle géométrique	2
1.3. Matériaux	2
1.3.1. Béton	2
1.3.2. Acier	6
1.4. Chargement	6
1.5. Hypothèses et limitations du modèle	6
<b>2. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS</b>	<b>7</b>
2.1. Généralité	7
2.2. Dalle Type 1	7
2.2.1. Charge-flèche	7
2.2.2. Schéma de fissuration	8
2.2.3. Déformation des barres d'armature de renforcement en cisaillement	10
2.3. Dalle type 2	14
2.3.1. Charge-Flèche	14
2.3.2. Schémas de fissuration	15
2.3.3. Déformation des barres d'armature	17
2.4. Dalle type 3	21
2.4.1. Comportement Charge-Flèche	21
2.4.2. Schéma de fissuration	22
2.4.3. Déformation des barres d'armature	24

<b>3. DISCUSSION ET CONCLUSION</b>	<b>28</b>
<b>4. BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>29</b>

## Liste des figures

FIGURE 1 - DALLE 1 - COURBE CONTRAINTE-DÉFORMATION DU BÉTON	4
FIGURE 2 - DALLE 2 - COURBE CONTRAINTE-DÉFORMATION DU BÉTON	4
FIGURE 3 - DALLE3- COURBE CONTRAINTE-DÉFORMATION DU BÉTON	5
FIGURE 4 DALLES 1A ET 1B, COMPORTEMENT CHARGE-FLÈCHE	7
FIGURE 5 – DALLE 1A SCHÉMA DE FISSURATION	8
FIGURE 6 DALLE 1B SCHÉMA DE FISSURATION	9
FIGURE 7 DALLE 1B MAILLAGE PAR ÉLÉMENTS FINIS	11
FIGURE 8 – DALLE 1B- DÉFORMATION DES BARRES DE RENFORCEMENT (72,5 MM)	12
FIGURE 9 – DALLE 1B – DÉFORMATION DES BARRES DE RENFORCEMENT (172,5 MM)	12
FIGURE 10 – DALLE 1B – DÉFORMATION DES BARRES DE RENFORCEMENT (272,MM)	13
FIGURE 11 – DALLES 2A ET 2B, COMPORTEMENT CHARGE-FLÈCHE	14
FIGURE 12 – DALLE 2A SCHÉMA DE FISSURATION	15
FIGURE 13 – DALLE 2B – SCHÉMA DE FISSURATION	16
FIGURE 14 - DALLE 2 MAILLAGE PAR ÉLÉMENTS FINIS	18
FIGURE 15 - DALLE 2B-DÉFORMATION DES BARRES DE RENFORCEMENT (72,5 MM)	19
FIGURE 16 – DALLE 2B- DÉFORMATION DES BARRES DE RENFORCEMENT (172,5MM)	19
FIGURE 17 DALLE 2B – DÉFORMATION DES BARRES DE DÉFORMATION (272,5MM)	20
FIGURE 18 DALLES 3A ET 3B, COMPORTEMENT CHARGE-FLÈCHE	21
FIGURE 19 – DALLE 3A – SCHÉMA DE FISSURATION	22
FIGURE 20 – DALLE 3B -SCHÉMA DE FISSURATION	23
FIGURE 21 - DALLE 3B MAILLAGE PAR ÉLÉMENTS FINIS	25
FIGURE 22 - DALLE 3B- DÉFORMATION DES BARRES DE RENFORCEMENT (122,5MM)	26
FIGURE 23 – DALLE 3B- DÉFORMATION DES BARRES DE RENFORCEMENT (322,5MM)	26
FIGURE 24 – DALLE 3B – DÉFORMATION DES BARRES DE RENFORCEMENT (522,5MM)	27

## Liste des tableaux

TABLEAU 1 CARACTÉRISTIQUE DU MATÉRIAU BÉTON	3
TABLEAU 2 COEFFICIENTS DE FROTTEMENT POUR LES FISSURES	5

## Introduction

Au Québec, les infrastructures routières en béton se détériorent rapidement. Le ministère des transports du Québec possède un grand nombre de structures en béton, notamment des structures de type dalle épaisse (sans armature de cisaillement) construites majoritairement dans les années 50 à 70. Les charges qui sollicitent ces structures sont aujourd'hui beaucoup plus importantes que celles prévues lors de leur conception. De plus, ce type de structure présente parfois une lacune au niveau de la résistance au cisaillement, pouvant entraîner une rupture fragile de l'ouvrage.

Le Ministère des transports du Québec (MTQ) en collaboration avec l'Université Laval, a donc mis en place un projet de recherche visant à évaluer la capacité en cisaillement de structures de type dalle épaisse (sans armature de cisaillement) de même qu'évaluer l'efficacité d'un type de renforcement en cisaillement de ces mêmes dalles. Le projet de recherche consiste donc, dans un premier temps, à soumettre des éléments de dalles de grandes dimensions, renforcées et non renforcées, à des sollicitations en cisaillement. Dans un deuxième temps, un modèle numérique, représentant le plus fidèlement possible les résultats expérimentaux, est développé. Ces essais expérimentaux et modèle numérique ont pour but de déterminer l'efficacité du renforcement en terme de gain en résistance à l'ultime et de comportement à la rupture.

Les paragraphes qui suivent sont dédiés à la portion numérique du programme de recherche. On y présente d'une part le modèle et outil numérique utilisés et, d'autre part, les résultats numériques associés aux différents essais sur dalles.

On rappelle ici que trois types de dalles ont été soumis à un chargement en trois points. Ces dalles de type 1, 2 et 3 diffèrent principalement de part leur géométrie (voir annexe A). Pour chacun des types de dalles, deux prototypes sans armature de cisaillement et deux prototypes avec armature de cisaillement ont été conçus et sollicités de façon à favoriser une rupture en cisaillement. La nomenclature des essais utilisée dans le document est la suivante : chiffre-Xx. Le chiffre représente le type de la dalle (1, 2 ou 3), la lettre majuscule fait référence au fait que la dalle soit non-renforcée en cisaillement (A) ou renforcée en cisaillement (B). Finalement la lettre minuscule (a ou b) sert à distinguer les deux essais similaires

# 1. Modèle numérique par éléments finis

## 1.1. Généralité

Le modèle numérique a été développé dans ANSYS 11.0 (ANSYS, 2007) de manière paramétrique en utilisant le langage de programmation propre à ANSYS, soit l'APDL. La méthode de construction du modèle est la même que celle présentée par Goulet (2008). Les fichiers d'entrée et de sortie peuvent être fournis sur CD-ROM.

Tel que détaillé dans les paragraphes qui suivent, le modèle numérique utilisé est un modèle tri dimensionnel afin de capter, dans la mesure du possible, le degré de confinement apporté par les barres de renforcement en cisaillement introduites comme renfort par opposition à un modèle bidimensionnel.

## 1.2. Modèle géométrique

Le béton a été discrétisé par des éléments brique à 8 nœuds de type SOLID65 [1] qui modélise la fissuration du béton par un modèle de fissuration diffuse. La fissuration diffuse est un modèle de fissuration couramment utilisée en éléments finis pour les composantes en béton. La fissuration diffuse (ou smeared cracking) fait en sorte de diminuer la rigidité des éléments de béton (à leurs points d'intégration) lorsque la fissuration est perçue numériquement. La fissuration diffuse ne permet donc pas de localiser discrètement une fissure au travers d'un élément de béton ni d'évaluer sa largeur. Il s'agit d'une représentation numérique entraînant une perte de rigidité distribuée dans l'élément de béton lorsque celui-ci devient fissuré. Dans ce modèle, une fissure diffuse peut se refermer si, avec la progression du chargement, les contraintes perçues à cet endroit entraînent cette fermeture de la fissure.

Les barres d'armature sont discrétisées par des éléments ligne à deux nœuds sans rigidité en flexion. Dans le modèle, les barres sont directement liées au béton. On suppose donc un lien parfait acier-béton. Le fait que l'élément de barre utilisé n'ait pas de rigidité en flexion ne permet donc pas de prendre en compte l'effet « goujon ». Il s'agit d'une représentation (modèle) typique en béton armé.

Les maillages utilisés sont représentés à la sections 3 du présent document. On constatera alors que pour les dalles sollicitées au tiers de leur portée (dalle de types 1 et 2), les maillages utilisés représentent une demi-profondeur de dalle sur toute sa portée (avec les conditions limites appropriées). Dans le cas des dalles de type 3, sollicitées à leur demie portée, le maillage représente une demie profondeur de dalle sur une mi-portée (soit un quart de la dalle) avec les conditions limites appropriées.

## 1.3. Matériaux

### 1.3.1. Béton

Les essais de caractérisation du matériau béton ont conduit à deux paramètres expérimentaux, le module d'élasticité et la résistance en compression du béton. Les courbes de comportement utilisées pour les divers types de dalle sont présentées aux figures 1, 2 et 3. Courbes sont basées sur les modules d'élasticité expérimentaux à partir

desquels certaines équations empiriques usuelles sont utilisées pour déterminer la limite de rupture du béton et la finalement la courbe contrainte –déformation du béton. Il est donc possible que la contrainte ultime en compression du béton utilisée diffère légèrement des résultats de caractérisation expérimentaux.

