



TESIS-RC 092399

**STUDI NUMERIK PERILAKU *SHEAR WALLS* SAAT
DIKENAI BEBAN GEMPA**

GATI ANNISA HAYU
3112202002

DOSEN PEMBIMBING
Michael Brun
Fabien Delhomme
Endah Wahyuni ST., M.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



THESIS-RC 092399

NUMERICAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF SHEAR WALLS SUBJECTED TO EARTHQUAKE LOADS

GATI ANNISA HAYU
3112202002

SUPERVISORS

Michael Brun
Fabien Delhomme
Endah Wahyuni ST., M.Sc., Ph.D.

MASTER PROGRAM
STRUCTURAL ENGINEERING
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

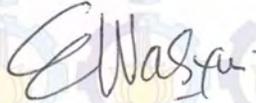
GATI ANNISA HAYU

NRP. 3112 202 002

Tanggal Ujian : 15 September 2014

Periode Wisuda : Maret 2015

Disetujui Oleh :



1. Endah Wahyuni ST., MSc., Ph.D
NIP. 19700201 199512 2 001

(Pembimbing)

Direktur Program Pascasarjana



Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto M.T.

NIP. 19640405 199002 1 001

STUDI NUMERIK PERILAKU *SHEAR WALLS* SAAT DIKENAI BEBAN GEMPA

Nama mahasiswa : Gati Annisa Hayu
NRP : 3112202002
Pembimbing : Michael Brun, Fabien Delhomme, dan Endah Wahyuni ST., M.Sc., Ph.D

ABSTRAK

Dinding geser atau yang lebih dikenal dengan *shear walls* adalah element beton bertulang yang menyediakan kekuatan besar dan kekakuan serta kapasitas deformasi yang diperlukan untuk memenuhi tuntutan gerakan tanah dari suatu gempa yang kuat. Fungsi utama *shear walls* adalah untuk menahan beban lateral seperti beban gempa dan beban angin. Berdasarkan geometrinya, *shear walls* dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu: *flexural walls*, *squat walls* atau *low-rise shear walls*, dan *coupled shear walls*.

Test pseudo-dinamik terhadap *low-rise shear walls* telah dilakukan oleh *Eléctricité de France and COGEMA* di *ELSA Laboratory of the Joint Research Centre* pada tahun 1997-1998. Mengacu pada hasil experimental yang telah ada tersebut, adapun tujuan dari penulisan thesis ini adalah untuk melakukan pemodelan numerik terhadap perilaku *shear walls* saat dikenai beban gempa dan selanjutnya dibandingkan dengan hasil eksperimental yang telah ada. Pemodelan dilakukan secara 2D menggunakan *software* CAST3M 2000.

Terdapat 2 tipe pemodelan *shear walls*, yaitu tipe T8 dan T13. Tipe T8 mempunyai ρ_h dan ρ_v sebesar 0.4%. Tipe T13 mempunyai rasio penulangan yang sama dengan T8 akan tetapi terdapat perkuatan komposit dipermukaannya. Pemodelan elemen fini untuk beton berupa QUA4, tulangan dan komposit berupa SEG2, sedangkan pemodelan titik nodal untuk ikatan beton dan tulangan berupa *perfect adhesion*.

2 jenis pembebanan yang dilakukan adalah pembebanan kuasi static dan dinamik. Pembebanan kuasi static berupa *impose* gaya geser dan *displacement* pada puncak *shear walls*. Pembebanan dinamik dilakukan dengan memvariasikan percepatan gempa, yaitu: $a(t)$, $1.4 \times a(t)$, dan $1.8 \times a(t)$ untuk T8 serta $a(t)$, $1.8 \times a(t)$, dan $2.6 \times a(t)$ untuk T13.

Kata kunci: CAST3M 2, *Dynamic Loads*, *Pushover*, *Shear Walls*, T8 dan T13.

NUMERICAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF SHEAR WALLS SUBJECTED TO EARTHQUAKE LOADS

Student's Name : Gati Annisa Hayu
Registration Number : 3112202002
Supervisor : Michael Brun, Fabien Delhomme, and Endah Wahyuni ST.,MSc.,Ph.D

ABSTRACT

Shear walls are the reinforced concrete elements that provide substantial strength and stiffness as well as the deformation capacity needed to meet the demands of strong earthquake ground motion. The main function of shear walls is to resist the lateral loads like earthquake loads and wind loads. Based on the geometry, shear walls are divided into 3 types, namely: flexural walls, squat walls or low-rise shear walls, and coupled shear walls.

Pseudo-dynamic tests of low-rise shear walls have been carried out by Électricité de France and COGEMA at ELSA Laboratory of the Joint Research Centre in 1997-1998. Referring to the existing experimental results, the purpose of writing this thesis is to perform numerical modeling of the behavior of shear walls when subjected to earthquake loads and then it will be compared with existing experimental results. 2D model is done using software CAST3M 2000.

2 types of shear walls are investigated: type T8 characterized by ρ_h and ρ_v of 0.4%. Type T13 that has the same reinforce ratio as T8 but retrofitted by composite material on the surface. Finite elements used for adopting the concrete is QUA4, meanwhile for the steel reinforcement and composite is SEG2, and assumption between these materials is a perfect adhesion.

There are 2 types of loading carried out in this numerical study, namely the pushover and the dynamic loading. On pushover is by imposing force and displacement at the peak of the shear walls. While on dynamic loading is done with 3 variations of acceleration: $a(t)$, $1,4 \times a(t)$, and $1,8 \times a(t)$ for T8 and $a(t)$, $1,8 \times a(t)$, and $2,6 \times a(t)$ for T8.

Keywords : CAST3M, *Dynamic Loads*, *Pushover*, *Shear Walls*, T8 and T13.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais dire un grand merci à Allah SWT, le créateur de la pensée, de qui j'ai eu la force, la persévérance, la motivation et la santé. Un sentiment spécial de gratitude à mes parents aimants, **Kunto Adji** et **Sugiharti Hidayat**, ma sœur **Sulih Ngutamani**, mes frères **Rojul Leksono** et **Afrihan Nugraha**, et ma petite nièce **Khayla Nugraha**. Merci pour leur prière, les mots d'encouragement, la motivation, et le temps d'apprentissage de l'indépendance et de la responsabilité.

Je tiens à exprimer ma gratitude à mes superviseurs **Michael Brun** et **Fabien Delhomme**, merci pour la connaissance, la direction, la gentillesse, et la patience.

Je tiens à dire merci au Gouvernement d'Indonésie en particulier au **Ministère de l'Éducation et de la Culture** et **Pasca Sarjana ITS** qui m'ont donné l'occasion de continuer mes études en France. **Endah Wahyuni**, ma superviseur en Indonésie, et toute la communauté universitaire de l'Institut Teknologi Sepuluh Nopember en particulier le département de Génie Civil, je ne peux pas les citer un par un.

Mon autre famille : Ibu **Nur Hayati**, Papi **Bambang Pramono**, **Windi**, **Victoria**, **Shella**, **Onik**, **Karina**, **Efi**, **Ervita**, **Fitri**, **Winda**, **Devina**, **Lericta**, **Kiki**, **Niar**, **Upik**, **Jaka**, **Ani Zaida** et sa famille, **Uli**, **Echie**, qui sont devenus mes meilleurs *cheerleaders* dans les moments difficiles.

Famille de DDIP 2013 : **Widya**, **Putra**, **Dimas**, **Didin**, **Dian**, **Agus**, **Isti**, **Saldhyna**, **Filsa**, **Yanti**, **Abduh**, **Nafi'**, **Elsen**, **Arum**, **Rini**, **Hanif**, **Fandi**, Famille d'IFI : **Mme Irma**, **mlle Tuti**, **mlle Norma**, **m. Tarsono** et **Pierre-Yves**, et l'**Association des Etudiants Indonésiens à Lyon (PPI LYON)** qui est déjà appelé comme ma deuxième famille en France, merci pour votre enthousiasme et votre motivation.

Lyon, le 15 Septembre 2014

L'Auteur

DAFTAR ISI

Halaman Judul	
Lembar Pengesahan	
Abstrak.....	i
Lembar Persembahan.....	v
Daftar Isi.....	vii
Daftar Gambar.....	ix
Daftar Tabel.....	xiii

CHAPITRE I. INTRODUCTION

1.1. Généralités.....	1
1.2. Objectif.....	2
1.3. Avantage.....	4

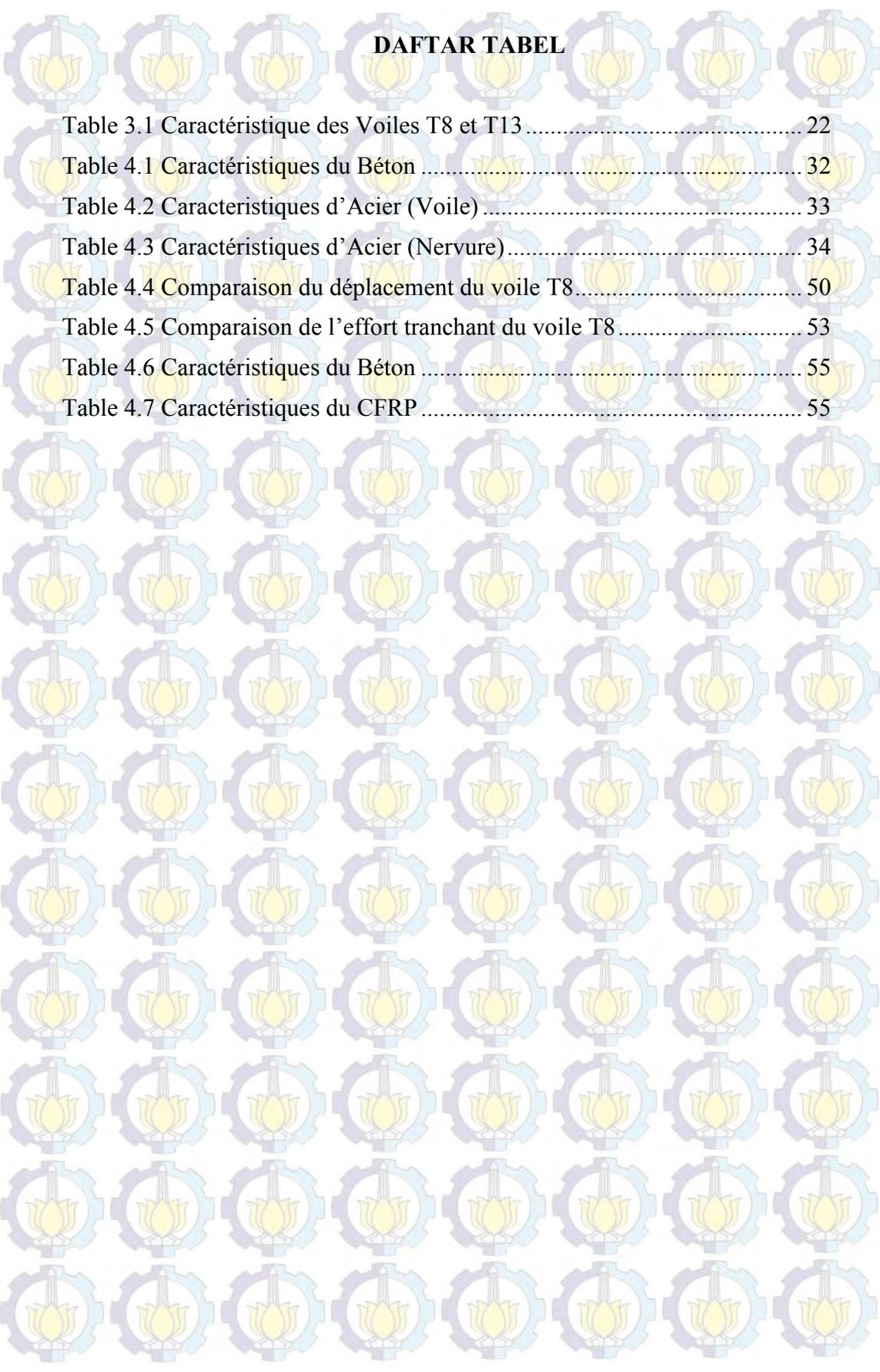
CHAPITRE II. ETUDE BIBLIOGRAFIE

2.1. Le Voile en Béton Armé.....	5
2.1.1 Le Types du Voile	5
2.1.2 Les Modes de Rupture des Voikles Courtes	5
2.2. Les Modèles de Matériaux Utilisés	7
2.2.1 Le Modèle du Béton	7
2.2.2 Le Modèle de l'Acier	12
2.2.3 Le Modèle de la Liaison Acier-Béton	13
2.2.4 Le Modèle du CFRP.....	13
2.3. La Presentation de la Structure.....	15
2.4. Les Chargement.....	15
2.4.1 Le Chargement Quasi-Statique.....	15
2.4.2 Le Chargement Pseudo-dynamique (PSD).....	16

CHAPITRE III. INVESTIGATION DES ESSAIS

3.1. Introduction	19
3.2. La Préparation des Données	20
3.3. L'Etude Bibliographie.....	20
3.4. Les Modélisation en 2D pour Le Voile T8 et Le Voile T13.....	21
3.4.1 Les Types des Voiles des Essais.....	21
3.4.2 Les Descriptifs des Essais et Les Instruments d'Essais	23
3.5. L'Analyse des Résultats	25
3.6. La Validation des Résultats.....	25
3.6.1 Le Voile T8.....	26
3.6.2 Le Voile T13.....	28

3.7.	La Conclusion.....	30
CHAPITRE IV. MODELISATION NUMERIQUE		
4.1.	Généralités.....	31
4.2.	Le Voile T8.....	31
4.2.1	Les Hypothèse de Caractéristique de Géométrie.....	31
4.2.2	Les Hypothèse de Caractéristique des Matériaux.....	31
4.2.3	Les Hypothèse de la Discrétisation des Maillages ...	35
4.2.4	Les Hypothèse des Chargements.....	37
4.2.5	Les Résultats et l'Analyse	38
4.3.	Le Voile T13.....	54
4.3.1	Les Hypothèse de Caractéristique de Géométrie.....	54
4.3.2	Les Hypothèse de Caractéristique des Matériaux.....	54
4.3.3	Les Hypothèse de la Discrétisation des Maillages ...	55
4.3.4	Les Hypothèse des Chargements.....	57
4.3.5	Les Résultats et l'Analyse	58
CHAPITRE V. CONCLUSION		
5.1.	Conclusion.....	73
BIBLIOGRAPHIQUE.....		75



DAFTAR TABEL

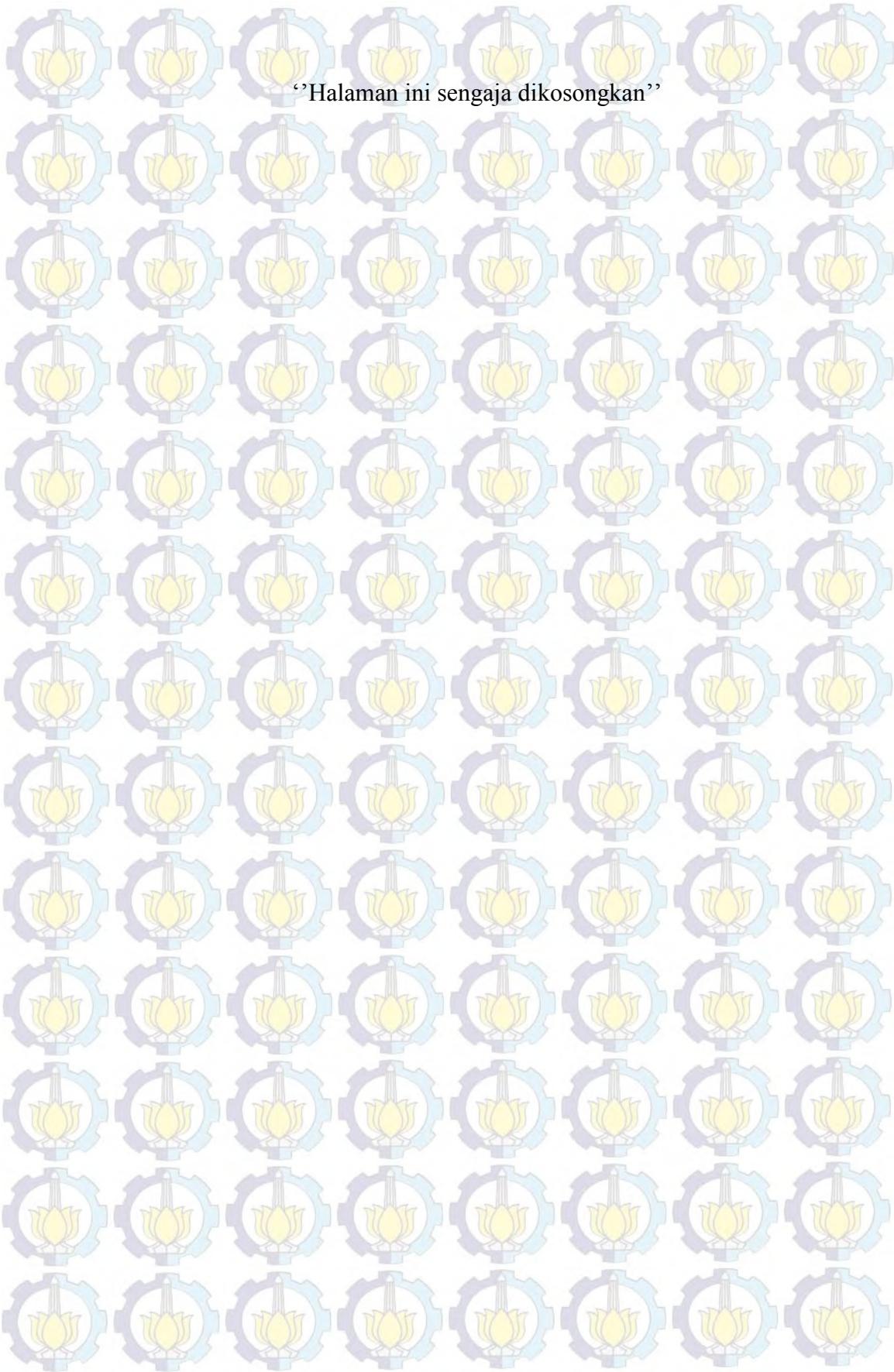
Table 3.1 Caractéristique des Voiles T8 et T13	22
Table 4.1 Caractéristiques du Béton	32
Table 4.2 Caracteristiques d'Acier (Voile)	33
Table 4.3 Caractéristiques d'Acier (Nervure)	34
Table 4.4 Comparaison du déplacement du voile T8	50
Table 4.5 Comparaison de l'effort tranchant du voile T8	53
Table 4.6 Caractéristiques du Béton	55
Table 4.7 Caractéristiques du CFRP	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Modes de Rupture des Voiles Courts (Ile, 2000).....	6
Gambar 2.2. Surface de rupture et la surface de charge dans le plan des contraintes principales (Brun, 2002).....	9
Gambar 2.3. Surface de charge selon Ottosen comparé aux résultats expérimentaux de Kupfer	10
Gambar 2.4. Repère des Fissures (Brun, 2002).....	11
Gambar 2.5. Loi de comportement d'acier (Ile, 2000).....	13
Gambar 2.6. Comportement du CFRP	14
Gambar 3.1. Méthodologie de Cette Etude	20
Gambar 3.2. Géométrie du voile en béton armé sur le programme SAFE	21
Gambar 3.3. Pose des matériaux composites sur le mur T13 (UGRC, 1999).....	22
Gambar 3.4. Dispositif de Chargement (UGRC, 1999).....	23
Gambar 3.5. Accélération de référence pour le test T8 et T13 (Brun, 2002).....	25
Gambar 3.6. Accélérogramme pour le test SAFE T8.....	26
Gambar 3.7. Déplacement en tête du Voile T8.....	27
Gambar 3.8. Effort tranchant du voile T8.....	27
Gambar 3.9. Courbes effort tranchant-déplacement en tête pour le test T8).....	28
Gambar 3.10. Accélérogramme pour le test SAFE 13.....	29
Gambar 3.11. Courbes effort tranchant-déplacement en tête pour le test T13 (Brun, 2002).....	29
Gambar 4.1. Figure 4.1 Comportement d'Acier.....	35
Gambar 4.2. Maillage du béton	35
Gambar 4.3. Maillage d'acier	36
Gambar 4.4. Maillage Total du Voile en Béton Armé	37
Gambar 4.5. (a) Chargement Vertical sur le Voile (b) Force Imposée sur le Voile.....	38
Gambar 4.7. Points affectés par la Fissuration et la Compression.....	39
Gambar 4.8. Points Affectés par la Fissuration	40
Gambar 4.9. Déformation Minimale du Béton	40

Gambar 4.10. Plastification d'Armature.....	41
Gambar 4.11. Déformation d'armature	42
Gambar 4.12. Déformation Horizontales dans le Béton	42
Gambar 4.13. Déformation dans les Armatures	43
Gambar 4.14. Effort et Déplacement du Voile	43
Gambar 4.15. Points Affectés par la Fissuration et la Compression.....	44
Gambar 4.16. Affectés par la Fissuration.....	44
Gambar 4.17. Déformation Minimale du Béton	45
Gambar 4.18. Plastification d'Armature	46
Gambar 4.19. Déformation d'Armature Horizontale et Verticale	47
Gambar 4.20. Déformation horizontale dans le béton	47
Gambar 4.21. Déformation dans les Armatures.....	48
Gambar 4.22. Comparaison Entre les Déplacements Numériques et les Déplacements Expérimentaux	48
Gambar 4.23. Comparaison du Déplacement T8_1	49
Gambar 4.24. Comparaison du déplacement T8_2.....	49
Gambar 4.25. Comparaison du Déplacement T8_3	50
Gambar 4.26. Comparaison Entre les Efforts Numériques et les Efforts Expérimentaux	51
Gambar 4.27. Comparaison l'Effort Tranchant T8_1	51
Gambar 4.28. Comparaison l'Effort Tranchant T8_2.....	52
Gambar 4.29. Comparaison l'Effort Tranchant T8_3.....	52
Gambar 4.30. Courbes Effort Tranchant-déplacement en Tête de T8 Numérique ..	53
Gambar 4.31. Maillage du Béton.....	56
Gambar 4.32. Maillage d'Acier	56
Gambar 4.33. Maillage du Composite	57

Gambar 4.34. Maillage Total du Voile en Béton Armé	57
Gambar 4.35. (a) Chargement Vertical sur le Voile (b) Force Imposée sur le Voile.....	58
Gambar 4.36. Effort et Ddéplacement du Voile	59
Gambar 4.37. Points Affectés par la Fissuration et la Compression.....	59
Gambar 4.38. Points Affectés par la Fissuration.....	60
Gambar 4.39. Déformation Minimale du Béton	61
Gambar 4.40. Plastification d'Armature.....	61
Gambar 4.41. Déformation d'Armature.....	62
Gambar 4.42. Plastification d'Armature.....	63
Gambar 4.43. Points Affectés par la Fissuration et la Compression.....	63
Gambar 4.44. Points Affectés par la Fissuration.....	64
Gambar 4.45. Déformation Minimale du Béton	64
Gambar 4.46. Plastification d'Armature.....	65
Gambar 4.47. Déformation d'Armature Horizontale et Verticale	66
Gambar 4.48. Déplacement en Tête du Voile T13.....	66
Gambar 4.49. Déplacement en tête pour le test T13	67
Gambar 4.50. Déplacement T13_1	67
Gambar 4.51. Déplacement T13_2	68
Gambar 4.52. Déplacement T13_3	68
Gambar 4.53. Effort Tranchant du Voile T13.....	69
Gambar 4.54. Effort Tranchant T13_1	70
Gambar 4.55. Effort Tranchant T13_2.....	70
Gambar 4.56. Effort Tranchant T13_3.....	71
Gambar 4.57. Courbes Effort Tranchant-Déplacement en Tête de T13	72



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1. Généralités

Les tremblements de terre sont une fréquente catastrophe et sa présence ne peut pas être prédite. En France et en Indonésie, la menace d'un tremblement de terre ne peut pas être ignorée. Ils peuvent résulter d'un certain nombre de naturel et les phénomènes induits par l'homme, y compris l'impact de météorites, l'activité volcanique, l'explosion nucléaire souterrain, et rock changements de contraintes induites par le remplissage de grandes réservoirs artificiels. (Paulay et Priestley, 1992). Les tremblements de terre non seulement entraînent la perte matérielle, mais aussi la perte de la vie.

En France et en Indonésie, une structure en béton armé est souvent utilisée pour les bâtiments de faible hauteur ou les bâtiments de grande hauteur. Ce type de structure combine la vertu du matériau du béton et de l'acier. Le béton est un matériau qui forte contre la compression et l'acier est un matériau qui forte contre la traction. Dans un bâtiment de grande hauteur qui utilise la structure d'acier, il est généralement contreventement qui sert à résister aux forces sismiques. Comme avec la structure d'acier, dans la structure en béton armé, il y a du voile pour résister aux forces sismiques. (Hayu, 2014).

Selon le rapport du tremblement de terre de Chi-Chi en 1999, le voile joue un rôle important en tant qu'élément résistant au séisme pour la construction de faible hauteur en béton armé (Ika, 2008). Les voiles sont les éléments en béton armé qui fournissent la force importante et la rigidité ainsi que la capacité de déformation nécessaire pour répondre aux mouvements du sol lors de forts tremblements de terre (Parulekar et al, 2014). Lors d'un grand tremblement de terre se produit, on constate que de nombreux bâtiments à

voiles en béton armé ont survécu sans endommagement exagéré. Les voiles en béton armé peuvent résister efficacement aux forces horizontales et donc réduire le risque dû à un tremblement de terre (ILE, 2000).

Dans les centrales nucléaires, les voiles massifs de faible hauteur et les voiles squats sont utilisés. Pour ces voiles de faible hauteur, la flexion et le glissement rupture en cisaillement ne se produisent pas. Ces voiles sont généralement défailants en cisaillement. Beaucoup d'expériences ont été réalisées par des chercheurs sur les voiles de faible hauteur (Parulekar et al, 2014).

Le programme SAFE (Structures Armées Faiblement Elancées) est composé d'une campagne expérimentale réalisée au *Joint Research Center of The European Commission par EDF/SEPTEN et COGEMA*. Il avait été exécuté au *ELSA Laboratory* en 1997-1998 (Brun et al, 2010). L'expérience concerne 13 essais pseudo-dynamiques sur des voiles caractérisés par la proportion de renforcement des murs, la fréquence propre initiale et la charge verticale de confinement (Brun, 2002).

1.2. Objectif

Il y a beaucoup de programme par élément finis utilisé pour analyser le comportement d'élément structure. L'étude est menée en modélisant le comportement d'un élément structure (Plaque, poutre, colonne ou voile) dans un programme. Cette méthode est considéré comme meilleur parce que l'utilisation peut gagner du temps, réduire les risques qui peuvent survenir lorsque'il est effectué expérimentale et économiser les coûts. Un de ces programmes est le programme CAST3M 2000. Ce programme est souvent utilisé en France. En utilisant ce programme, on peut voir le comportement d'élément de la structure qu'on est examiné. Dans ce programme, on peut modéliser l'élément de la structure en ou 2D.

Dans ce rapport, je vais présenter les modèles d'élément fini du voile en béton armé qui représentent les comportements de cet élément soumis à des charges sismiques avec le logiciel CAST3M. Je vais modeliser les

éléments en 2D avec le chargement quasi-statique et le chargement dynamique. Les types de voile qui sont modélisés sont les voiles T8 et T13. Ces voiles sont constituées du béton, l'acier, et le composite. Pour le voile T8, les modélisations des éléments finis sont QUA4 pour le béton, SEG2 pour l'armature d'acier, et *parfait adhérence* pour modéliser le point nodal entre l'armature d'acier et le béton. Pour le voile T13, les modélisations des éléments finis sont QUA4 pour le béton, SEG2 pour l'armature d'acier, SEG2 pour le CFRP et *parfait adhérence* pour modéliser le point nodal entre l'armature d'acier et le béton. Sur la base des faits et le contexte qui a été décrit précédemment, l'autor est pris ce titre **Modélisation Numérique du Comportement des Voiles en Béton Armé Soumis à des Excitations Sismiques**.

Avant cette étude, la première à faire est une étude préliminaire. La première chose à noter est que le comportement des voiles lorsque le matériau est exposé à la traction et à la compression des charges. Les matériels du voile sont le béton, l'acier, et le composite CFRP (*Carbon Fiber Reinforcement Polymer*). En outre, on a besoin de connaître les paramètres à utiliser dans cette modélisation, les étapes de ce modèle, le chargement quasi-statique et le chargement dynamique.

D'abord, on modélise le voile en béton armé en 2D. En suite, on limite la simulation avec le chargement quasi-statique et le chargement dynamique. Les résultats de cette modélisation numérique sont ensuite comparés avec les résultats expérimentaux effectués au par avant dans le laboratoire ELSA. Les résultats de l'analyse sont présentés sous la forme de courbe : le déplacement, la force de cisaillement, la déformation du béton, la déformation de l'acier, et le courbe d'hystérésis.

1.3. Avantage

Les avantages de cette étude sont:

1. Pour les ingénieurs, peuvent fournir un résumé des informations pratiques concernant la nature de voile en béton armé lorsqu'il est exposé à excitation sismique
2. Pour l'auteur, peut améliorer les connaissances sur le comportement de voile en béton armé lorsqu'il est exposé à excitation sismique
3. Pour le mode de construction, peut ajouter une référence à l'utilisation de logiciel CAST3M 2000 pour modéliser la structure lorsqu'elle est exposé à excitation sismique

CHAPITRE II

ETUDE BIBLIOGRAPHIE

2.1. Le Voile en Béton Armé

2.1.1. Le Types du Voile

En general, les différents types de voile en béton armé se distinguent par leur fonction et leur emplacement, ainsi que par leur géométrie. Les types de voile en béton armé en termes de fonction et d'emplacement, sont :

- *Bearing walls*

La fonction principale de ce type de voile est de soutenir la majorité de la charge de gravité.

- *Frame walls*

La fonction principale de ce type de voile est de résister aux charges latérales et aux charges de gravité de structure elle-même en béton armé.

- *Core walls*

Généralement, ce type de voile est situé au centre ou noyau du bâtiment et il a double fonction. Ces voiles sont considérés comme le plus efficaces.

Ensuite, les types de voile en béton armé en termes de géométrie, sont:

- *Flexural walls*

Ce type de voile présente un rapport entre sa hauteur et sa largeur supérieur à 2 ($hw/lw > 2$). Ce voile est mince et contrôlé par le comportement en flexion.

- *Squat walls*

Ce type de voile se trouve dans beaucoup de bâtiments de faible hauteur. Ce voile a un rapport entre sa hauteur et sa largeur inférieur à 2 ($hw/lw < 2$). Ce voile est contrôlé par le comportement en cisaillement.

- *Couple shear walls*

Dans ce voile, la force de cisaillement est absorbée par une paire de voiles qui sont reliés par une poutre.

2.1.2. Les Modes de Rupture des Voiles Courtes

Dans cette étude, on a fait la modélisation d'un voile court. Il existe plusieurs modes de rupture des voiles courts (Ile, 2000), comme suit :

- Mode T1

C'est la rupture par glissement. Ce mode de rupture, conséquence de la plastification progressive des armatures verticales est accompagné d'importants glissements qui réduisent d'une façon significative la raideur et la dissipation hystérétique.

- Mode T2

C'est la rupture diagonale avec plastification ou rupture des armatures le long des fissures diagonales. Ce mode se rencontre dans les voiles moyennement armés sollicités par un faible effort normal.

- Mode T3 :

C'est la rupture par écrasement du béton de l'âme du voile, à la base des bielles transmettant les efforts de compression. C'est un mode de ruine caractéristique des voiles fortement armés, surtout s'ils sont associés à des raidisseurs sur leur bord.

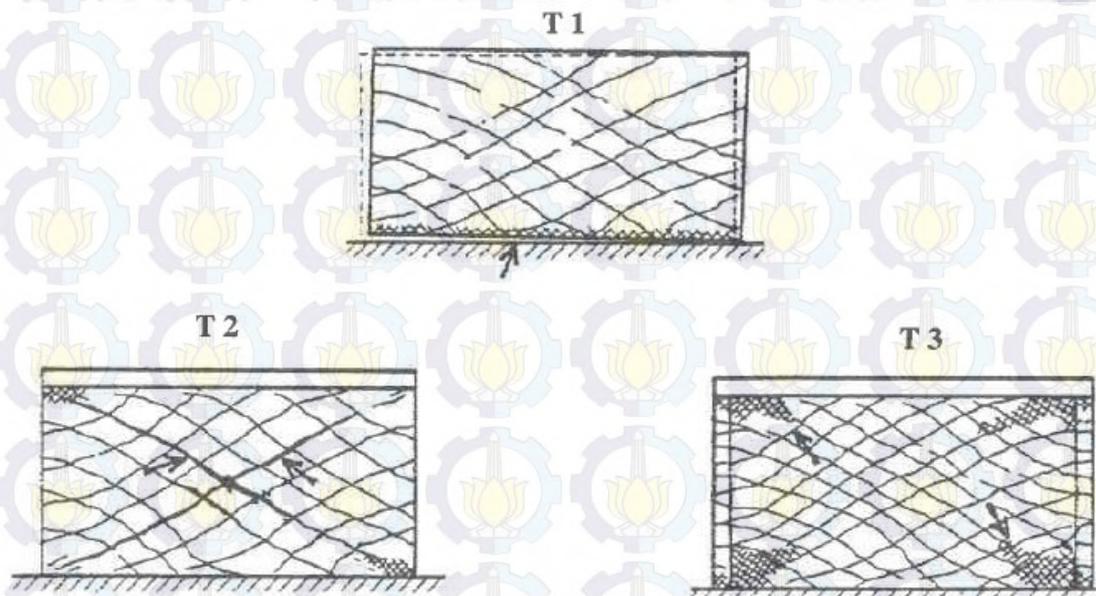


Figure 2.1. Modes de Rupture des Voiles Courts (Ile, 2000)

2.2. Les Modèles de matériaux Utilisés

2.2.1. Le Modèle du Béton

Il existe deux modèles pour le béton, à savoir le béton intègre (non fissuré) et le béton fissuré. Le béton intègre a un comportement élastique-plastique. Alors que, s'il commence à se fissurer il est appelé béton fissuré.

2.2.1.1. Le Béton Intègre

Comme une condition expliquée précédemment, le béton intègre est développé dans le cadre de l'élasto-plastique standard en contraintes planes. La loi d'écoulement est associée et la règle d'écrouissage est isotrope (U.R.G.C-Structures, 1999).

Les types de surface dans ce modèle sont la surface de rupture et la surface de charge. Il existe deux surfaces de rupture, pour le domaine des compressions et pour le domaine de tractions. La surface de rupture à 2 paramètres de Nadai, de type Drucker-Prager, est définie par une relation linéaire entre les contraintes octaédrales.

L'expression mathématique de cette surface est définie pour le domaine des compressions ($\sigma_1 < 0$ et $\sigma_2 < 0$) par :

$$f_{\text{comp}}(\sigma_{\text{oct}}, \tau_{\text{oct}}) = \frac{\tau_{\text{oct}} + a\sigma_{\text{oct}}}{b} - f'_c = 0 \quad 2.1$$

Pour le domaine des tractions (traction pure ou traction-compression),

$\sigma_1 > 0$ et/ou $\sigma_2 > 0$) :

$$f_{\text{trac}}(\sigma_{\text{oct}}, \tau_{\text{oct}}) = \frac{\tau_{\text{oct}} + c\sigma_{\text{oct}}}{d} - f'_c = 0 \quad 2.2$$

Les paramètres du critère a, b, c, d fonctions de α et β sont déduits à partir de trois essais : compression uniaxiale f'_c , traction uniaxiale f'_t , et compression biaxiale f'_{cc} .

Dans le plan de stress principal, la surface de la rupture est représentée par le critère d'Ottosen qui est reconnu comme étant en bon accord avec les résultats expérimentaux. La surface de charge est déduite homothétiquement de la surface de rupture par critère d'Ottosen. La surface de chargement est convexe, elle est définie par un gain unitaire de la normale. Le béton intègre utilise la loi de découlement. (Brun, 2002).

La surface de charge est déduite de la surface de rupture en compression restreignant à un écrouissage isotrope. L'existence d'un domaine initial d'élasticité identifié à partir des essais Kupfer, correspondant à environ 30 % de la surface de rupture. L'équation 2.3 est une équation de la frontière du domaine d'élasticité en considérant un écrouissage isotrope :

$$f(\sigma, k) = \frac{\tau_{oct} + a\sigma_{oct}}{db} - \tau(k) = 0 \quad 2.3$$

$\sigma_1 < 0$ et $\sigma_2 < 0$ ou $\sigma_1 < 0$ et $\sigma_2 > 0$

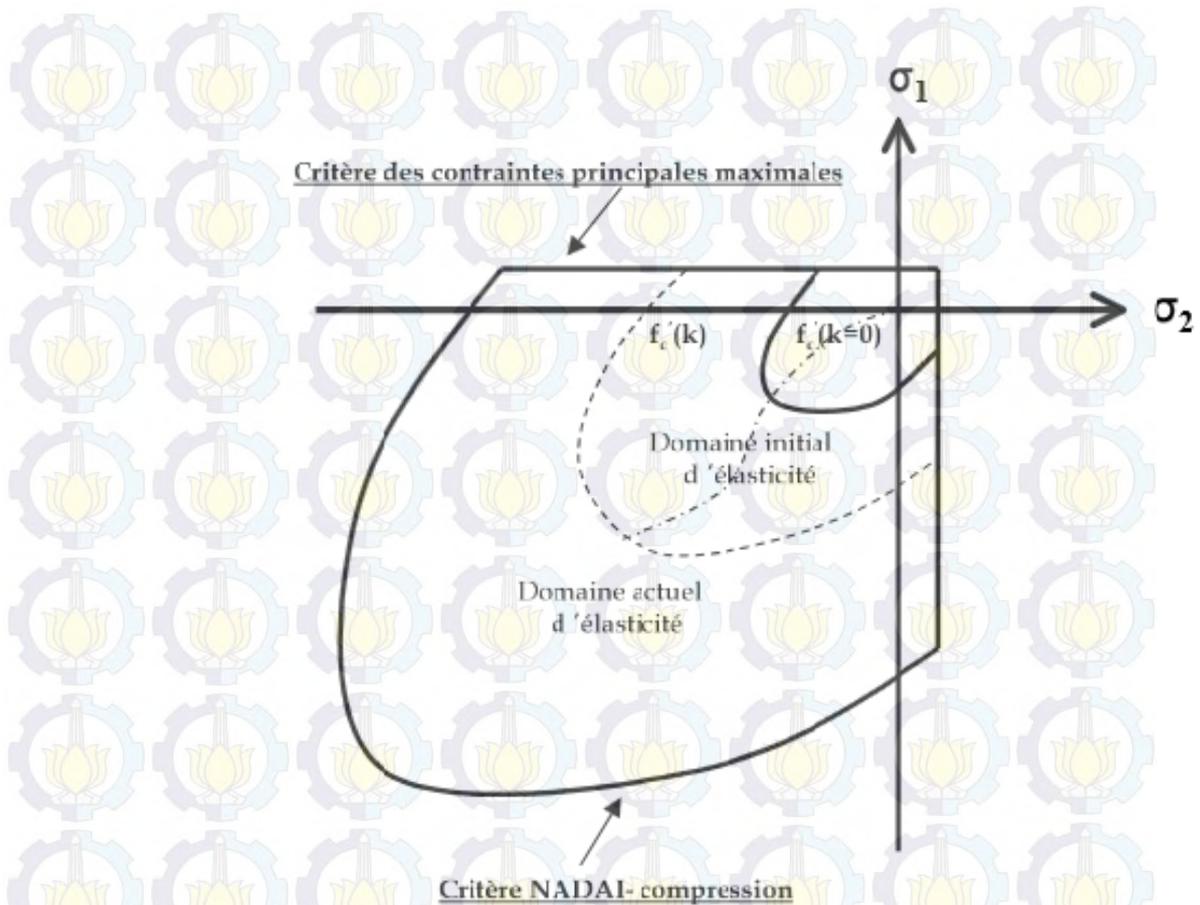


Figure 2.2 Surface de Rupture et la Surface de Charge dans le Plan des Contraintes Principales (Brun, 2002)

Le critère d'Ottosen est l'un des critères de fusion dans le béton. Le critère de fusion est la limite d'analyse de la réponse élastique du matériau. Le critère d'Ottosen a une fonction lisse, convexe, et il n'y a pas de discontinuité ce qui convient pour une tension uniaxiale, biaxiale, et multiaxiale (Antonius, 2010). Le lissage, la convexité, les méridiens courbes et une transition progressive d'une forme presque triangulaire à presque circulaire dans le plan déviatorique avec l'augmentation de la pression hydrostatique rend le critère d'Ottosen très approprié pour la simulation de la rupture du béton (Pereira et Barros, 2009).