Les courbes contrainte-déformation sont basées sur la relation suivante :

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{E\varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \quad (\text{MPa})$$

où  $\varepsilon$  est la déformation,  $\varepsilon_0$  est la déformation à la rupture donnée par l'équation suivante :

$$\varepsilon_0 = \frac{2f_c}{E}$$

avec

$$f_c = \left(\frac{E}{9100}\right)^3 \quad (\text{MPa}), \text{ où } E \text{ est la limite d'élasticité}$$

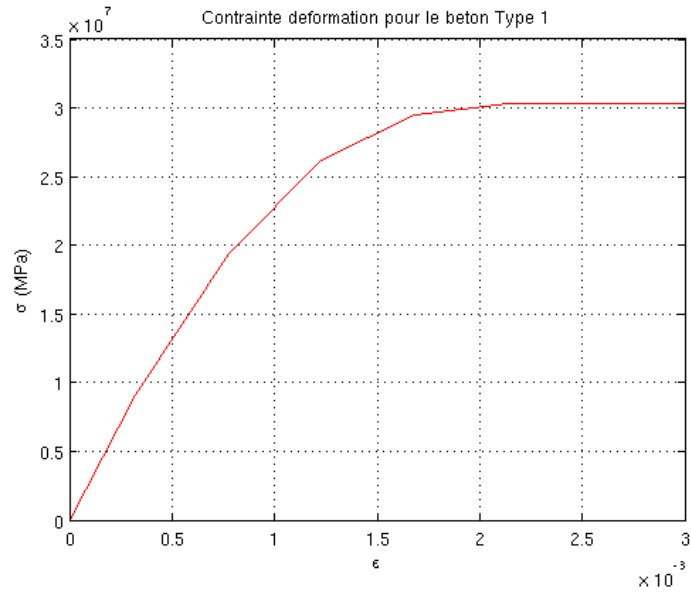
La limite de rupture en traction est évaluée à l'aide de l'équation suivante :

$$f_t = 0.36\sqrt{f_c} \quad (\text{MPa})$$

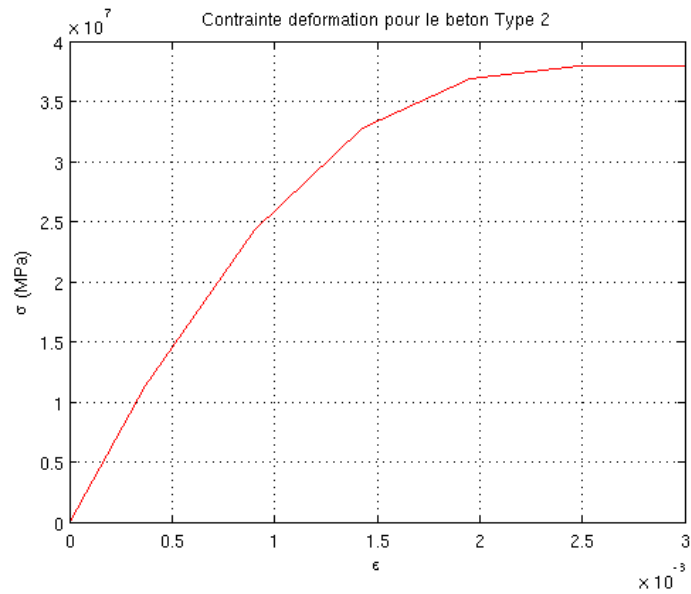
Le tableau 1 résume les paramètres caractéristiques de chacun des bétons selon le type de dalles.

**Tableau 1 Caractéristique du matériau béton**

	$E$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$\varepsilon_0$
Type 1	28 382	30.3392	1.9829	0.0021
Type 2	30 580	37.9479	2.2177	0.0025
Type 3	29 395	33.7051	2.0900	0.0023

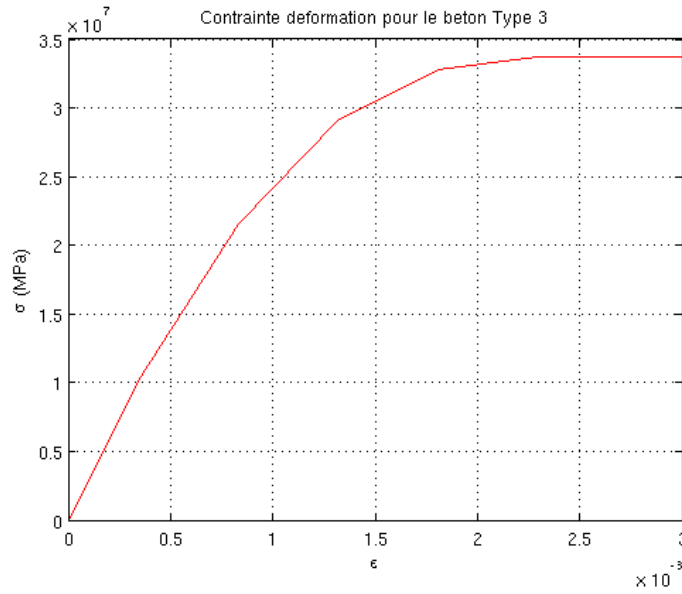


**Figure 1 - Dalle 1 - Courbe contrainte-déformation du béton**



**Figure 2 - Dalle 2 - Courbe contrainte-déformation du béton**





**Figure 3 - Dalle3- Courbe contrainte-déformation du béton**

Dans un modèle de fissuration diffuse, lorsqu'une fissuration est perçue, bien que la rigidité transversale à l'orientation de la fissure de l'élément soit réduite, un frottement tangent à la fissure existe néanmoins représentant le frottement développé entre les portions de béton de part et d'autre de la fissure. Des paramètres multiplicateurs  $\beta_1$  et  $\beta_2$  sont alors introduits pour caractériser la rigidité tangente à la fissure selon que la fissure soit considérée ouverte ou refermée. Plus le coefficient multiplicateur est faible pour le frottement développé est faible par rapport à l'état non fissuré. De façon usuelle le paramètre  $\beta_2$  est de l'ordre de 0,7. Le coefficient  $\beta_1$  gère en quelque sorte la progression de la fissuration et son éventuelle pseudo ouverture. Il s'agit d'un paramètre qui influence fortement la résolution numérique et la convergence du problème. Ici  $\beta_1$  est considéré de l'ordre de 0,2. Toutefois dans le cas de la dalle de type 3, un paramètre de l'ordre de 0,4 a été utilisé pour contrer les problèmes de non convergences du problème.

**Tableau 2 Coefficients de frottement pour les fissures**

Type de dalle	$\beta_1$	$\beta_2$
1	0.15	0.7
2	0.2	0.7
3	0.38	0.7

### **1.3.2. Acier**

L'acier d'armature et des plaques de support est un acier à 420MPa de limite élastique. Le module d'Young est de 210GPa, le coefficient de Poisson est de 0.3 et le module tangent est de 20MPa. Une loi de comportement typique élasto plastique bilinéaire a été utilisée dans le modèle par éléments finis.

### **1.4. Chargement**

Tel que montré à la section précédente, la modélisation d'un élément de béton présente des non linéarités de matériau importantes nécessitant le pilotage de la modélisation par incréments successifs du chargement (chargement monotone croissant). Étant donné le comportement non linéaire escompté, le chargement est appliqué par déplacement successif imposé aux nœuds correspondant au point d'appui du vérin au laboratoire.

Un premier incrément de chargement (ou pas de chargement ou loadstep) est effectué pour prendre en compte l'effet de la gravité sur la dalle (poids propre). La déflexion due à la gravité est ensuite ajoutée au déplacement imposé à chaque pas de chargement pour obtenir la flèche totale incluant la déflexion initiale. Dans les résultats présentés à la section 3 du présent document, la flèche due à la gravité a été retranchée des résultats numériques afin de comparer adéquatement les courbe charge-flèche aux résultats obtenus expérimentalement (ne tenant pas en considération la flèche initiale due au poids propre).

### **1.5. Hypothèses et limitations du modèle**

Le modèle de comportement du béton dans ANSYS utilise la fissuration diffuse, il s'agit d'un modèle généralement utilisé qui permet de représenter le comportement global d'un élément de béton. Dans le modèle de fissuration, seul un critère sur l'état de contrainte est considéré pour la détection d'une fissure, désactivant partiellement la contribution des éléments fissurés. Il n'y a pas de fissure discrète et, par conséquent, il ne peut y avoir sollicitation importante localisée des barres au droit d'une fissure. La fissure est distribuée sur l'élément de béton et, par conséquent, les barres d'armature environnantes sont également sollicitées plus globalement.

Tel que mentionné précédemment, les barres d'armature (de flexion et de renforcement en cisaillement) sont placées de manière discrète dans le maillage avec des liens fixes au béton par connexion aux mêmes nœuds. De par ce type de maillage il n'est pas possible de représenter une perte d'adhérence partielle acier-béton de même que le décrochage et glissement (perte d'ancrage) des barres d'armature.

Les limitations considérées ici sont des limitations usuelles employées pour représenter les éléments typiques en béton armé. Les paragraphes suivants présentent certains résultats numériques obtenus. Ces derniers donnent des informations très intéressantes sur le comportement des dalles épaisses.

## 2. Présentation des résultats

### 2.1. Généralité

Les sections 3.2 à 3.4 présentent les résultats numériques relatifs à chacun des types de dalles 1, 2 et 3. On y présente d'abord les courbes de comportement chargement-flèche sous la charge, puis les schémas de fissuration, un détail du maillage utilisé puis enfin les déformations des barres de renforcement en cisaillement.

### 2.2. Dalle Type 1

#### 2.2.1. Charge-flèche

La figure 4 compare les résultats expérimentaux aux résultats numériques. Les simulations numériques, Cas A et Cas B, représentent respectivement, les dalles non renforcées et renforcées en cisaillement. Ici la flèche est évaluée sous la poutre sous la charge.

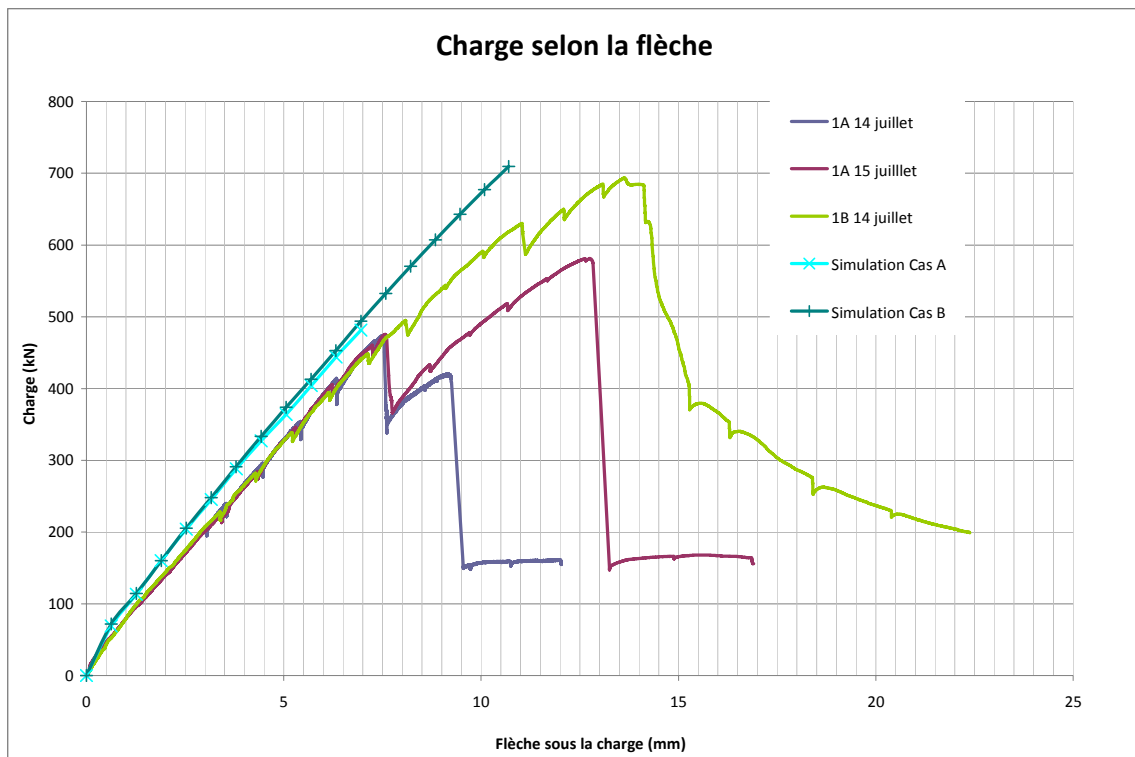
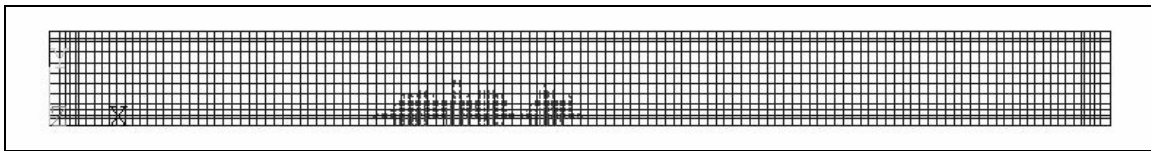


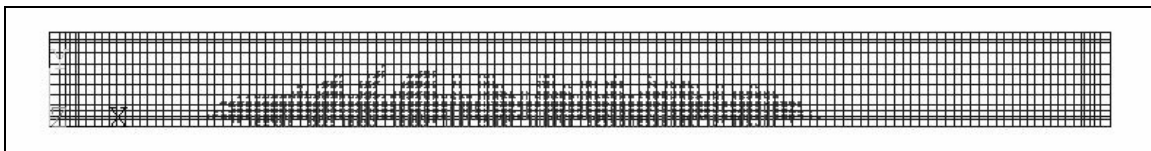
Figure 4 Dalles 1A et 1B, Comportement charge-flèche

### 2.2.2. Schéma de fissuration

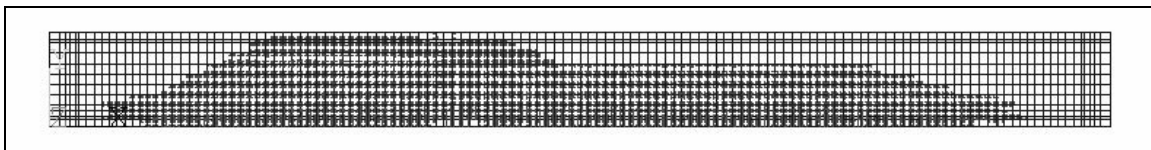
Les figures suivantes présentent les schémas de fissuration dans le plan des dalles 1A et 1B. On présente ici l'orientation du plan principal de fissuration pour chacun des points d'intégration. Les schémas de fissuration sont présentés en fonction du pas de chargement (ou loadstep). Ces pas de chargement sont représentés par chacun des points des courbes charge-flèches issues de la modélisation numérique de la section 3.2.1.



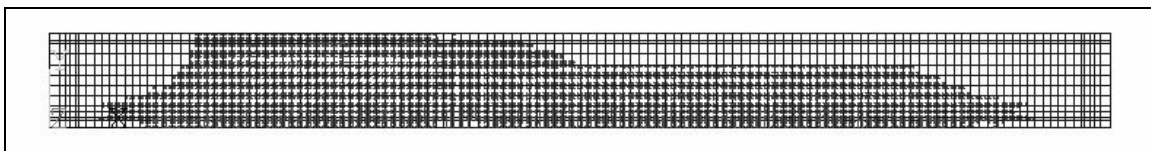
Loadstep 2



Loadstep 4

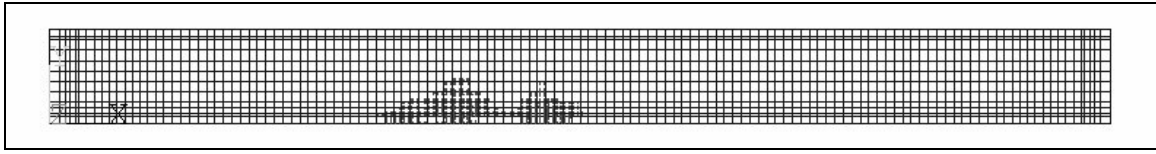


Loadstep 13

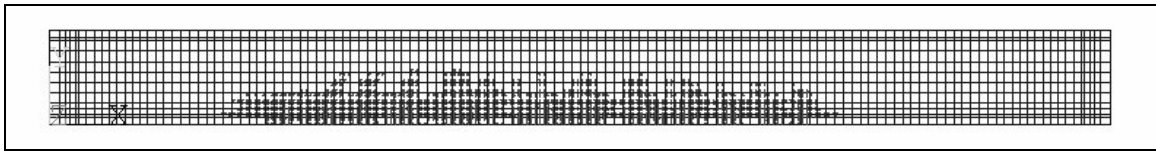


Loadstep 14

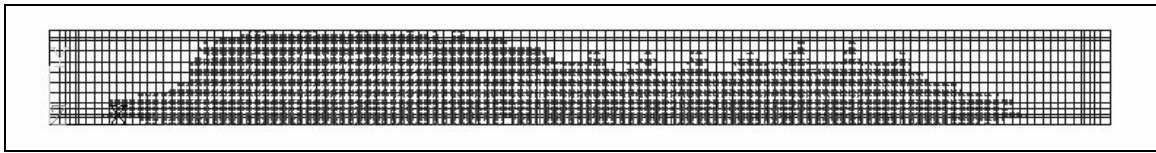
Figure 5 – Dalle 1A Schéma de fissuration



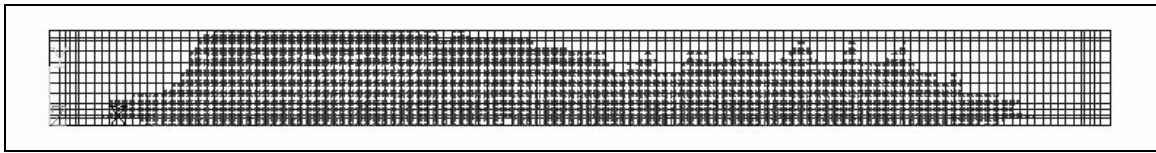
**Loadstep 2**



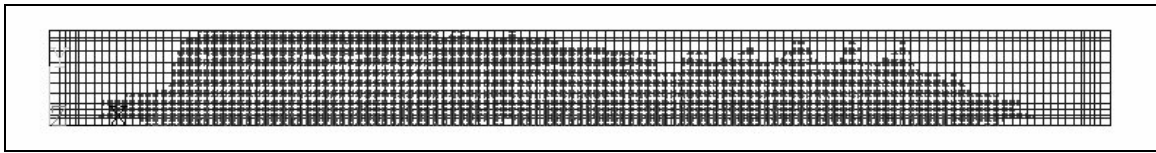
**Loadstep 4**



**Loadstep 13**



**Loadstep 14**



**Loadstep 15**

**Figure 6 Dalle 1B Schéma de fissuration**

### **2.2.3. Déformation des barres d'armature de renforcement en cisaillement**

Cette section présente les déformations des barres de renforcement en fonction de la flèche sous la charge. Dans cette section, les barres d'armature de renforcement sont numérotées de 1 à 16. Pour plus de clarté, cette numérotation des barres ainsi que la position des jauges de déformation sur ces barres sont rappelés à la figure 7. On peut y constater que les jauges de déformations sont positionnées à 72,5 , 172,5 et 272,5 mm de l'extrémité inférieure de chacune des barres de renforcement en cisaillement. Cette figure permet également de visualiser le maillage utilisé pour la modélisation par éléments finis.