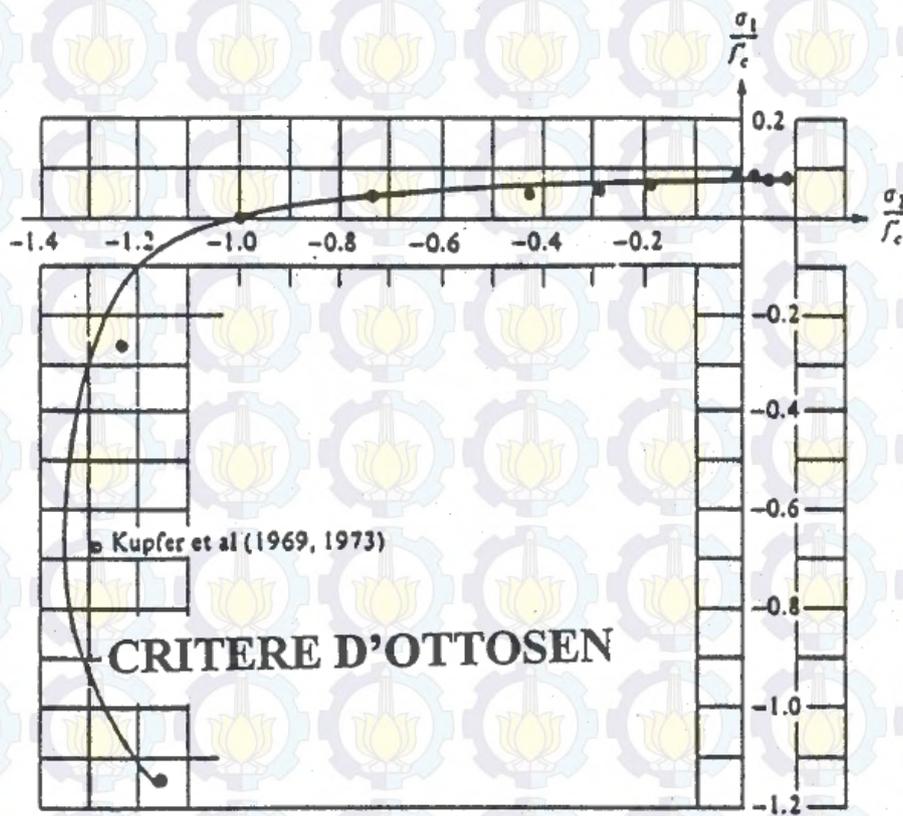


Figure 2.3 Surface de charge selon Ottosen Comparé aux Résultats Experimentaux de Kupfer

2.2.1.2. Le Béton Fissuré

A l'atteinte de la surface de rupture d'Ottosen dans les domaines de traction et de traction-compression, une fissure est générée perpendiculairement à la contrainte principale majeure. Le comportement élasto-plastique du béton transformé en comportement orthotropique sur le repère de la fissure (Brun, 2002), est indiqué ci-dessous.

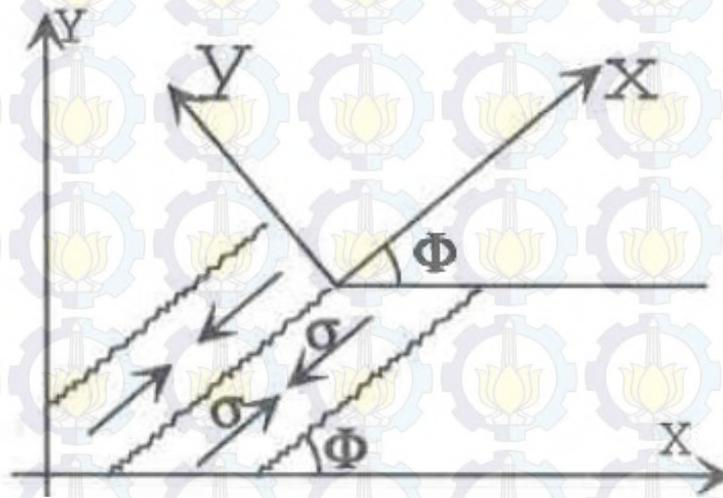


Figure 2.4 Repère des Fissures (Brun, 2002)

Le comportement du béton fissuré est encore illustrée sous la forme de loi uniaxiale dans le repère (X, Y) de la fissure. La première loi uniaxiale est relative à la direction normale Y à la première fissure créée. Cette direction coïncide avec la direction de la contrainte principale majeure lorsque l'état des contraintes a atteint la surface de rupture. Alors que sur la deuxième loi uniaxiale, la deuxième direction de fissure est déterminée perpendiculairement à partir de la première direction de la fissure. Les contraintes et les déformations dans un système d'axes xy tourné d'un angle ϕ par rapport au système d'axes global XY sont décrit dans la relation suivante :

$$\{\sigma^1\} = [T]\{\sigma\} \quad 2.4$$

$$\{\varepsilon^1\} = [T]\{\varepsilon\} \quad 2.5$$

Avec $[T]$ est une matrice de transformation donné par :

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\phi & \sin^2\phi & 2\cos\phi\sin\phi \\ \sin^2\phi & \cos^2\phi & -2\cos\phi\sin\phi \\ -\cos\phi\sin\phi & \cos\phi\sin\phi & \cos^2\phi - \sin^2\phi \end{bmatrix} \quad 2.6$$

Le tenseur des contraintes dans le repère local est équipé d'une contrainte de cisaillement calculée élastiquement avec un module de cisaillement réduit pour tenir compte de l'effet d'engrènement de la fissure correspondant au frottement des surfaces de lèvres de la fissure. Ces effets sont obtenus en soustrayant le module de cisaillement initial à l'aide du facteur de transfert de cisaillement η .

$$0 \leq \eta \leq 1 \text{ si } \varepsilon_{var,i} - \varepsilon_{i,resi} - \varepsilon_{rupture}^{trac} \leq 2\varepsilon_{rupture}^{trac} \quad 2.7$$

$$\eta = 0 \text{ si } \varepsilon_{var,i} - \varepsilon_{i,resi} - \varepsilon_{rupture}^{trac} \geq 2\varepsilon_{rupture}^{trac} \quad 2.8$$

$$\eta = 0 \text{ et } \sigma_{12} = 0 \text{ si } \varepsilon_{var,i} - \varepsilon_{i,resi} - \varepsilon_{rupture}^{trac} \geq 4\varepsilon_{rupture}^{trac} \quad 2.9$$

avec

$\varepsilon_{var,i}$: la déformation dans la direction perpendiculaire à la fissure,

$i = x = y$

$\varepsilon_{i,resi}$: la déformation résiduelle dans la direction i , après décharge en compression, $i = x, y$

$\varepsilon_{rupture}^{trac}$: la déformation à la rupture en traction

2.2.2. Le Modèle de l'Acier

La loi de comportement adoptée pour le renforcement est le modèle cyclique de Pinto-Manegotto qui prend en compte l'effet Bauschinger et le flambement des armatures (Brun et al, 2010). Le modèle de comportement de l'acier est un modèle élasto-plastique à écrouissage positif défini par les caractéristiques élastiques et la pente d'écrouissage après plastification. Les paramètres des modèles sont décrits dans une courbe de simple traction sur la figure 2.4 suivante.

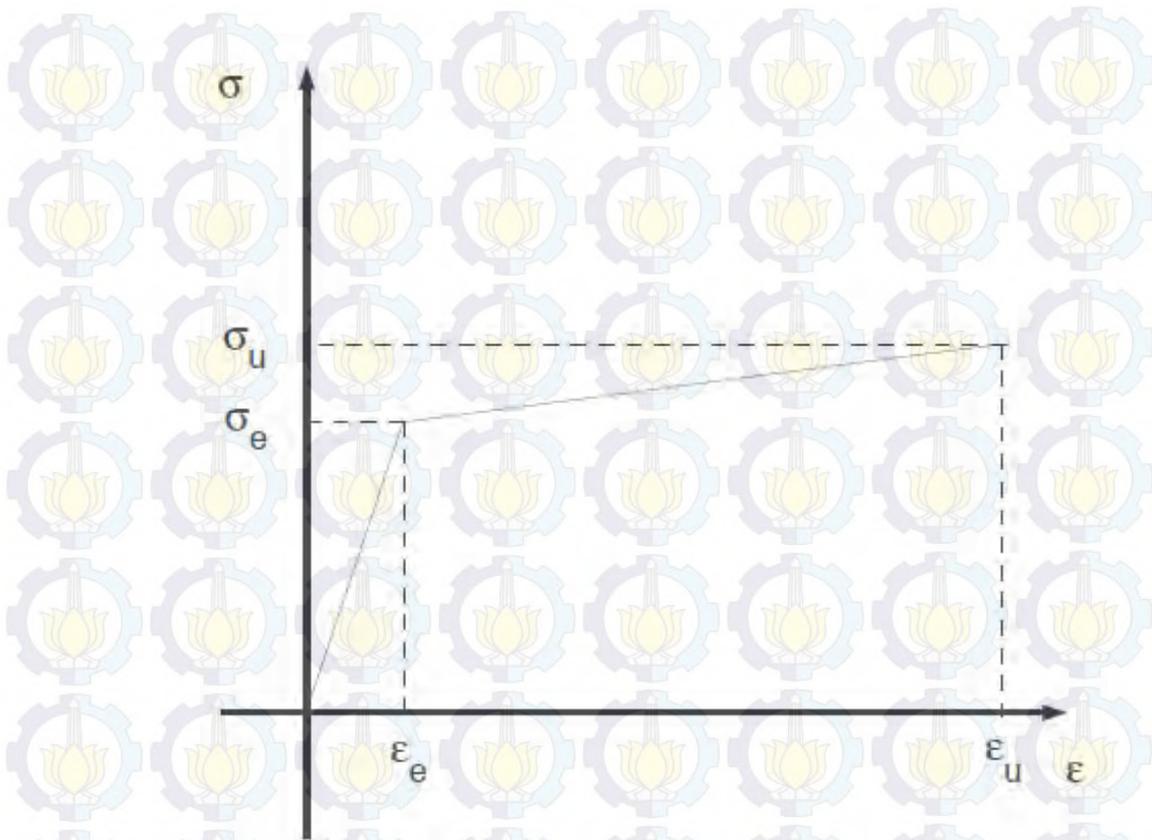


Figure 2.5. Loi de comportement d'acier (Ile, 2000)

2.2.3. Le Modèle de la Liaison Acier-Béton

Le modèle de comportement cyclique de la liaison est implémenté dans le code CAST3M 2000. Ce modèle est basé sur les mécanismes de résistance et de dégradations de la liaison qui se produisent lors de l'arrachement d'une barre nervurée, noyée dans un bloc de béton (ILE, 2000).

2.2.4. Le Modèle du CFRP

L'utilisation de *Fibre Reinforced Polymers* (FRP) comme renfort des structures s'est rapidement imposé. Cela est dû aux nombreux avantages de ces matériaux par rapport à l'armature d'acier conventionnelle ou au béton (Irwin et Rahman, 2002). Leurs caractéristiques supérieures sont la légèreté, la résistance élevée à la traction, la résistance à la corrosion, et la facilité

d'application. Ces matériaux FRP peuvent être collés sur la surface de tension des structures en béton de n'importe quelle forme souhaitée par l'intermédiaire d'une fine couche de colle époxy et donc peuvent améliorer la rigidité et la résistance des structures à renforcer (Niu et Wu).

Pour le renforcement du voile T13, on utilise un type de FRP en *Carbon Fibre Reinforcement Polymere* (CFRP). Le CFRP a été largement utilisé dans diverses applications notamment dans la fabrication de structures aérospatiales. En raison de leur faible densité, de leur haute résistance et de leur rigidité, de leurs excellentes résistances à la corrosion et à l'impact, les CFRP sont largement utilisés dans divers composants structuraux.

Wu et al proposent une analyse par éléments finis pour étudier les comportements d'interface. L'interaction entre la résistance de la liaison interfaciale, l'énergie de rupture interfaciale de la couche d'adhésif, la résistance à la traction et l'énergie de rupture du béton sont discutés. L'une des conclusions importantes est que si la bonne liaison interfaciale est garantie, l'augmentation de l'énergie de rupture du béton peut entraîner une fissuration distribuée dans le béton, cette condition considérée comme bénéfique pour les performances de renforcement structurel.

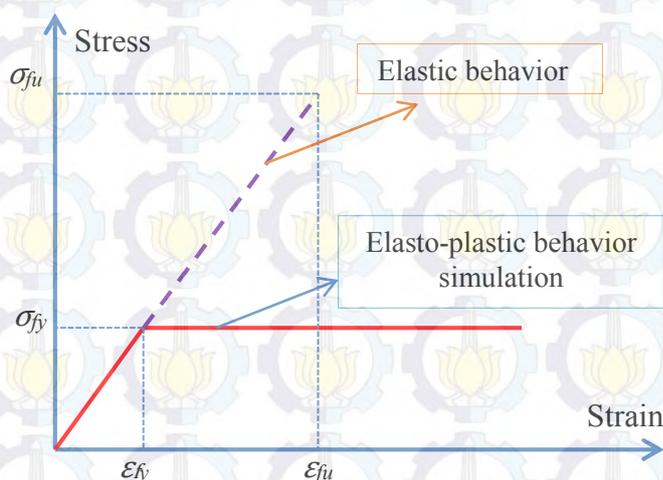


Figure 2.6. Comportement du CFRP

2.3. La Présentation de la Sturcture

Les voiles T8 et T13 ont une longueur de 3 m, une hauteur de 1,2 m, et une épaisseur de 0,20 m. La structure est idéalisée comme système à un degré de liberté. Les valeurs de la masse M et de l'amortissement sont spécifiées. La raideur conventionnelle et la fréquence propre conventionnelle du voile sont calculées par les relations suivantes :

$$K = \frac{GS_a}{h} \quad 2.10$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad 2.11$$

avec

G : le module de cisaillement conventionnel

S_a : la section de l'âme

H : la hauteur du voile

M : la masse en translation en tête du voile

Les pourcentages d'aciers horizontaux ρ_h et verticaux ρ_v sont donnés par les formules suivantes :

$$\rho_h = \frac{\tau_d}{f_e} \text{ et } \rho_v = \frac{\tau_d - \sigma_n}{f_e} \quad 2.12$$

avec

σ_n : la contrainte vertical moyenne issue du poids propre et du dispositif de chargement

τ_d : le cisaillement moyen de dimensionnement

2.4. Les Chargements

2.4.1. Le Chargement Quasi-Statique

Le chargement quasi-statique est la charge qui est appliquée lentement sur la structure, de sorte qu'elle se déforme également très lentement (vitesse de déformation très faible) et par conséquent, la force

d'inertie est très faible et peut être négligée. En d'autres termes le temps et la masse inertielle ne sont pas pertinent. Il y a deux types de chargements quasi-statiques : la force imposée et le déplacement imposé.

2.4.2. Le Chargement Pseudo-dynamique (PSD)

Le test de PSD utilise le calcul informatique en ligne et contrôle simultanément la mesure expérimentale de la force pour fournir une simulation réaliste du comportement dynamique du voile. (Brun et al, 2010). Cette procédure est basée sur la théorie du contrôle modal actif. Les propriétés d'amortissement et d'inertie sont simulées et les propriétés de rigidité sont acquises à partir de la structure (Aktan, 1986).

Le test de PSD impose un historique du déplacement sur la structure d'essai basé sur son équation du mouvement, fonction du modèle d'analyse de la structure pris par hypothèse. La principale contribution de cette procédure est son réalisme : le modèle acquiert des propriétés de rigidité non linéaires sous la forme d'un vecteur de force de rappel de la structure d'essai lors de sa réponse à un mouvement du sol hypothétique (Aktan, 1986).

Dans ces essais de PSD, le déplacement en pic du voile est adopté comme le seul degré de liberté du système parce que le dispositif expérimental empêche la rotation en pic du voile et l'effet de flexion. La masse numérique est considérée comme concentrée dans la partie supérieure du voile, elle est mise à l'échelle en fonction de la fréquence nominale (Brun et al, 2011). La formulation de l'équation du mouvement, est:

$$m\ddot{u}(t) + cu(t) + r(t) = -ma(t) \quad 2.13$$

avec

m : la masse numérique du voile

c : le paramètre d'amortissement visqueux numérique

$r(t)$: la force de rappel mesurée expérimentalement

$a(t)$: l'accélération imposée à la base du voile

En outre, l'accélérogramme nominal peut être obtenu en multipliant l'accélérogramme de référence avec un coefficient k , afin d'adapter à la contrainte de cisaillement de calcul.

$$k = \frac{H_d}{M\Gamma_d(f_0, \xi=0,07)} \quad 2.14$$

$$H_d = \tau_d L e \quad 2.15$$

avec

H_d : l'effort horizontal de dimensionnement

T_d : le cisaillement de dimensionnement

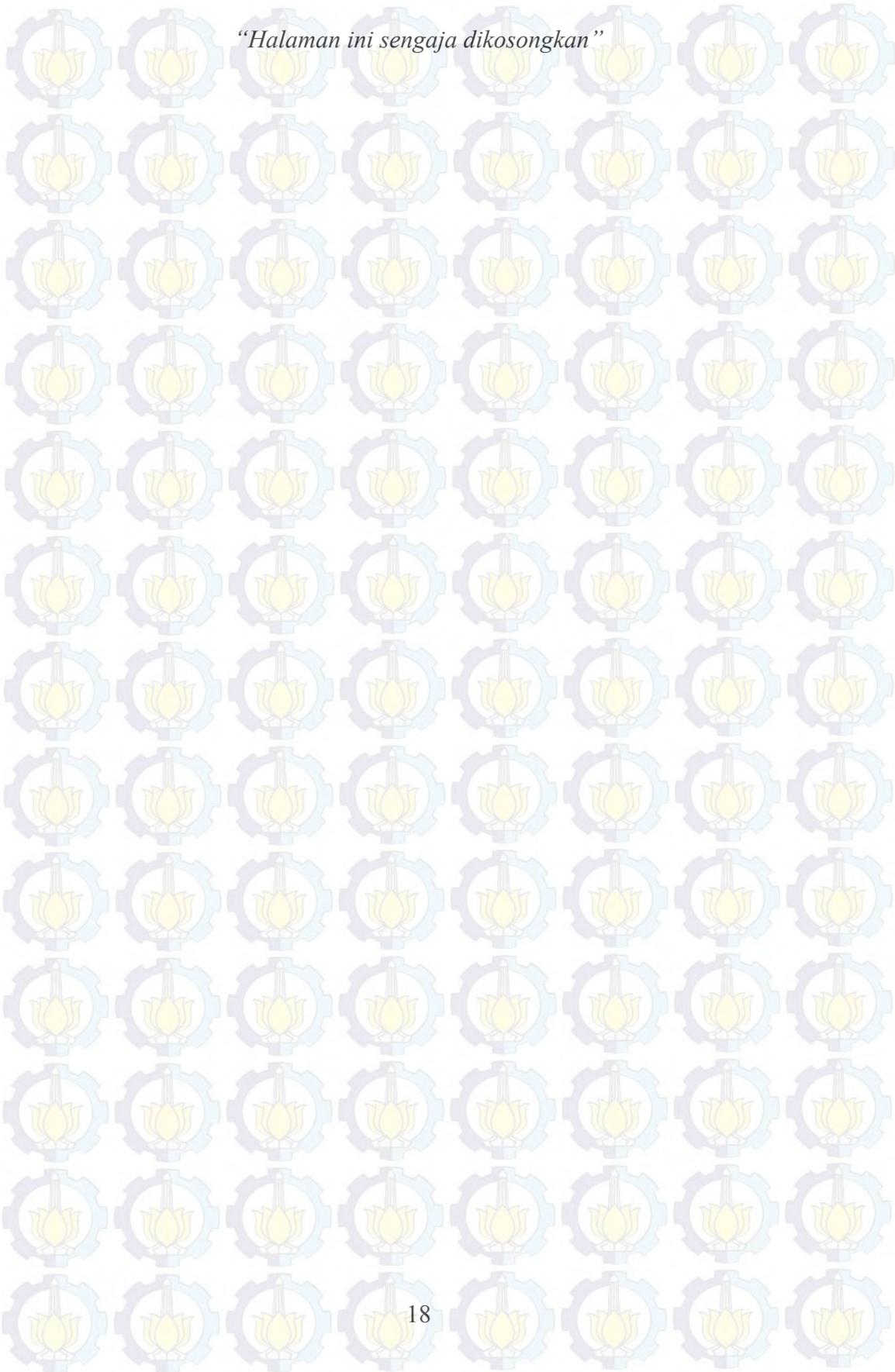
L : la longueur du voile

e : l'épaisseur du voile

M : la masse effective supportée par le voile

$\Gamma_d(f_0, \xi = 0,07)$: la valeur du spectre standard DSN79 en 5 %

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



CHAPITRE III

INVESTIGATION DES ESSAIS

3.1. Introduction

Comme décrit précédemment, cette étude permet de comparer les résultats numériques et expérimentaux qui ont été effectués. L'expérimental est mis en œuvre à l'aide du programme SAFE (Structures Armées Faiblement Elancées). Il reprend d'une campagne expérimentale qui a été menée dans le laboratoire d'ELSA (*European Laboratory for Structural Assesment*) en 1997-1998. Il y avait 13 voiles en béton armé dans cette campagne expérimentale, menée avec la méthode d'essai pseudo-dynamique.

Cet essai vise à comprendre les caractères des comportements des voiles en béton armé. A la différence de l'essai dynamique, la méthode pseudo-dynamique est une méthode hybride numérique ou expérimentale qui combine le calcul du déplacement de la structure et la mesure de la force utilisée pour imposer ce déplacement. Entre chaque série d'essais, les paramètres qui varient sont la proportion de renforcement des murs, la fréquence propre initiale et la charge verticale de confinement.

Afin de faciliter le travail de cette étude, on doit faire une méthodologie. La figure 3.1 montre la méthodologie de cette étude.

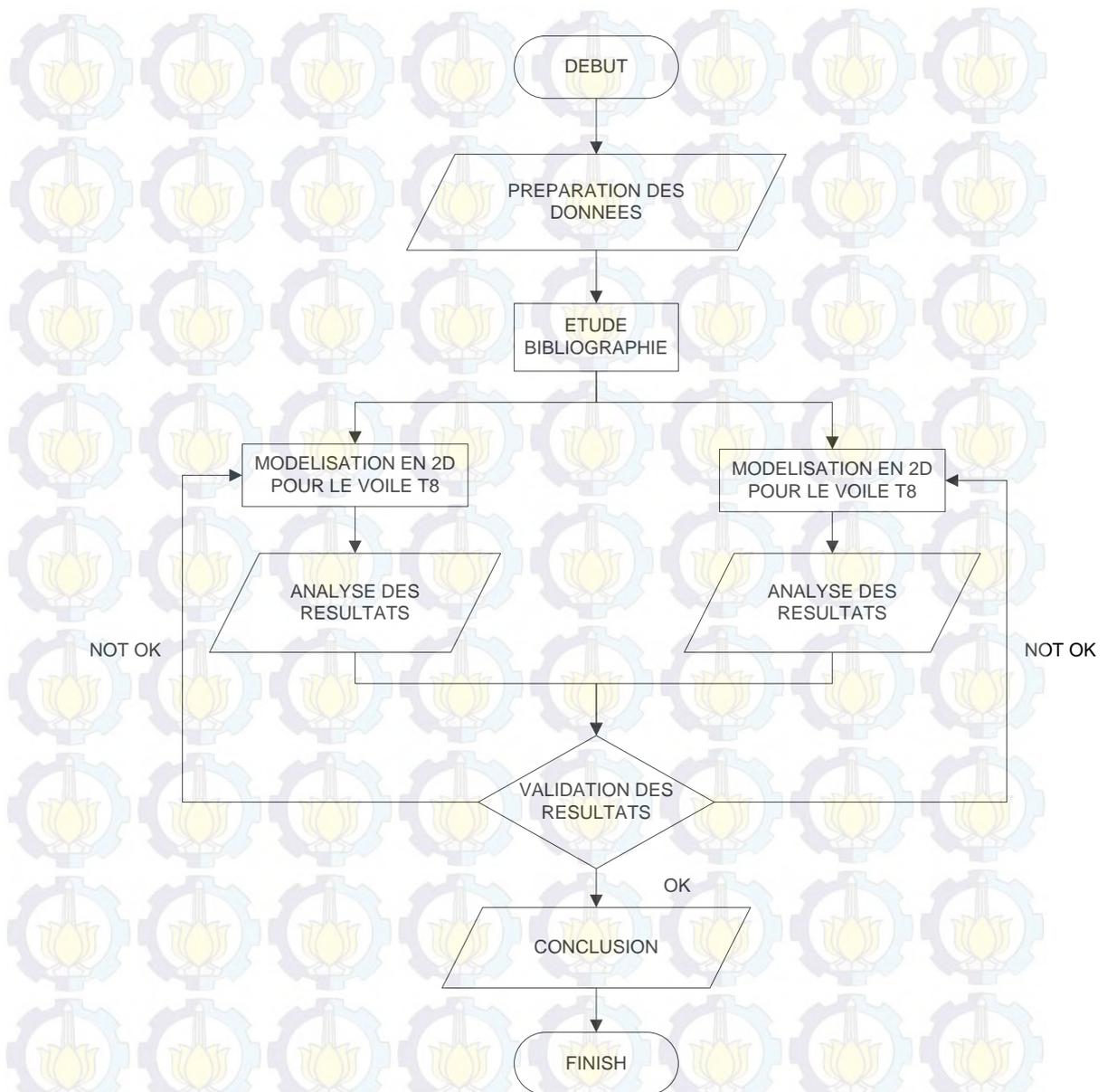


Figure 3.1 Méthodologie de Cette Etude

3.2. La Préparation des Données

Le premier étape de cette étude est la préparation des données provenant de plusieurs sources liées. Les sources peuvent inclure des livres, des revues scientifiques, des thèses, des mémoires, et ainsi de suite.

3.3. L'Etude Bibliographique

Pour la modélisation va bien, l'auteur a besoin d'étudier la littérature dans le sujet abordé dans cette thèse. En plus de la préparation de la

théorique, l'auteur doit également entreprendre une étude sur le type de programme par éléments finis utilisé, c'est-à-dire CAST3M2000.

3.4. Les Modélisations en 2D pour Le Voile T8 et Le Voile T13

3.4.1. Les Types des Voiles des Essais

Les deux types de voile pris en référence sont le voile T8 et le voile T13. Les deux voiles ont la même géométrie, mais il y a un renforcement du composite (CFRP) sur la surface du voile T13. D'une manière générale, le voile a une hauteur de 1,2 m, une largeur de 3 m, et une épaisseur de 0,2 m et un rapport entre d'armature horizontale et verticale de 0,4 %. La géométrie détaillée de ce voile peut être vue sur la figure 3.1 et puis les caractéristiques de ce voile sont détaillées dans le tableau 3.1.

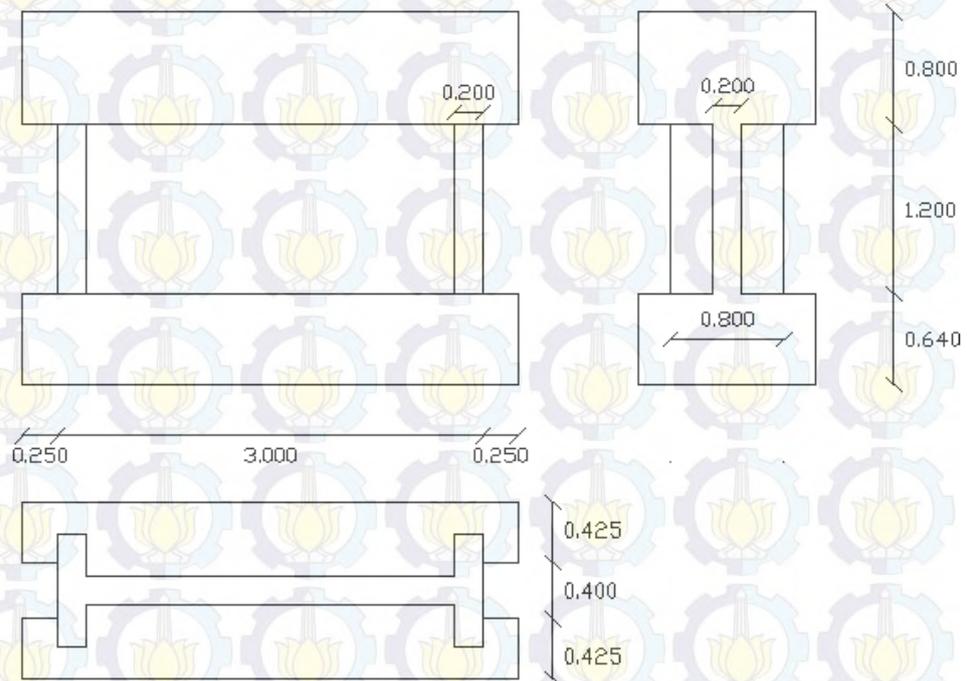


Figure 3.2 Géométrie du voile en béton armé sur le programme SAFE



Figure 3.3 Pose des matériaux composites sur le mur T13 (URGC, 1999)

Table 3.1 Caractéristique des Voiles T8 et T13

Test	e	ρ_v	ρ_h	M	K_{dim}	σ_n	τ_{dim}	f_d	f_o	k factor	α factor
	(m)	(%)	(%)	(kg)	(MN/m)	(MPA)	(MPA)	(Hz)	(Hz)		
T8	0,20	0,4	0,4	1252×10^3	7120	0,34	12	12	9,6	0,329	1 ; 1,4 ; 1,8
T13	0,20	0,4	0,4	1252×10^3	7120	0,34	12	12	10,1	0,329	1 ; 1,8 ; 2.6

Avec :

e : l'épaisseur

ρ_v : le ferrailage vertical

ρ_h : le ferrailage horizontal

M : la masse

K_{dim} : la raideur conventionnelle du mur

σ_n : la contrainte verticale moyenne issue du poids propre et du dispositif de chargement

τ_{dim} : le cisaillement moyen de dimensionnement

f_d : la fréquence de conception

f_0 : la fréquence initiale mesurée

k factor : le facteur d'échelle pour l'accélérogramme de conception

α factor : le facteur d'amplification

3.4.2. Les Descriptifs des Essais et Les Instruments d'Essais

Au cours des essais, la structure est considérée comme un système qui a un seul degré de liberté. Les valeurs de la masse et de l'amortissement sont spécifiées. La chronologie du test se déroule par pas de temps. Le déplacement calculé au pas de temps précédent est appliqué de façon quasi-statique au spécimen, puis la force induite par le déplacement imposé est mesurée et utilisée pour calculer le déplacement à imposer au pas de temps suivant (Brun, 2002).

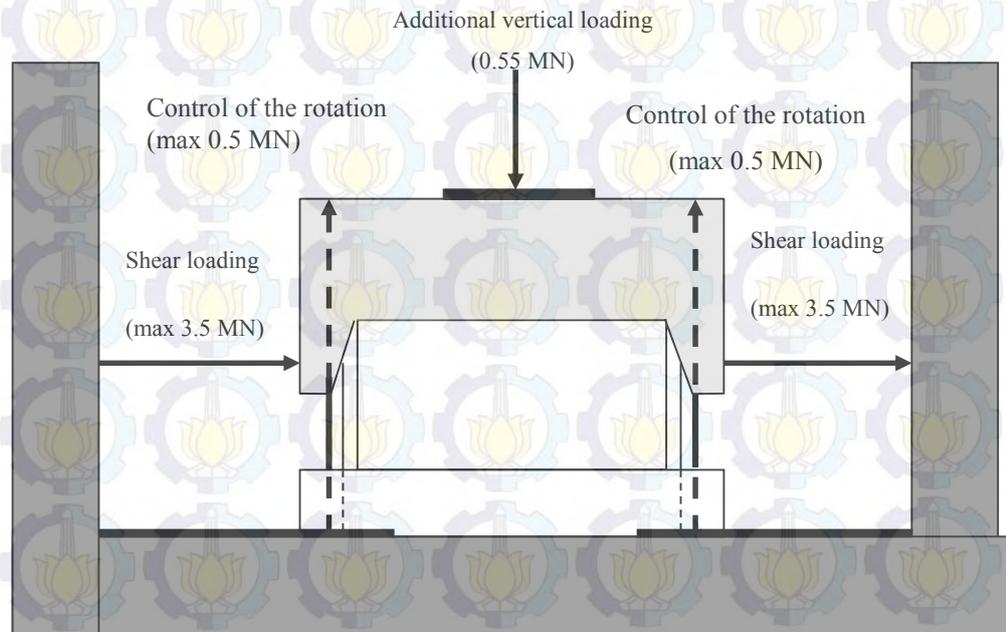


Figure 3.4 Dispositif de Chargement (UGRC, 1999)

La figure 3.4 représente le schéma de principe du dispositif de chargement. La charge horizontale est appliquée sur les deux côtés du pic du voile. Afin de soumettre la structure à un chargement le plus proche possible d'un cisaillement pur, la rotation de la longrine supérieure est bloquée grâce à un système de vérins. Un dispositif fixe la base afin de l'empêcher de glisser et de décoller.

Comme pour les tests précédents, les dernières secondes d'enregistrement du comportement des tests T8-1, T8-2 et T8-3 ont été consacrées à des vibrations libres. La procédure a été automatisée: la vibration commence à 17.25s et le test est stoppé à 20s, ou avant, si le niveau de vibration est trop faible. Contrairement au test de T8 précédent, la mise en vibrations libres à la fin du test n'a pas été effectuée. Les tests T13-1 et T13-2 ont donc été interrompus aux alentours de 17.25 s pour une valeur du déplacement voisine de zero.

Les tests de PSD sur les voiles T8 et T13 sont effectuées trois fois en faisant varier l'intensité de l'accélérogramme nominal. L'entrée sismique, prise comme référence dans la réalisation du test, correspond à l'amortissement de 5 % dans une série d'accélérogramme synthétiques fournie par EDF. L'accélérogramme utilisé est un accélérogramme de synthèse qui affiche la réponse en accélération de crête à une fréquence d'environ 4 Hz qui peut être vu dans la figure 3.5.

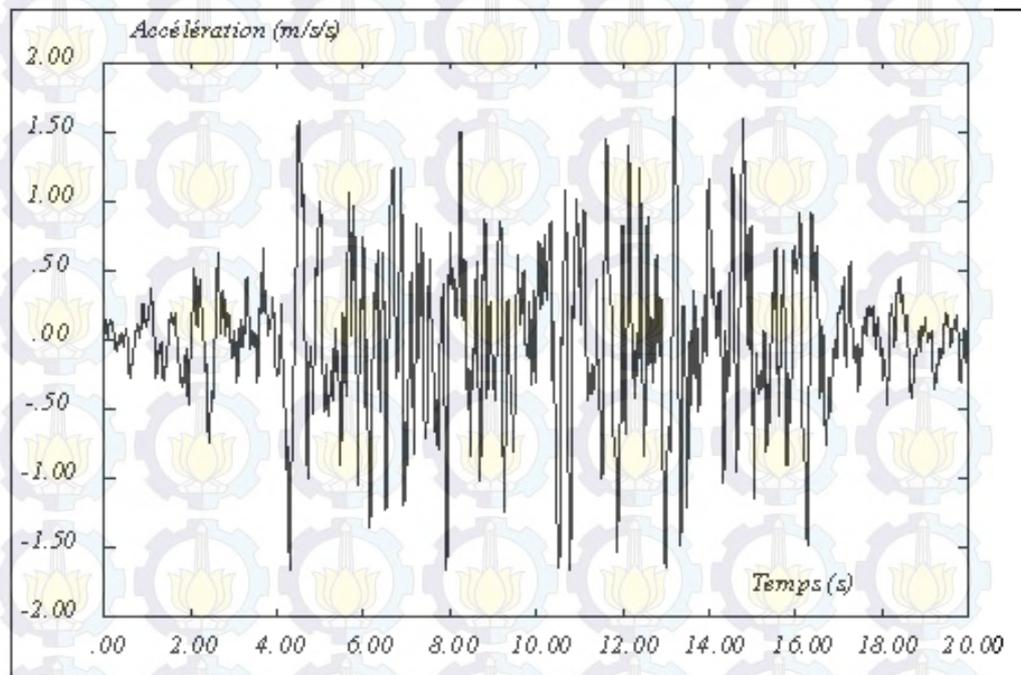


Figure 3.5 Accélération de référence pour le test T8 et T13 (Brun, 2002)

3.5. L'Analyse des Résultats

Les résultats de l'analyse sont présentés sous la forme de courbe:

- le déplacement du voile
- la force de cisaillement du voile
- la déformation du béton
- la déformation de l'acier
- la plastification de l'acier
- le courbe d'hystérésis.

3.6. La Validation des Résultats

Après faire l'analyse des résultats, l'étape suivante est faire la validation des résultats. La validation se faite en comparant les résultats de la modélisation numérique avec les résultats expérimentaux qui a été fait par avant en 1997-1998. Cette sous-section présente synthétiquement les résultats expérimentaux sur les voiles T8 et T13.

3.6.1. Le Voile T8

La figure 3.6 présente l'accélérogramme pour le test T8. La figure 3.7 et 3.8 présentent le déplacement en tête du voile T8 et l'effort tranchant du voile T8. Le déplacement maximal est 1,09 cm et le déplacement minimal est -1,180 cm. Tandis que pour l'effort tranchant, l'effort maximal et l'effort minimal sont 392000 kg et -385000 kg respectivement.

La figure 3.9 montre les courbes entre effort tranchant et déplacement en tête du voile pour chacun des chargements de T8. Le mur se fissure légèrement durant T8-1, plus massivement au cours de T8-2, et s'endommage de façon importante et est détruit lors de T8-3.