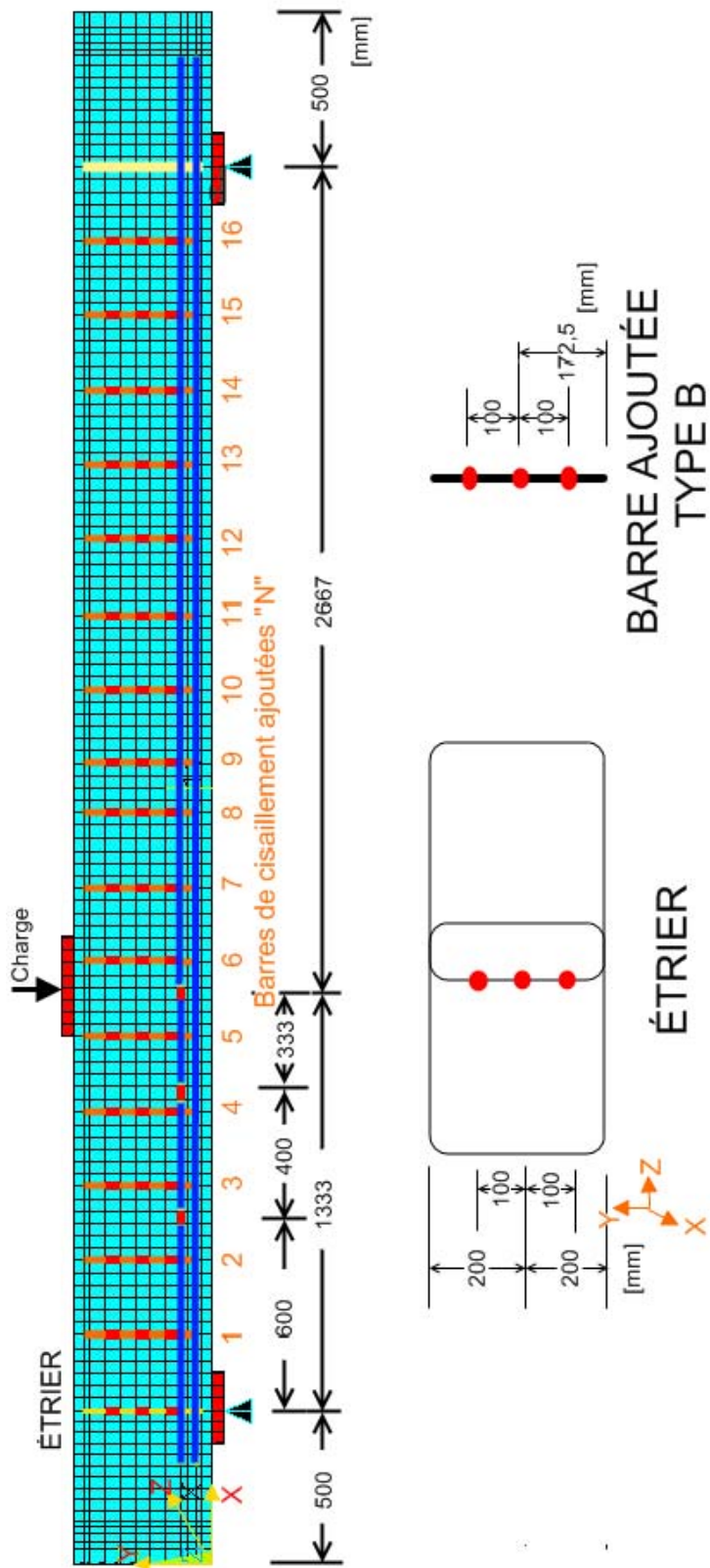


Figure 7 Dalle 1B Maillage par éléments finis

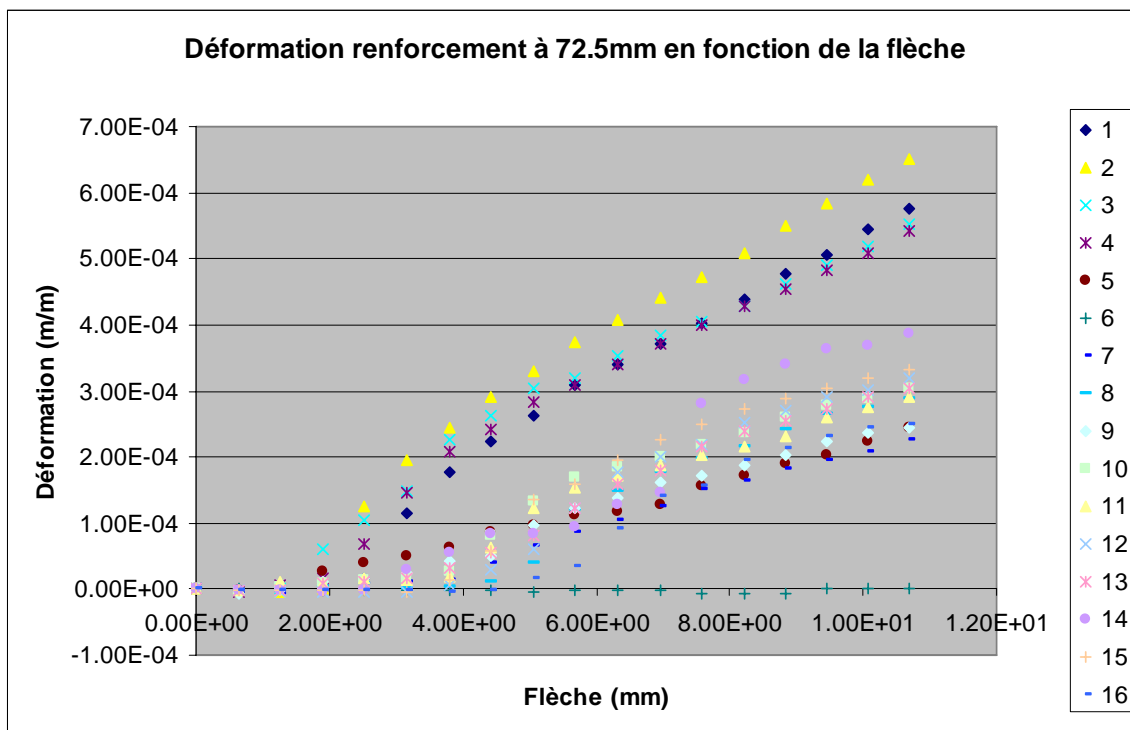


Figure 8 – Dalle 1B- Déformation des barres de renforcement (72,5 mm)

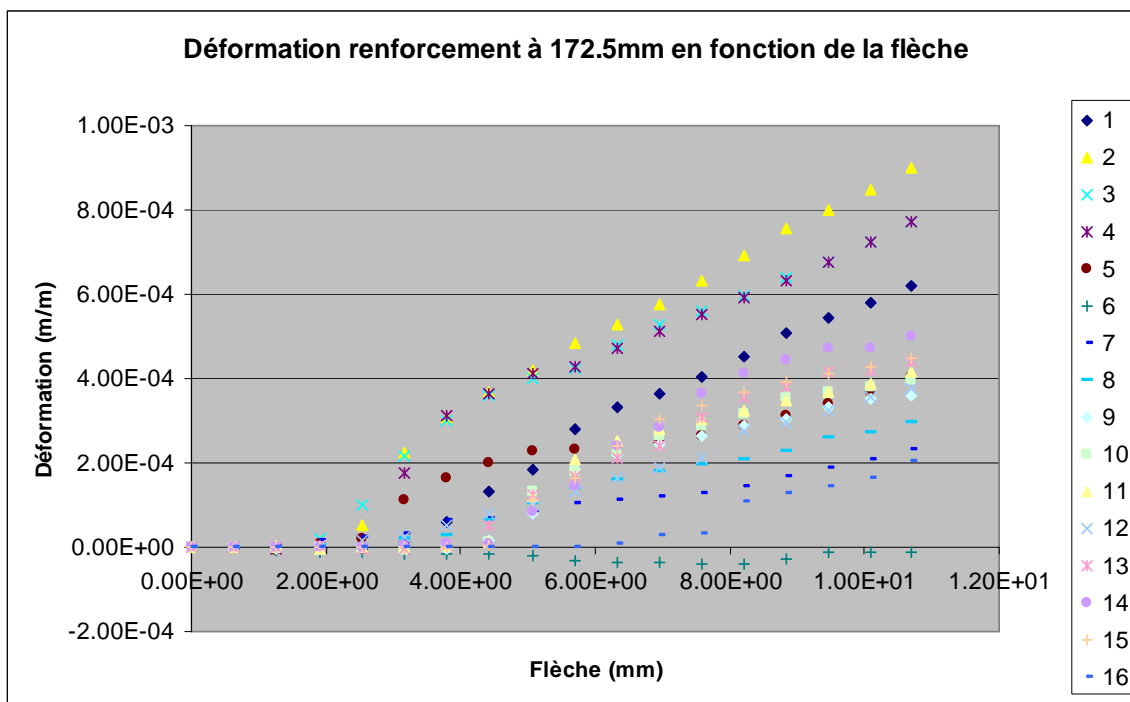
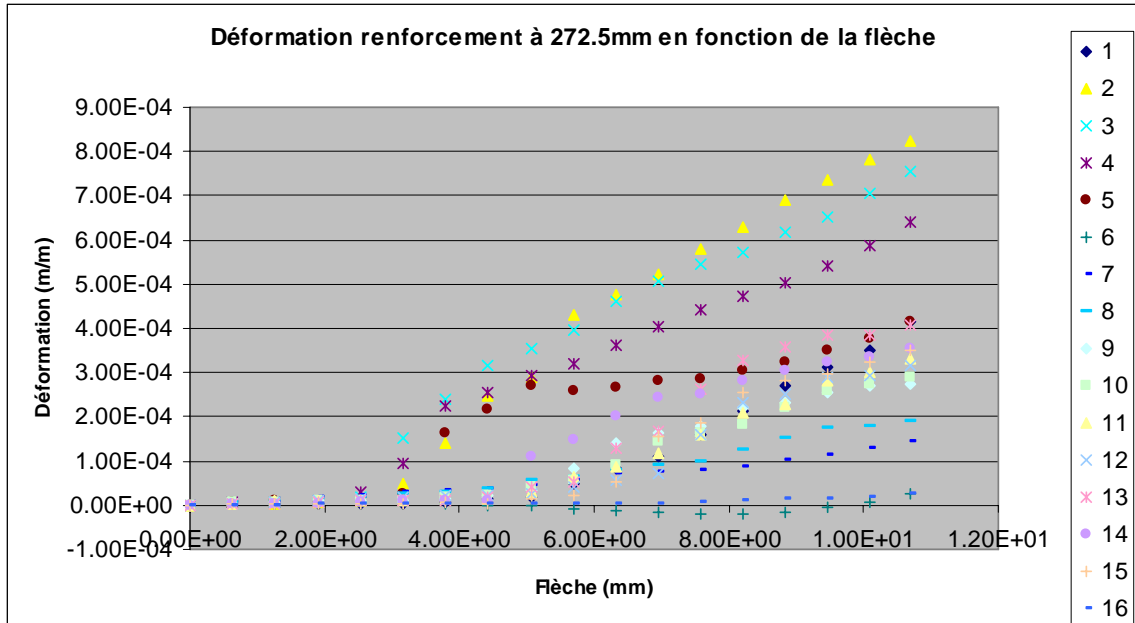


Figure 9 – Dalle 1B – Déformation des barres de renforcement (172,5 mm)





**Figure 10 – Dalle 1B – Déformation des barres de renforcement (272,mm)**

## 2.3. Dalle type 2

### 2.3.1. Charge-Flèche

La figure 11 compare les résultats expérimentaux aux résultats numériques. Les simulations numériques, Cas A et Cas B, représentent respectivement, les dalles non renforcées et renforcées en cisaillement. Ici, la flèche est évaluée sous la charge.