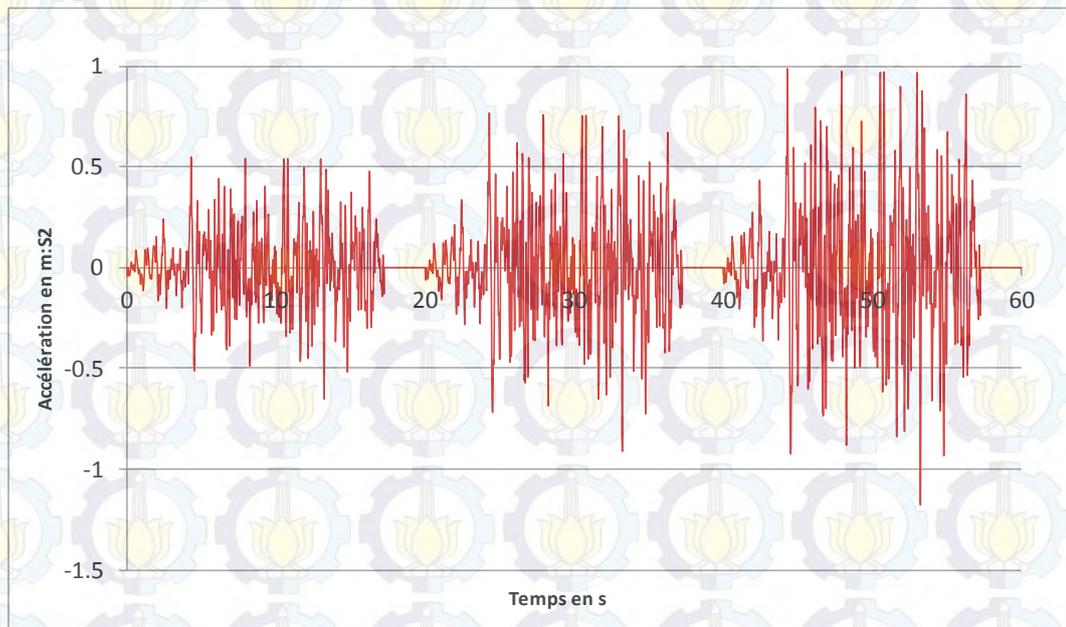


Figure 3.6 Accélérogramme pour le test SAFE T8

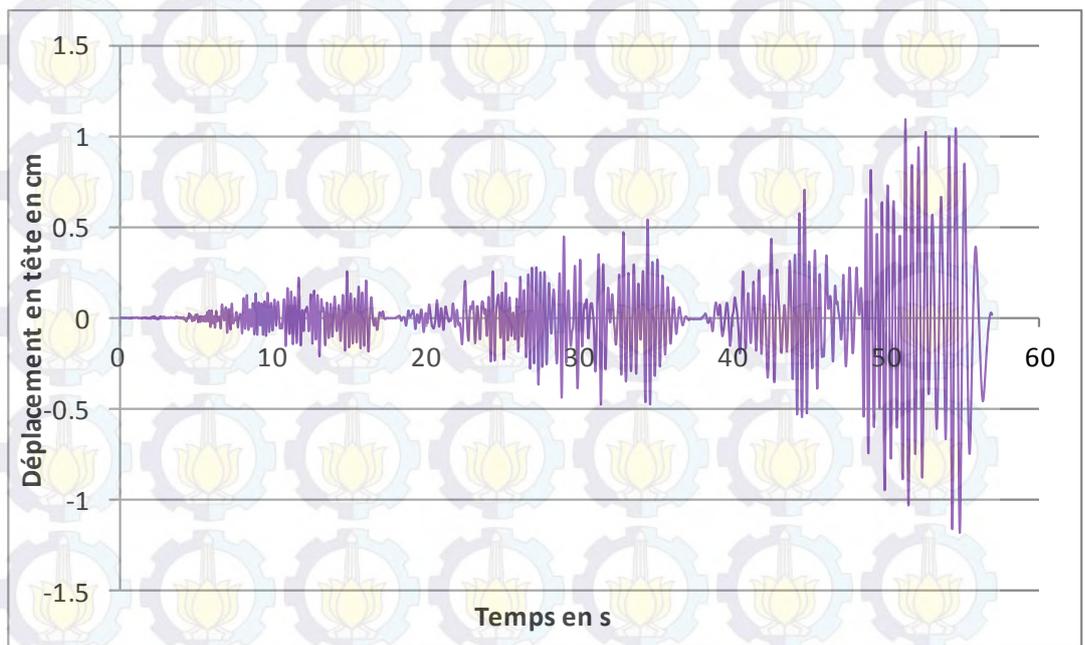


Figure 3.7 Déplacement en tête du Voile T8

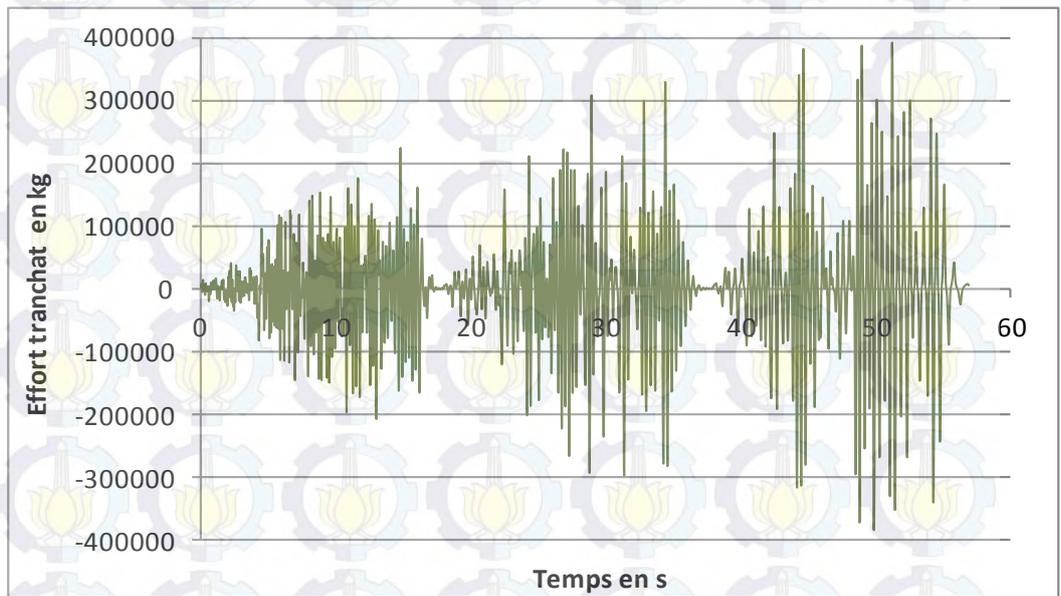


Figure 3.8 Effort tranchant du voile T8

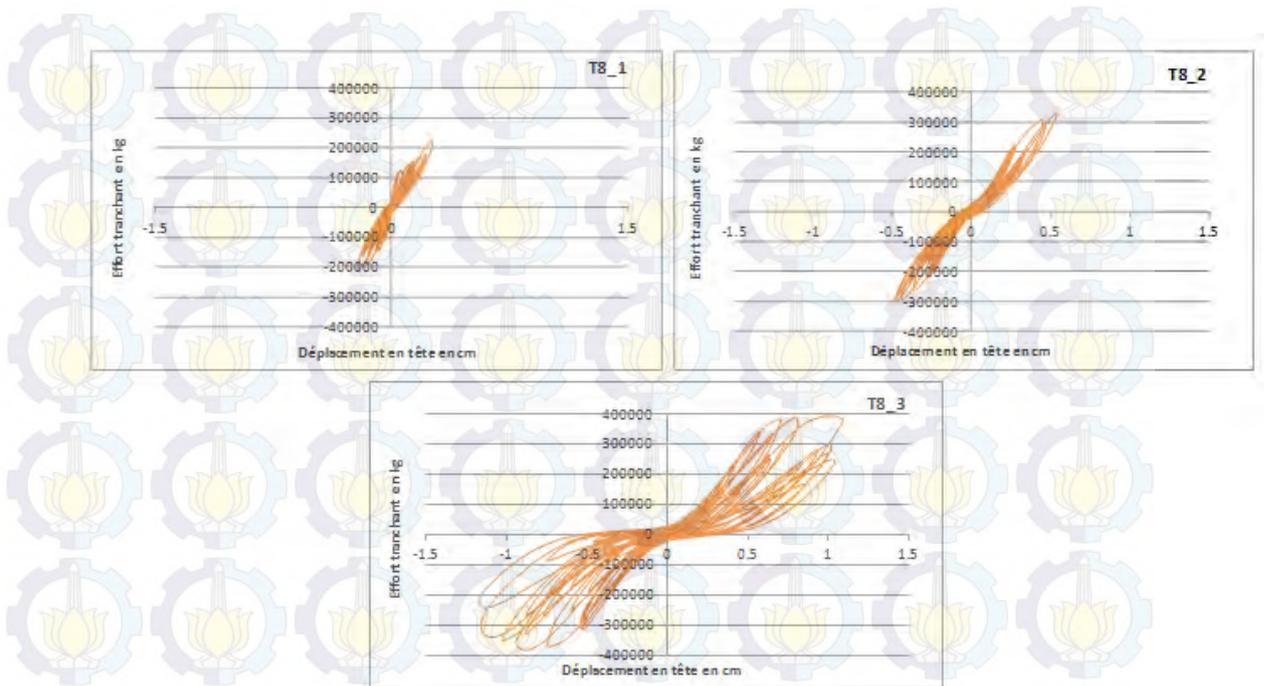


Figure 3.9 Courbes effort tranchant-déplacement en tête pour le test T8

3.6.2. Le Voile T13

La figure 3.10 présente l'accélérogramme pour le test T13. Dans ces essais, le graphique montre la relation entre force et déplacement sur le voile T13. Le mur reste pratiquement intact durant T13-1, se fissure légèrement durant T13-2, se fissure massivement et détruit suite au décollement des composites durant T13-3.

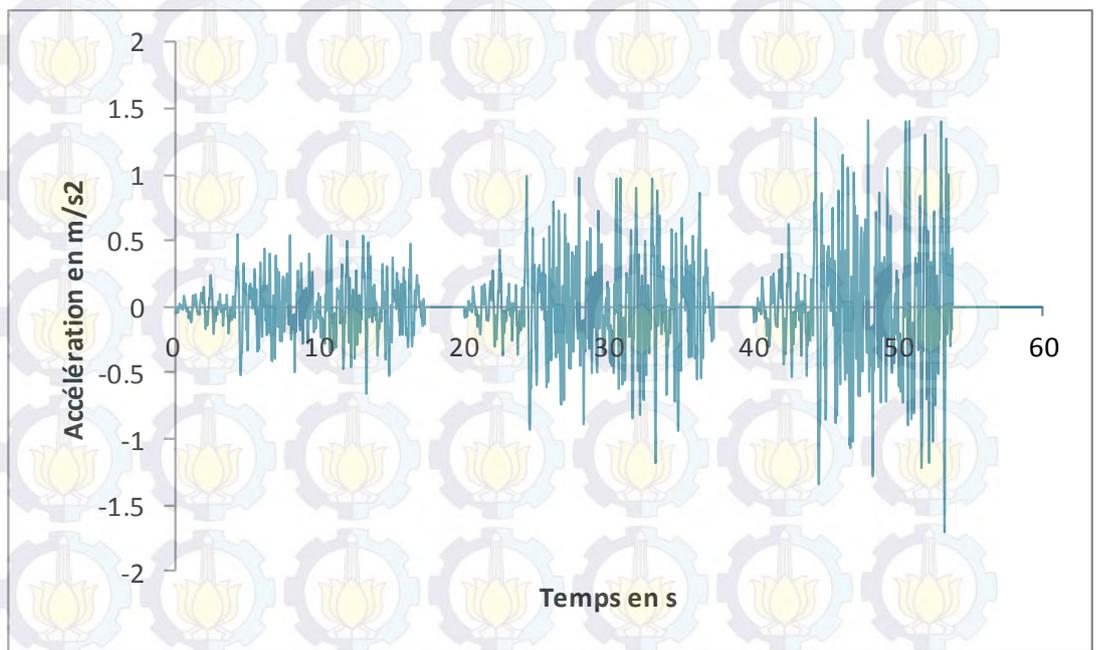


Figure 3.10 Accélérogramme pour le test SAFE 13

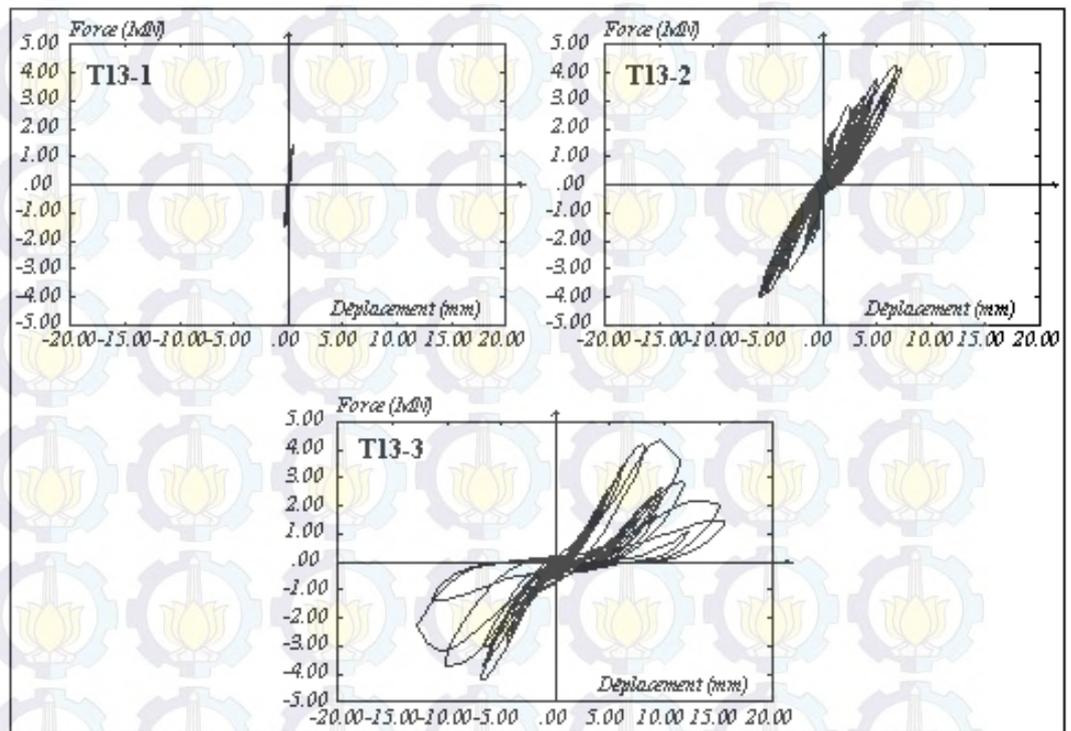
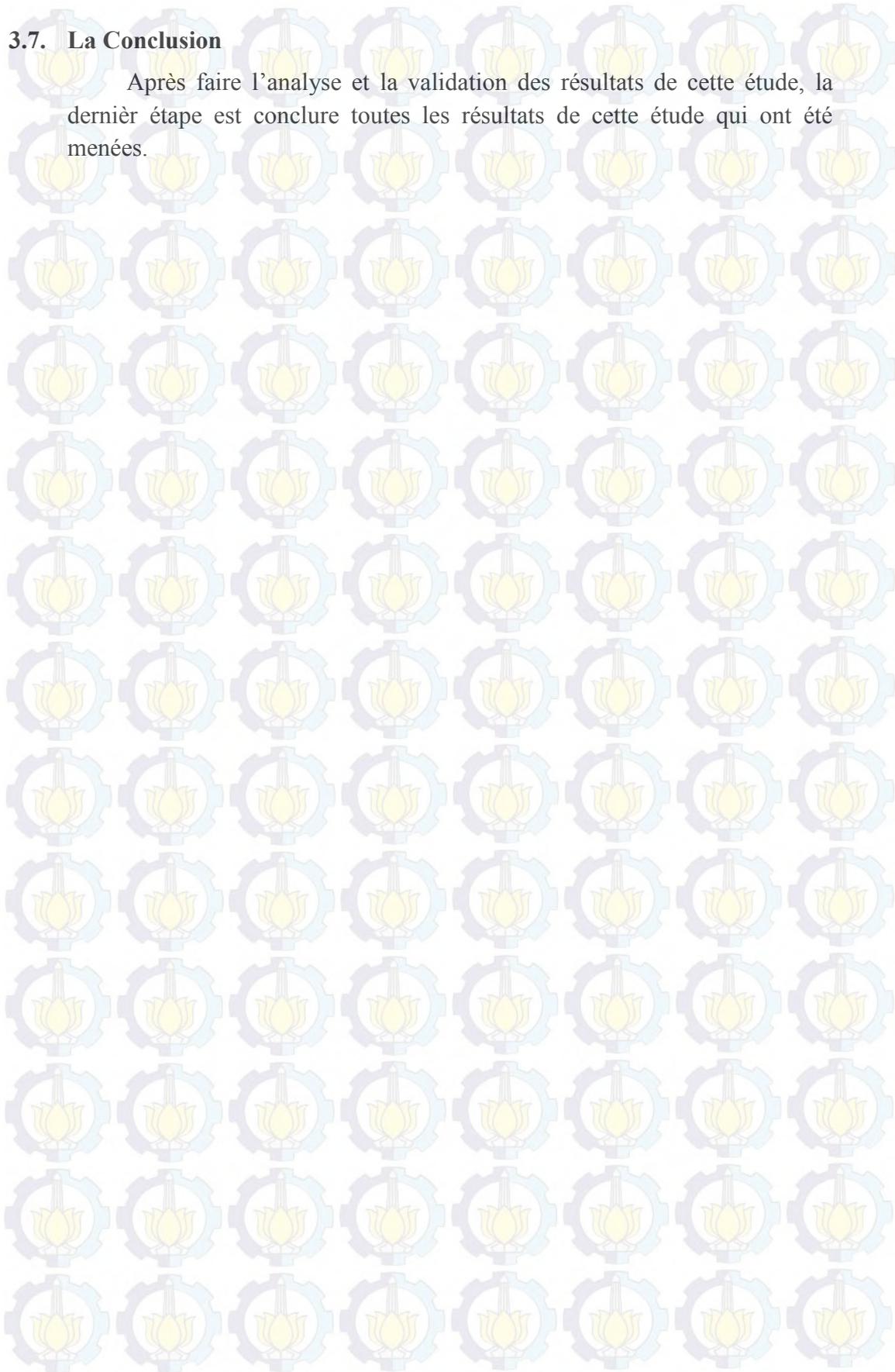


Figure 3.11 Courbes effort tranchant-déplacement en tête pour le test T13
(Brun, 2002)

3.7. La Conclusion

Après faire l'analyse et la validation des résultats de cette étude, la dernière étape est conclure toutes les résultats de cette étude qui ont été menées.



CHAPITRE IV

MODELISATION NUMERIQUE

4.1 Généralités

Dans ce chapitre, on analyse la modélisation numérique du voile en béton armé T8 et T13. Les points discutés en détail sont les caractéristiques du modèle de chaque voile et les résultats et l'analyse de chaque voile.

4.2 Le Voile T8

4.2.1 Les Hypothèse de Caractéristique de Géométrie

Contrairement au programme SAFE, la modélisation à l'aide de CAST3M 2000 se fait uniquement sur le voile sans les longrines supérieure et inférieure. En plus de la modélisation du béton, on modélise aussi les armatures verticales et horizontales du voile. Elles sont divisées en deux, à savoir l'armature du voile et l'armature de la nervure.

4.2.2 Les Hypothèse de Caractéristique des Matériaux

Le béton utilisé pour la modélisation est le Béton_INSA. Ce béton a été développé à l'INSA de Lyon en code CAST3M 2000. Il a été développé dans le cadre de la théorie de la plasticité dans la condition contrainte plane. Le comportement du béton fissuré est abordé par le concept de la fissuration répartie en considérant le matériau fissuré comme un milieu continu (Ile, 2000). Les caractéristiques du béton utilisé sont exposées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Caractéristiques du Béton

Module de Young (YOUNG)	218250 Kg /cm ²
Coefficient de Poisson (NU)	0,20
Contrainte ultime en compression simple (LCS)	291 Kg /cm ²
Déformation à la rupture en traction (EPUT)	0,00035
Déformation à la rupture en compression (EMAX)	0,006
Facteur transfert cisaillement (FTC)	0,30

Le modèle de l'acier utilisé est un modèle élasto-plastique jusqu'à écoulement positif. Les tableaux 4.2 et 4.3 montrent les caractéristiques de l'armature utilisée.

Tableau 4.2 Caractéristiques d'acier (voile)

Voile	Verticale	Horizontale
Module de Young (YOUNG)	2000000 Kg /cm ²	2000000 Kg /cm ²
Coefficient de Poisson (NU)	0,0	0,0
Coefficient de dilatation thermique (ALPH)	0,00001	0,00001
Contrainte de plasticité (STSY)	5944 Kg /cm ²	5944 Kg /cm ²
Déformation ultime (EPSU)	0,241	0,241
Contrainte ultime (STSU)	6719 Kg /cm ²	6719 Kg /cm ²
Déformation de début d'écroutissement (EPSH)	0,002972	0,002972
Rapport de la longueur entre deux renforts de cisaillement avec le diamètre de la barre (FALD)	5,0	5,0
Coefficient A6 (A6FA)	620	620
Coefficient C (CFAC)	0,5	0,5
Coefficient A (AFAC)	0,006	0,006
Coefficient RO (ROFA)	20	20
Rapport de la rigidité d'écroutissement cyclique avec la rigidité élastique (BFAC)	0,0021	0,0021
Coefficient A1 (A1FA)	18,5	18,5
Coefficient A2 (A2FA)	0,15	0,15

Tableau 4.3 Caractéristiques d'Acier (Nervure)

Nervure	Verticale	Horizontale
Module de Young (YOUNG)	2000000 Kg /cm ²	2000000 Kg /cm ²
Coefficient de Poisson (NU)	0,0	0,0
Coefficient de dilatation thermique (ALPH)	0,00001	0,00001
Contrainte de plasticité (STSY)	5730 Kg /cm ²	5944 Kg /cm ²
Déformation ultime (EPSU)	0,267	0,241
Contrainte ultime (STSU)	6500 Kg /cm ²	6719 Kg /cm ²
Déformation de début d'écroutissage (EPSH)	0,002865	0,002972
Rapport de la longueur entre deux renforts de cisaillement avec le diamètre de la barre (FALD)	5,0	5,0
Coefficient A6 (A6FA)	620	620
Coefficient C (CFAC)	0,5	0,5
Coefficient A (AFAC)	0,006	0,006
Coefficient RO (ROFA)	20	20
Rapport de la rigidité d'écroutissage cyclique avec la rigidité élastique (BFAC)	0,0021	0,0021
Coefficient A1 (A1FA)	18,5	18,5
Coefficient A2 (A2FA)	0,15	0,15

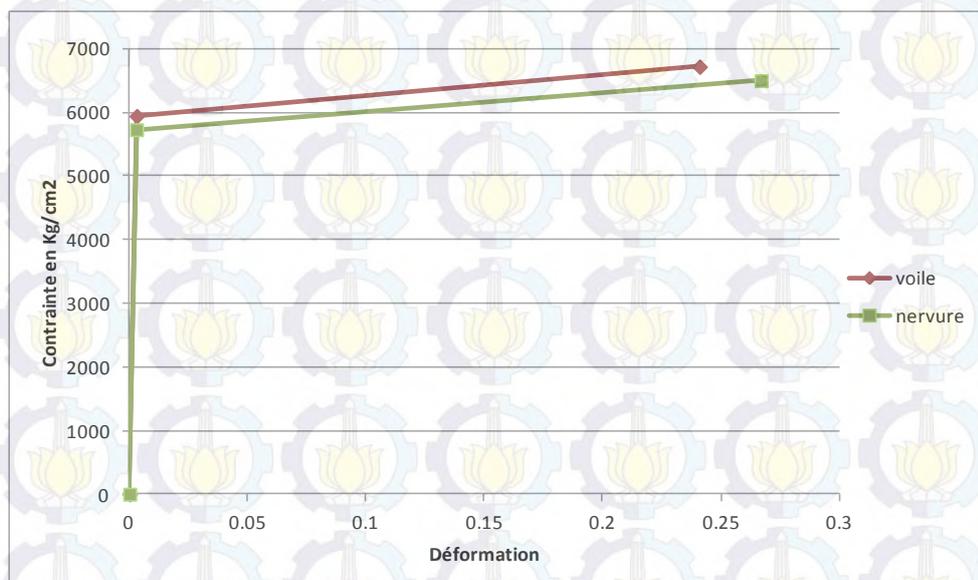


Figure 4.1 Comportement d'Acier

4.2.3 Les Hypothèse de la Discrétisation des Maillages

Une analyse bidimensionnelle de voile en béton armé est réalisée dans le code de calcul par éléments finis CAST3M. Deux types des matériaux, utilisés pour les maillages, sont le béton et l'acier.

- Le Béton

Le maillage du béton est modélisé avec un modèle de quadrilatéraux 4 nœuds (QUA4).

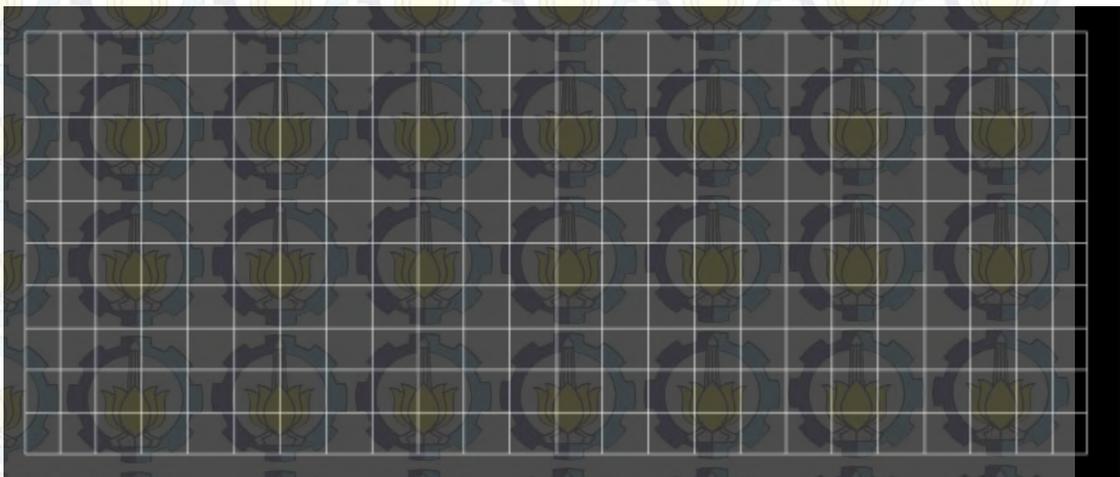


Figure 4.2 Maillage du béton

- L'acier

Comme mentionné précédemment, les renforts en acier sont divisés en 4, à savoir le renforcement horizontal sur le voile, le renforcement verticale sur le voile, le renforcement horizontal sur la nervure, et le renforcement vertical sur la nervure. Le maillage de l'acier est modélisé avec un modèle linéaire 2 nœuds (SEG2). Les nœuds d'acier doivent correspondre à des nœuds du béton afin de répondre à la configuration réelle de renfort tout en adoptant l'hypothèse de liaison parfaite.



Figure 4.3 Maillage d'acier

Eksperimental yang digunakan sebagai bahan validasi dari tesis ini adalah hasil eksperimental yang dilakukan oleh Kurdyashov dkk, 2012. Eksperimental ini dilakukan dengan melakukan pengujian terhadap pelat beton bertulang satu arah. Pelat beton tersebut dipanaskan pada bagian bawah dengan suhu yang berubah-ubah sesuai dengan waktu. Pemanasan dilakukan mengikuti kurva api standar sesuai dengan ISO 834. Berikut adalah skema eksperimen yang dilakukan.

Dans les calculs numériques sur CAST3M 2000, on utilise la procédure pas à pas parce qu'on modélise le problème d'une façon non-linéaire.

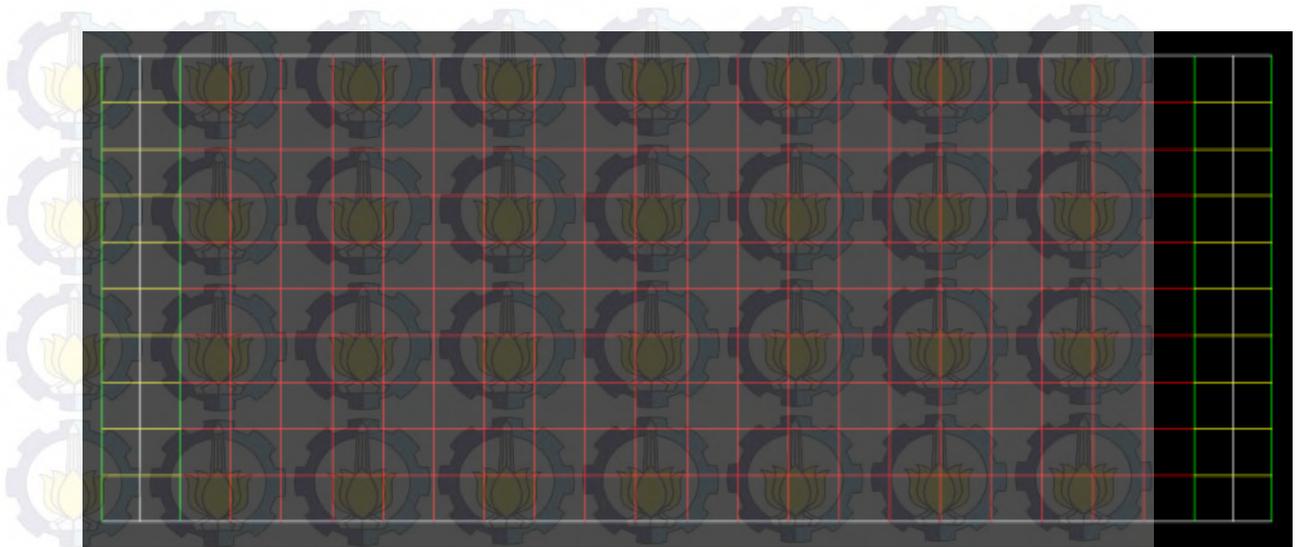
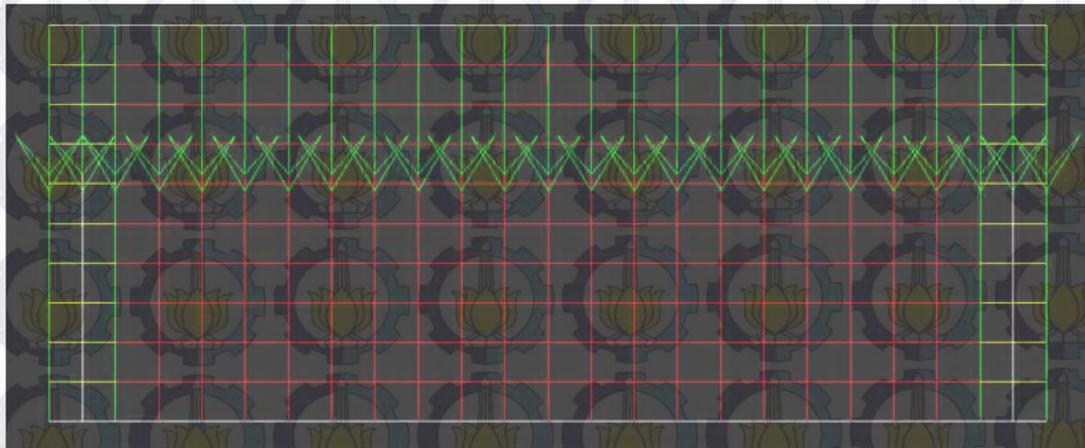


Figure 4.4 Maillage Total du Voile en Béton Armé

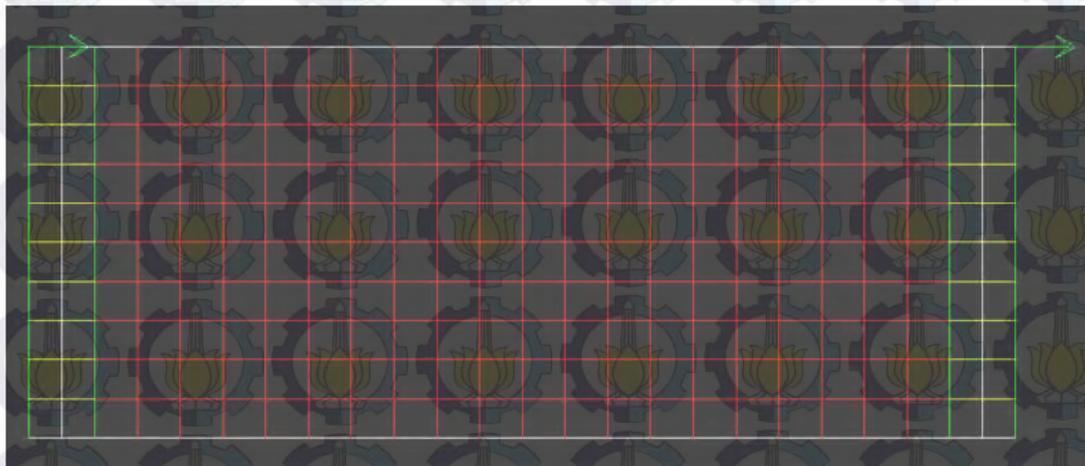
4.2.4 Les Hypothèse des Chargements

Le voile modélisé est seulement l'âme du voile sans les longrines supérieure et inférieure. Donc, on doit bloquer le bas du voile de sorte qu'il ne se déplace pas horizontalement et verticalement. En outre, à l'extrémité supérieure, on fait la modélisation d'une manière telle qu'il n'y a pas de rotation dans la partie supérieure du voile.

Les chargements sur cette modélisation sont les chargements verticaux et horizontaux. Le chargement vertical est le chargement propre dû à la masse propre (la masse de la longrine supérieur et du dispositif) de 25000 kg. Tandis que, pour le chargement horizontal, il peut être divisé en un chargement quasi-statique et un chargement pseudo-dynamique. Il y a deux types de chargements quasi-statiques, à savoir le chargement en force et le chargement en déplacement. Dans cette modélisation, le déplacement imposé et la force imposée sont appliqués sur le point pic du voile en direction horizontale.



(a)



(b)

Figure 4.5 (a) Chargement Vertical sur le Voile (b) Force Imposée sur le Voile

4.2.1 Les Résultats et l'Analyse

4.2.1.1 Le Chargements Quasi-Statique

La figure 4.6 suivante est une courbe de force-déplacement obtenue à partir de la force imposée. On peut voir que plus la force imposée est grande, plus le déplacement est grand. La force est proportionnelle au déplacement. La force maximale est 348000 kg pour un déplacement de 0,58 cm. Le signe moins indique que la direction de la force résultat est opposé à la direction de la force imposée appliquée sur le voile.

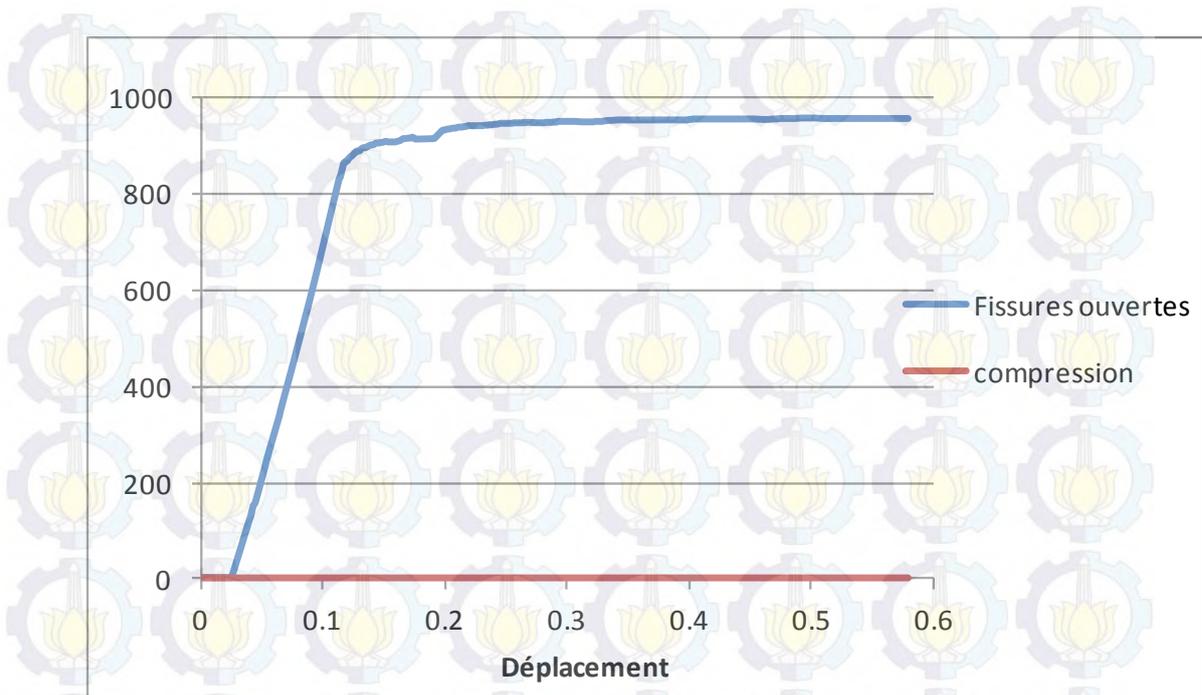


Figure 4.7 Points affectés par la Fissuration et la Compression

La figure 4.7 présente le nombre de points affectés par la fissuration (traction) et la compression. Le béton est un matériau qui est résistant à la compression mais faible par rapport à la traction. Par conséquent, le nombre de points affectés par la fissuration est beaucoup plus élevé que la compression.

La figure 4.8 montre les points affectés par la fissuration. La fissure 1 est perpendiculaire à la direction de la contrainte de traction principale majeure. La fissure 2 est perpendiculaire à la fissure 1.

La figure 4.9 représente la déformation minimale dans le béton. La déformation est proportionnelle au déplacement. Plus la valeur de la déformation effort, plus la valeur du déplacement est élevée. La déformation maximale est 0,00424 pour un déplacement de 0,58 cm.

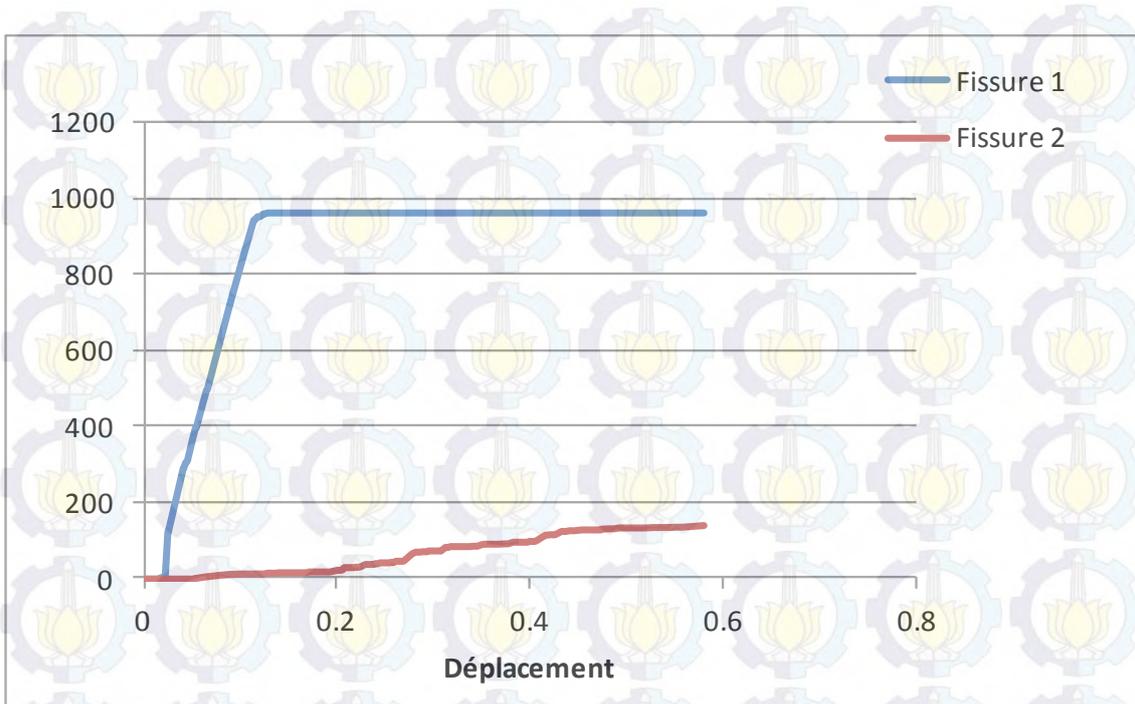


Figure 4.8 Points Affectés par la Fissuration

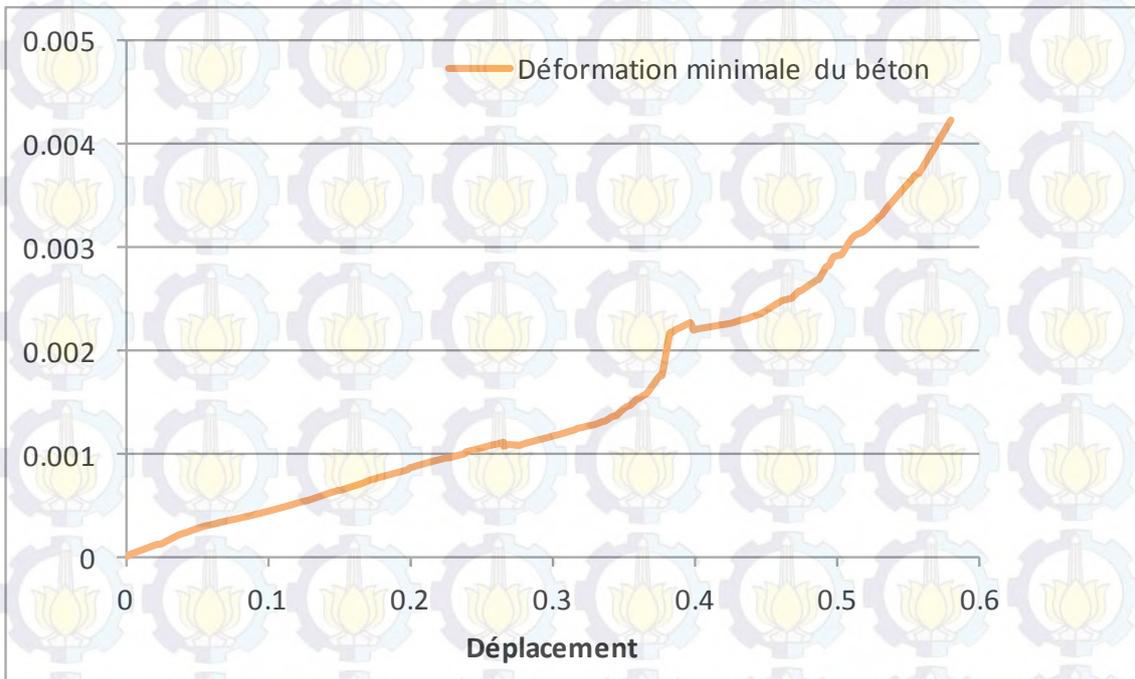


Figure 4.9 Déformation Minimale du Béton

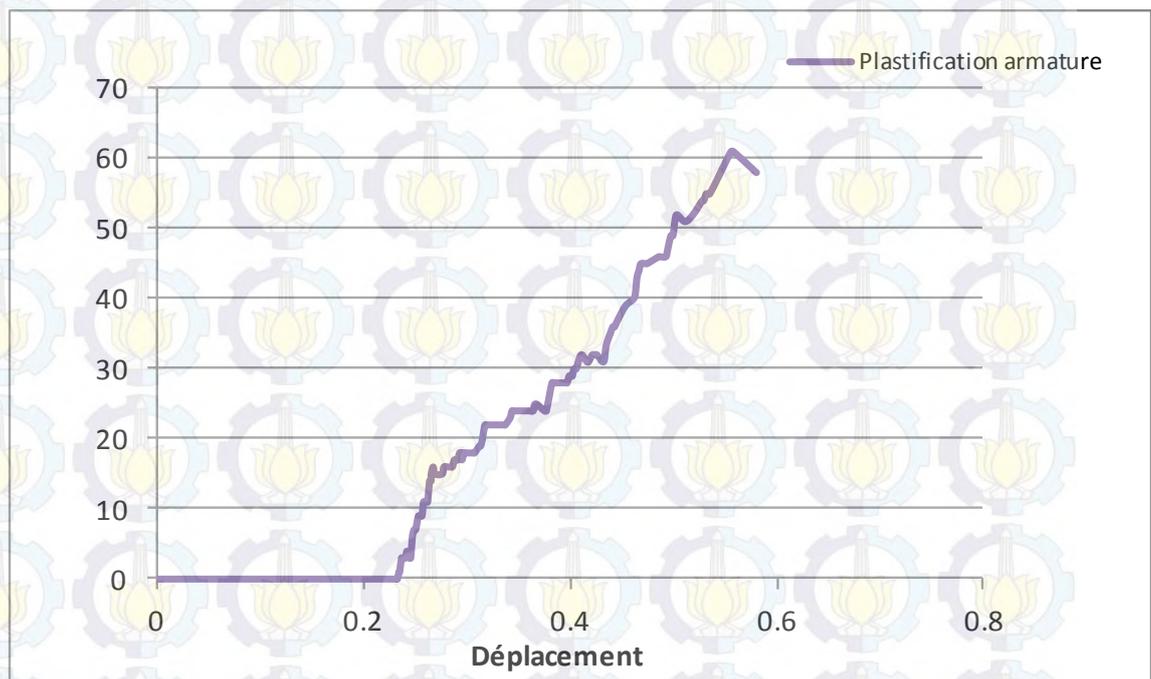


Figure 4.10 Plastification d'Armature

L'armature subit la plastification lorsque la traction à laquelle elle est soumise est supérieure à sa limite de résistance. La figure 4.10 représente le nombre de points de l'armature qui a subi la plastification. Le déplacement augmente avec l'augmentation du nombre de points de l'armature affectés par la plastification.

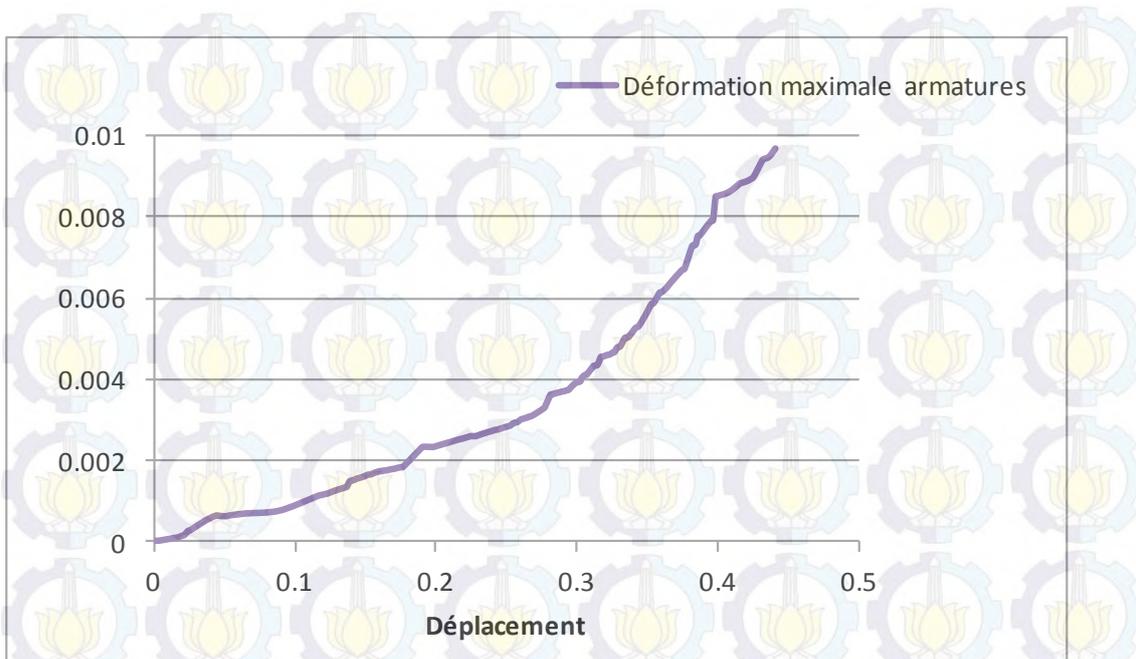


Figure 4.11 Déformation d'armature

La figure 4.11 montre la déformation maximale dans l'armature. La déformation est proportionnelle au déplacement. La déformation maximale est 0,00969 pour un déplacement de 0,441 cm.

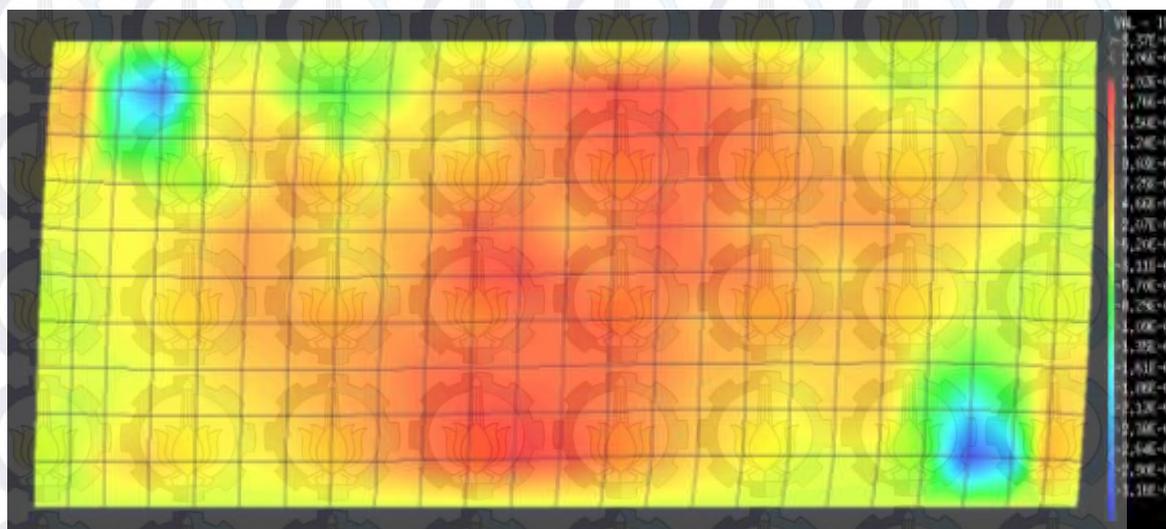


Figure 4.12 Déformation Horizontales dans le Béton

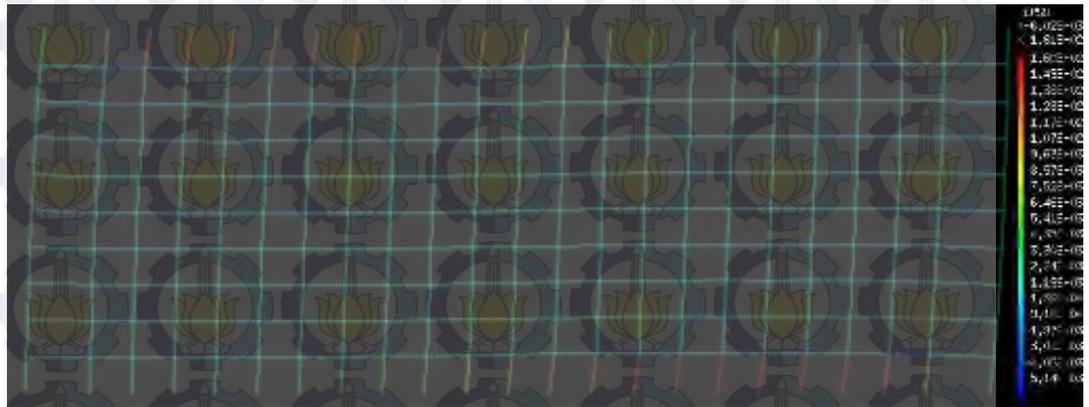


Figure 4.13 Déformation dans les Armatures

La figure 4.12 montre la déformation horizontale dans le béton. Dans la déformation horizontale du béton, la déformation maximale se situe sur le centre du voile. En général, il existe une fissure diagonale dans le centre du voile, due à la force horizontale imposée sur le voile. La déformation horizontale maximale est environ 0,002. La déformation maximale est environ 0,016 et se situe sur l'armature supérieure et sur l'armature inférieure du voile.

- Le déplacement imposé



Figure 4.14 Effort et Déplacement du Voile

La figure 4.14 est une courbe de force-déplacement obtenue à partir du déplacement imposé. La force maximale est 349000 kg pour un déplacement de 0,598 cm.

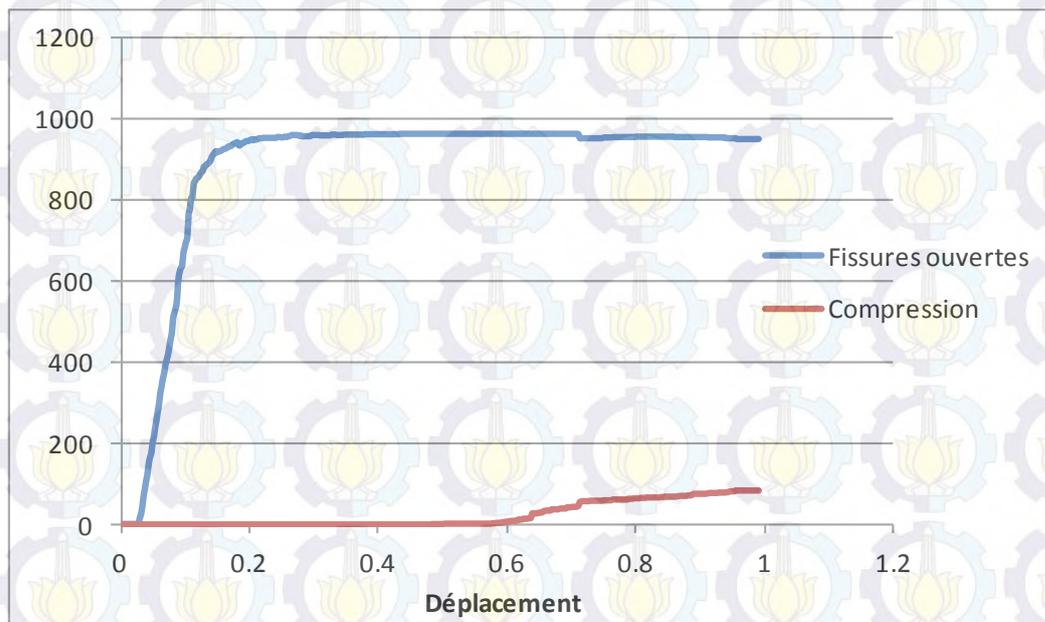


Figure 4.15 Points Affectés par la Fissuration et la Compression

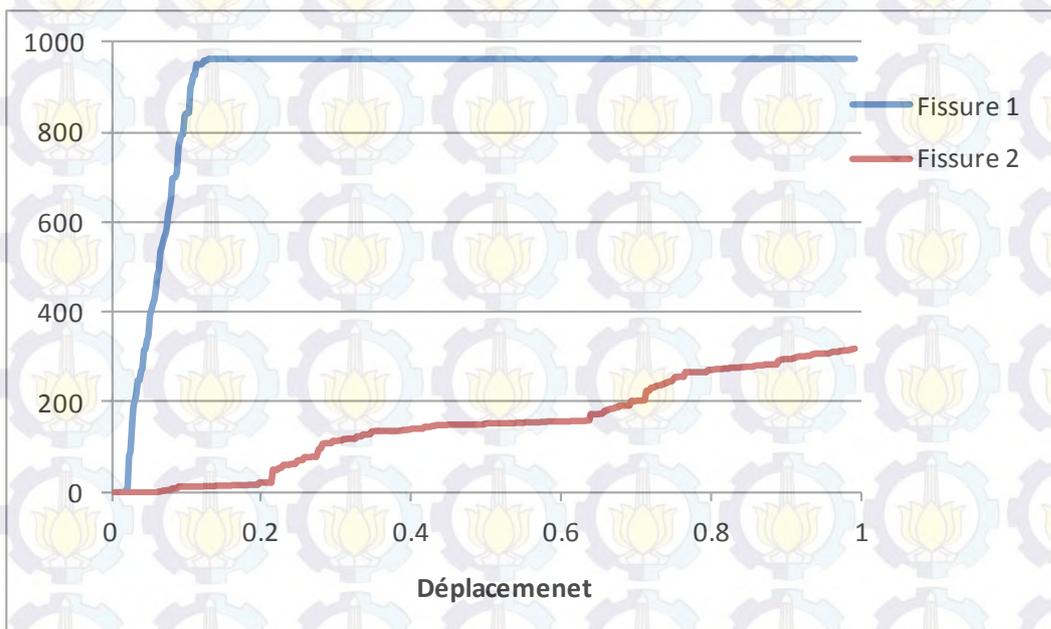


Figure 4.16 Points Affectés par la Fissuration

Même avec la force imposée, le nombre de points affectés par la fissuration est beaucoup plus élevé par rapport à la compression. En outre, le nombre de points affectés par la fissure 1 est beaucoup élevé par rapport à la fissure 2.

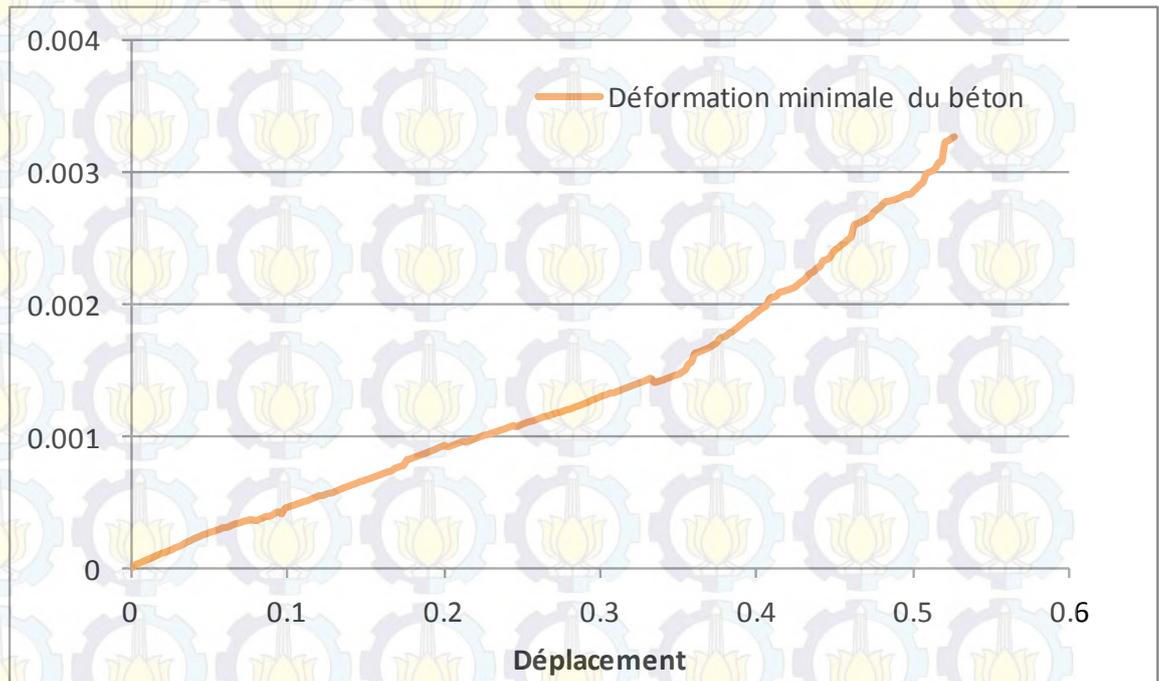


Figure 4.17 Déformation Minimale du Béton

La figure 4.17 représente la déformation minimale dans le béton. La déformation maximale est 0,00327 pour un déplacement de 0,526 cm. La figure 4.18 représente le nombre de points de l'armature qui a subi la plastification.

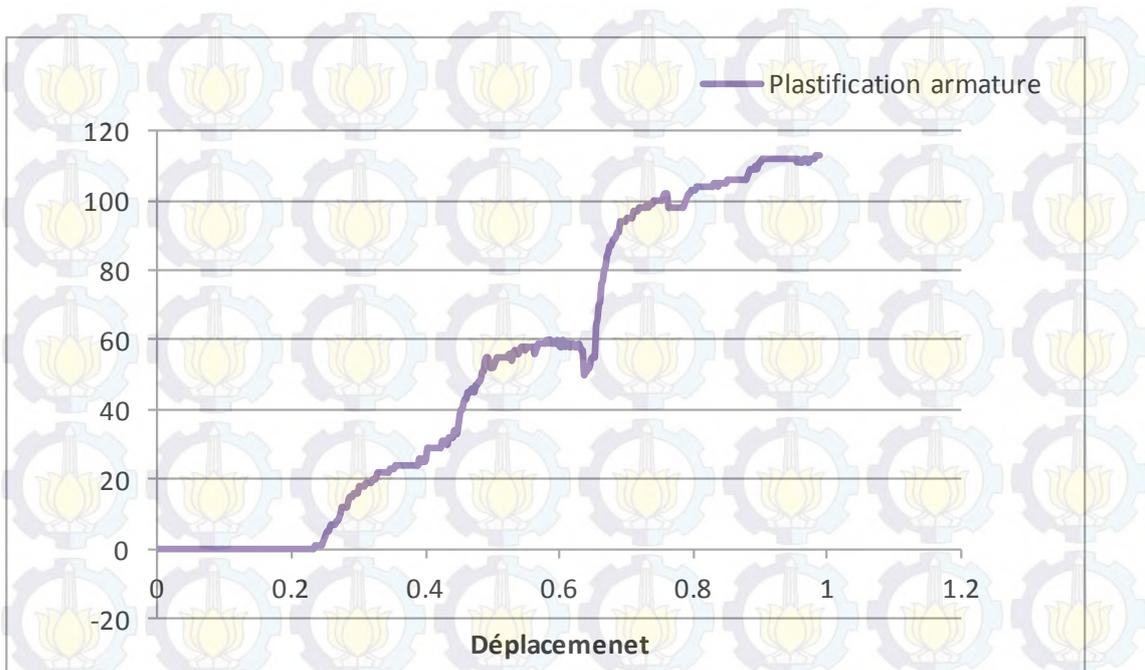


Figure 4.18 Plastification d'Armature

La figure 4.19 montre que la déformation de l'armature verticale est supérieure à la déformation de l'armature horizontale. C'est parce que dans cette modélisation, la force horizontale est plus dominante que la force verticale. L'armature qui détient la force horizontale (l'armature verticale) subit une plus grande déformation.

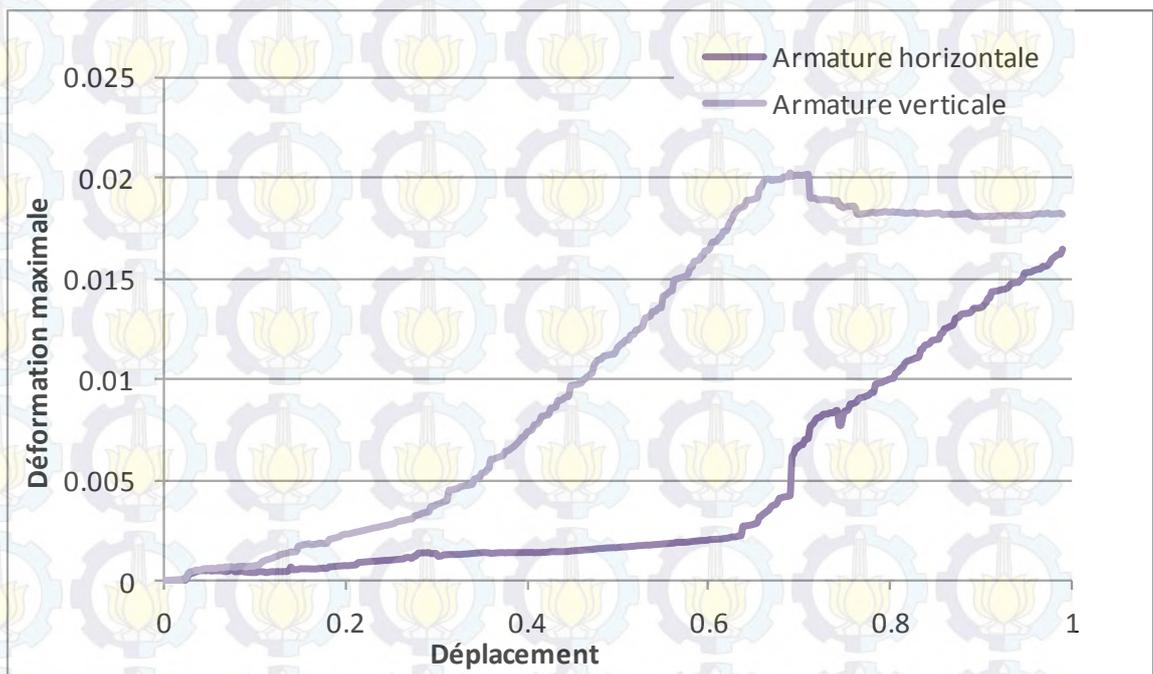


Figure 4.19 Déformation d'Armature Horizontale et Verticale

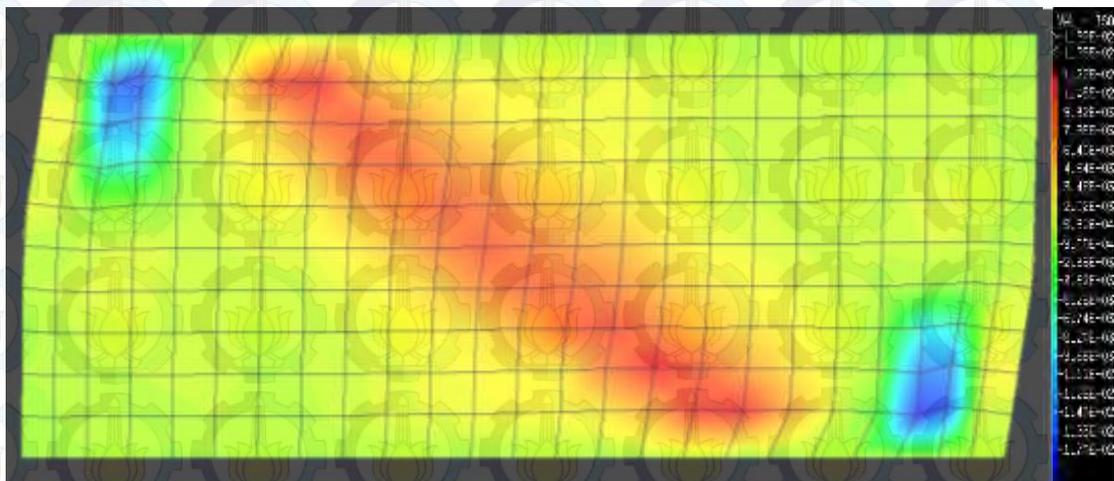


Figure 4.20 Déformation horizontale dans le béton

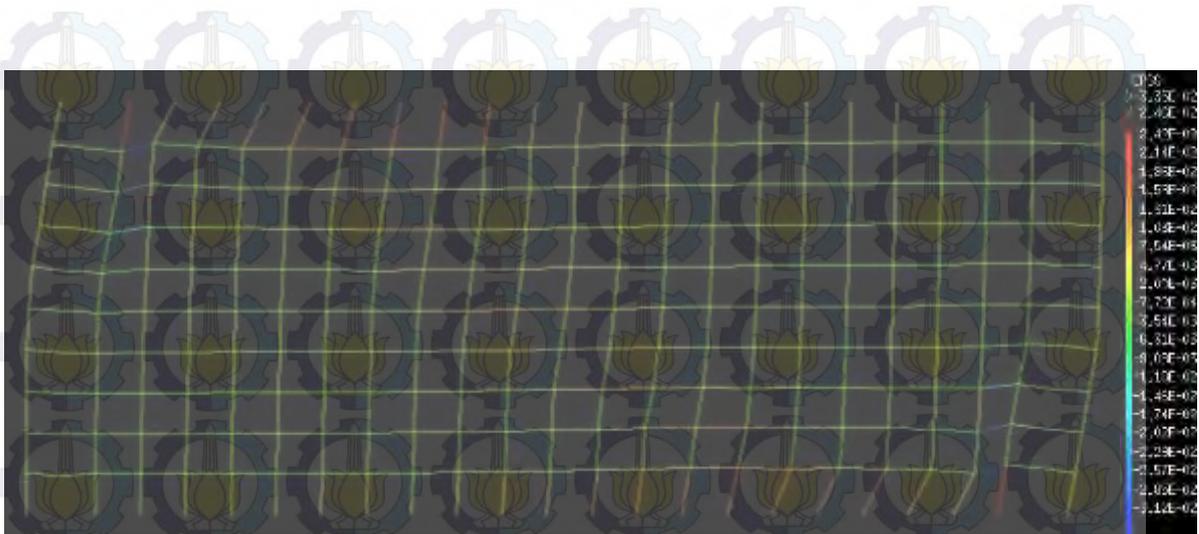


Figure 4.21 Déformation dans les Armatures

La figure 4.20 montre la déformation horizontale dans le béton. La déformation horizontale maximale est environ 0,0122. La figure 4.21 montre la déformation dans l'armature. La déformation maximale est environ 0,0242 et elle se situe sur l'armature supérieure et l'armature inférieure du voile.

4.2.1.2 Le Chargement Pseudodynamique

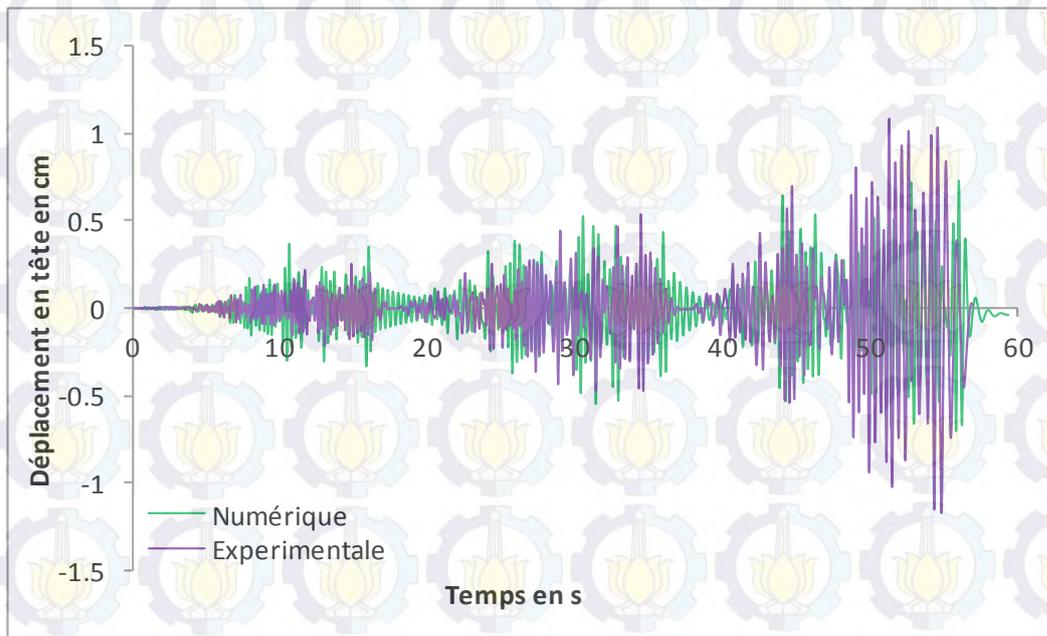


Figure 4.22 Comparaison Entre les Déplacements Numériques et les Déplacements Expérimentaux

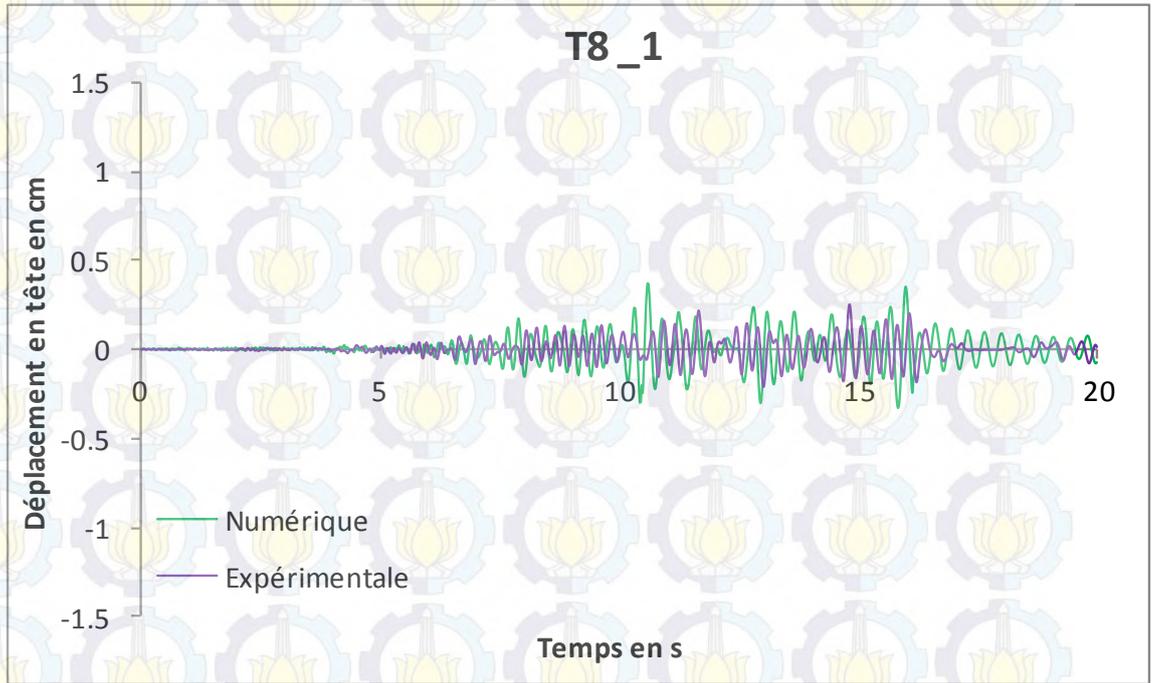


Figure 4.23 Comparaison du Déplacement T8_1

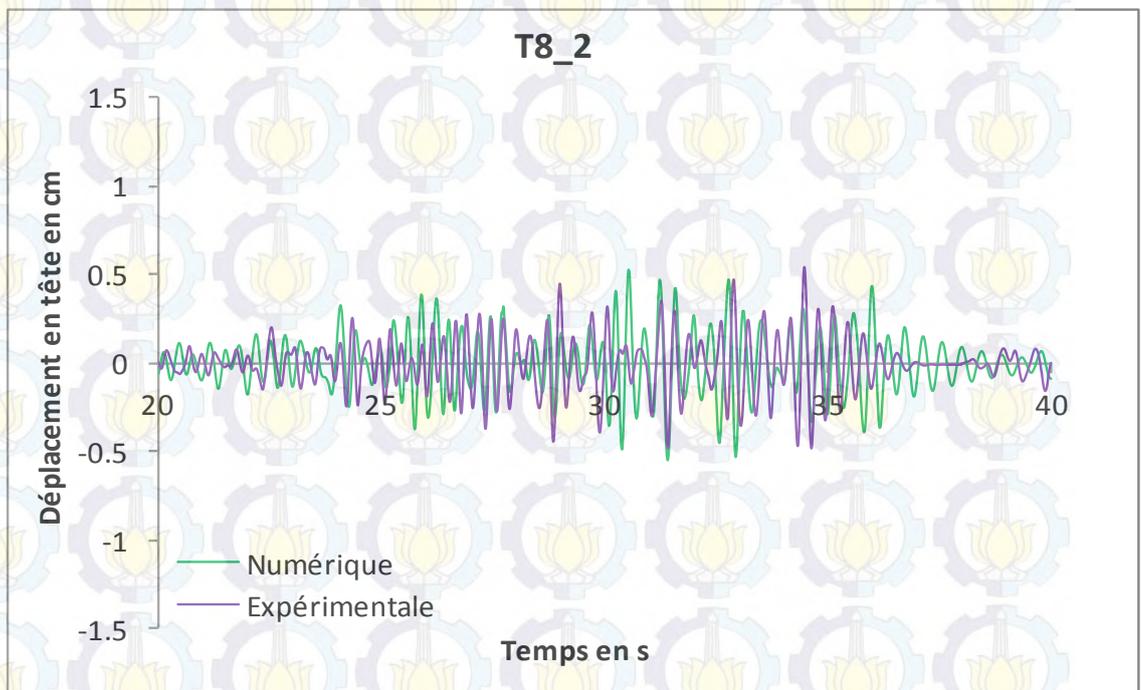


Figure 4.24 Comparaison du déplacement T8_2

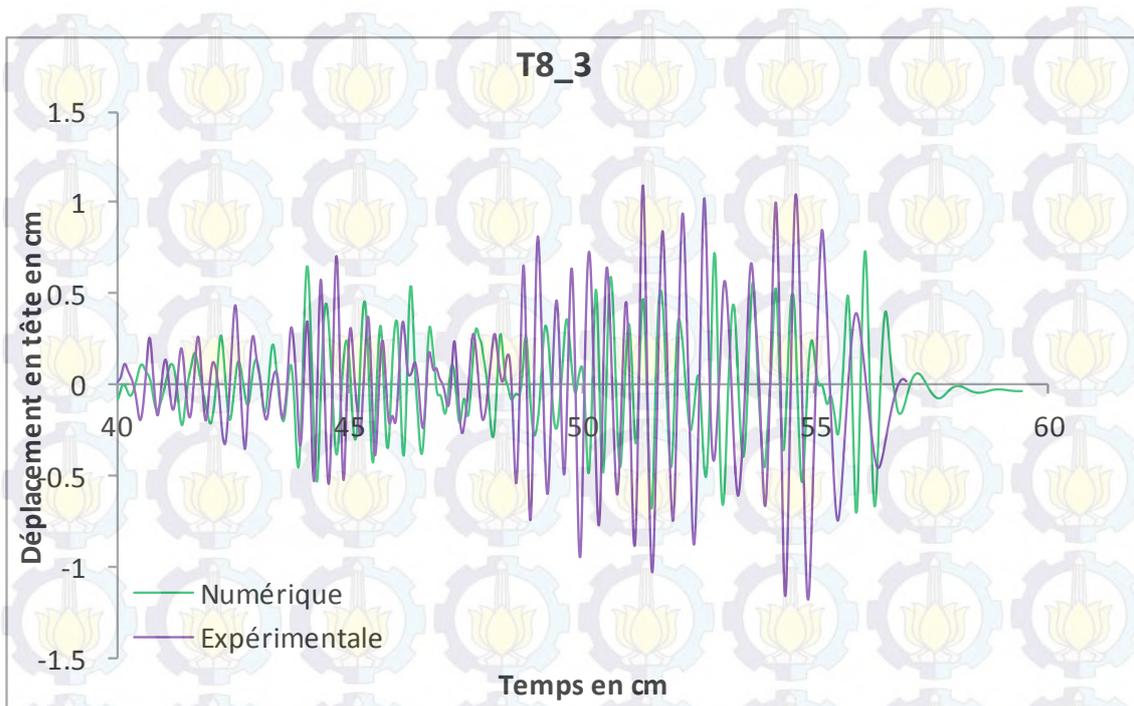


Figure 4.25 Comparaison du Déplacement T8_3

Tableau 4.4 Comparaison du déplacement du voile T8

	Déplacement Maximal		Déplacement Minimal	
	Numérique	Expérimental	Numérique	Expérimental
T8_1	0,3687	0,2550	-0,3316	-0,2120
T8_2	0,5270	0,5400	-0,5468	-0,4760
T8_3	0,7301	1,09	-0,7020	-1,18

Le déplacement calculé est le déplacement en tête du voile. Il existe des différences entre les résultats du déplacement numérique et ceux du déplacement expérimental. Les différences de la valeur maximale et la valeur minimale de chaque test de T8 apparaissent dans le tableau 4.4. On peut voir que dans T8_1, les résultats de la modélisation numérique sont plus grands que les résultats expérimentaux. En revanche, dans T8_2 et T8_3, des résultats expérimentaux sont plus grands que les résultats numériques. La plus grande différence se produit dans T8_3.

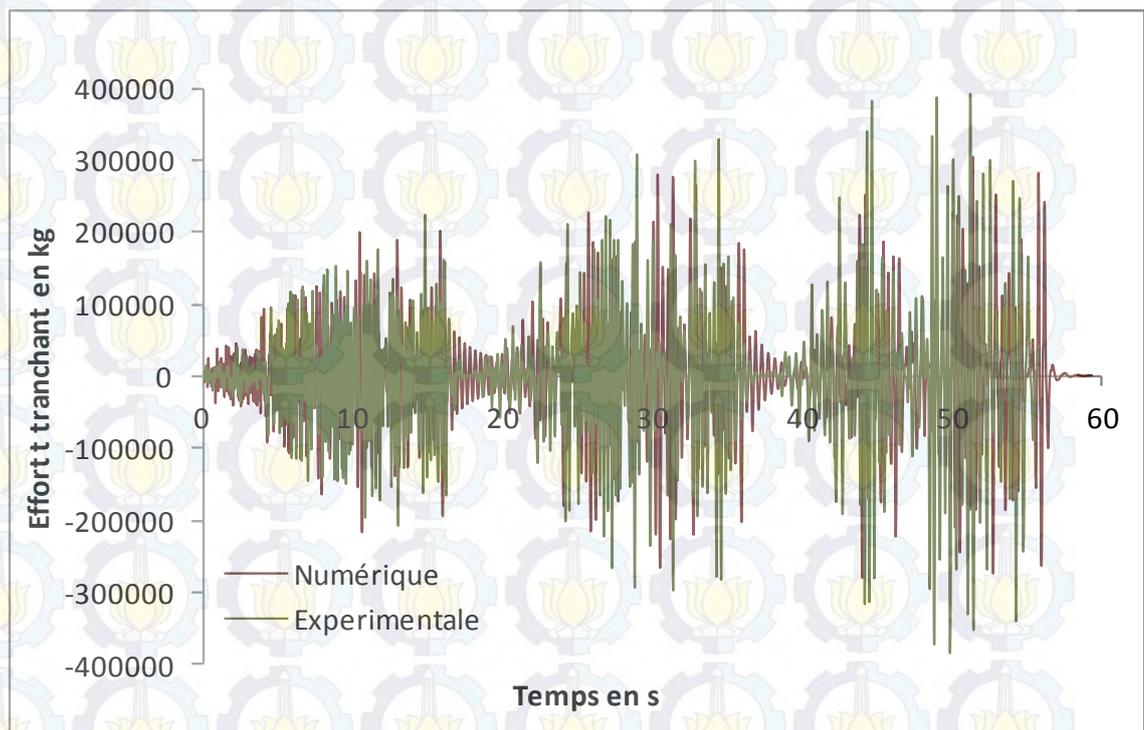


Figure 4.26 Comparaison Entre les Efforts Numériques et les Efforts Expérimentaux

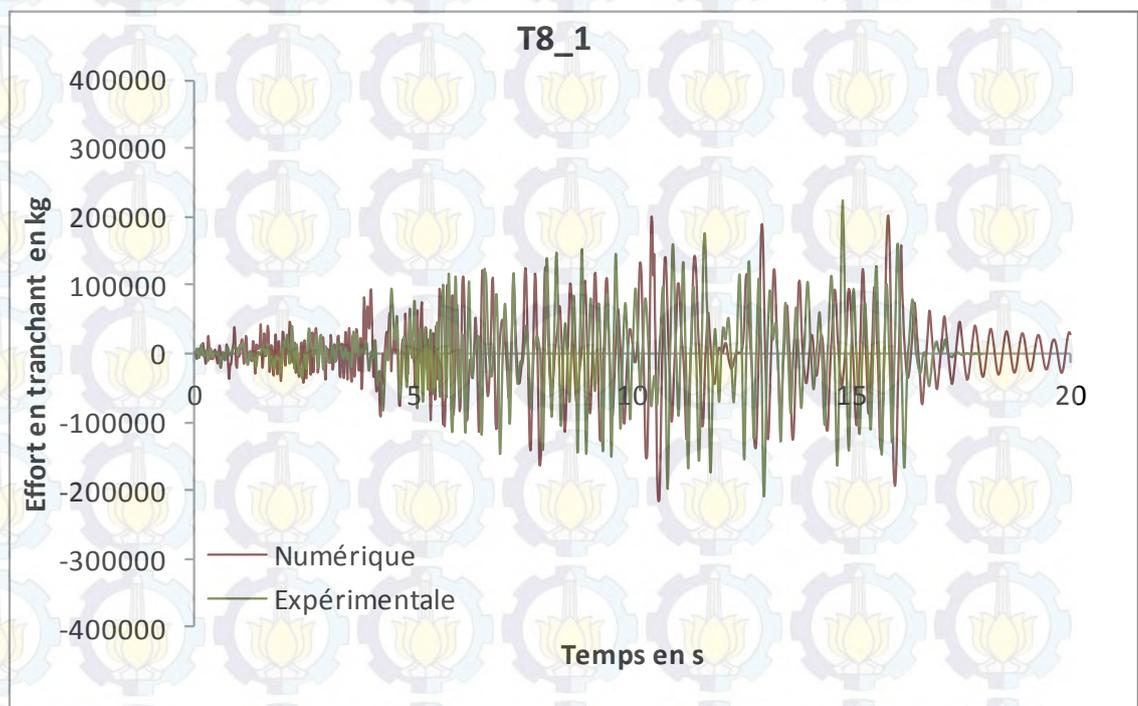


Figure 4.27 Comparaison l'Effort Tranchant T8_1

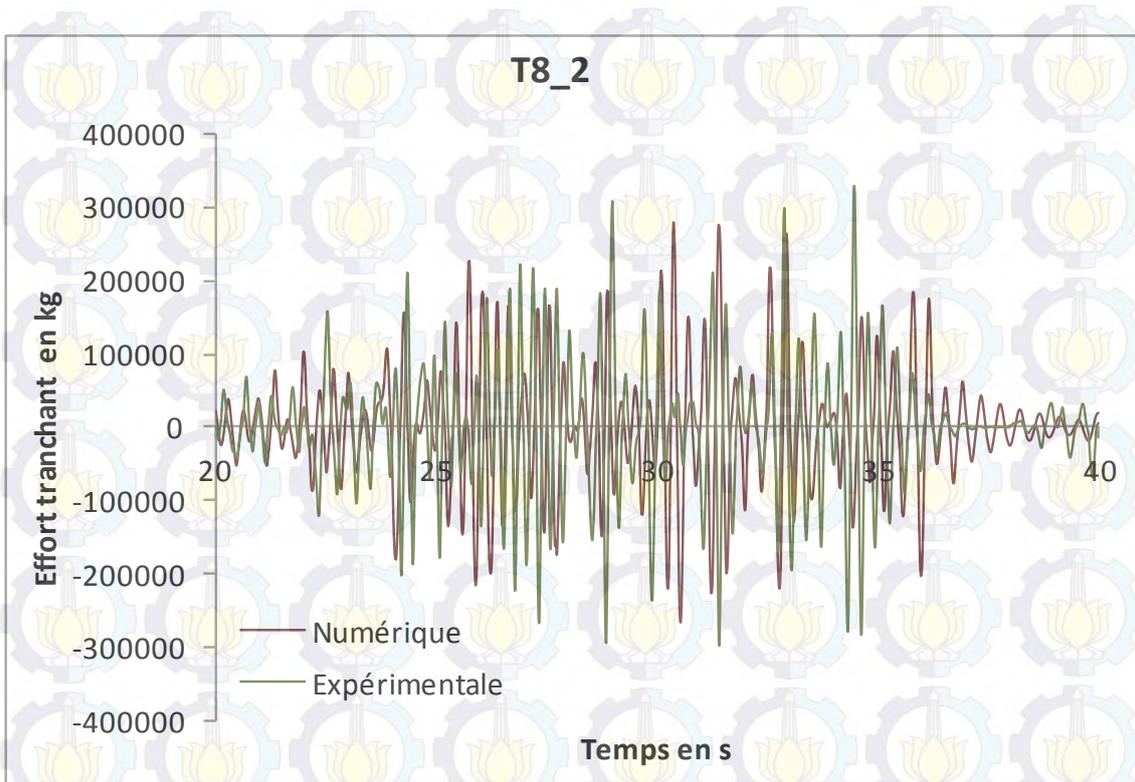


Figure 4.28 Comparaison l'Effort Tranchant T8_2

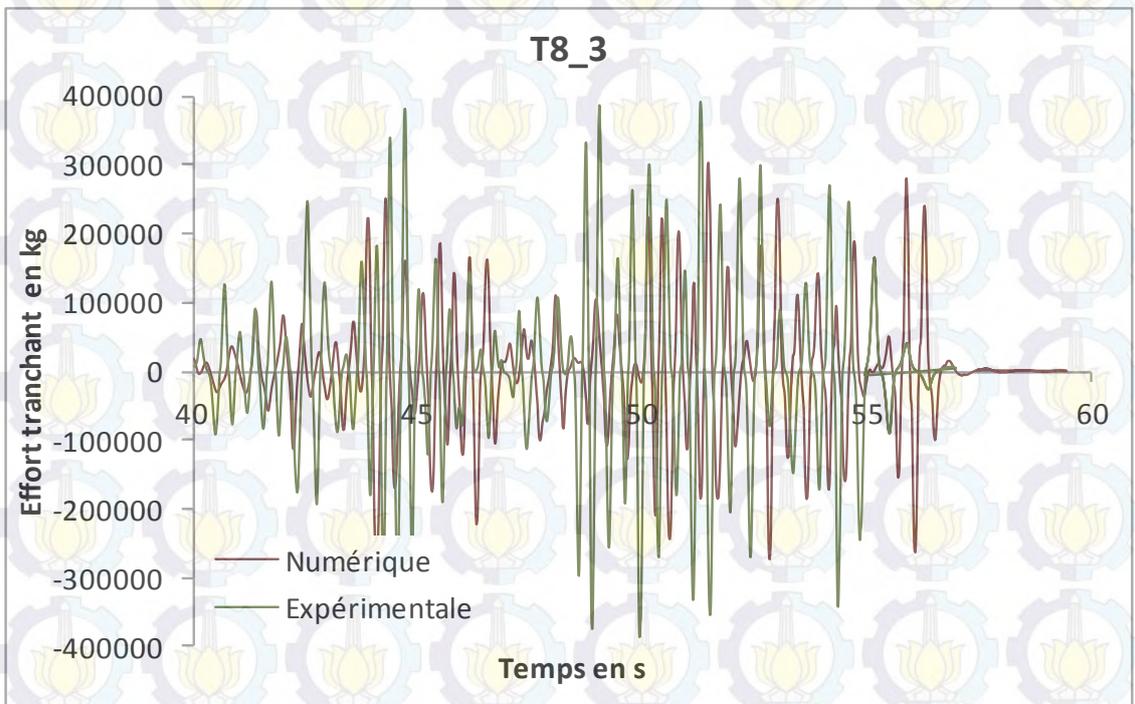


Figure 4.29 Comparaison de l'Effort Tranchant T8_3

Tableau 4.5 Comparaison de l'effort tranchant du voile T8

	Effort Maximal		Effort Minimal	
	Numérique	Expérimental	Numérique	Expérimental
T8_1	201029	224000	-217504	-208000
T8_2	279249	329000	-266974	-298000
T8_3	303932	392000	-281043	-385000

De même que pour le déplacement, il existe des différences entre les résultats de l'effort tranchant numérique et ceux de l'effort tranchant expérimental. Les différences de la valeur maximale et la valeur minimale de chaque test de T8 apparaissent dans le tableau 4.5. On peut voir que dans T8_1, T8_2, et T8_3 les résultats du expérimental sont plus grands par rapport aux résultats numérique. Pourtant, dans cet effort tranchant, la plus grande différence se produit dans T8_3.