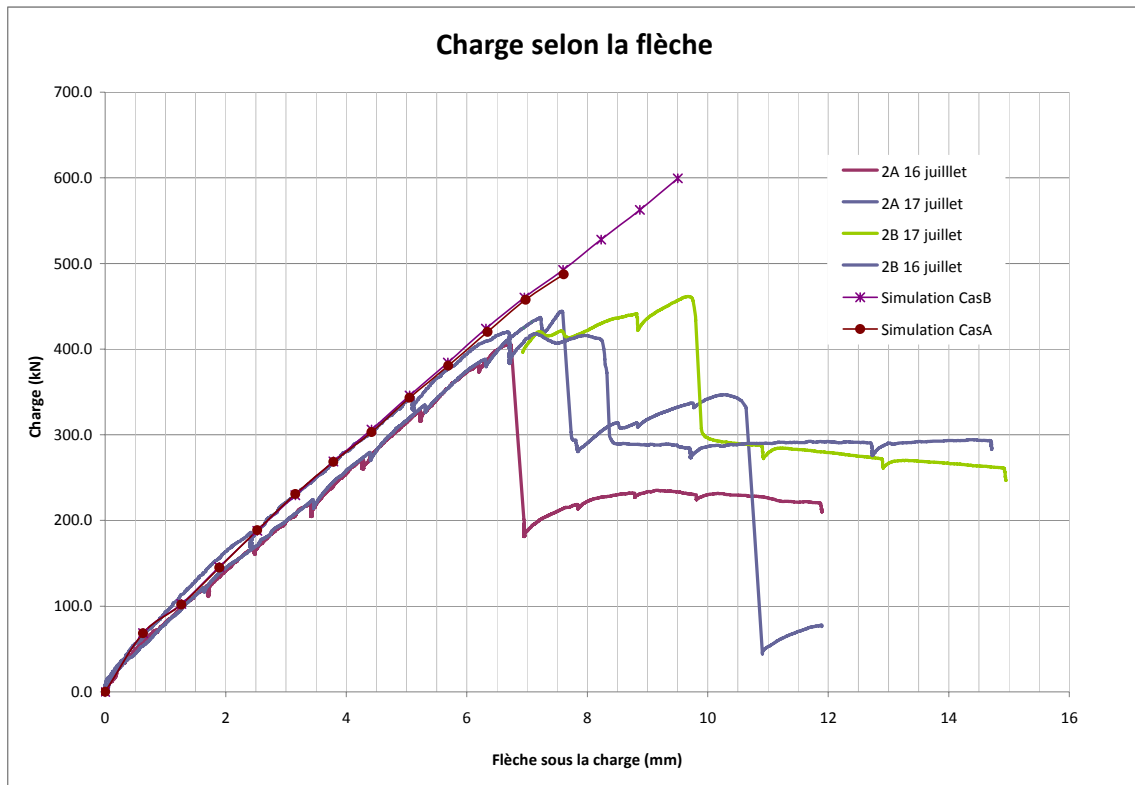
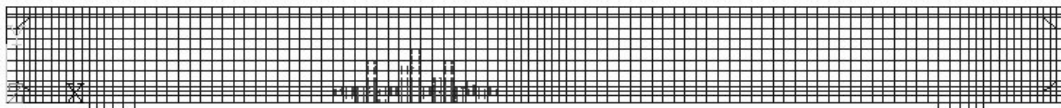


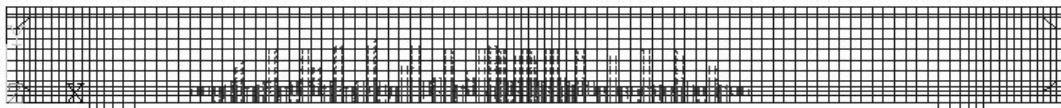
Figure 11 – Dalles 2A et 2B, Comportement charge-flèche

### 2.3.2. Schémas de fissuration

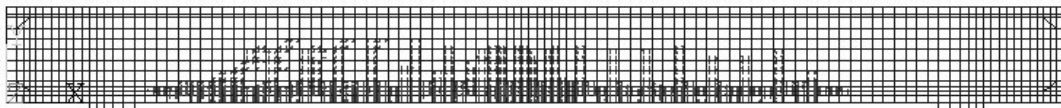
Les figures suivantes présentent les schémas de fissuration dans le plan des dalles 2A et 2B. On présente ici l'orientation du plan principal de fissuration pour chacun des points d'intégration. Les schémas de fissuration sont présentés en fonction du pas de chargement (ou loadstep). Ces pas de chargement sont représentés par chacun des points des courbes charge-flèches issues de la modélisation numérique de la section 3.3.1.



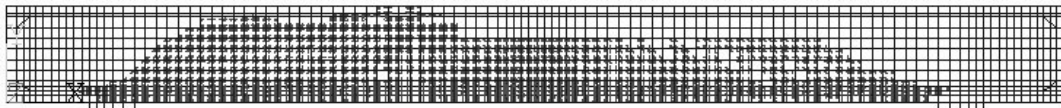
Loadstep 2



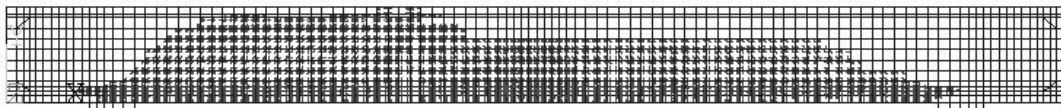
Loadstep 4



Loadstep 6

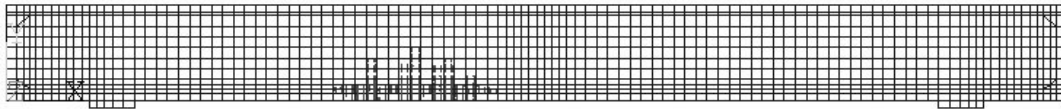


Loadstep 14

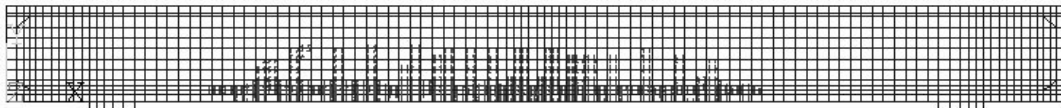


Loadstep 15

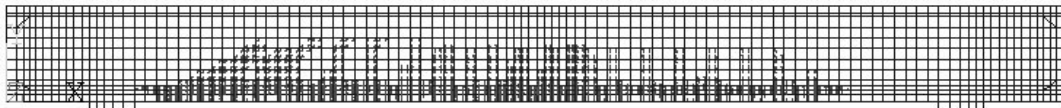
Figure 12 – Dalle 2A Schéma de fissuration



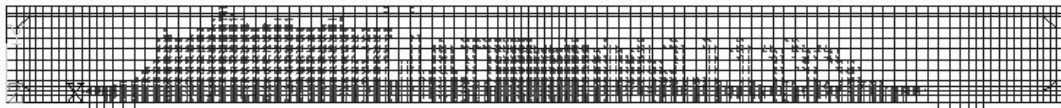
**Loadstep 2**



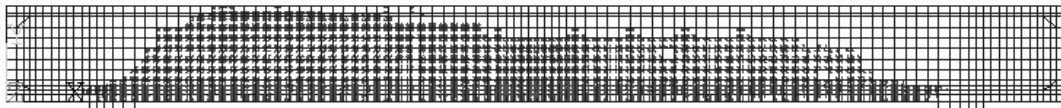
**Loadstep 4**



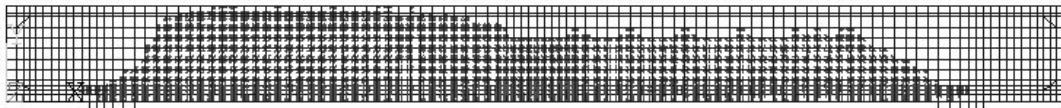
**Loadstep 5**



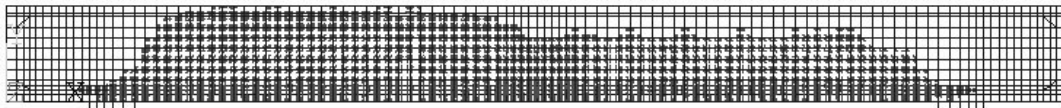
**Loadstep 12**



**Loadstep 14**



**Loadstep 15**



**Loadstep 16**

**Figure 13 – Dalle 2B – Schéma de fissuration**

### **2.3.3. Déformation des barres d'armature**

Cette section présente les déformations des barres de renforcement en fonction de la flèche sous la charge. Dans cette section, les barres d'armature de renforcement sont numérotées de 1 à 15. Pour plus de clarté, cette numérotation des barres ainsi que la position des jauges de déformation sur ces barres sont rappelés à la figure 14. On peut y constater que les jauges de déformations sont positionnées à 72,5 , 172,5 et 272,5 mm de l'extrémité inférieure de chacune des barres de renforcement en cisaillement. Cette figure permet également de visualiser le maillage utilisé pour la modélisation par éléments finis.