Figure 4.30 Courbes Effort Tranchant-déplacement en Tête de T8 Numérique

La figure 4.30 montre les courbes entre effort tranchant et déplacement en tête du voile (courbe d'hystérésis) pour chacun des chargements de T8. Cette courbe montre le comportement ductile de la structure et la capacité d'amortissement de la structure. La courbe d'hystérésis de T8_1 est instable, parce qu'à la fin du chargement, il y a une augmentation significative de la force suivie par une augmentation du déplacement. Dans ce T8_1, le mur se fissure légèrement. Tandis que sur T8_2, la courbe d'hystérésis est assez stable. Mais on peut voir ici qu'en même temps que l'augmentation d'effort tranchant, il y a aussi une augmentation significative du déplacement. Dans ce T8_2, le mur se fissure plus massivement. Et pour le test T8_3, on peut voir qu'il y a une augmentation très significative du déplacement lorsque l'effort absorbé n'est pas très différent de T8_2. Dans ce T8_3, le mur s'endommage de façon importante et est détruit.

4.1 Le Voile T13

4.3.1 Les Hypothèse de Caractéristique de Géometrie

De même que pour le voile T8, la modélisation du voile T13 à l'aide de CAST3M 2000 se fait uniquement sur le voile sans les longrines supérieure et inférieure. On modélise aussi les armatures verticales et horizontales du voile. Elles sont divisées en deux, à savoir l'armature du voile et l'armature de la nervure. De plus, ce mur a été par ailleurs renforcé extérieurement sur ses deux faces à l'aide de bandes verticales et horizontales de matériaux composites (CFRP).

4.3.2 Les Hypothèse de Caractéristique des Matériaux

Les caractéristiques de l'acier utilisées pour la modélisation sont les mêmes que les caractéristiques du voile T8. Les tableaux 4.6 et 4.7 suivants présentent les caractéristiques du béton et les caractéristiques du composite pour le voile T13.

Tableau 4.6 Caractéristiques du Béton

Module de Young (YOUNG)	310000 Kg /cm ²
Coefficient de Poisson (NU)	0,20
Contrainte ultime en compression simple (LCS)	411 Kg /cm ²
Déformation à la rupture en traction (EPUT)	0,0031
Déformation à la rupture en compression (EMAX)	0,011
Facteur transfert cisaillement (FTC)	0,30

Tableau 4.7 Caractéristiques du CFRP

Module de Young (YOUNG)	1500000 Kg /cm ²
Coefficient de Poisson (NU)	0,0
Déformation ultime	0,0056
Epaisseur	0,043 cm
Largeur	7,5 cm

4.3.3 Les Hypothèse de la Discretisation des Maillages

Les maillages sont définis en trois types des matériaux, le béton, l'acier, et le composite.

- Le Béton

Le maillage du béton est modélisé avec un modèle de quadrilatéraux 4 nœuds (QUA4). Le maillage du voile est choisi suffisamment fin, égal à 2,5 cm, afin de satisfaire la configuration de renforcement réel tout en adoptant l'hypothèse de liaison parfaite.

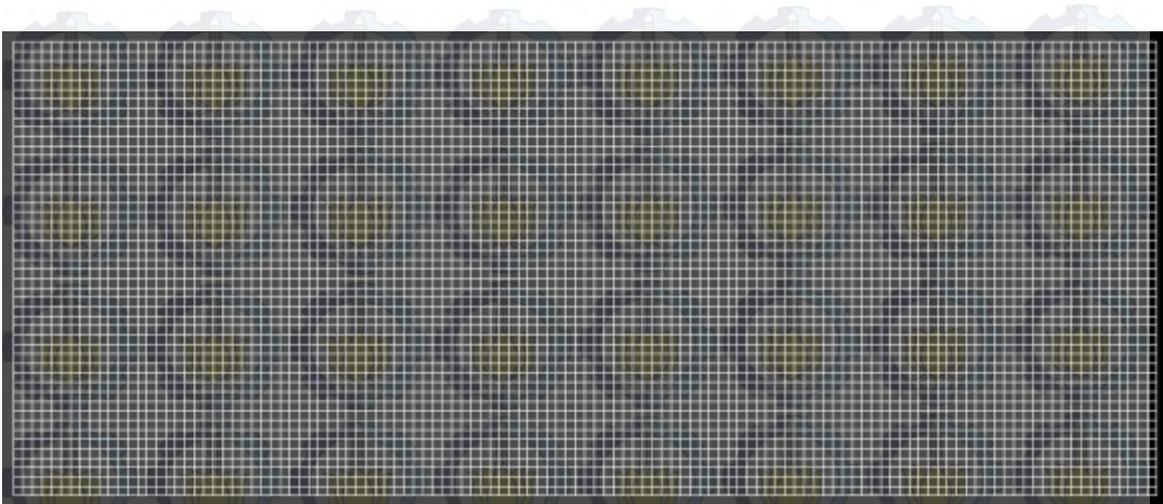


Figure 4.31 Maillage du Béton

- L'acier

Les aciers sont représentés par des barres uniaxiales dont les nœuds sont reliés aux nœuds du béton. L'armature d'acier est modélisée à l'aide des éléments de barres linéaires associés à la loi cyclique uniaxiale proposé par Pinto-Manegotto.

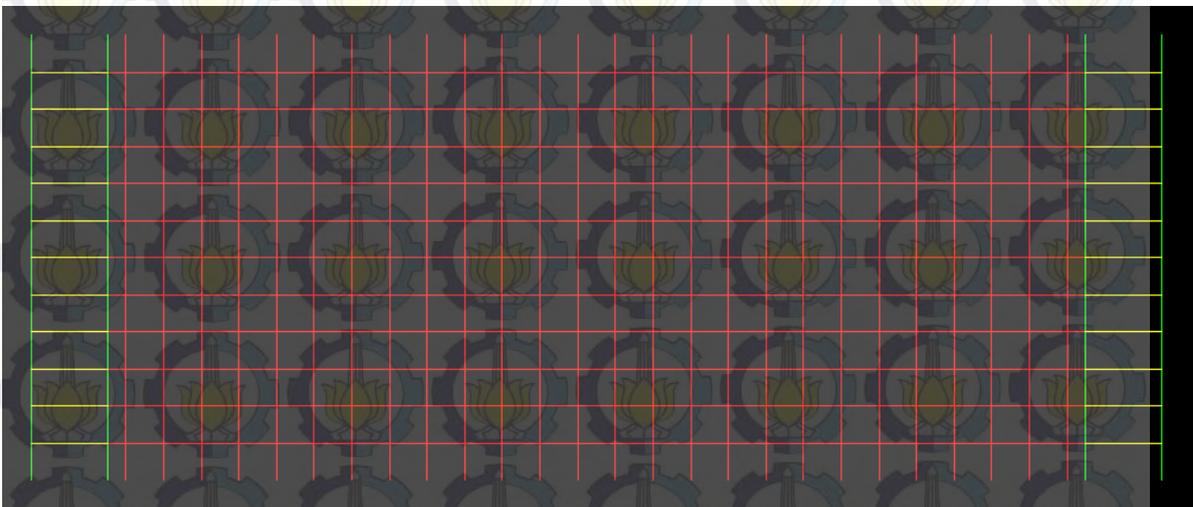


Figure 4.32 Maillage d'Acier

- Le composite

Le CFRP est représenté par des barres uniaxiales dont les nœuds sont reliés aux nœuds du béton. Les bandes de CFRP sont modélisées par trois éléments de barre dont la section totale est égale à la section de la grande

plaque de CFRP de 75 mm. Les trois nœuds des barres sont directement connectés aux nœuds du béton sous l'hypothèse de liaison parfaite.

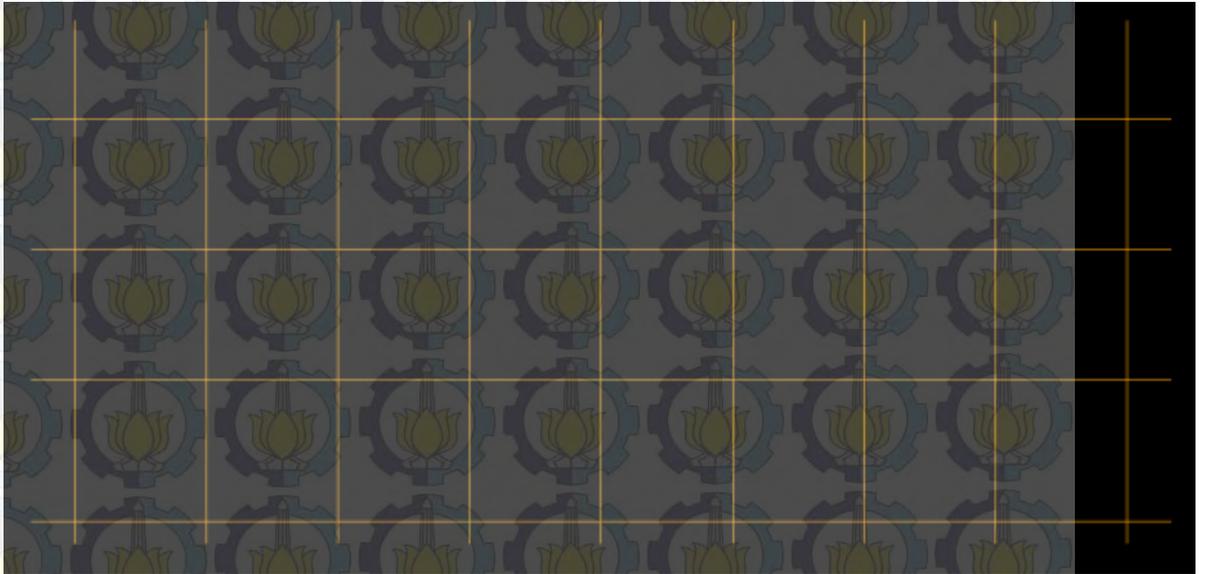


Figure 4.33 Maillage du Composite

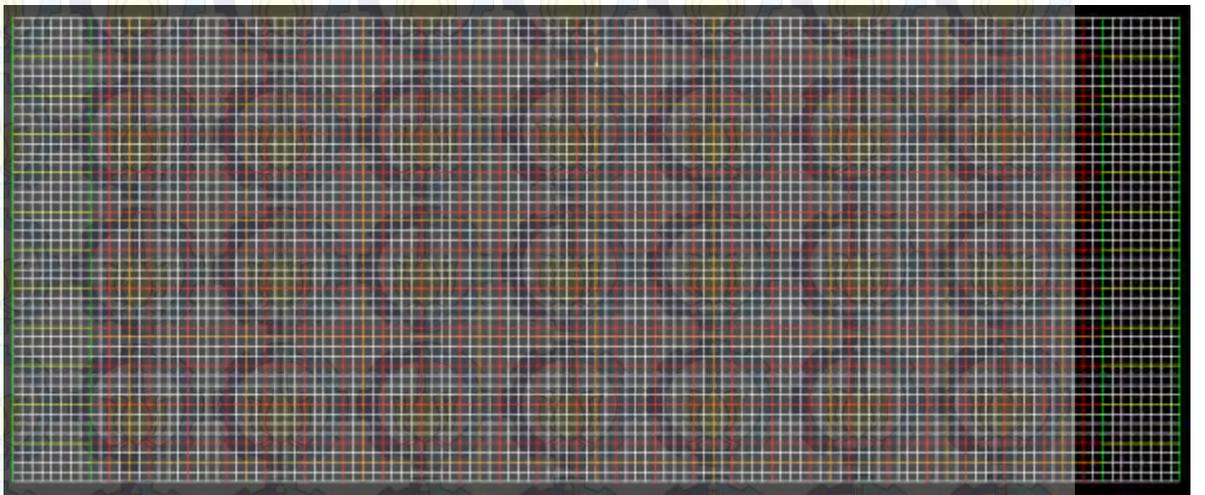
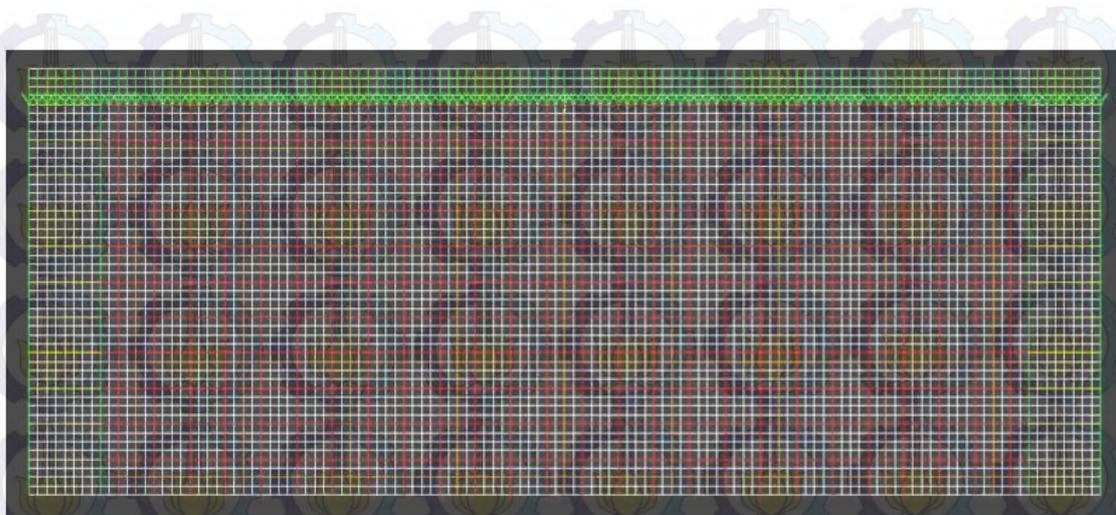


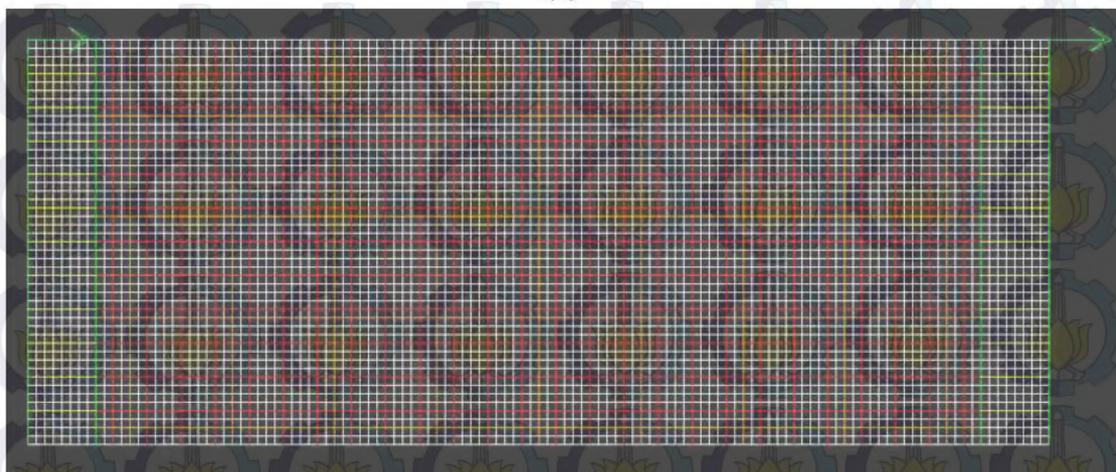
Figure 4.34 Maillage Total du Voile en Béton Armé

4.3.4 Les Hypothèses des Chargements

Les hypothèses des conditions aux limites et des chargements du voile T13 sont même avec le voile T8.



(a)



(b)

Figure 4.35 (a) Chargement Vertical sur le Voile (b) Force Imposée sur le Voile

4.3.5 Les Résultats et l'Analyse

4.3.5.1 Le Chargement Quasi-Statique

- La force imposée

La figure suivante est une courbe de force-déplacement obtenue à partir de la force imposée. La force maximale est 263759 kg pour un déplacement de 0,29 cm.



Figure 4.36 Effort et Déplacement du Voile

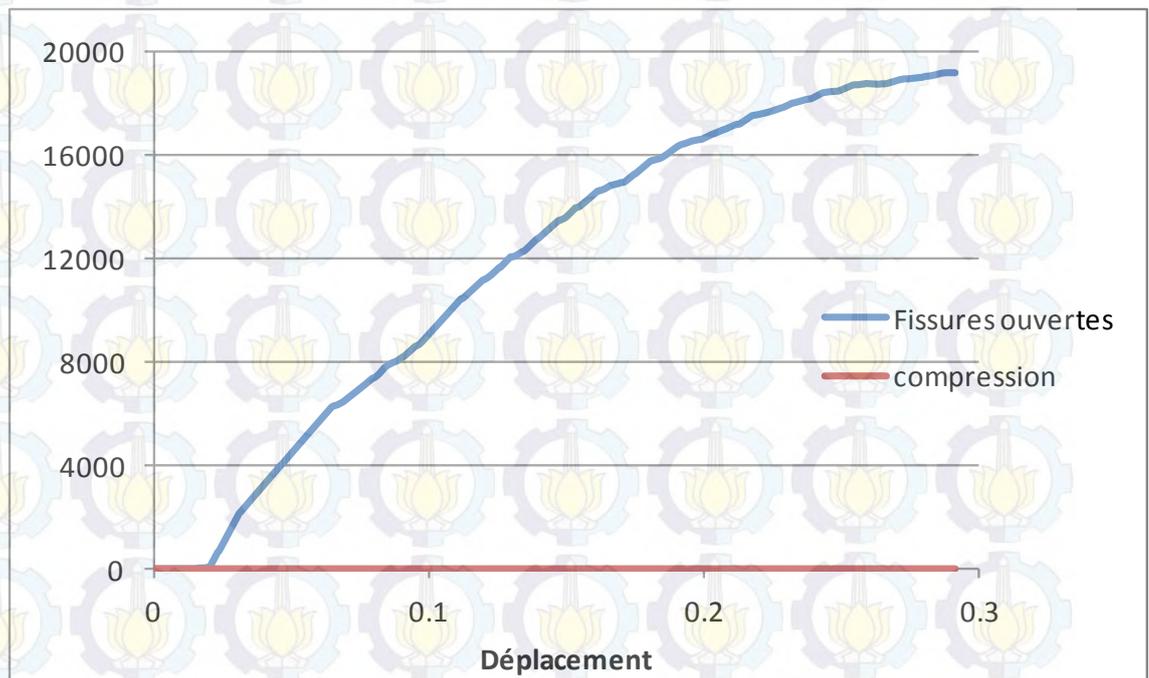


Figure 4.37 Points Affectés par la Fissuration et la Compression

Le nombre de points affectés par la fissuration est beaucoup plus élevé qu'à la compression. En comparaison avec le voile T8, le nombre de points

affectés par la fissuration dans le voile T13 est beaucoup plus élevé. Il est dû à la taille de la maille qui est très fine.

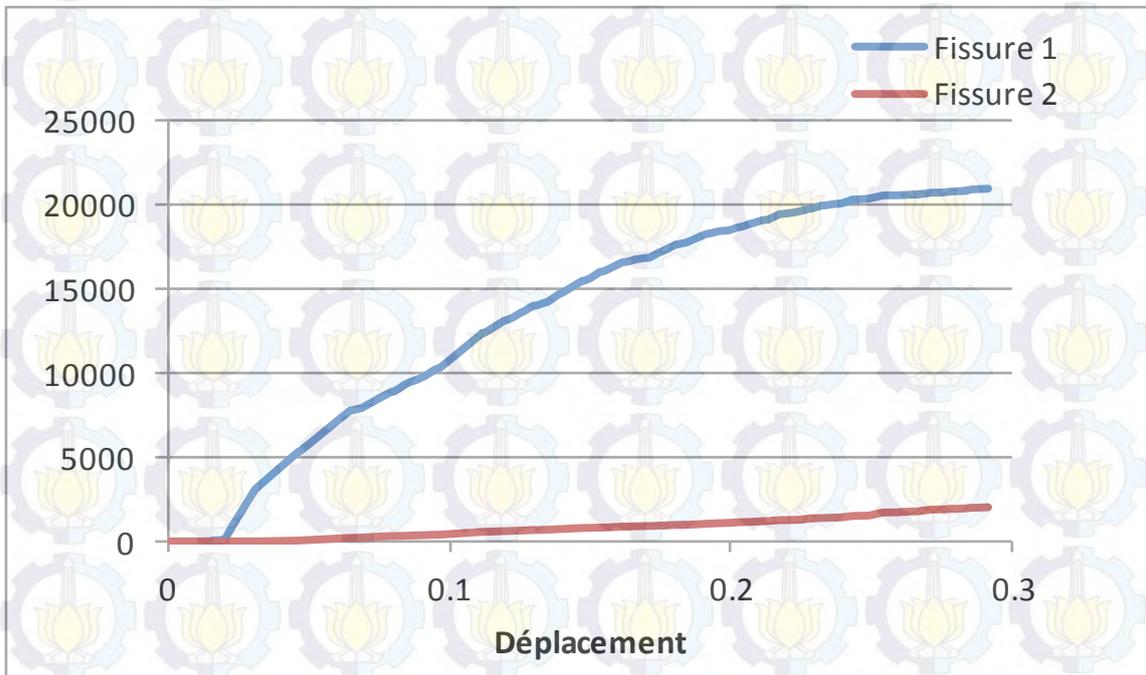


Figure 4.38 Points Affectés par la Fissuration

La figure 4.39 suivante représente la déformation minimale du béton.

La déformation maximale est 0,00226 pour un déplacement de 0,29 cm.

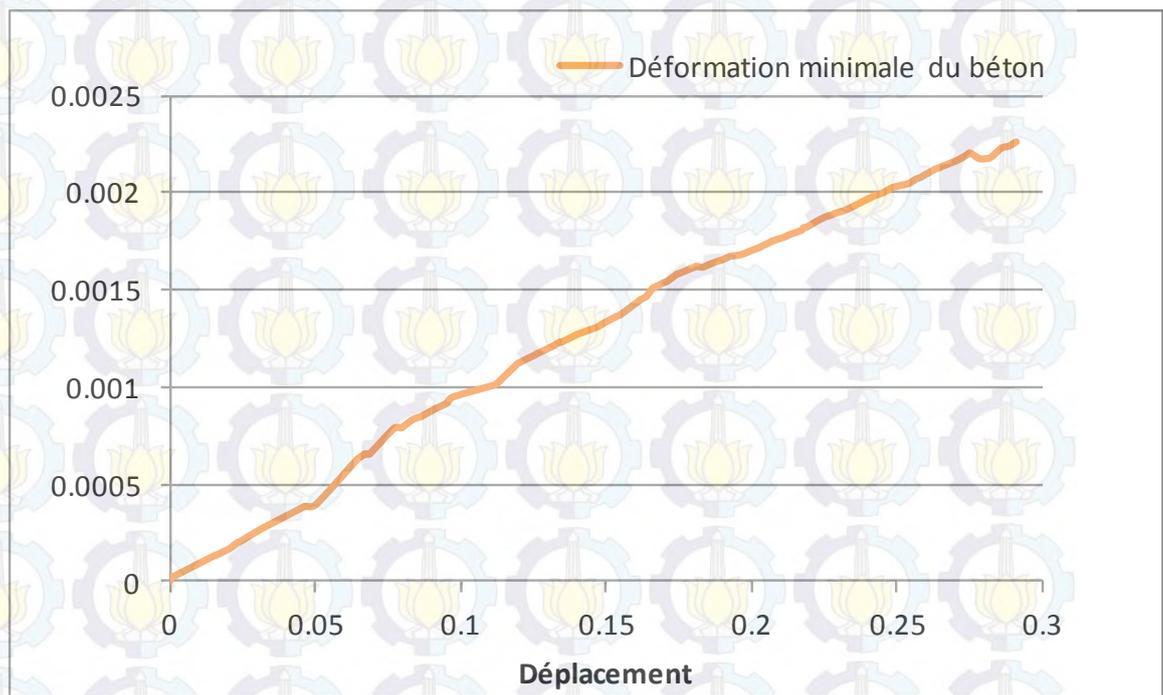


Figure 4.39 Déformation Minimale du Béton

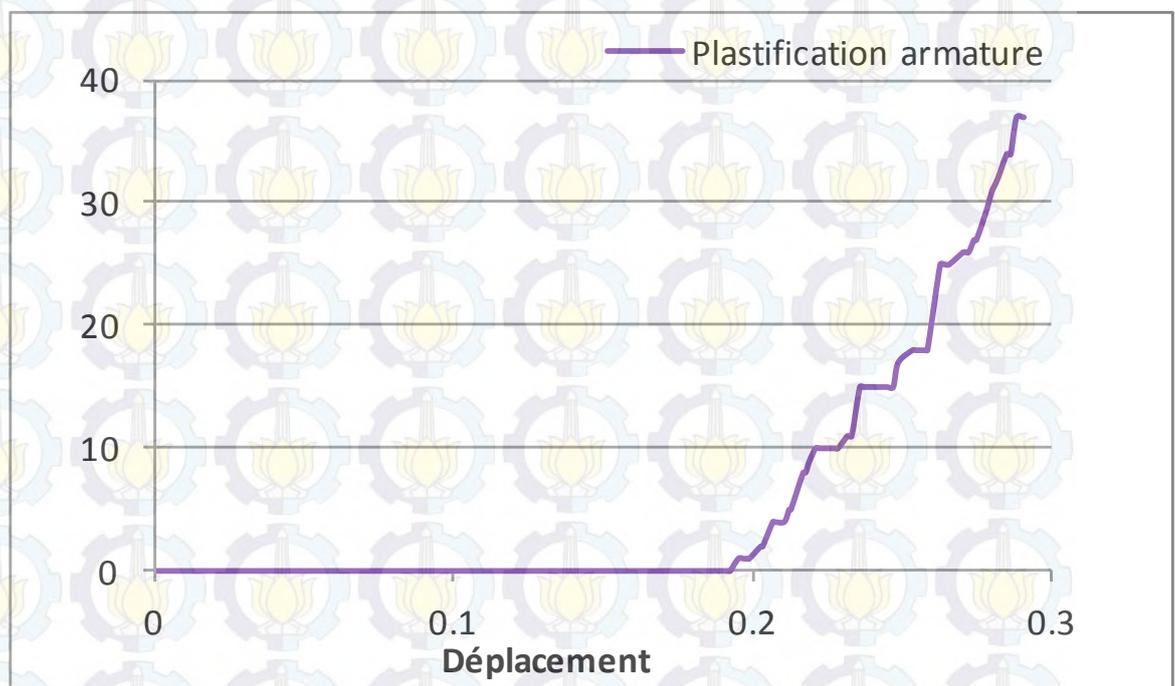


Figure 4.40 Plastification d'Armature

L'armature subit la plastification lorsque la traction à laquelle elle est soumise est supérieure à sa limite de résistance. La figure 4.40 représente le

nombre de points de l'armature qui a subi la plastification. Le déplacement augmente avec l'augmentation du nombre de points de l'armature affectés par la plastification.

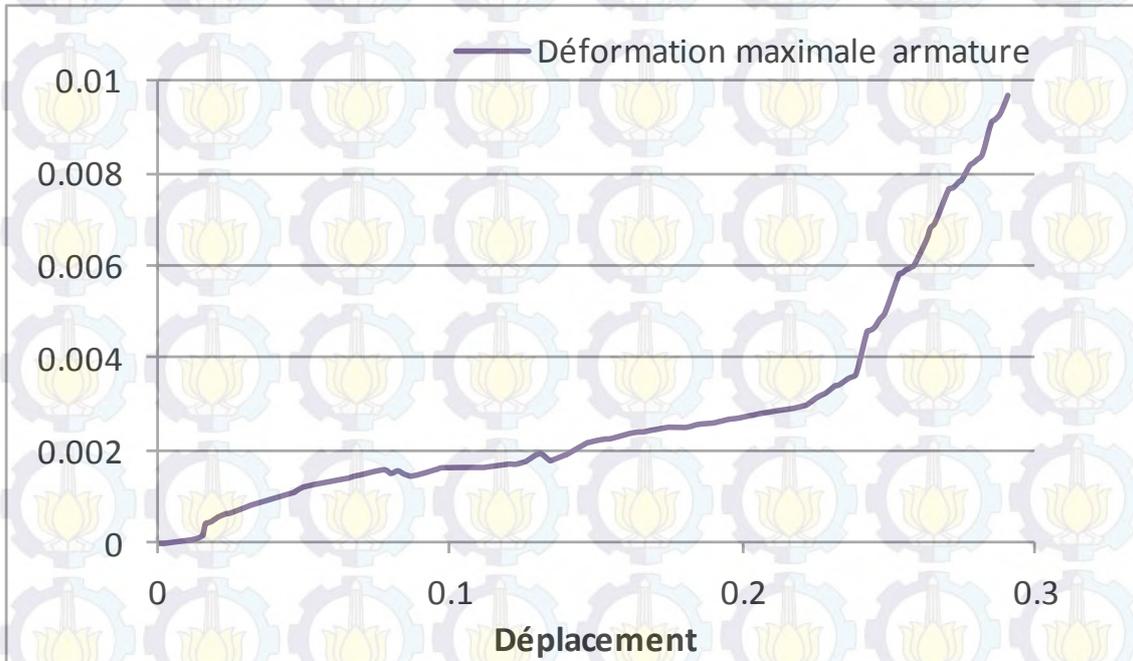


Figure 4.41 Déformation d'Armature

La figure 4.41 montre la déformation maximale dans l'armature. La déformation est proportionnelle au déplacement. La déformation maximale est 0,00967 pour un déplacement de 0,29 cm.

- Le déplacement imposé



Figure 4.42 Effort et Déplacement du Voile

La figure 4.42 est une courbe de force-déplacement obtenue à partir du déplacement imposé. La force maximale est 344000 kg pour un déplacement de 0,48 cm.

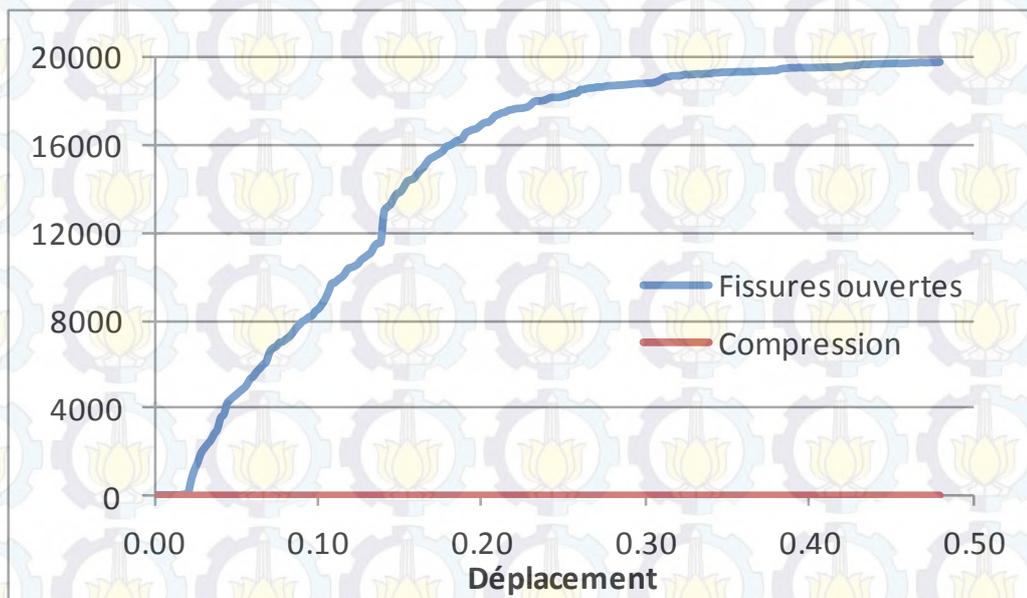


Figure 4.43 Points Affectés par la Fissuration et la Compression

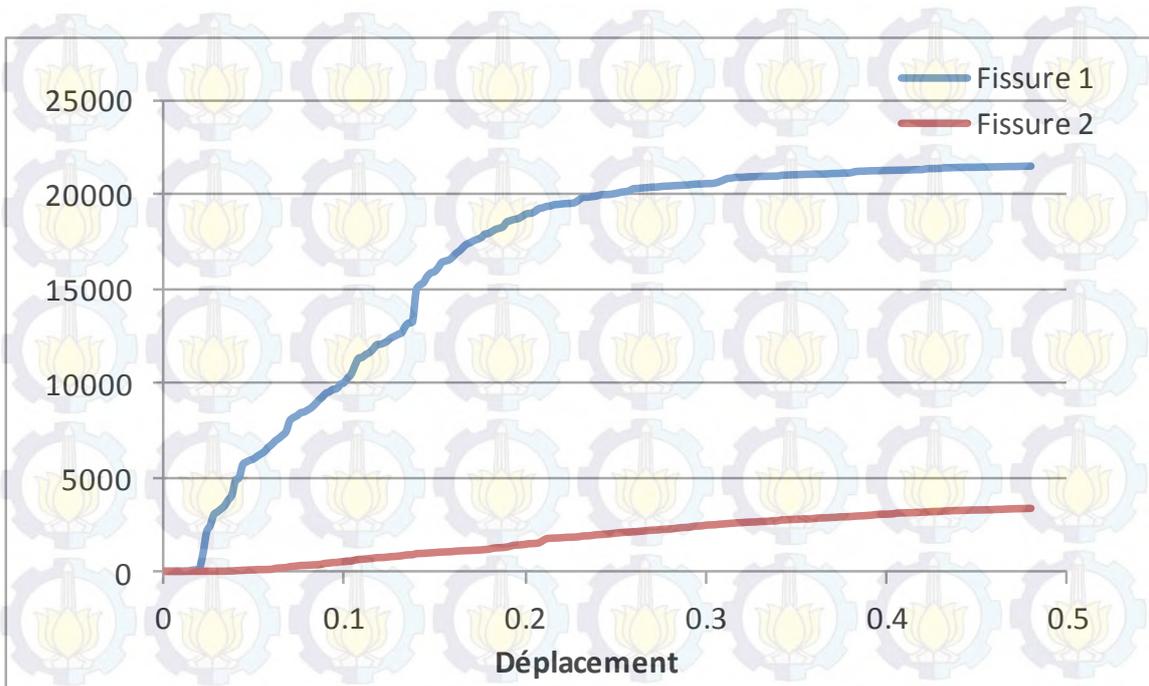


Figure 4.44 Points Affectés par la Fissuration

Même avec la force imposée, le nombre de points affectés par la fissuration est beaucoup plus élevé qu'à la compression. En outre, le nombre de points affectés par la fissure 1 est beaucoup plus élevé qu'à la fissure 2.

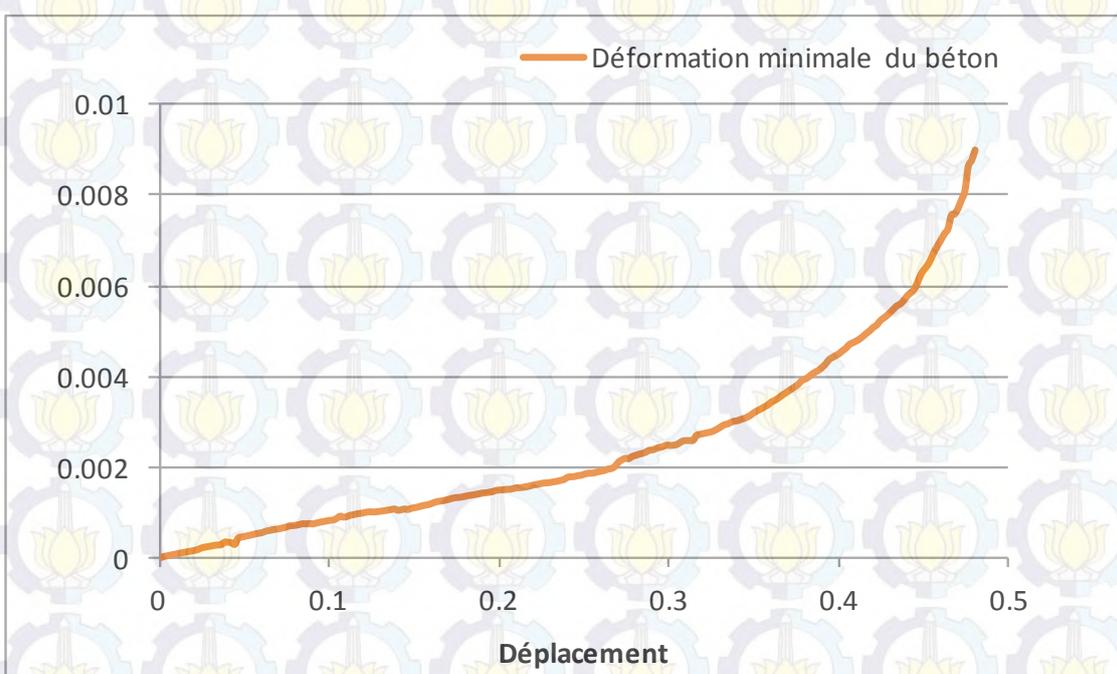


Figure 4.45 Déformation Minimale du Béton

La figure 4.45 représente la déformation minimale du béton. La déformation maximale est 0,00898 pour un déplacement de 0,48 cm. La figure 4.46 représente le nombre de points de l'armature qui a subi la plastification.

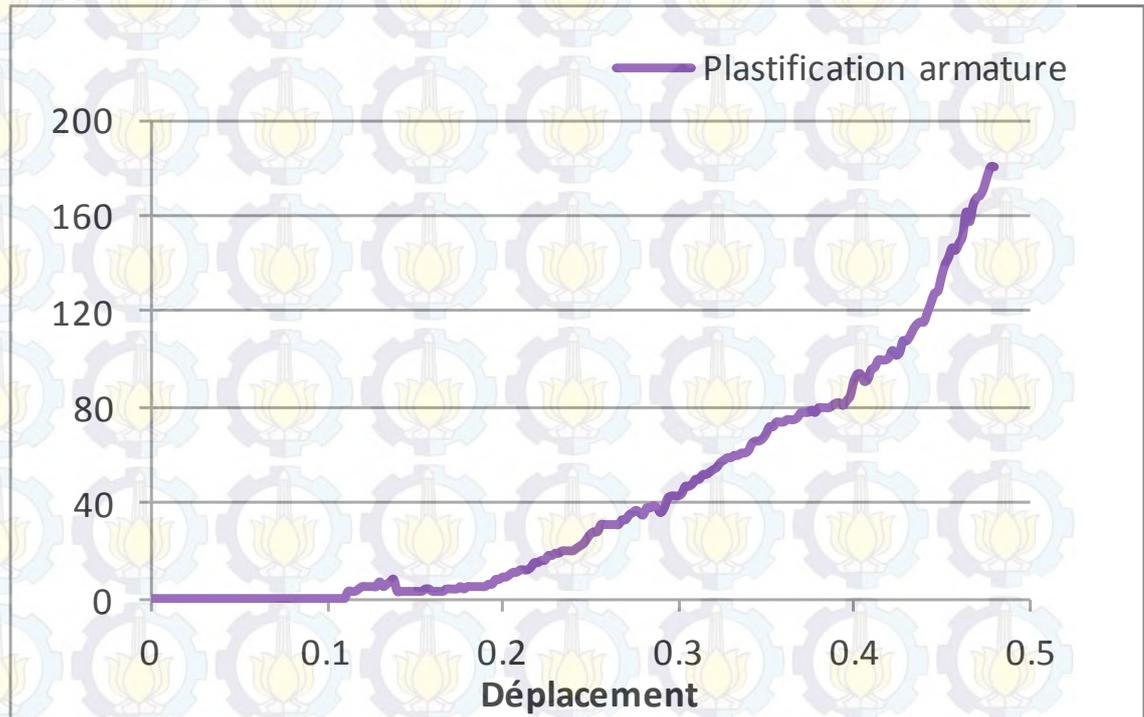


Figure 4.46 Plastification d'Armature

La figure 4.47 montre que la déformation de l'armature verticale est supérieure à la déformation de l'armature horizontale. C'est parce que dans cette modélisation, la force horizontale est plus dominante que la force verticale. L'armature qui détient la force horizontale (l'armature verticale) subit une plus grande déformation.

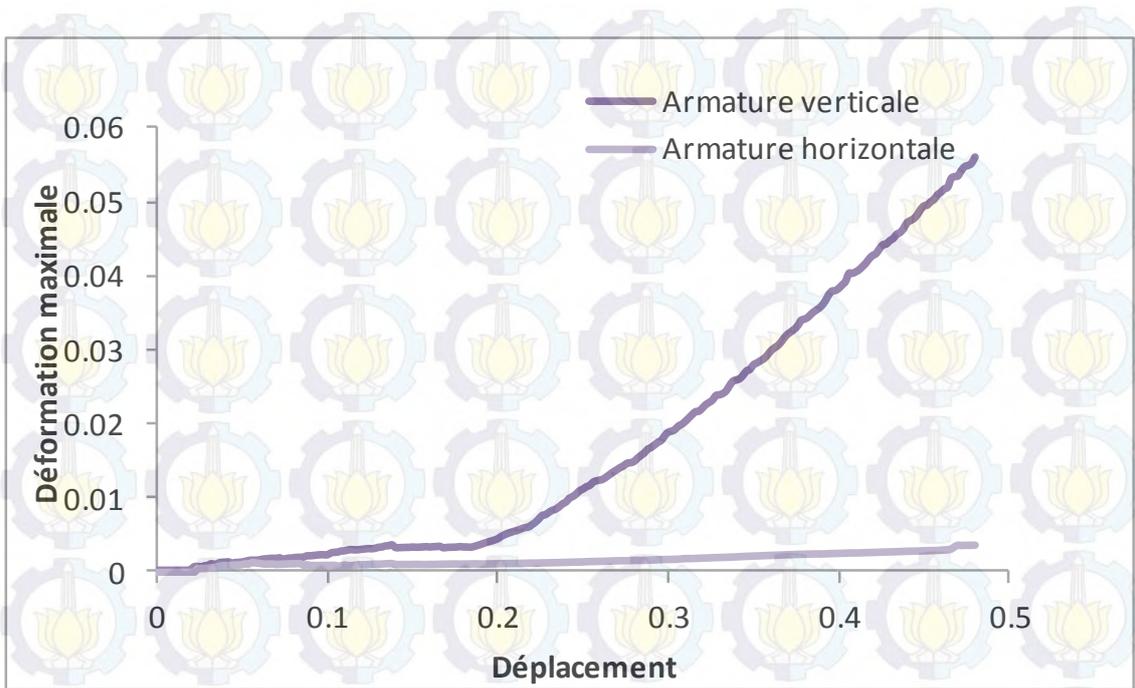


Figure 4.47 Déformation d'Armature Horizontale et Verticale

4.3.5.2 Le Chargement Pseudo-Dynamique

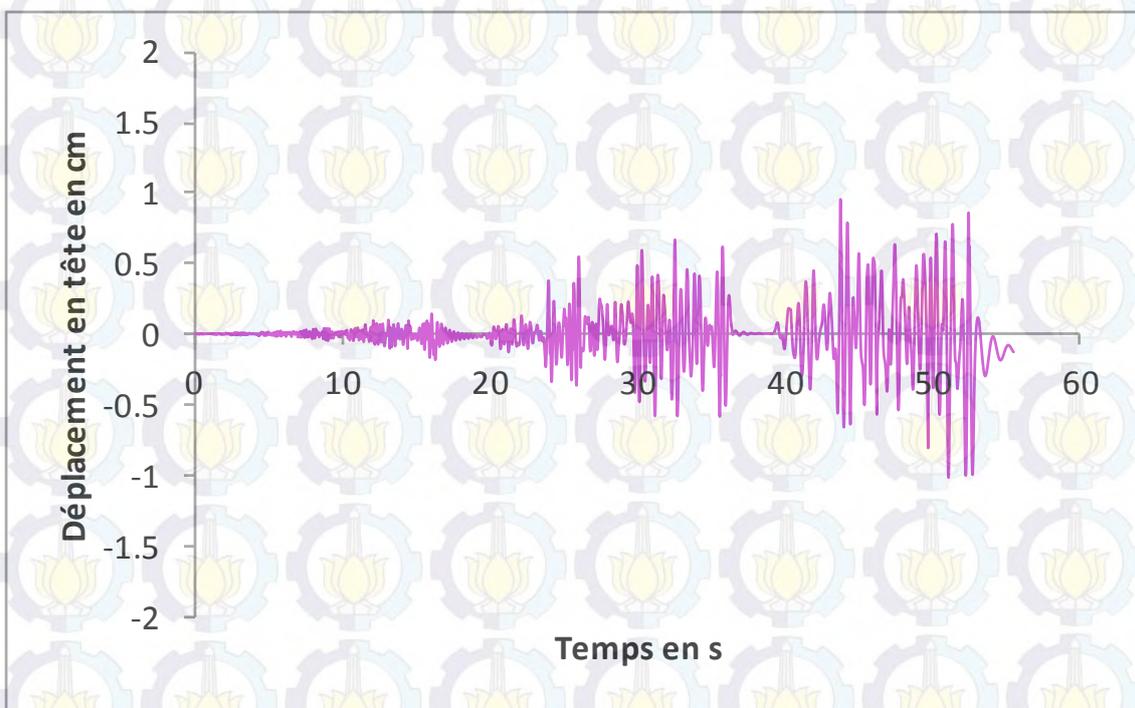


Figure 4.48 Déplacement en Tête du Voile T13

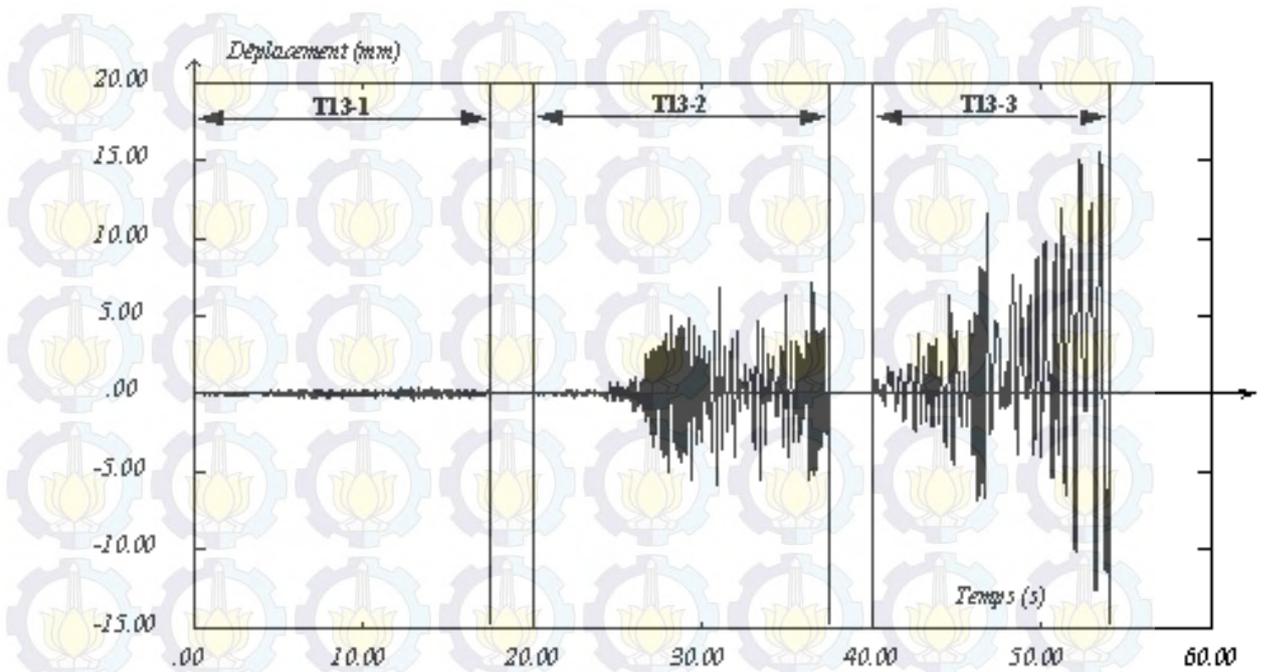


Figure 4.49 Déplacement en tête pour le test T13

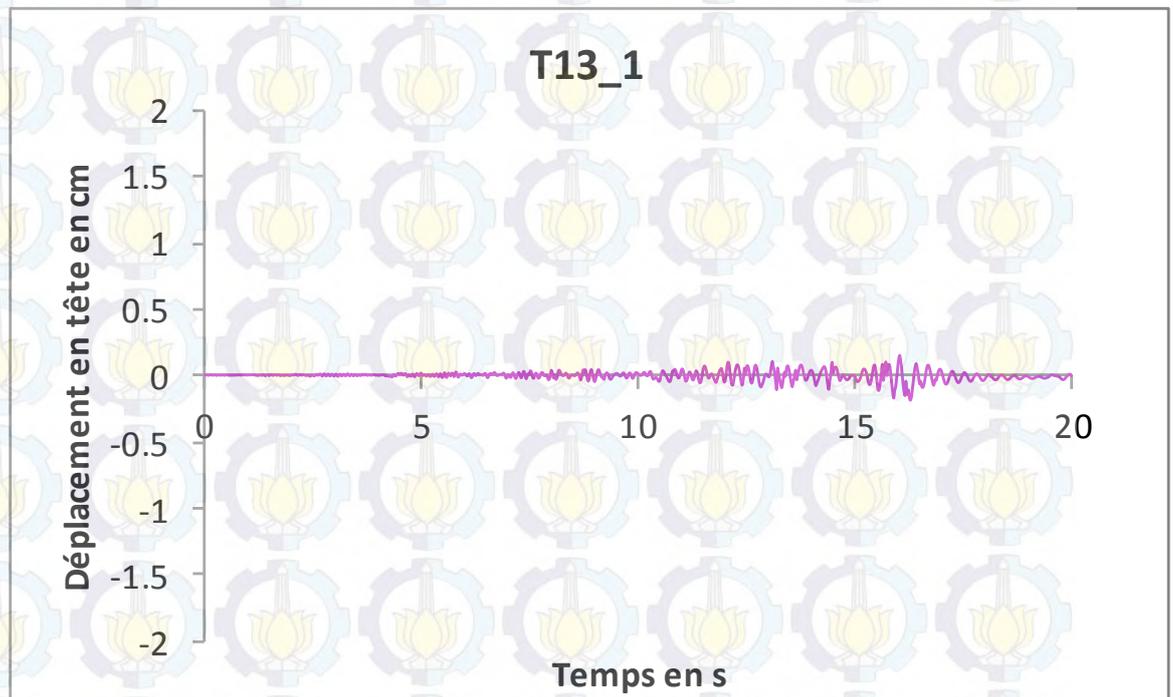


Figure 4.50 Déplacement T13_1

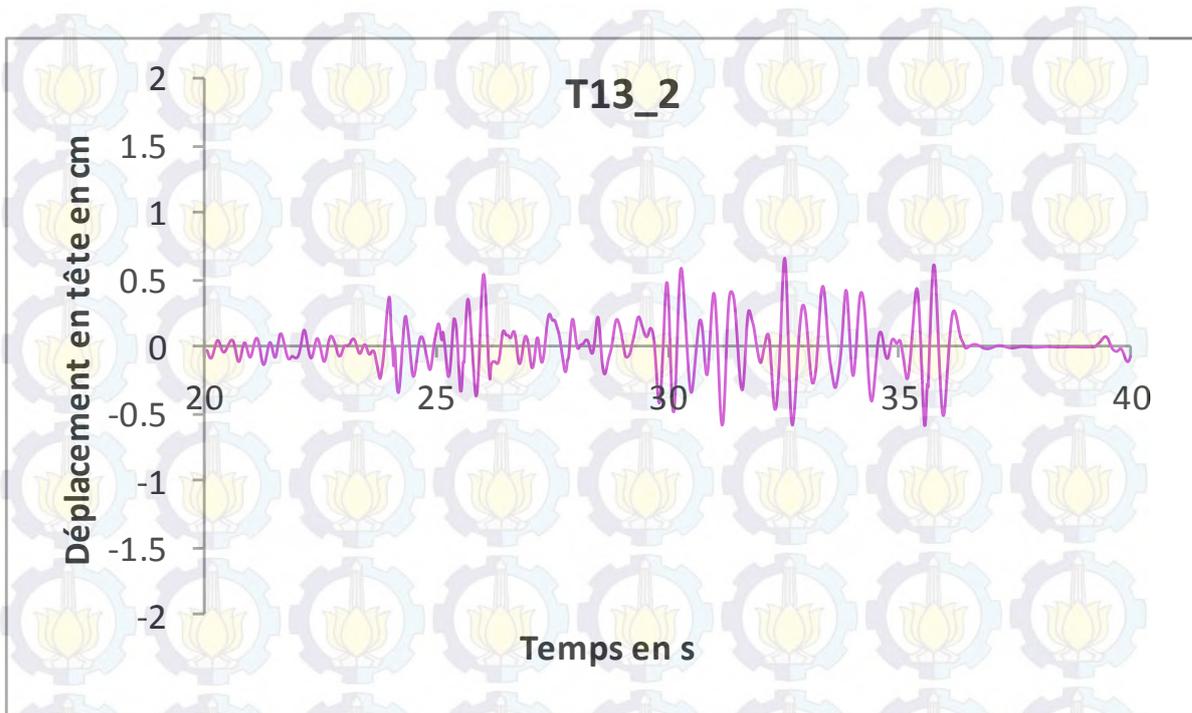


Figure 4.51 Déplacement T13_2



Figure 4.52 Déplacement T13_3

Le déplacement calculé est le déplacement en tête du voile. On peut voir que dans T13_1, le plus grand déplacement est d'environ 0,14 cm. Dans

T13_2 et T13_3, le déplacement augmente de manière significative. Le déplacement maximal de T13_2 est d'environ 0,67 cm, tandis que, le déplacement maximal de T13_3 est d'environ 1,01 cm. Et le déplacement minimal de T13_1, T13_2, et T13_3 sont -0,15 cm, -0,58 cm, et -1,03 cm. Bien que les résultats expérimentaux montrent que le déplacement maximal de T13_1, T13_2, et T13_3 sont 0,09 cm, 0,65 cm, et 1,51 cm. Et le déplacement minimal de T13_1, T13_2, et T13_3 sont -0,09 cm, -0,60 cm, et -1,25 cm.

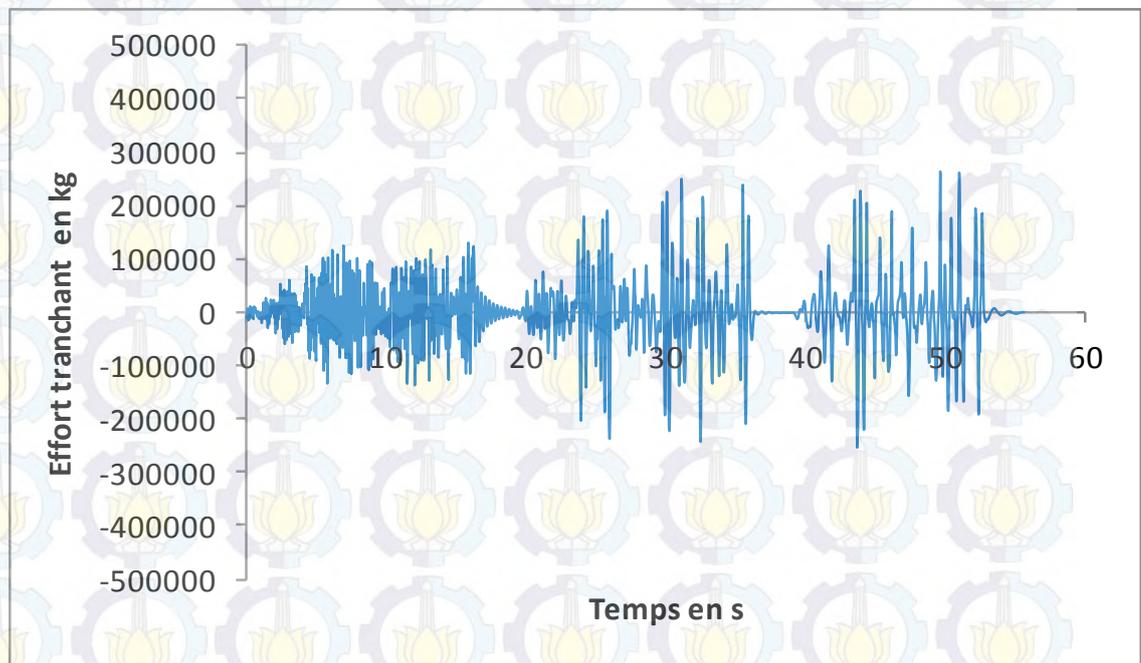


Figure 4.53 Effort Tranchant du Voile T13

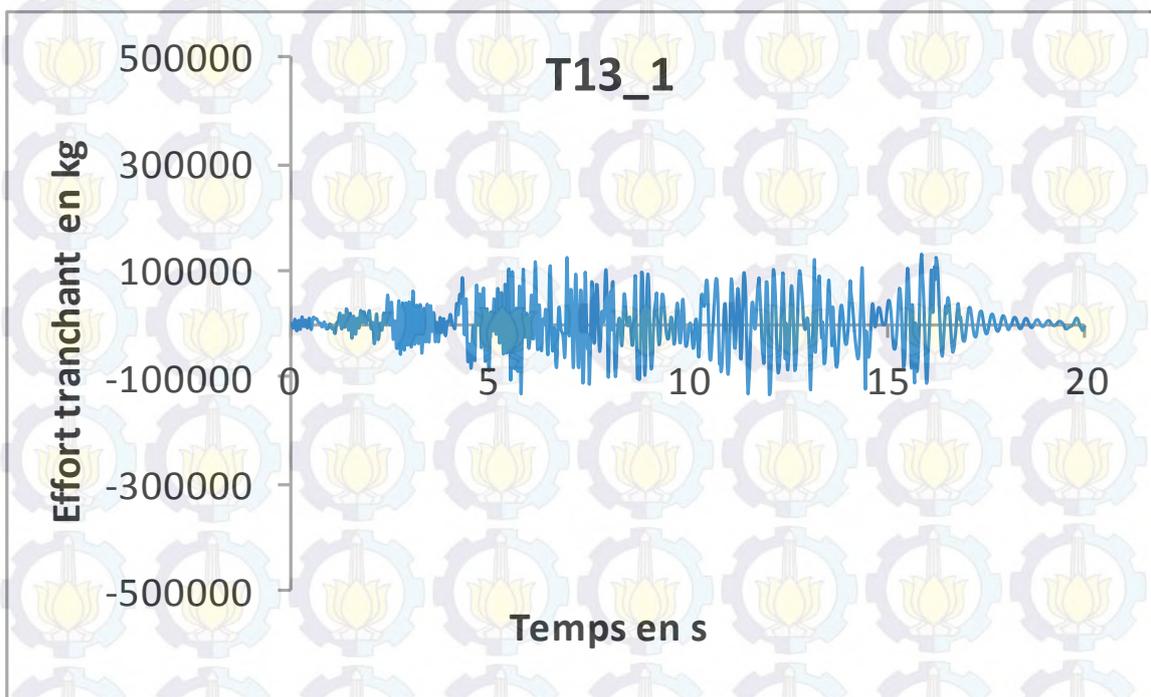


Figure 4.54 Effort Tranchant T13_1

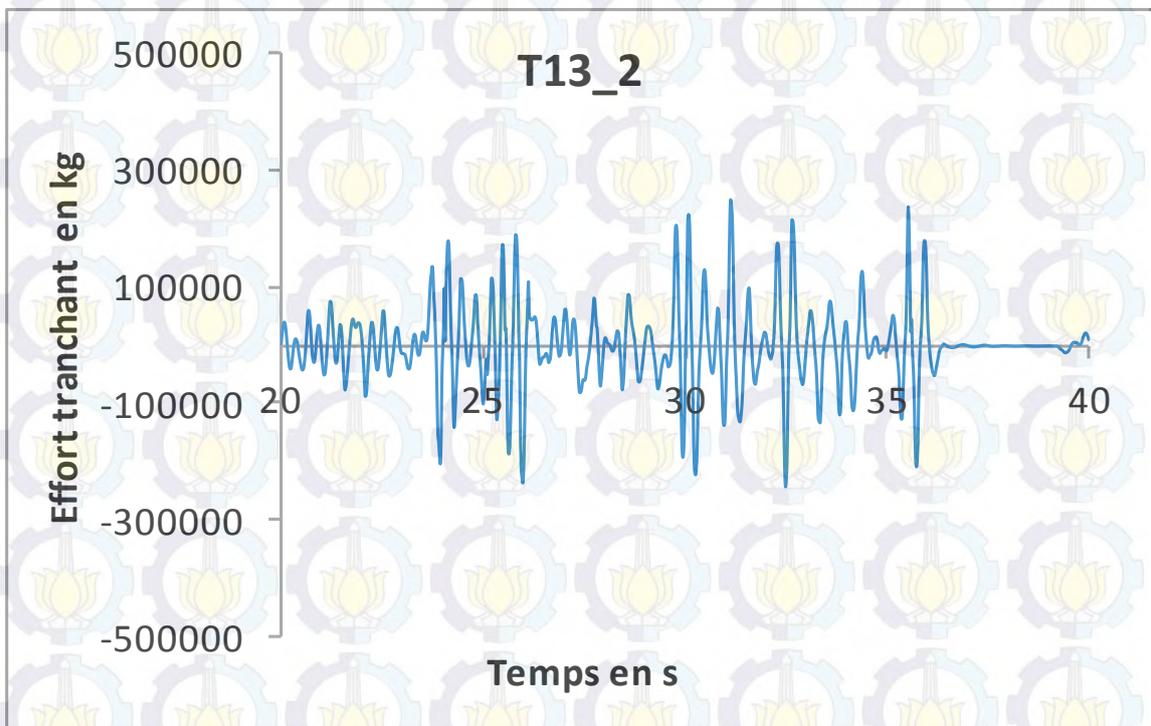


Figure 4.55 Effort Tranchant T13_2

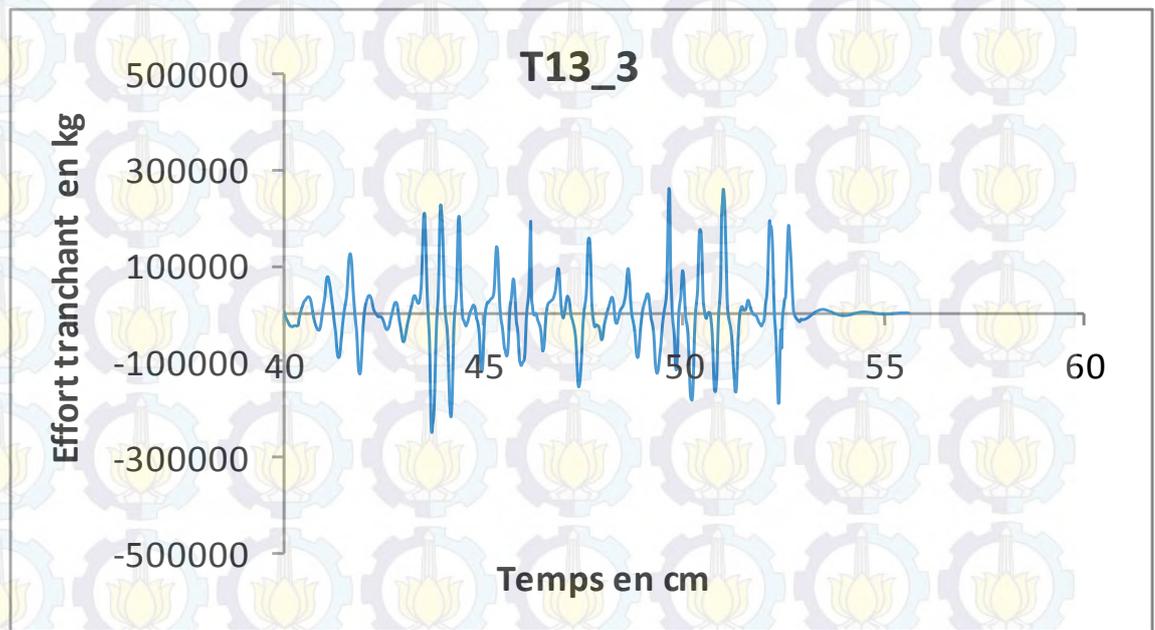


Figure 4.56 Effort Tranchant T13_3

On peut voir que dans T13_1, le plus grand effort est d'environ 130000 kg. Dans T13_2, l'effort maximal est 250183 kg. Tandis que dans T13_3, l'effort maximal est 264000 kg.

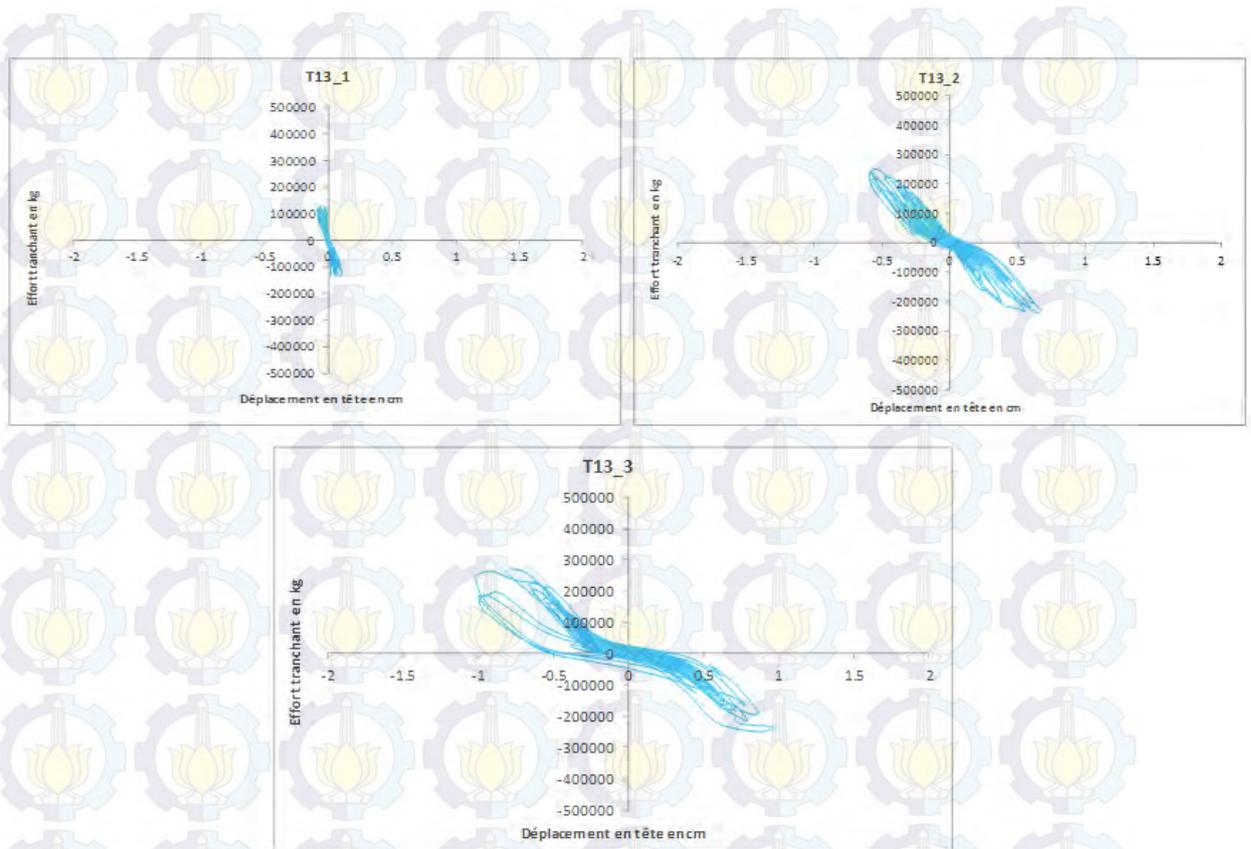
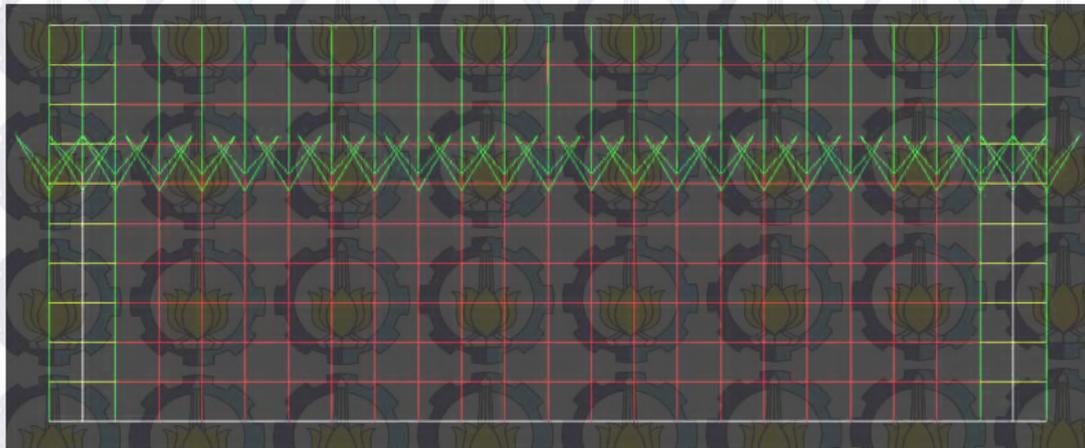
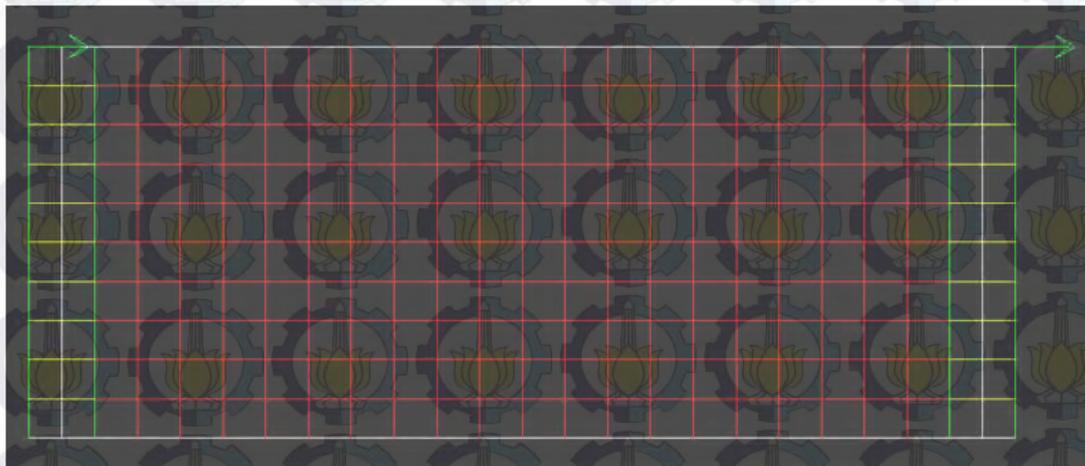


Figure 4.57 Courbes Effort Tranchant-Déplacement en Tête de T13

La figure 4.56 montre les courbes entre effort tranchant et déplacement en tête du voile (courbe d'hystérésis) pour chacun des chargements de T13. Cette courbe montre le comportement ductile de la structure et la capacité d'amortissement de la structure. Même avec les résultats expérimentaux, la courbe d'hystérésis de T13_1 est stable. Dans ce T13_1, le voile reste pratiquement intact. Tandis que sur T13_2, à cette étape, le voile se fissure légèrement. On peut voir que dans ce T13_2, la courbe d'hystérésis est assez stable bien qu'elle n'est pas aussi stable que la courbe T13_1. Et pour le test T13_3, on peut voir que la courbe d'hystérésis n'est pas stable. L'augmentation de la force n'est pas trop grande, mais l'augmentation du déplacement est assez grande. Dans ce T13_3, le voile se fissure massivement et détruit.



(a)



(b)

Figure 4.5 (a) Chargement Vertical sur le Voile (b) Force Imposée sur le Voile

4.2.1 Les Résultats et l'Analyse

4.2.1.1 Le Chargements Quasi-Statique

La figure 4.6 suivante est une courbe de force-déplacement obtenue à partir de la force imposée. On peut voir que plus la force imposée est grande, plus le déplacement est grand. La force est proportionnelle au déplacement. La force maximale est 348000 kg pour un déplacement de 0,58 cm. Le signe moins indique que la direction de la force résultat est opposé à la direction de la force imposée appliquée sur le voile.

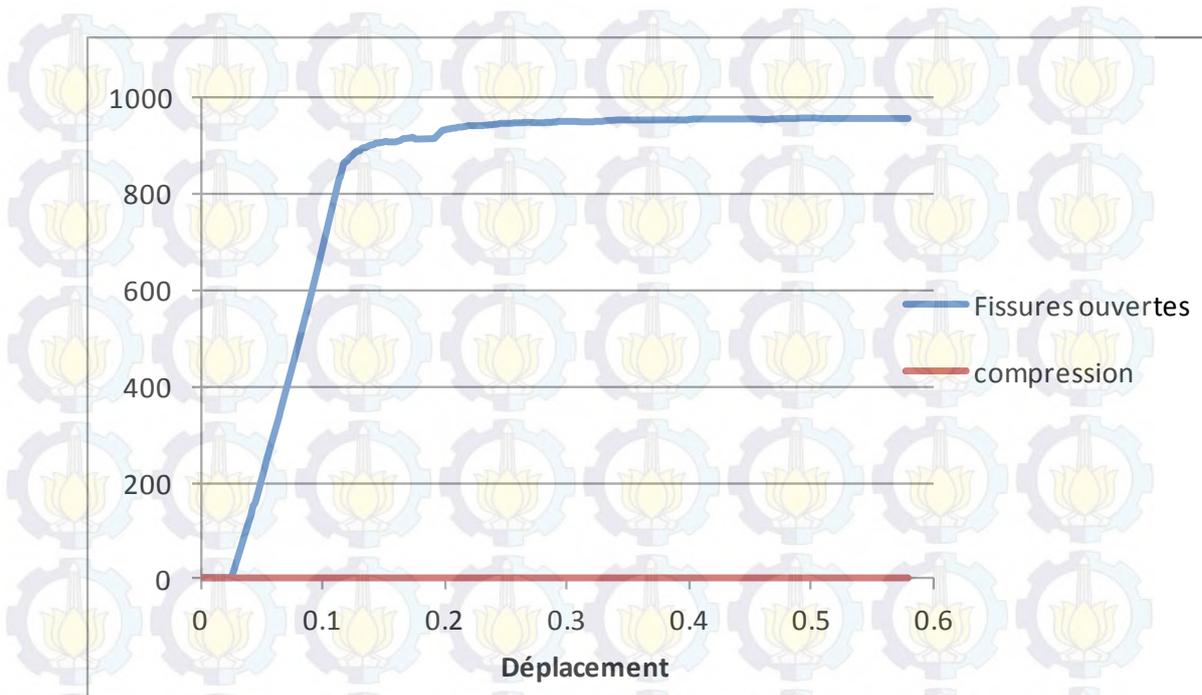


Figure 4.7 Points affectés par la Fissuration et la Compression

La figure 4.7 présente le nombre de points affectés par la fissuration (traction) et la compression. Le béton est un matériau qui est résistant à la compression mais faible par rapport à la traction. Par conséquent, le nombre de points affectés par la fissuration est beaucoup plus élevé que la compression.

La figure 4.8 montre les points affectés par la fissuration. La fissure 1 est perpendiculaire à la direction de la contrainte de traction principale majeure. La fissure 2 est perpendiculaire à la fissure 1.

La figure 4.9 représente la déformation minimale dans le béton. La déformation est proportionnelle au déplacement. Plus la valeur de la déformation effort, plus la valeur du déplacement est élevée. La déformation maximale est 0,00424 pour un déplacement de 0,58 cm.