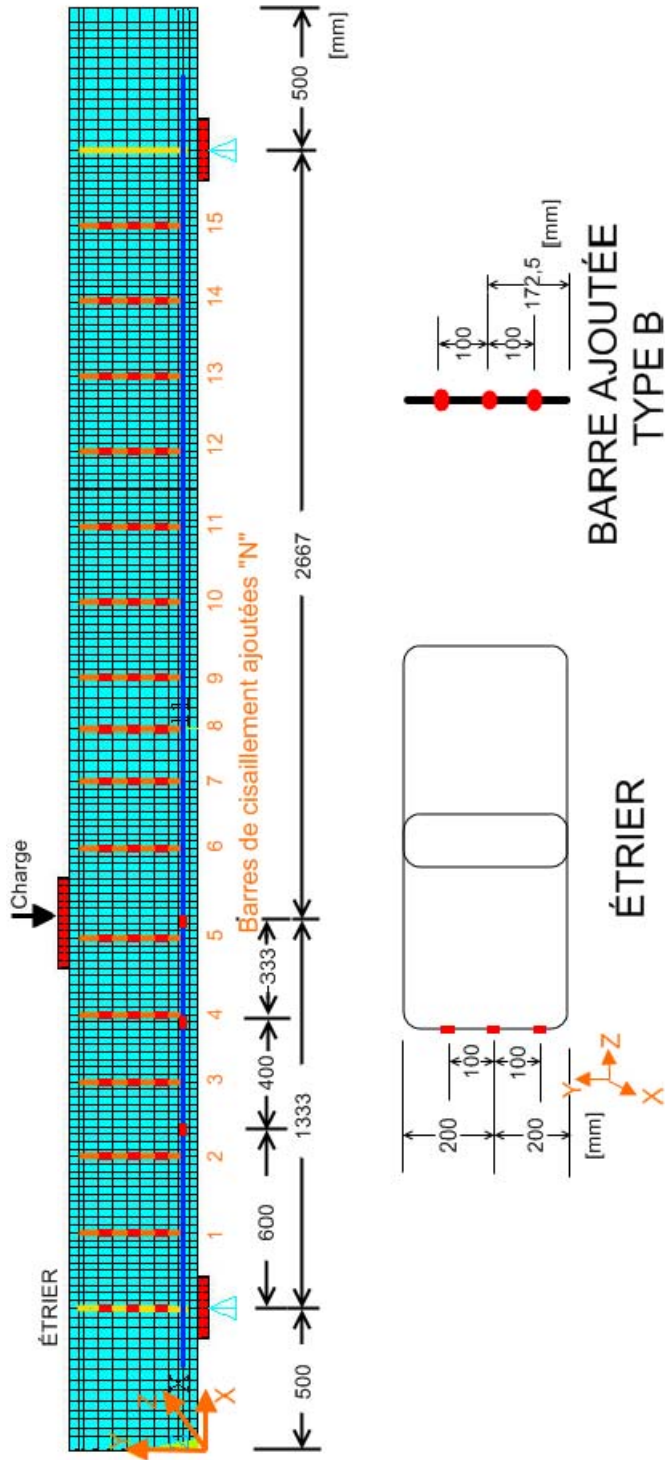


Figure 14 - Dalle 2 Maillage par éléments finis

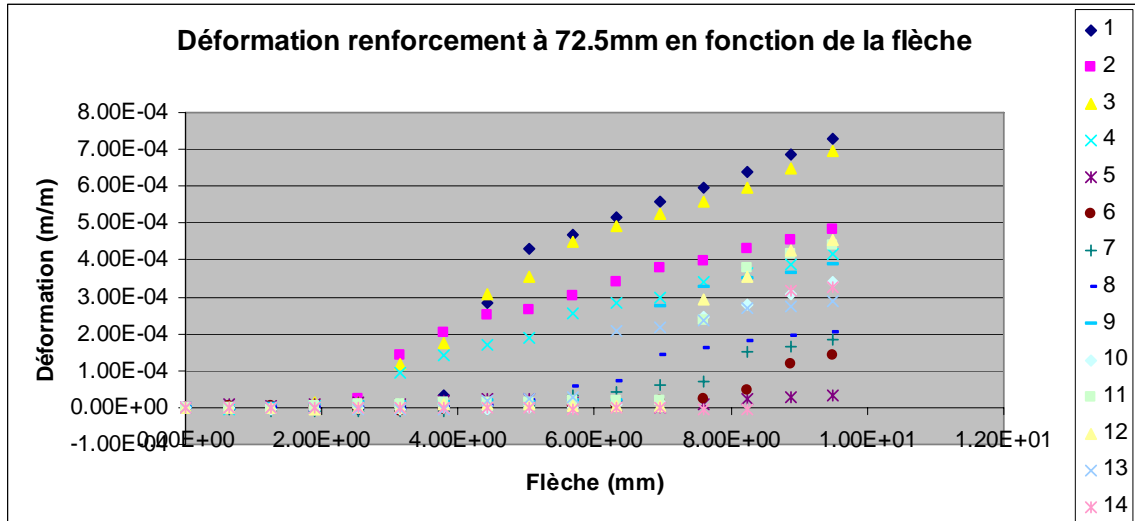


Figure 15 - Dalle 2B-Déformation des barres de renforcement (72,5 mm)

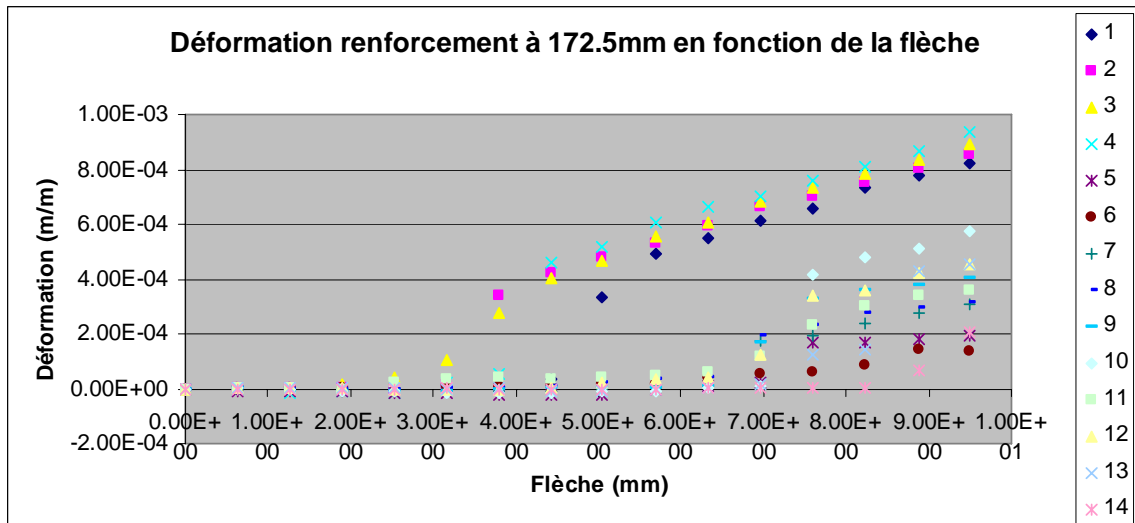


Figure 16 – Dalle 2B- Déformation des barres de renforcement (172,5mm)

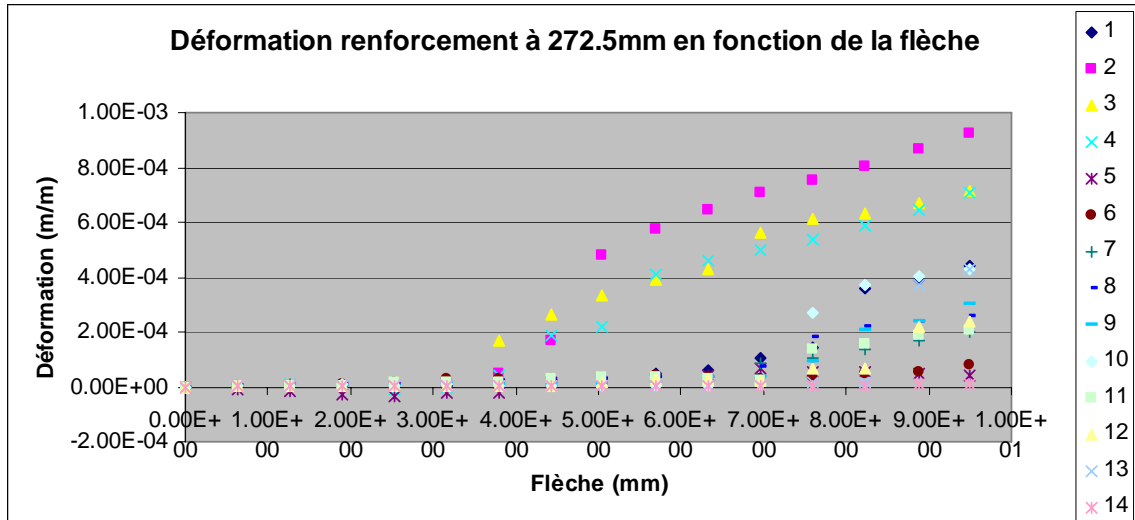


Figure 17 Dalle 2B – Déformation des barres de déformation (272,5mm)



## 2.4. Dalle type 3

### 2.4.1. Comportement Charge-Flèche

La figure 18 compare les résultats expérimentaux aux résultats numériques. Les simulations numériques, Cas A et Cas B, représentent respectivement, les dalles non renforcées et renforcées en cisaillement. Ici, la flèche est évaluée sous la charge.

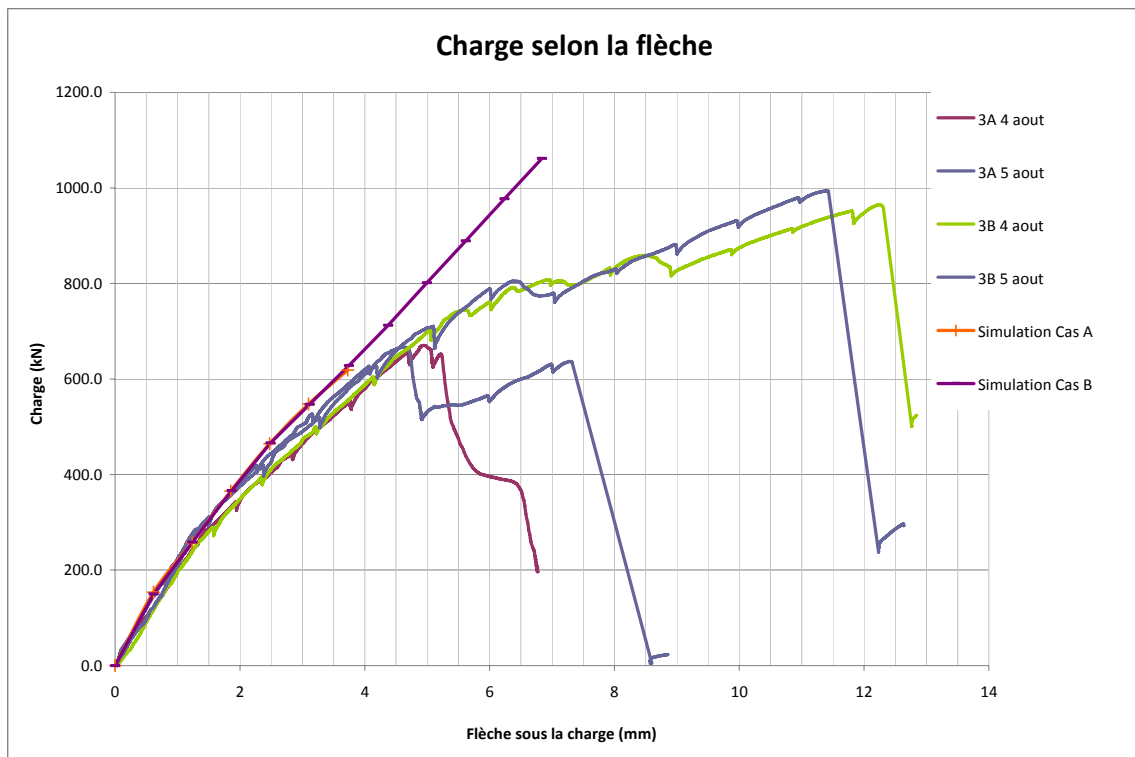
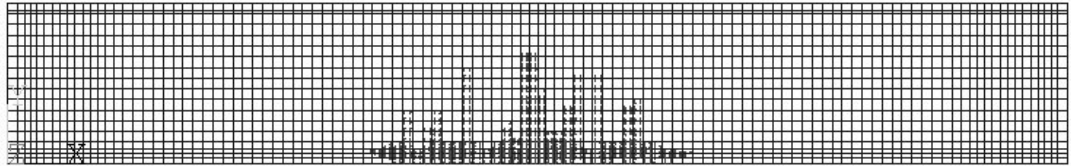