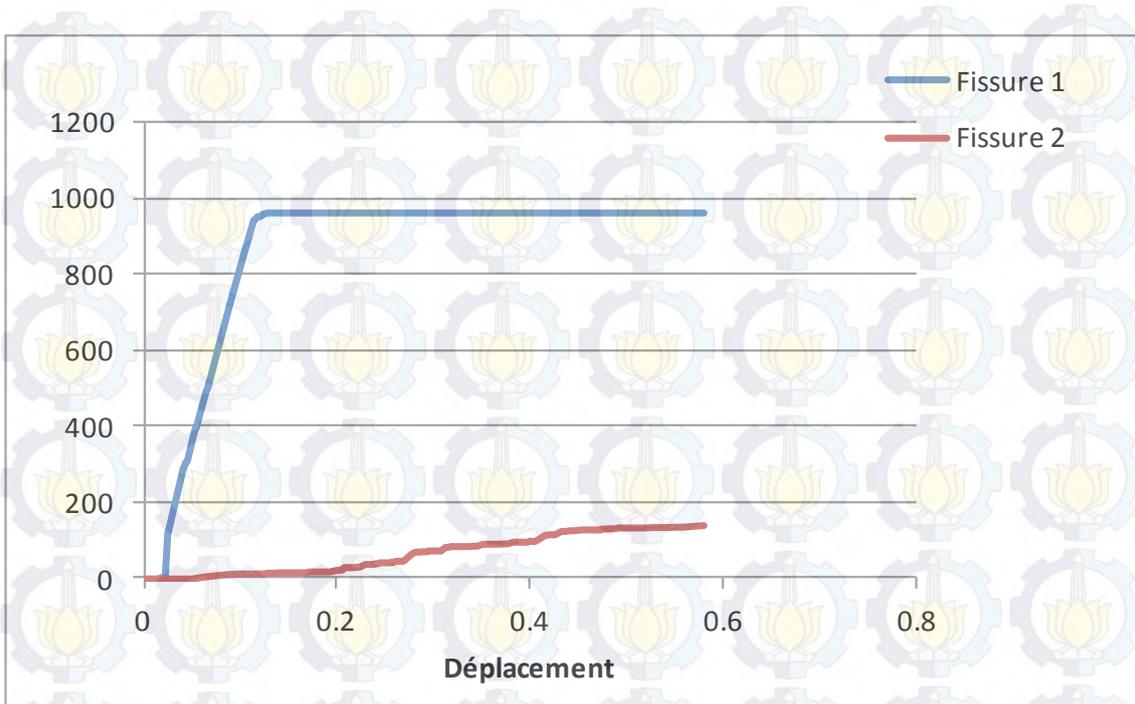


Figure 4.8 Points Affectés par la Fissuration

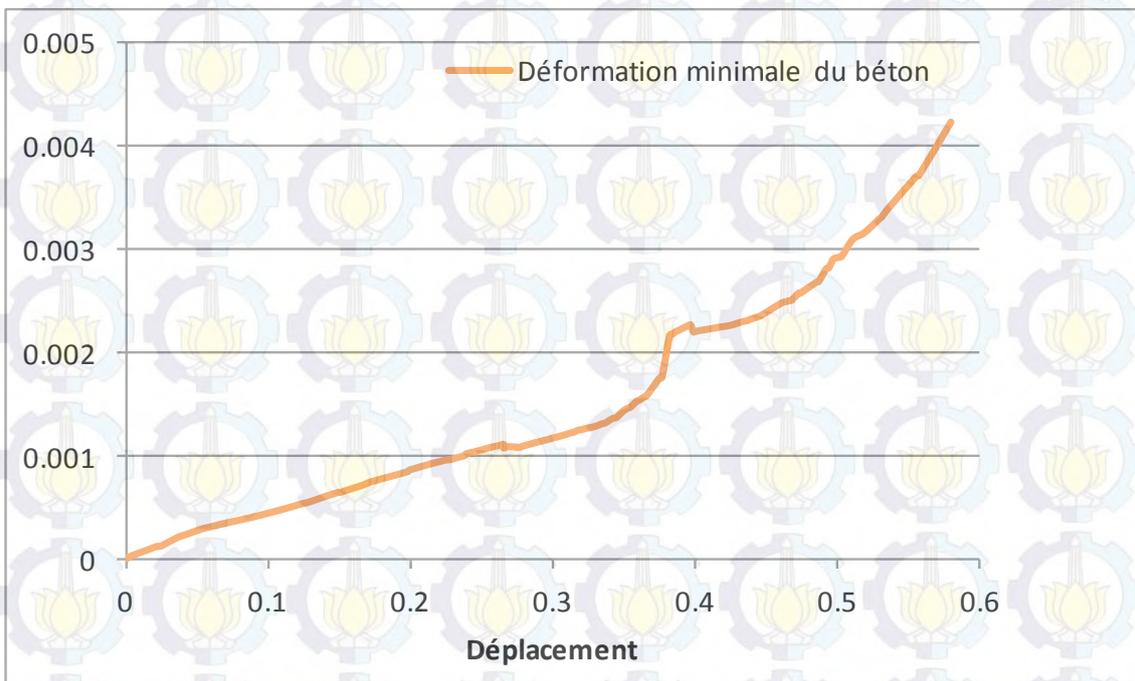


Figure 4.9 Déformation Minimale du Béton

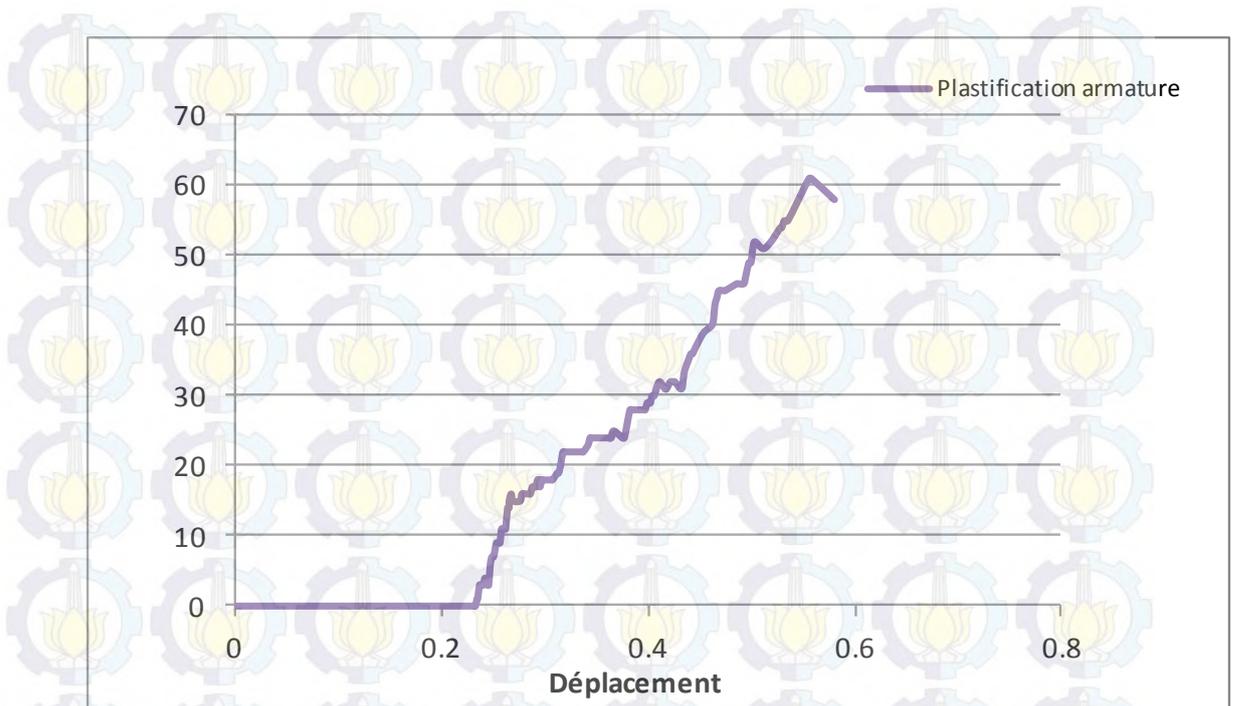


Figure 4.10 Plastification d'Armature

L'armature subit la plastification lorsque la traction à laquelle elle est soumise est supérieure à sa limite de résistance. La figure 4.10 représente le nombre de points de l'armature qui a subi la plastification. Le déplacement augmente avec l'augmentation du nombre de points de l'armature affectés par la plastification.

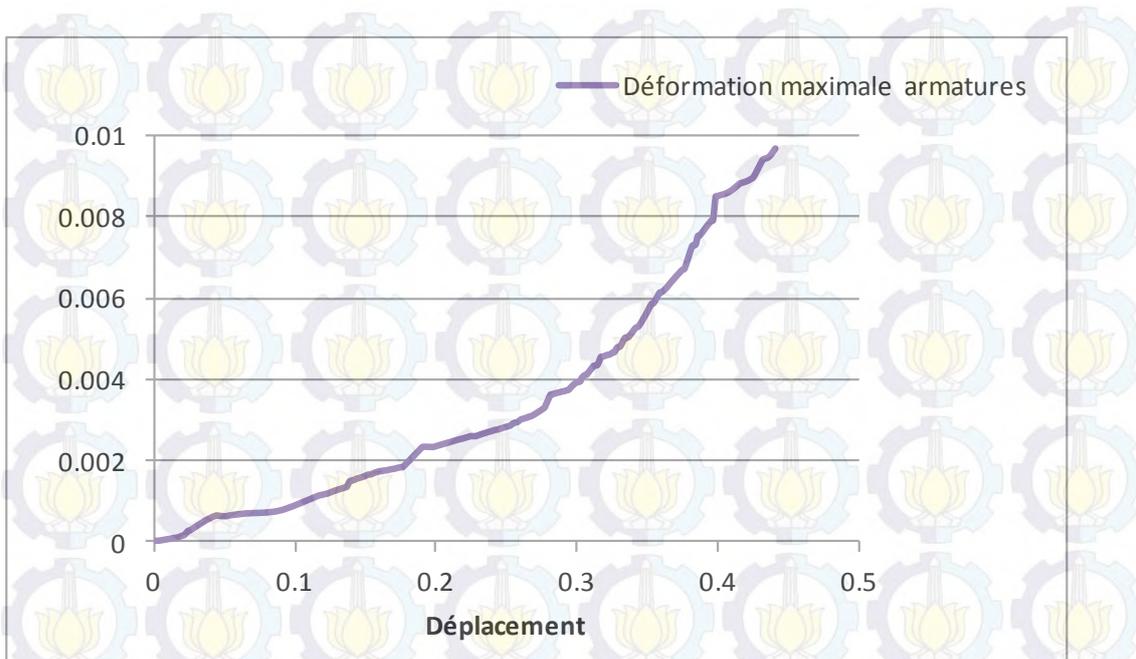


Figure 4.11 Déformation d'armature

La figure 4.11 montre la déformation maximale dans l'armature. La déformation est proportionnelle au déplacement. La déformation maximale est 0,00969 pour un déplacement de 0,441 cm.

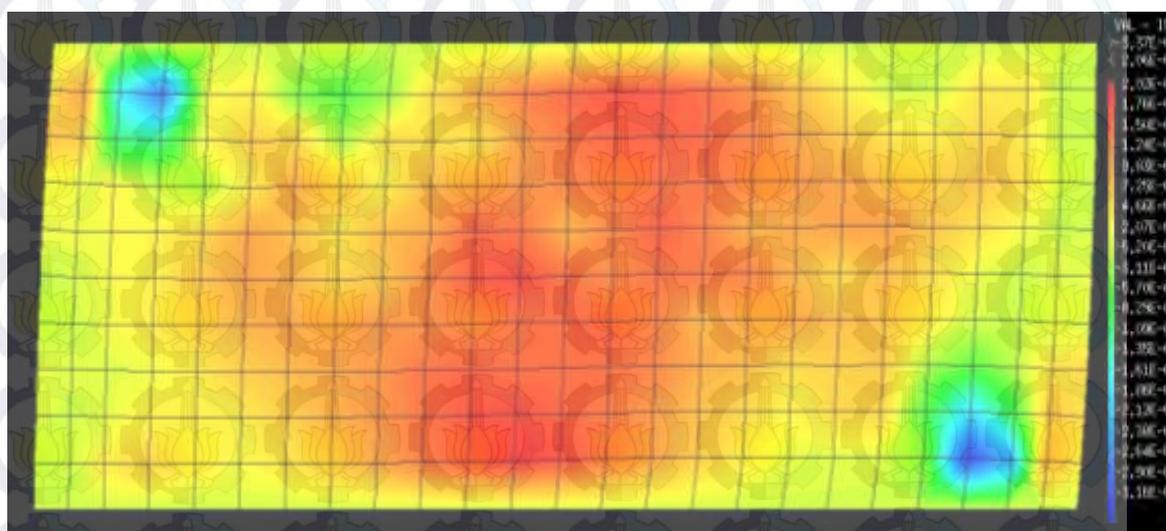


Figure 4.12 Déformation Horizontales dans le Béton

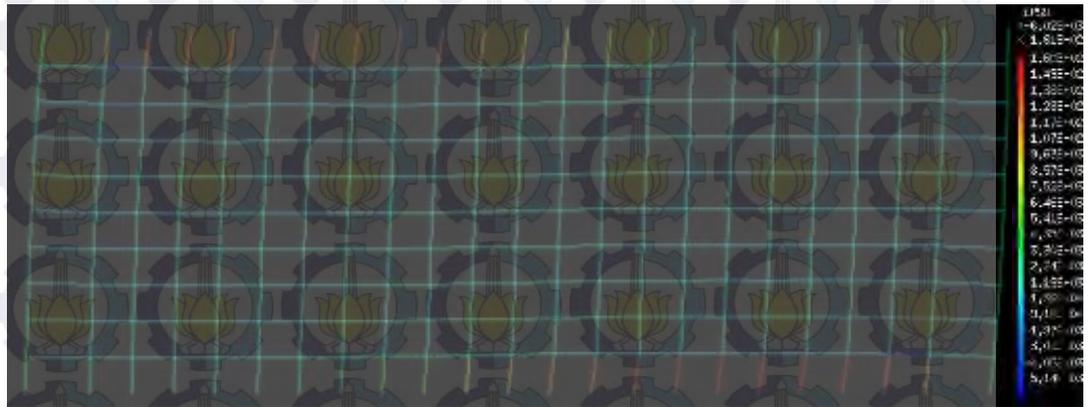


Figure 4.13 Déformation dans les Armatures

La figure 4.12 montre la déformation horizontale dans le béton. Dans la déformation horizontale du béton, la déformation maximale se situe sur le centre du voile. En général, il existe une fissure diagonale dans le centre du voile, due à la force horizontale imposée sur le voile. La déformation horizontale maximale est environ 0,002. La déformation maximale est environ 0,016 et se situe sur l'armature supérieure et sur l'armature inférieure du voile.

- Le déplacement imposé



Figure 4.14 Effort et Déplacement du Voile

La figure 4.14 est une courbe de force-déplacement obtenue à partir du déplacement imposé. La force maximale est 349000 kg pour un déplacement de 0,598 cm.

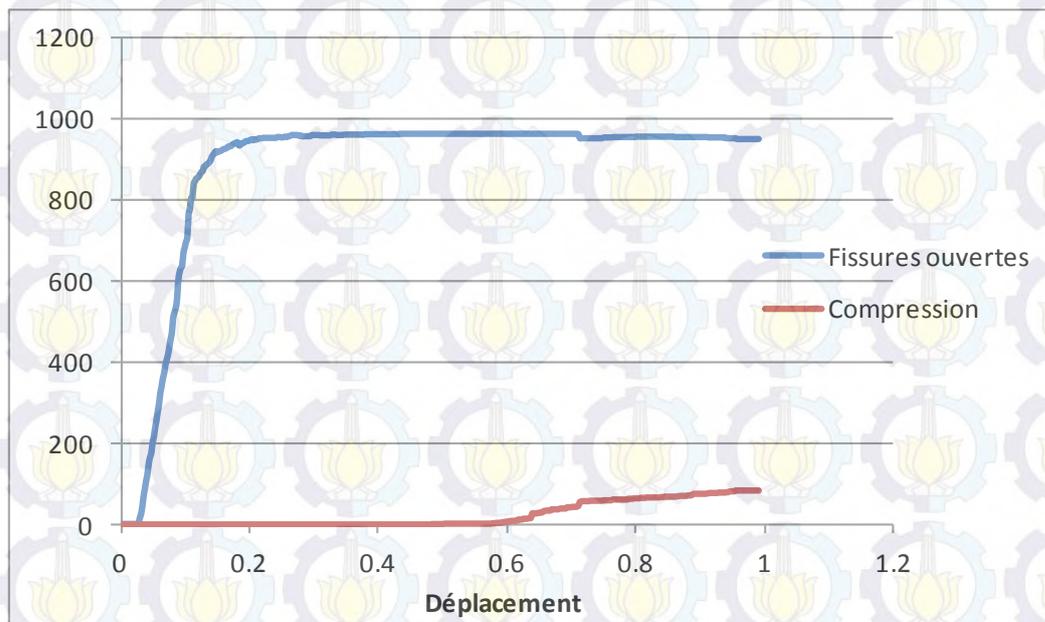


Figure 4.15 Points Affectés par la Fissuration et la Compression

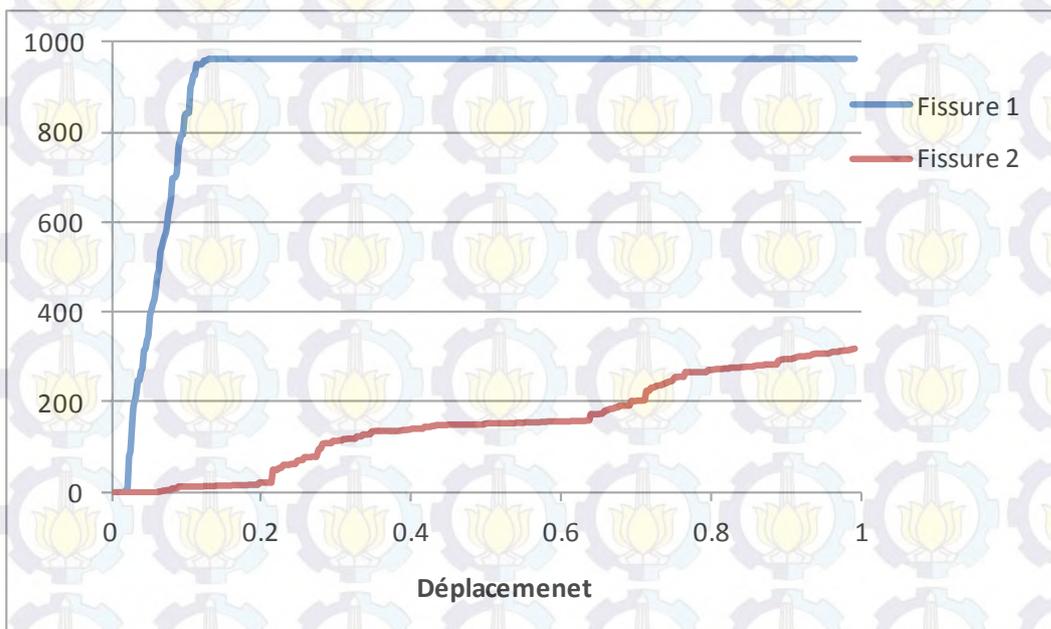


Figure 4.16 Points Affectés par la Fissuration

Même avec la force imposée, le nombre de points affectés par la fissuration est beaucoup plus élevé par rapport à la compression. En outre, le nombre de points affectés par la fissure 1 est beaucoup élevé par rapport à la fissure 2.

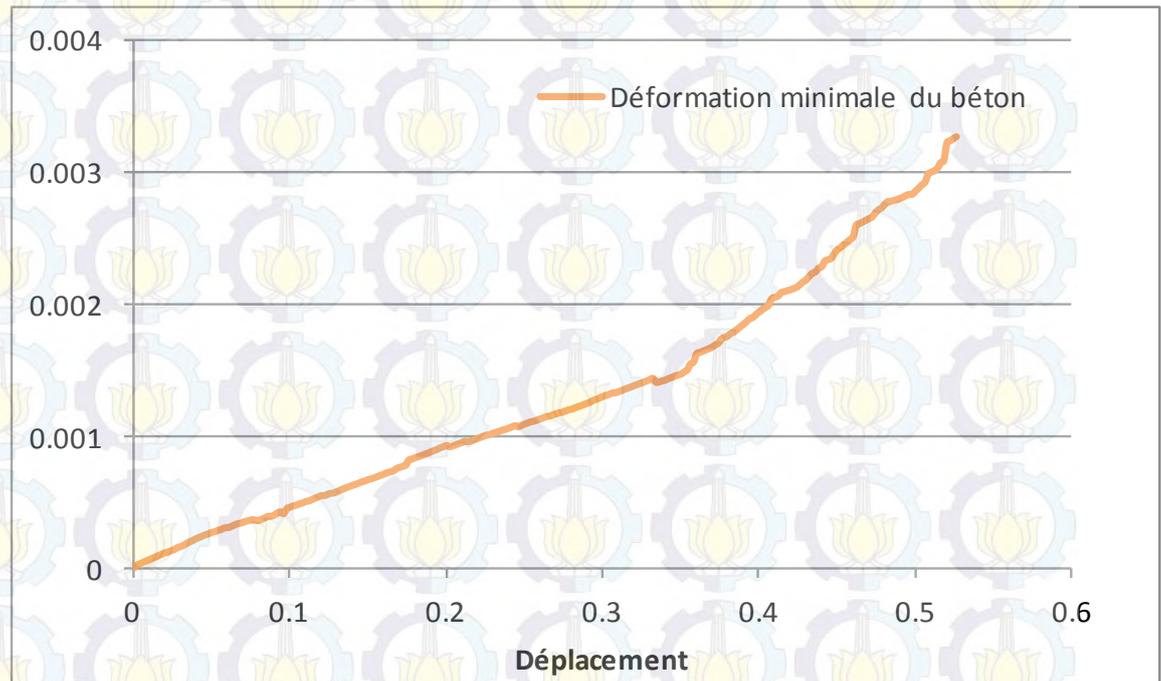


Figure 4.17 Déformation Minimale du Béton

La figure 4.17 représente la déformation minimale dans le béton. La déformation maximale est 0,00327 pour un déplacement de 0,526 cm. La figure 4.18 représente le nombre de points de l'armature qui a subi la plastification.

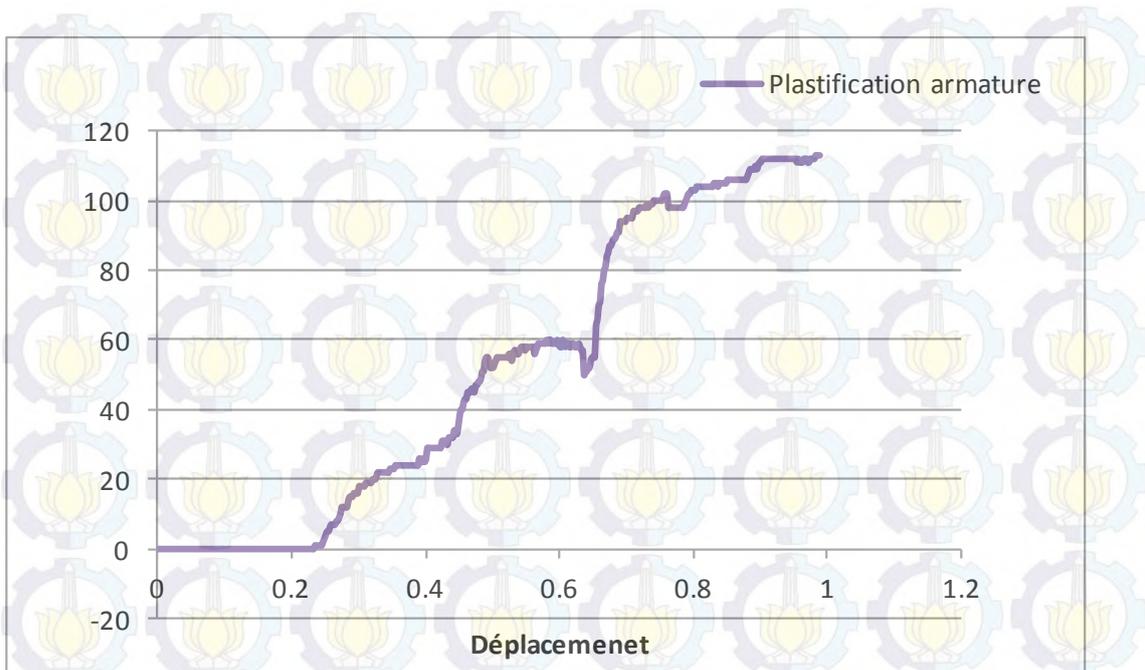


Figure 4.18 Plastification d'Armature

La figure 4.19 montre que la déformation de l'armature verticale est supérieure à la déformation de l'armature horizontale. C'est parce que dans cette modélisation, la force horizontale est plus dominante que la force verticale. L'armature qui détient la force horizontale (l'armature verticale) subit une plus grande déformation.

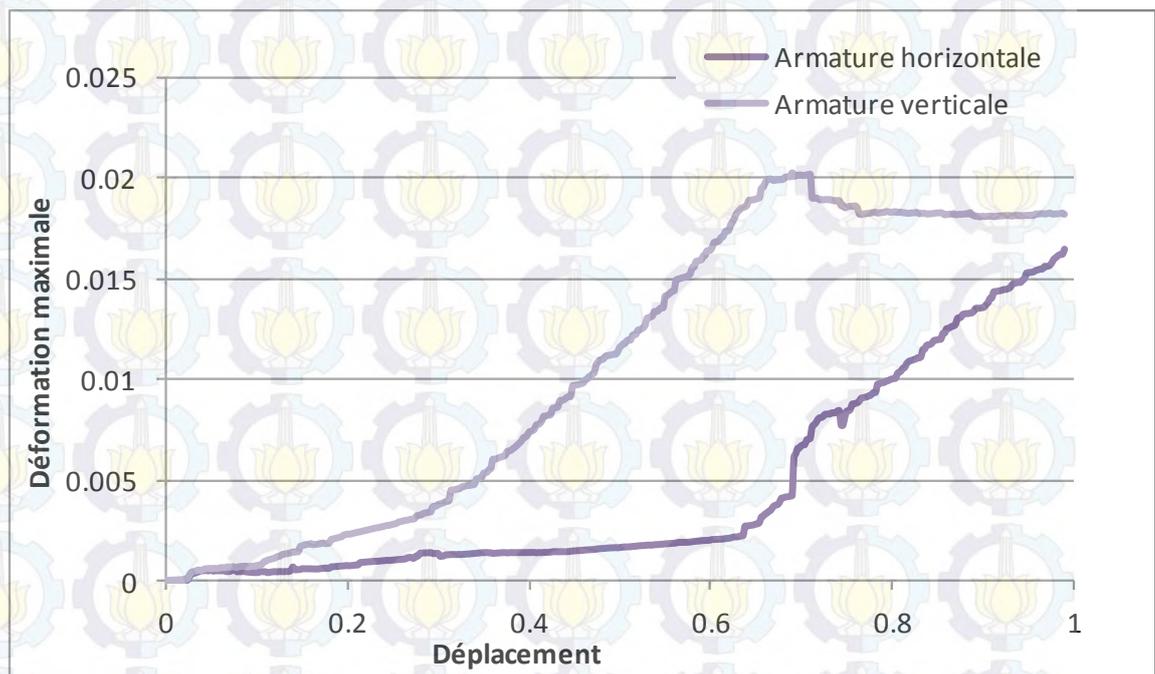


Figure 4.19 Déformation d'Armature Horizontale et Verticale

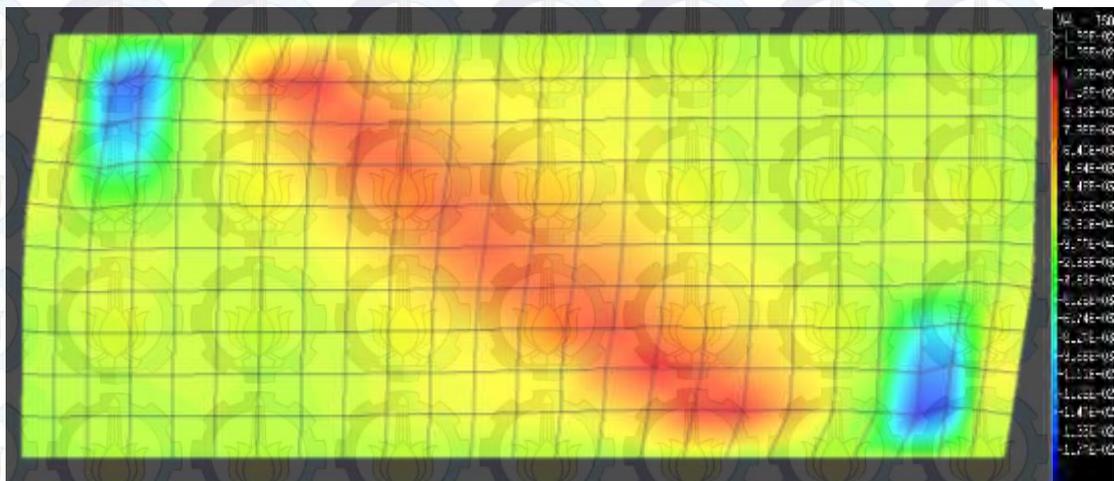


Figure 4.20 Déformation horizontale dans le béton

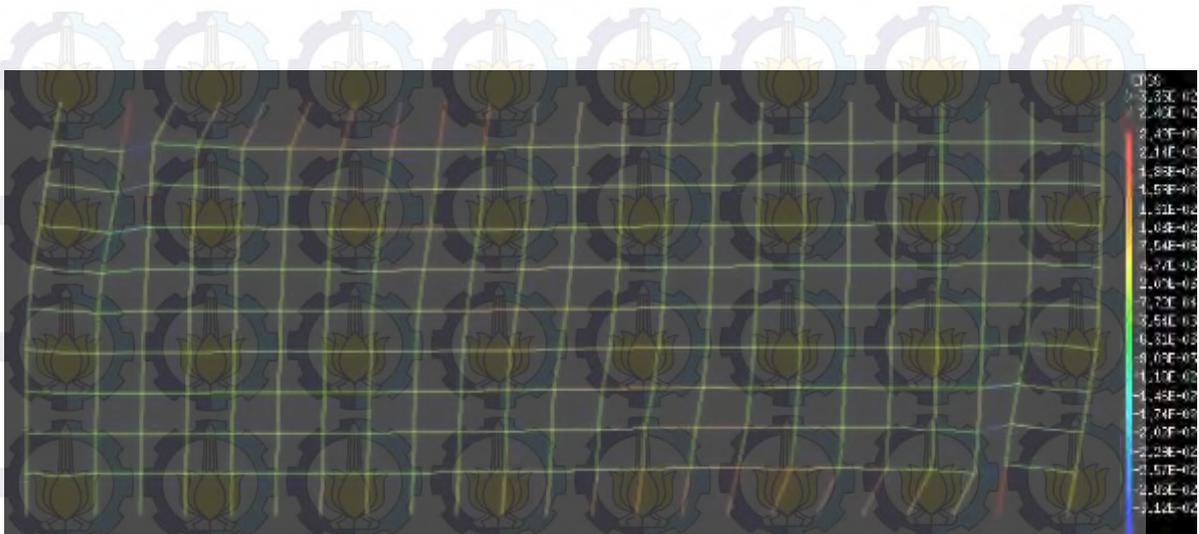


Figure 4.21 Déformation dans les Armatures

La figure 4.20 montre la déformation horizontale dans le béton. La déformation horizontale maximale est environ 0,0122. La figure 4.21 montre la déformation dans l'armature. La déformation maximale est environ 0,0242 et elle se situe sur l'armature supérieure et l'armature inférieure du voile.

4.2.1.2 Le Chargement Pseudodynamique

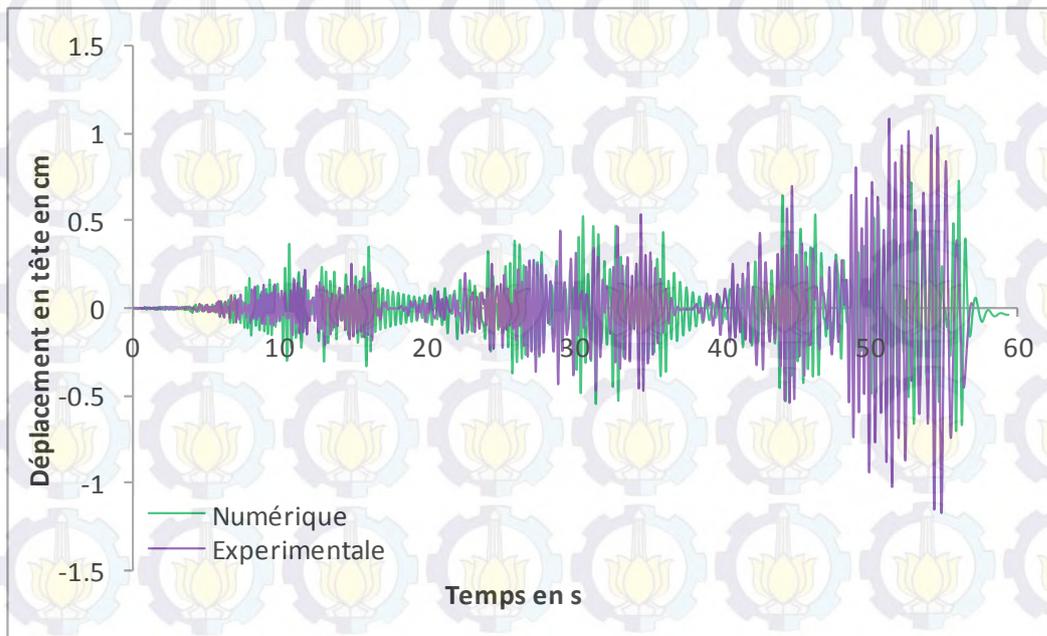


Figure 4.22 Comparaison Entre les Déplacements Numériques et les Déplacements Expérimentaux

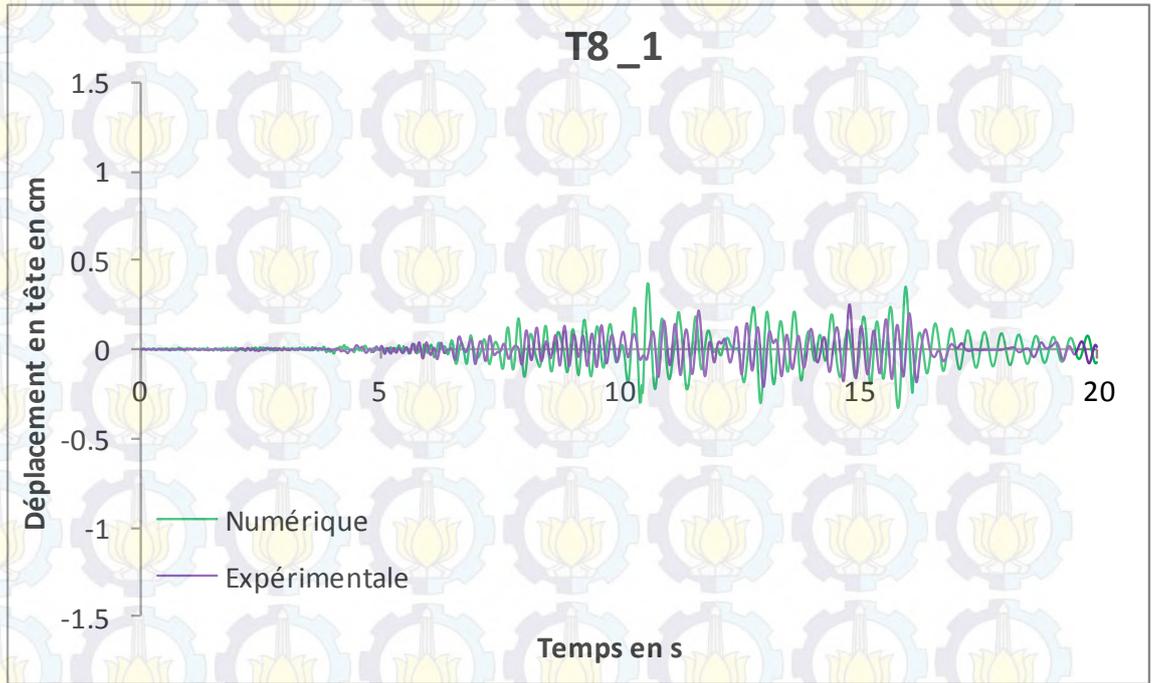


Figure 4.23 Comparaison du Déplacement T8_1

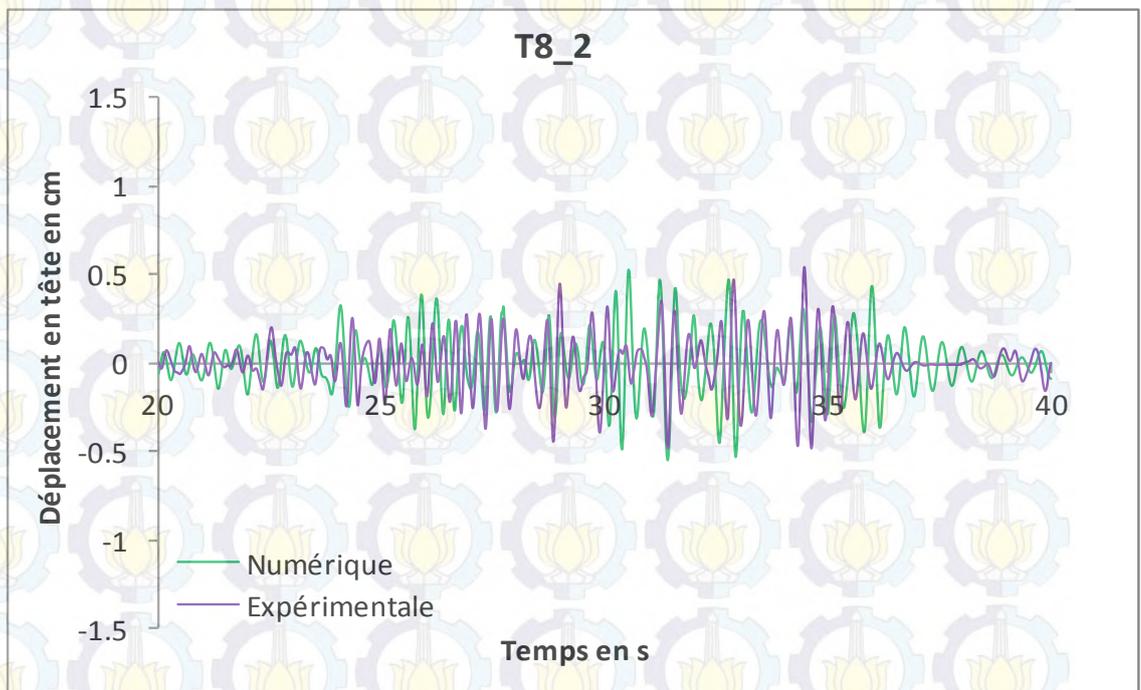


Figure 4.24 Comparaison du déplacement T8_2

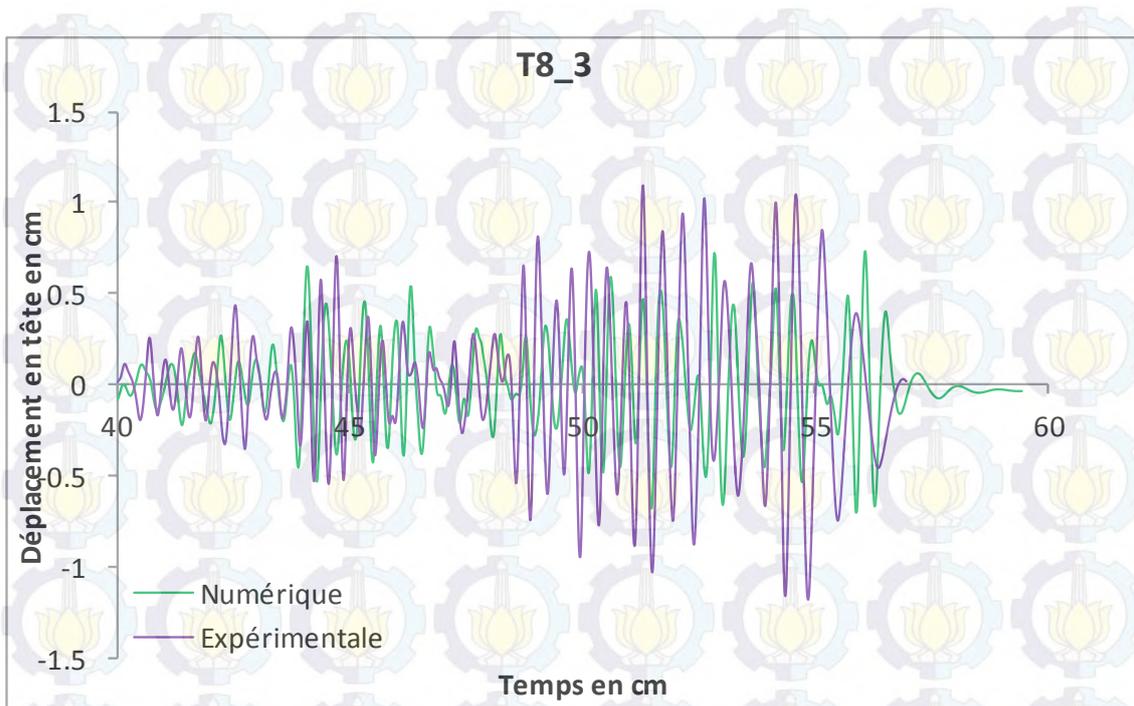


Figure 4.25 Comparaison du Déplacement T8_3

Tableau 4.4 Comparaison du déplacement du voile T8

	Déplacement Maximal		Déplacement Minimal	
	Numérique	Expérimental	Numérique	Expérimental
T8_1	0,3687	0,2550	-0,3316	-0,2120
T8_2	0,5270	0,5400	-0,5468	-0,4760
T8_3	0,7301	1,09	-0,7020	-1,18

Le déplacement calculé est le déplacement en tête du voile. Il existe des différences entre les résultats du déplacement numérique et ceux du déplacement expérimental. Les différences de la valeur maximale et la valeur minimale de chaque test de T8 apparaissent dans le tableau 4.4. On peut voir que dans T8_1, les résultats de la modélisation numérique sont plus grands que les résultats expérimentaux. En revanche, dans T8_2 et T8_3, des résultats expérimentaux sont plus grands que les résultats numériques. La plus grande différence se produit dans T8_3.