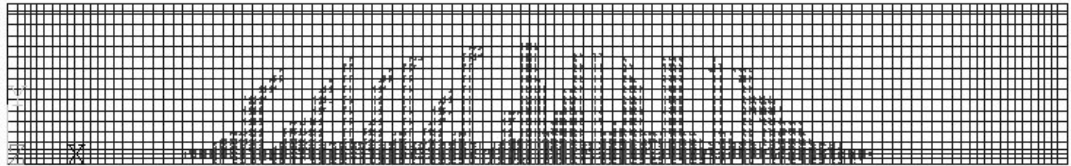
Figure 18 dalles 3A et 3B, Comportement charge-flèche

## 2.4.2. Schéma de fissuration

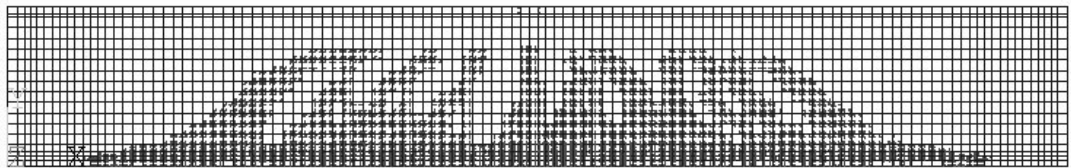
Les figures suivantes présentent les schémas de fissuration dans le plan des dalles 2A et 2B. On présente ici l'orientation du plan principal de fissuration pour chacun des points d'intégration. Les schémas de fissuration sont présentés en fonction du pas de chargement (ou loadstep). Ces pas de chargement sont représentés par chacun des points des courbes charge-flèches issues de la modélisation numérique de la section 3.4.1.



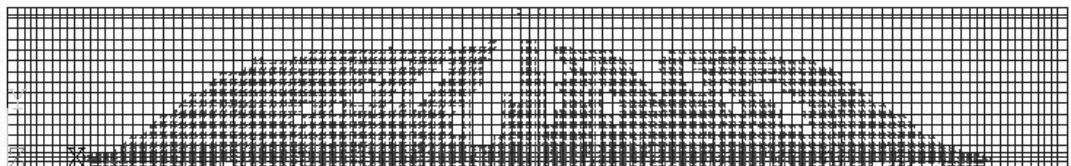
Loadstep 2



Loadstep 4

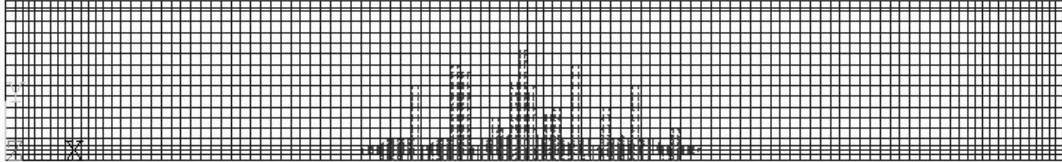


Loadstep 6

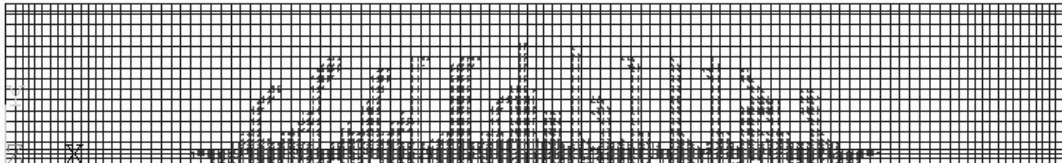


Loadstep 7

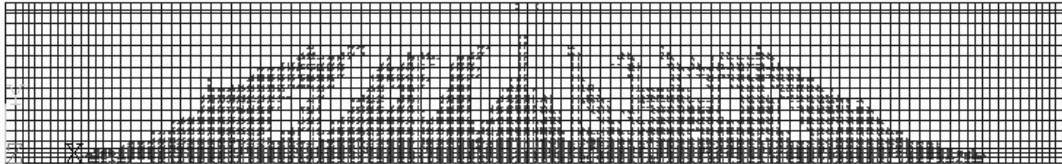
Figure 19 – Dalle 3A – Schéma de fissuration



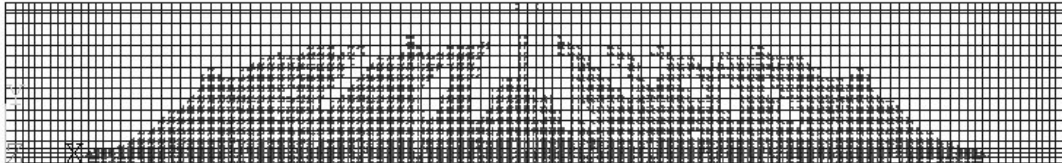
**Loadstep 2**



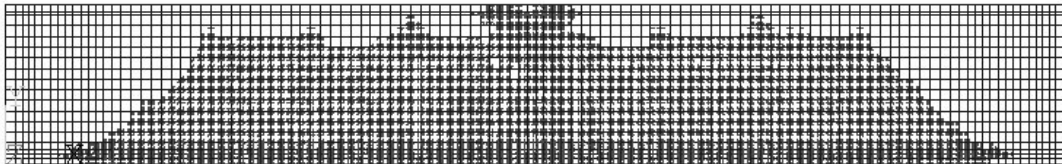
**Loadstep 4**



**Loadstep 6**



**Loadstep 7**



**Loadstep 12**

**Figure 20 – Dalle 3B -Schéma de fissuration**

### **2.4.3. Déformation des barres d'armature**

Cette section présente les déformations des barres de renforcement en fonction de la flèche sous la charge. Dans cette section, les barres d'armature de renforcement sont numérotées de 1 à 4 (demi-portée). Pour plus de clarté, cette numérotation des barres ainsi que la position des jauges de déformation sur ces barres sont rappelés à la figure 21. On peut y constater que les jauges de déformations sont positionnées à 122,5 , 322,5 et 522,5 mm de l'extrémité inférieure de chacune des barres de renforcement en cisaillement. Cette figure permet également de visualiser le maillage utilisé pour la modélisation par éléments finis.

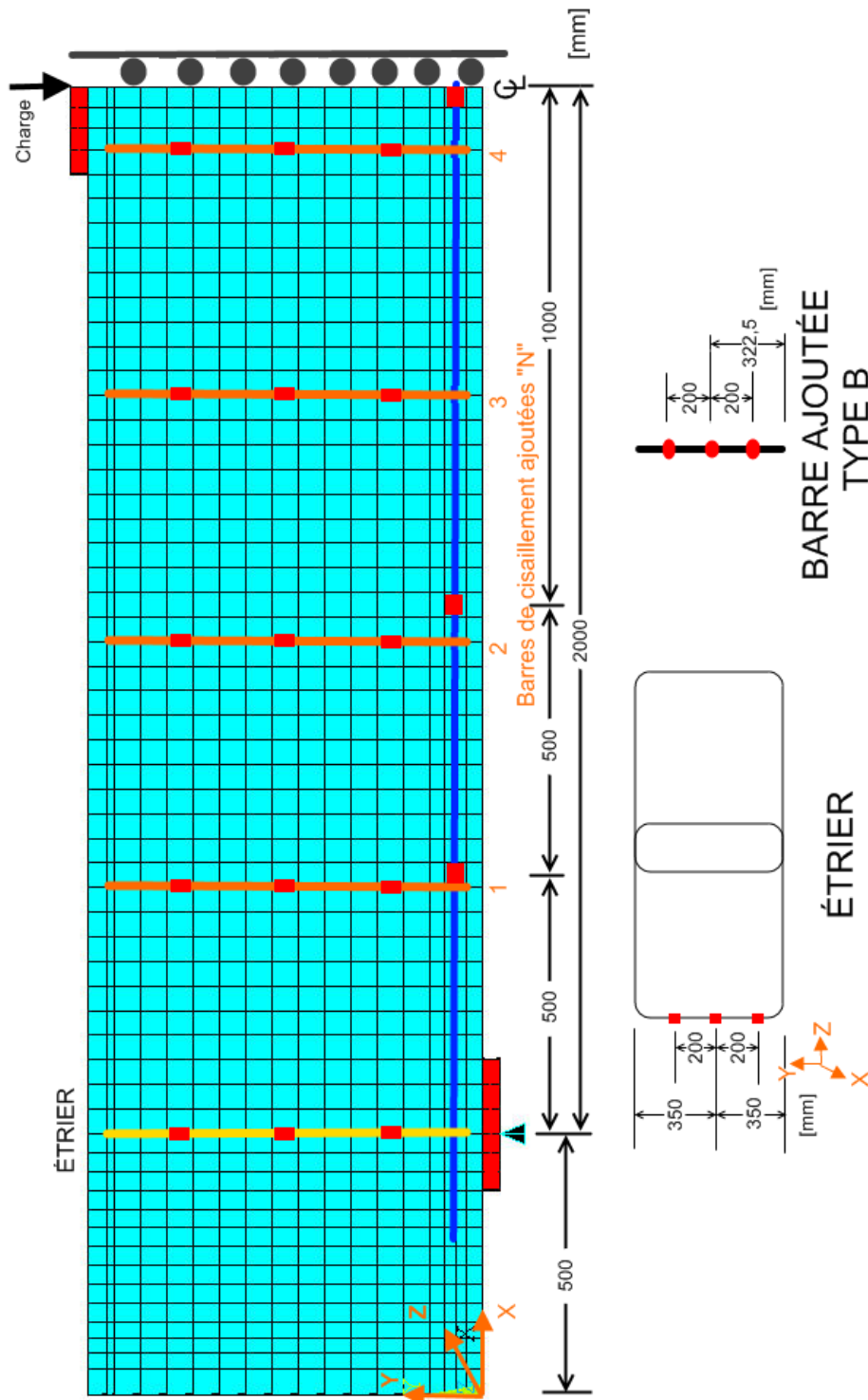


Figure 21 - Dalle 3B Maillage par éléments finis

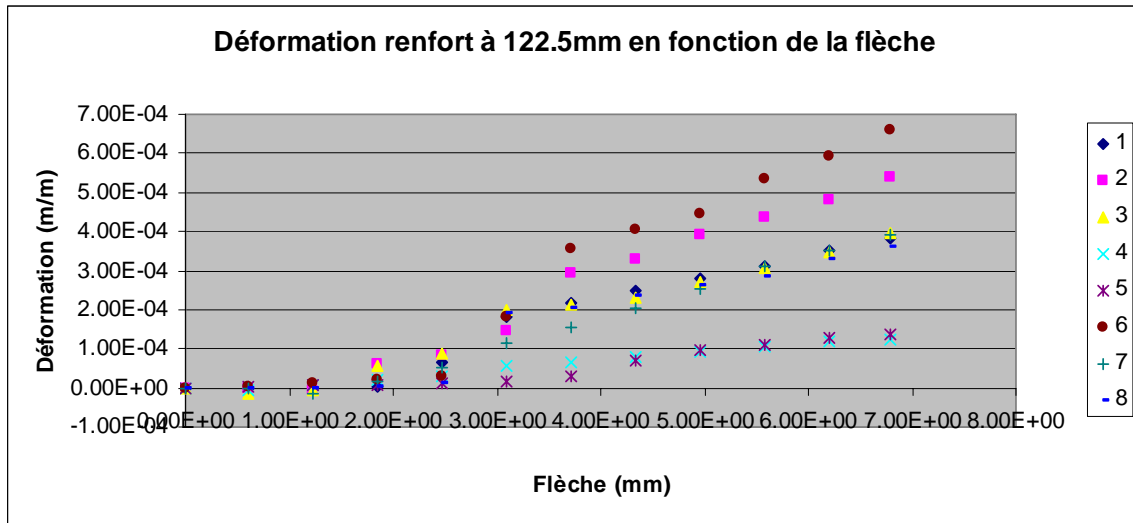


Figure 22 - Dalle 3B- Déformation des barres de renforcement (122,5mm)

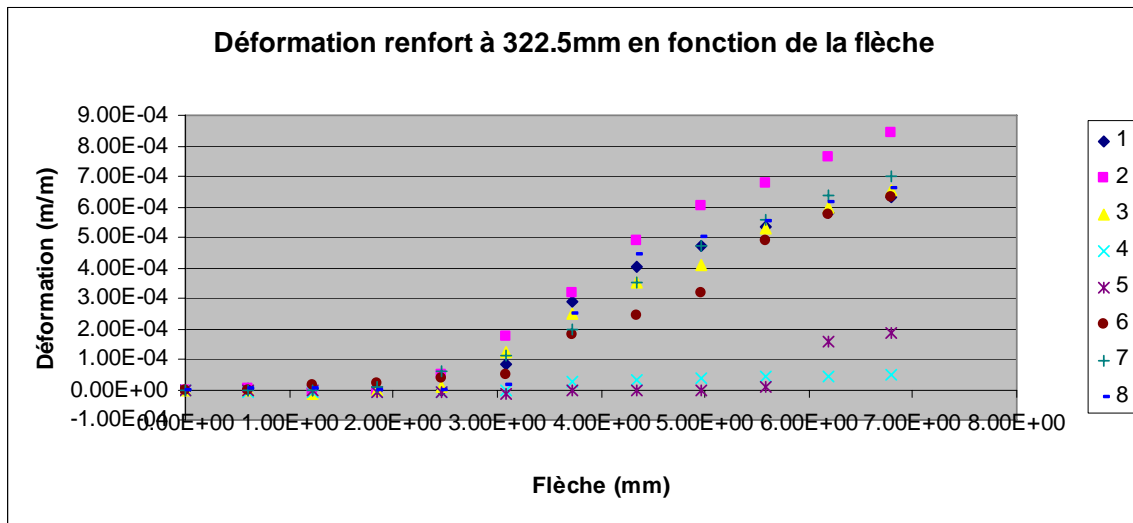
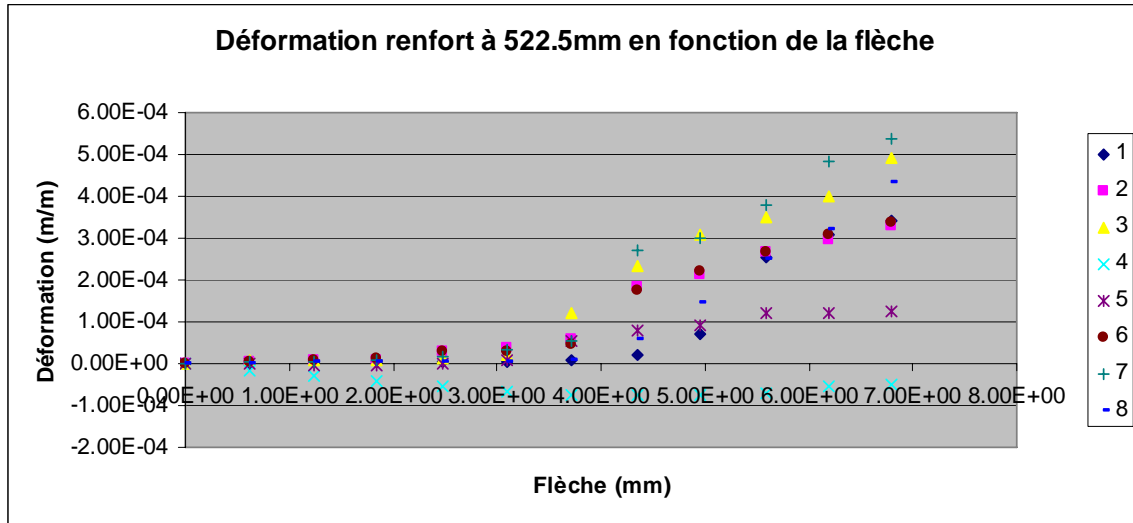


Figure 23 – Dalle 3B- Déformation des barres de renforcement (322,5mm)



**Figure 24 – Dalle 3B – Déformation des barres de renforcement (522,5mm)**

### 3. Discussion et Conclusion

En général, la simulation de dalles et poutres non armées en cisaillement est relativement complexe en raison de la rupture localisée et fragile des éléments. Il est alors difficile de saisir avec précision la progression de la fissuration et de la perte de rigidité des éléments en béton qui en résulte jusqu'à ultime. Certains auteurs ont également rapporté cette difficulté dans la littérature et il en est de même pour ANSYS et pour le logiciel Response 2000 (Parvanova et al, 2001; Bentz, 2000) autre outil couramment utilisé. En général, le chargement à ultime est relativement bien évalué par contre, la flèche associée est parfois beaucoup moins précise. Les paragraphes suivants donnent plus de précisions sur les résultats numériques présentés précédemment.

Dans un premier temps, les schémas de fissuration et les courbes charge-flèches donnent des informations générales intéressantes qui corroborent les informations recueillies en laboratoire. D'une part, l'introduction des armatures additionnelles de renforcement en cisaillement permettent de freiner la progression de la fissuration et ce faisant permettent d'atteindre des chargements ultimes plus importants. Ces chargements ultimes obtenus par les modèles sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus en laboratoire.

Dans le cas des dalles de type 2, les analyse par éléments finis suggèrent que l'introduction de barres de renforcement additionnels auraient dû conduire à une charge ultime plus importante que celle obtenue en laboratoire. Par conséquent, ces analyses tendent à confirmer l'hypothèse qu'il y a eu décrochage des barres d'armature pour cet essai tel que décrit dans le rapport portant sur les résultats expérimentaux (Bastien et al, 2009).

De façon générale, les modèles éléments finis approximent assez bien les rigidités initiales des courbes charge-flèches mais on constate un décrochage des courbes lorsque celles-ci s'incurvent et présentent une forte progression non linéaire (Cas 1B et 3B)

A titre indicatif, l'Annexe B donne de façon approximative la largeur de la principale fissure de cisaillement en fonction du chargement lors des essais expérimentaux. Cette annexe indique que sous chargement maximum les fissures principales de cisaillement mesurées atteignent l'ordre de 2mm (1A et 1B), de 4mm (2A), 2 mm (2B) et enfin près de 4mm (3A et 3B). Ces mesures sont approximatives mais indiquent néanmoins que des fissures de plusieurs mm sont observées à l'atteinte du chargement maximum.

Également, ces informations corroborent celles obtenues expérimentalement sur le niveau de déformations des barres de cisaillement sollicitées. En faisant abstraction des essais 2B pour lesquels il y a eu décrochage des barres, les barres de cisaillement ont été sollicitées à des niveaux nettement supérieurs à leur limite élastique et elles se sont donc fortement déformées (Bastien et al, 2009). Ceci entraîne une forte non linéarité additionnelle du comportement observé expérimentalement entre 500 et 700kN pour le cas 1B et entre 800 et 1000kN pour le cas 3B.



Expérimentalement, la rupture survient dû à l'action locale d'une ou deux fissures de cisaillement qui sollicitent localement deux, parfois trois, barres de renforcement. La fissuration diffuse utilisée dans le modèle numérique semble avoir plus de difficulté à capter ce mode de rupture (en cisaillement) que celui dû à la flexion pour lequel le schéma usuel de fissuration est beaucoup plus réparti.

Bien que les schémas de fissuration numériques présentés indiquent bien les zones de fissurations et leur orientation. Il ne s'agit pas ici d'un comportement discret et local. On peut faire le même constat en examinant les niveaux de déformations des barres de renforcement à l'aide du modèle numérique. Puisque le modèle de fissuration est diffus, les barres de renforcement travaillent de façon plus globale (tout en atteignant des niveaux de sollicitation au-delà de leur limite élastique).

En conclusion, les modèles numériques sont a même de bien représenter la charge ultime mais semble avoir plus de difficulté à reproduire les flèches associées aux dalles renforcées en cisaillement. Toutefois le modèle est tout à fait apte à reproduire les conditions de service.

## 4. Bibliographie

1. ANSYS, (2007), Release 11.0 Documentation for ANSYS, États-Unis
2. GOULET, James (Mai 2008), Simulation numérique du comportement de portiques en béton armé, *Université LAVAL*, 47 pages.
3. L. PARVANNOVA, Sonia , S. KAZAKOV, Konstantin , G. KERELEZOVA, Irina, K. GOSPODINOV, Gospodin, P. NIELSEN, Mogens (2001), MODELLING THE NONLINEAR BEHAVIOUR OF R/C BEAMS WITH MODERATE SHEAR SPAN AND WITHOUT STIRRUPS USING ANSYS, *University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy*, 6 pages.
4. Bentz, Evan, Response 2000 – User manual, September 2001, 85pages.
5. Bastien, et al. Dalles épaisses-volet expérimental, Rapport d'étape, Département de génie civil GCT-2009-07, Juin 2009, 32 pages.