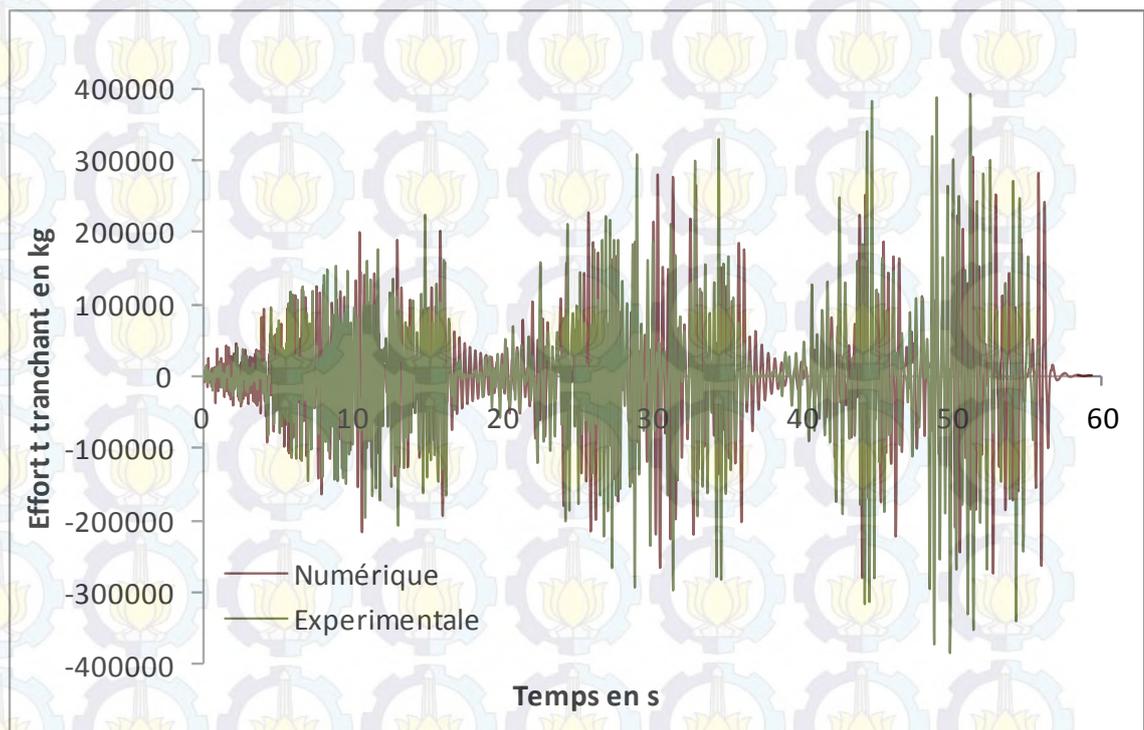


Figure 4.26 Comparaison Entre les Efforts Numériques et les Efforts Expérimentaux

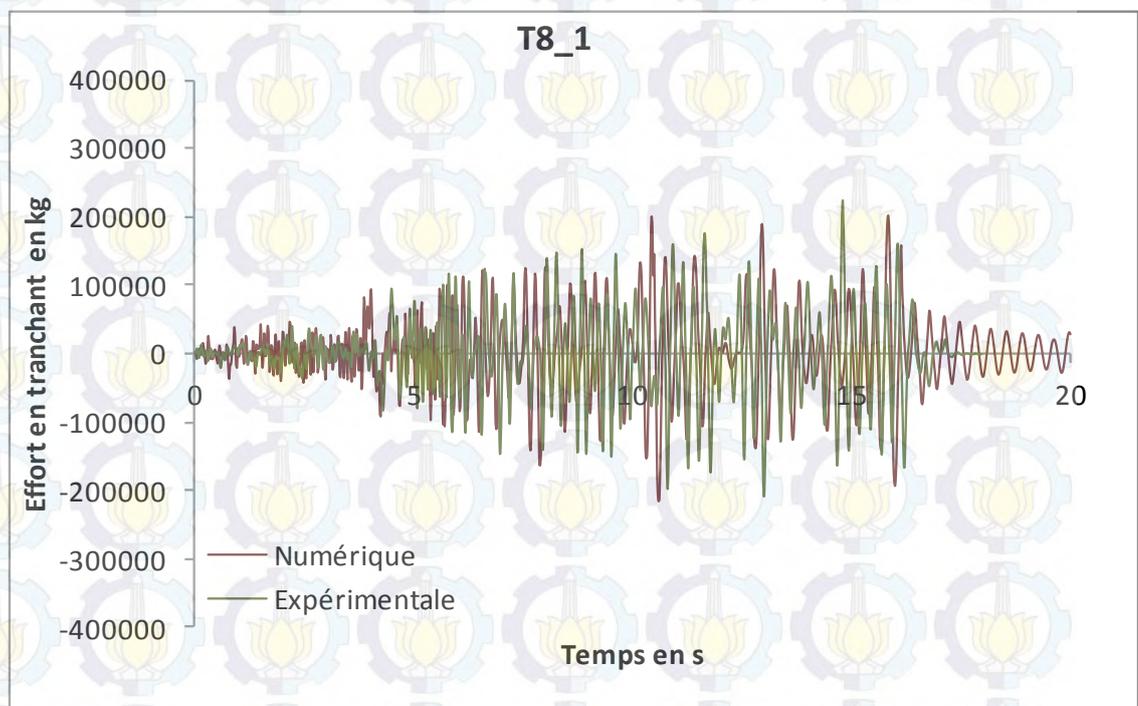


Figure 4.27 Comparaison l'Effort Tranchant T8_1

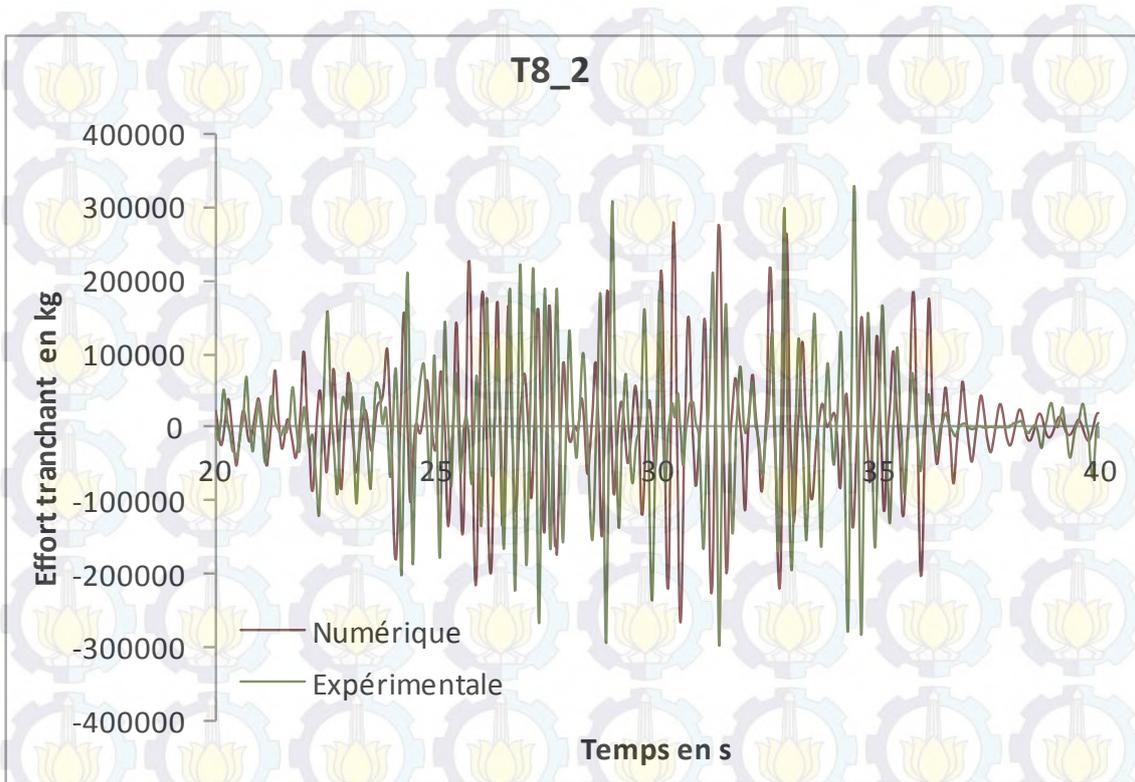


Figure 4.28 Comparaison l'Effort Tranchant T8_2

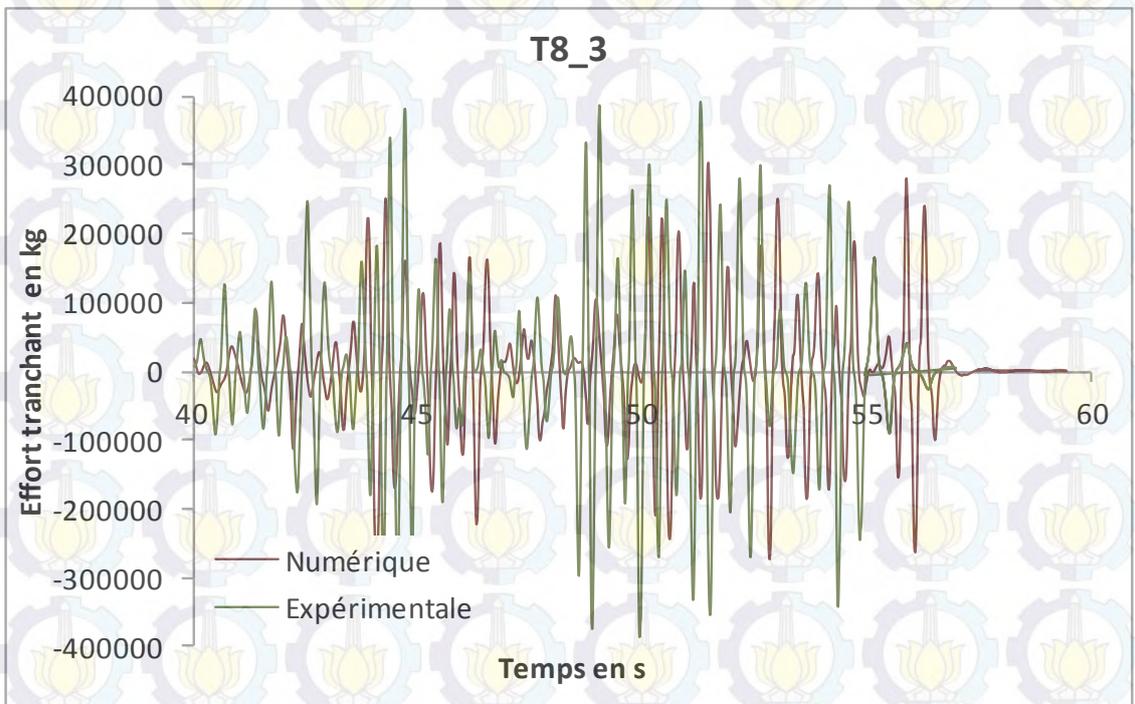


Figure 4.29 Comparaison de l'Effort Tranchant T8_3

Tableau 4.5 Comparaison de l'effort tranchant du voile T8

	Effort Maximal		Effort Minimal	
	Numérique	Expérimental	Numérique	Expérimental
T8_1	201029	224000	-217504	-208000
T8_2	279249	329000	-266974	-298000
T8_3	303932	392000	-281043	-385000

De même que pour le déplacement, il existe des différences entre les résultats de l'effort tranchant numérique et ceux de l'effort tranchant expérimental. Les différences de la valeur maximale et la valeur minimale de chaque test de T8 apparaissent dans le tableau 4.5. On peut voir que dans T8_1, T8_2, et T8_3 les résultats du expérimental sont plus grands par rapport aux résultats numérique. Pourtant, dans cet effort tranchant, la plus grande différence se produit dans T8_3.

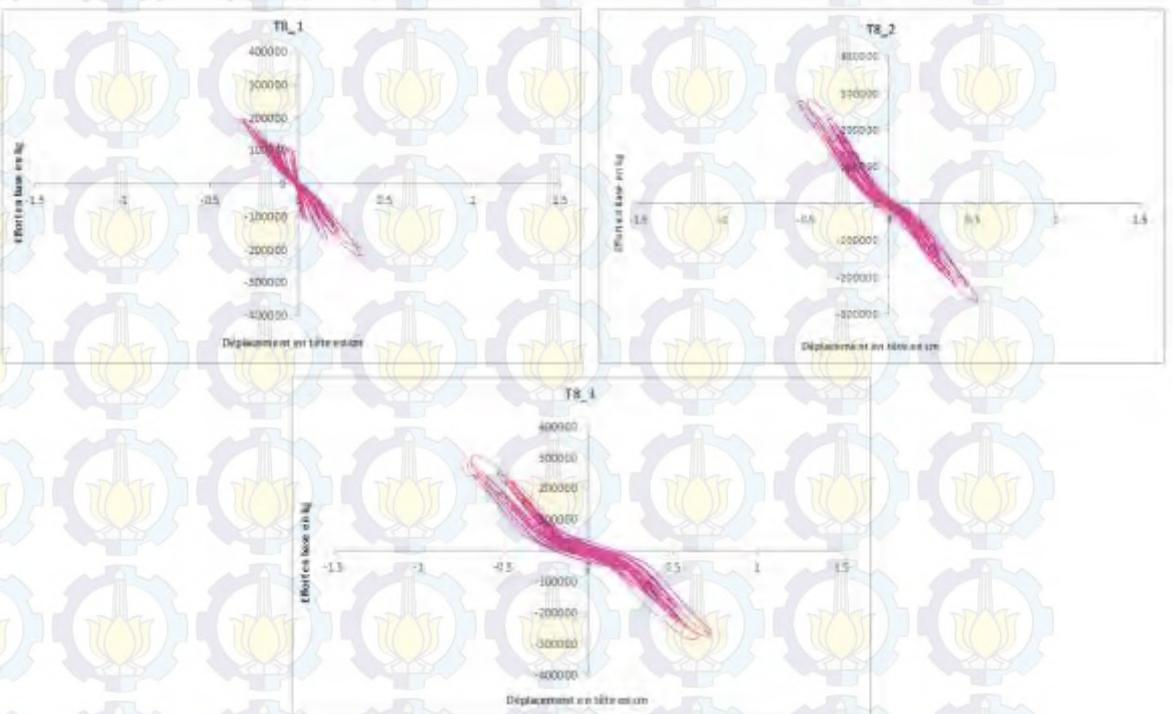


Figure 4.30 Courbes Effort Tranchant-déplacement en Tête de T8 Numérique

La figure 4.30 montre les courbes entre effort tranchant et déplacement en tête du voile (courbe d'hystérésis) pour chacun des chargements de T8. Cette courbe montre le comportement ductile de la structure et la capacité d'amortissement de la structure. La courbe d'hystérésis de T8_1 est instable, parce qu'à la fin du chargement, il y a une augmentation significative de la force suivie par une augmentation du déplacement. Dans ce T8_1, le mur se fissure légèrement. Tandis que sur T8_2, la courbe d'hystérésis est assez stable. Mais on peut voir ici qu'en même temps que l'augmentation d'effort tranchant, il y a aussi une augmentation significative du déplacement. Dans ce T8_2, le mur se fissure plus massivement. Et pour le test T8_3, on peut voir qu'il y a une augmentation très significative du déplacement lorsque l'effort absorbé n'est pas très différent de T8_2. Dans ce T8_3, le mur s'endommage de façon importante et est détruit.

4.1 Le Voile T13

4.3.1 Les Hypothèse de Caractéristique de Géometrie

De même que pour le voile T8, la modélisation du voile T13 à l'aide de CAST3M 2000 se fait uniquement sur le voile sans les longrines supérieure et inférieure. On modélise aussi les armatures verticales et horizontales du voile. Elles sont divisées en deux, à savoir l'armature du voile et l'armature de la nervure. De plus, ce mur a été par ailleurs renforcé extérieurement sur ses deux faces à l'aide de bandes verticales et horizontales de matériaux composites (CFRP).

4.3.2 Les Hypothèse de Caractéristique des Matériaux

Les caractéristiques de l'acier utilisées pour la modélisation sont les mêmes que les caractéristiques du voile T8. Les tableaux 4.6 et 4.7 suivants présentent les caractéristiques du béton et les caractéristiques du composite pour le voile T13.

Tableau 4.6 Caractéristiques du Béton

Module de Young (YOUNG)	310000 Kg /cm ²
Coefficient de Poisson (NU)	0,20
Contrainte ultime en compression simple (LCS)	411 Kg /cm ²
Déformation à la rupture en traction (EPUT)	0,0031
Déformation à la rupture en compression (EMAX)	0,011
Facteur transfert cisaillement (FTC)	0,30

Tableau 4.7 Caractéristiques du CFRP

Module de Young (YOUNG)	1500000 Kg /cm ²
Coefficient de Poisson (NU)	0,0
Déformation ultime	0,0056
Epaisseur	0,043 cm
Largeur	7,5 cm

4.3.3 Les Hypothèse de la Discretisation des Maillages

Les maillages sont définis en trois types des matériaux, le béton, l'acier, et le composite.

- Le Béton

Le maillage du béton est modélisé avec un modèle de quadrilatéraux 4 nœuds (QUA4). Le maillage du voile est choisi suffisamment fin, égal à 2,5 cm, afin de satisfaire la configuration de renforcement réel tout en adoptant l'hypothèse de liaison parfaite.

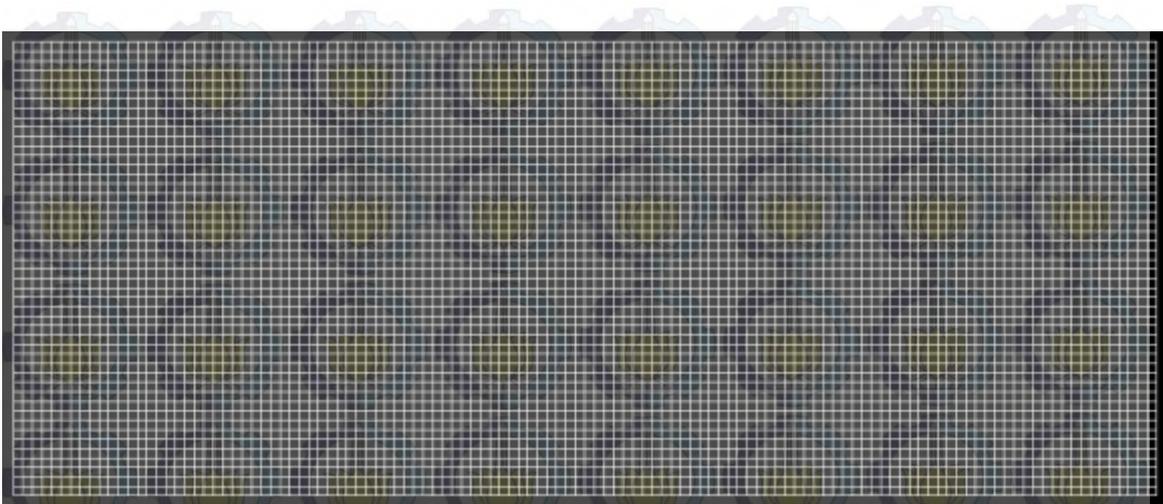


Figure 4.31 Maillage du Béton

- L'acier

Les aciers sont représentés par des barres uniaxiales dont les nœuds sont reliés aux nœuds du béton. L'armature d'acier est modélisée à l'aide des éléments de barres linéaires associés à la loi cyclique uniaxiale proposé par Pinto-Manegotto.

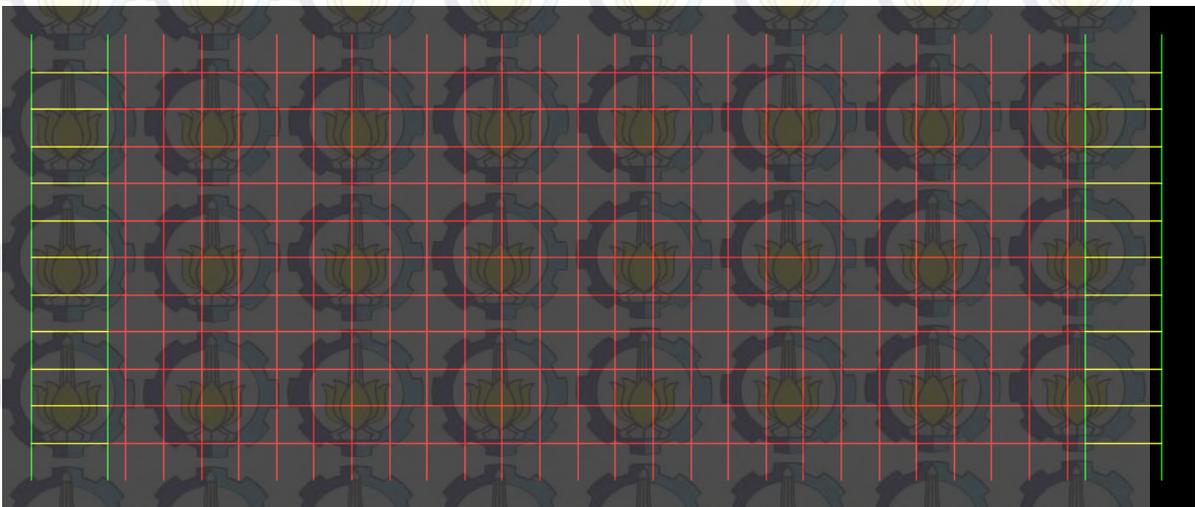


Figure 4.32 Maillage d'Acier

- Le composite

Le CFRP est représenté par des barres uniaxiales dont les nœuds sont reliés aux nœuds du béton. Les bandes de CFRP sont modélisées par trois éléments de barre dont la section totale est égale à la section de la grande

plaque de CFRP de 75 mm. Les trois nœuds des barres sont directement connectés aux nœuds du béton sous l'hypothèse de liaison parfaite.

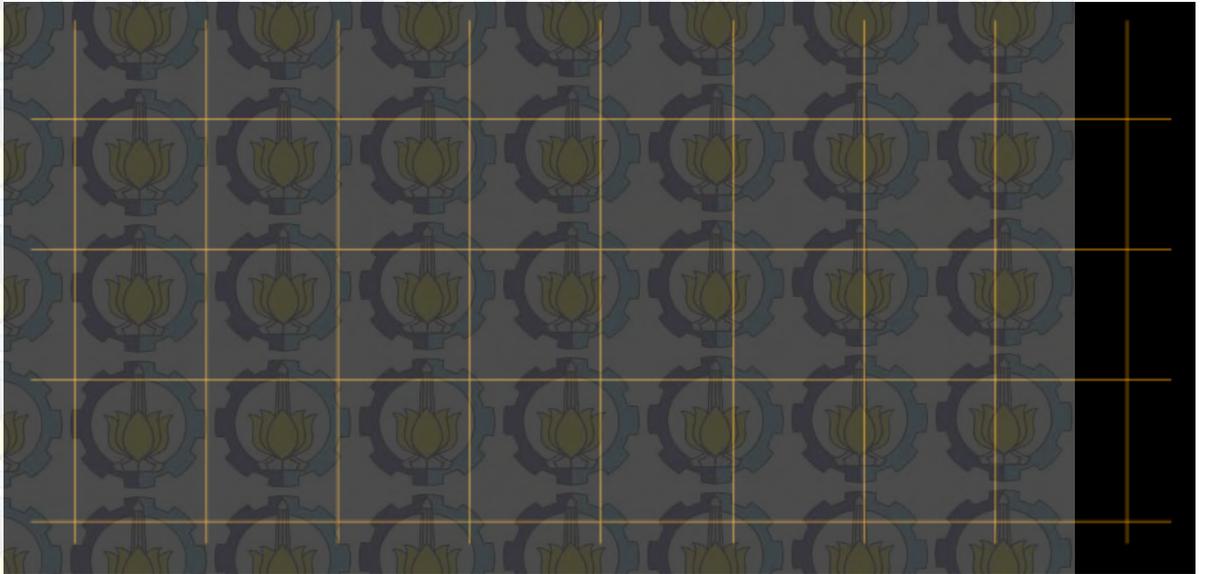


Figure 4.33 Maillage du Composite

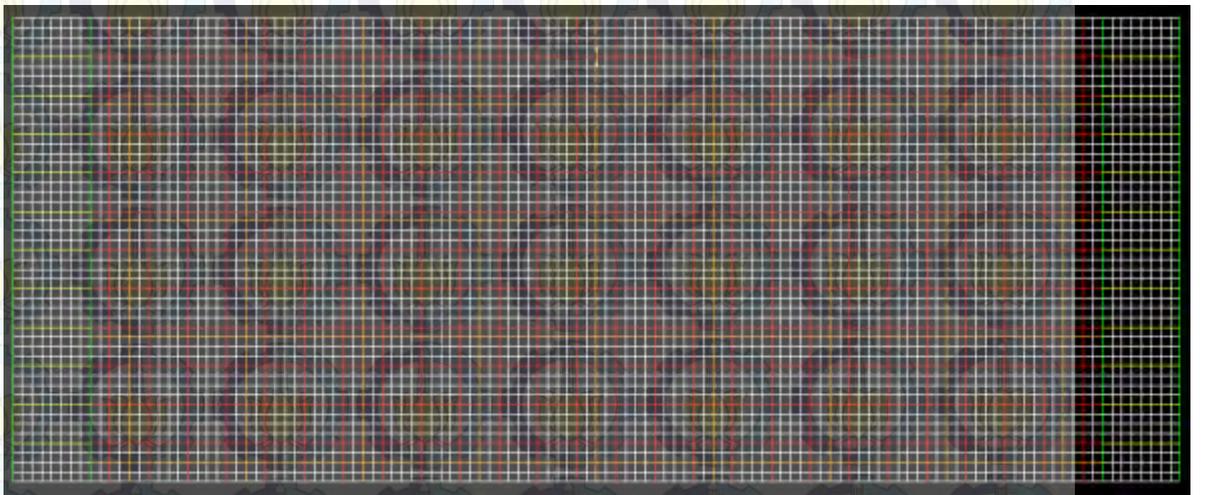
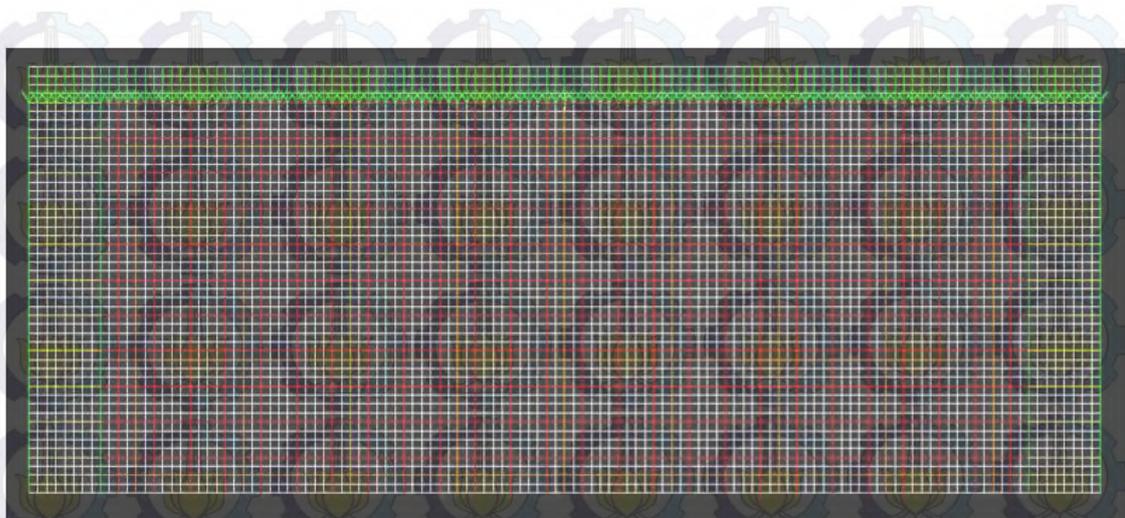


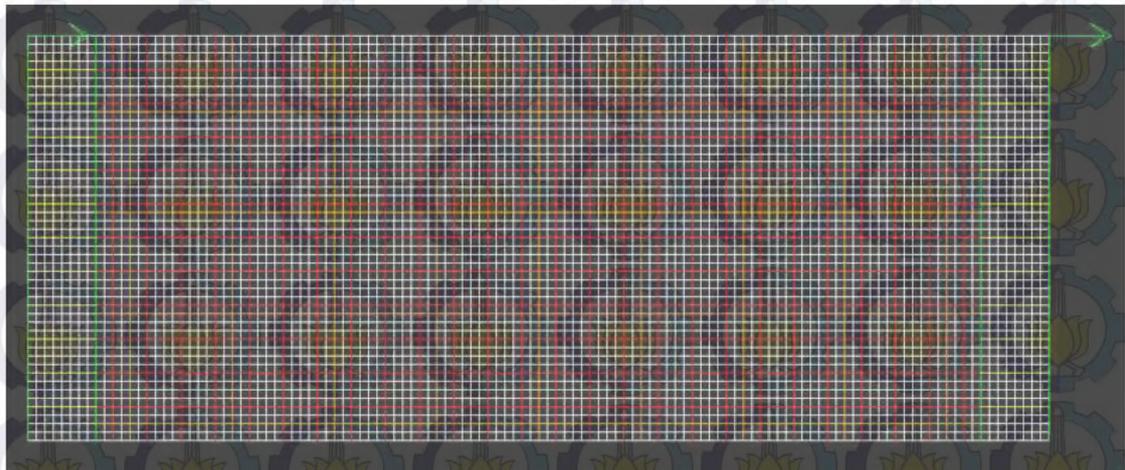
Figure 4.34 Maillage Total du Voile en Béton Armé

4.3.4 Les Hypothèses des Chargements

Les hypothèses des conditions aux limites et des chargements du voile T13 sont même avec le voile T8.



(a)



(b)

Figure 4.35 (a) Chargement Vertical sur le Voile (b) Force Imposée sur le Voile

4.3.5 Les Résultats et l'Analyse

4.3.5.1 Le Chargement Quasi-Statique

- La force imposée

La figure suivante est une courbe de force-déplacement obtenue à partir de la force imposée. La force maximale est 263759 kg pour un déplacement de 0,29 cm.



Figure 4.36 Effort et Déplacement du Voile

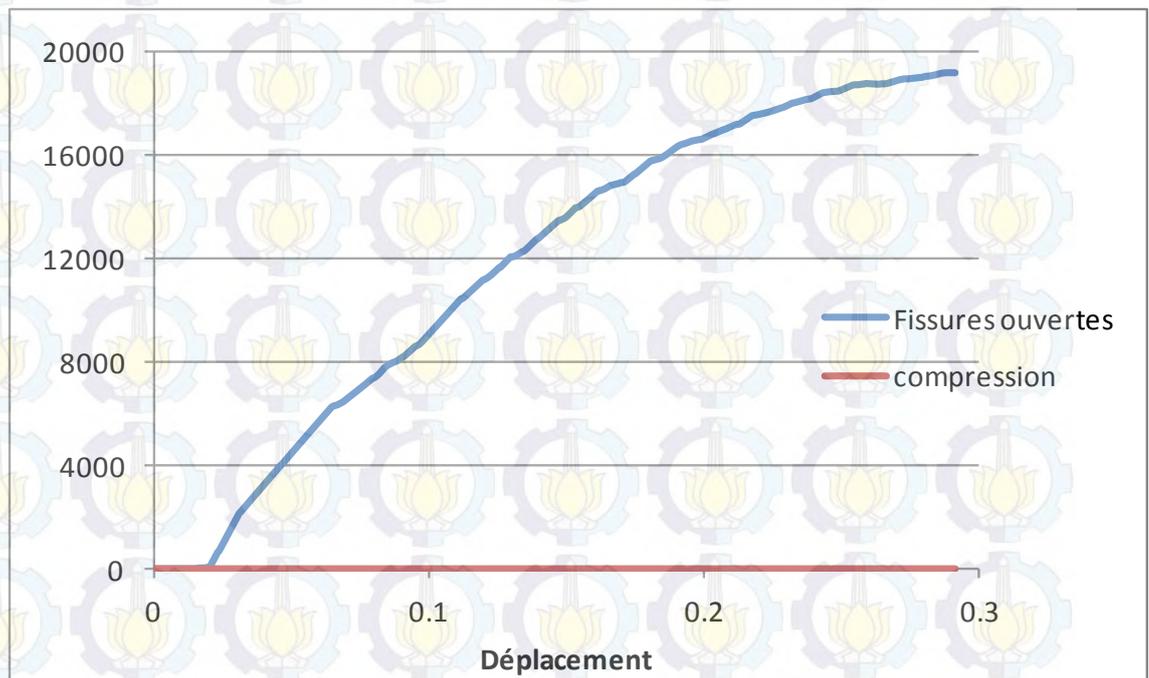


Figure 4.37 Points Affectés par la Fissuration et la Compression

Le nombre de points affectés par la fissuration est beaucoup plus élevé qu'à la compression. En comparaison avec le voile T8, le nombre de points

affectés par la fissuration dans le voile T13 est beaucoup plus élevé. Il est dû à la taille de la maille qui est très fine.

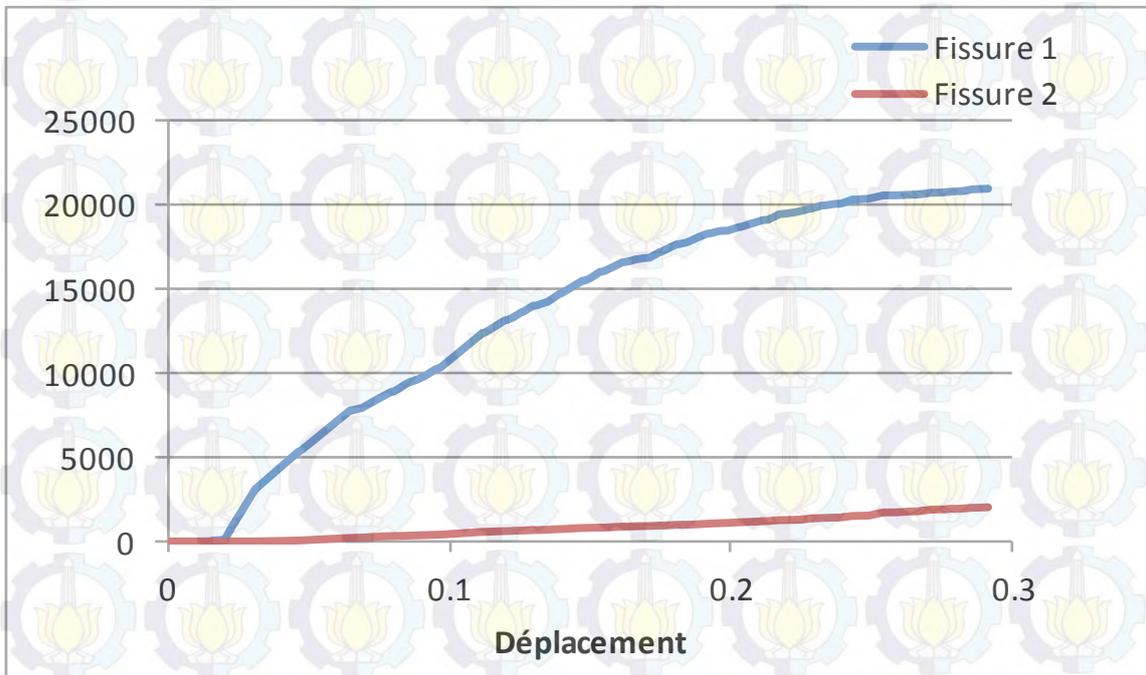


Figure 4.38 Points Affectés par la Fissuration

La figure 4.39 suivante représente la déformation minimale du béton.

La déformation maximale est 0,00226 pour un déplacement de 0,29 cm.

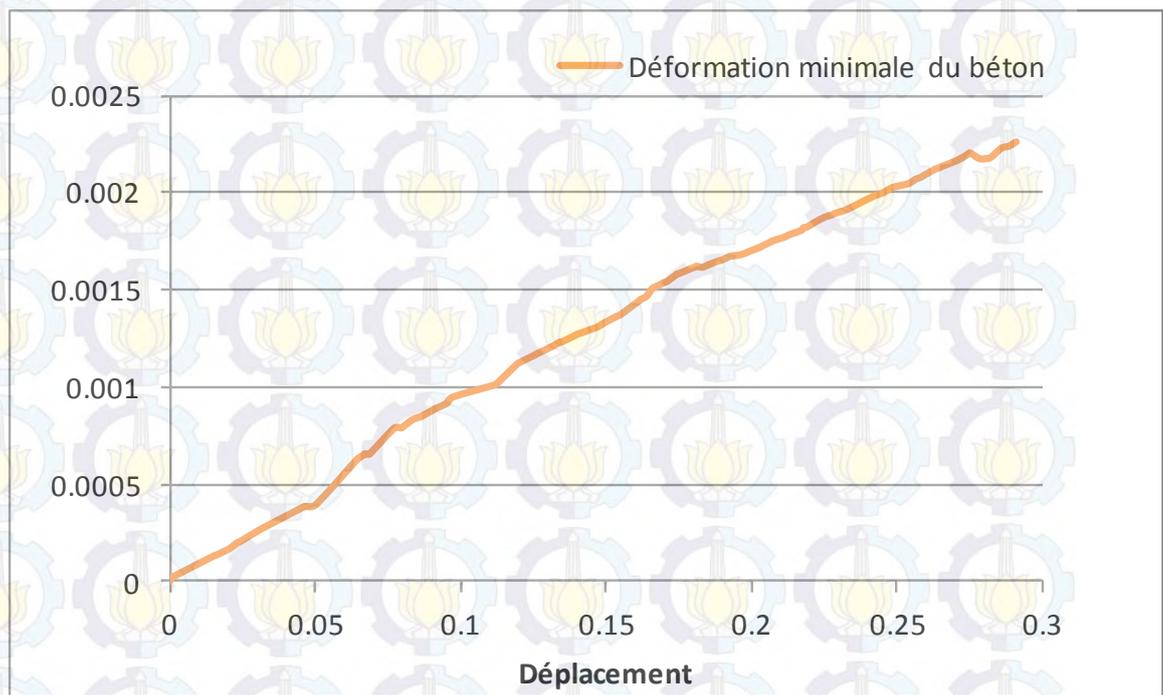


Figure 4.39 Déformation Minimale du Béton

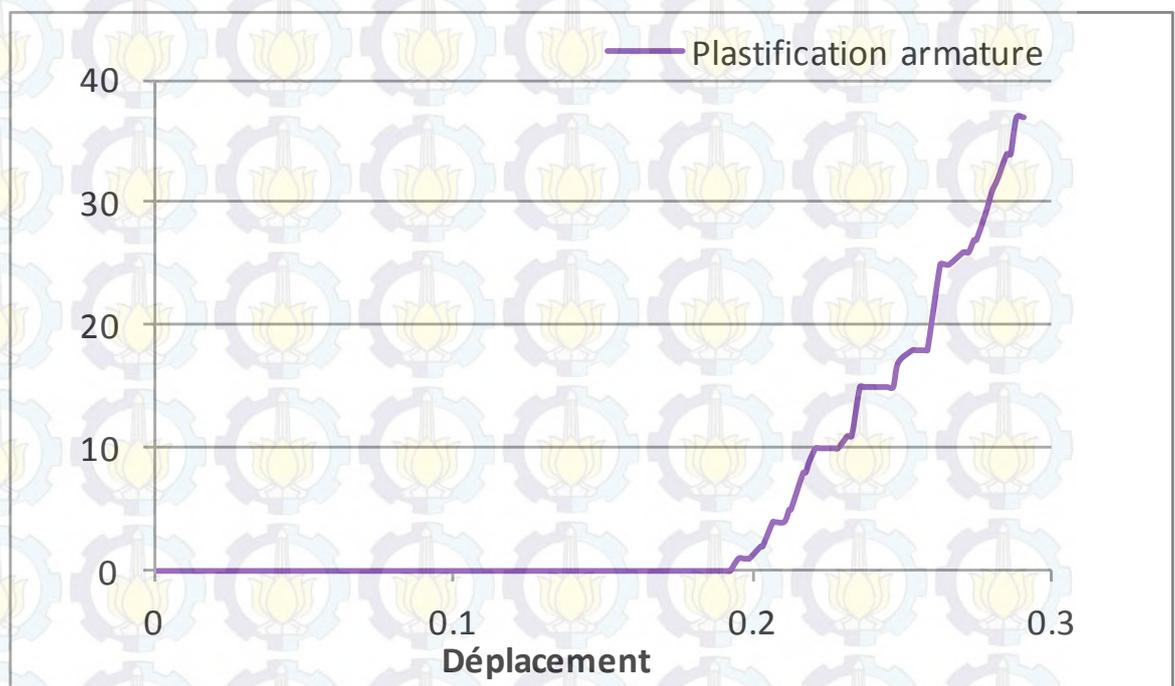


Figure 4.40 Plastification d'Armature

L'armature subit la plastification lorsque la traction à laquelle elle est soumise est supérieure à sa limite de résistance. La figure 4.40 représente le

nombre de points de l'armature qui a subi la plastification. Le déplacement augmente avec l'augmentation du nombre de points de l'armature affectés par la plastification.

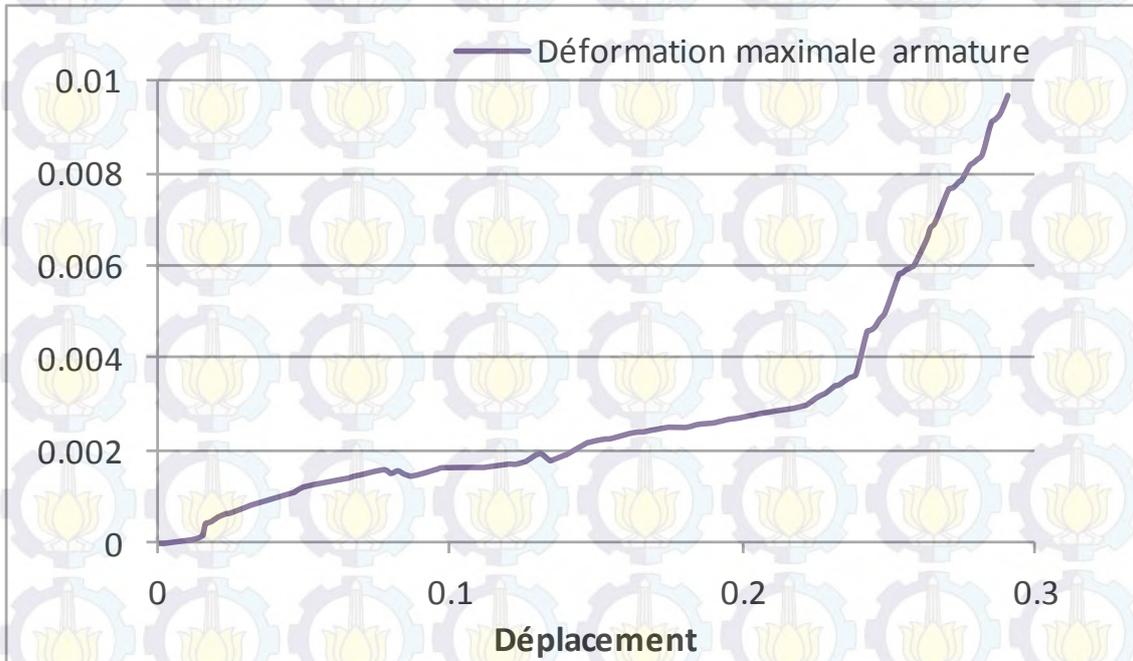


Figure 4.41 Déformation d'Armature

La figure 4.41 montre la déformation maximale dans l'armature. La déformation est proportionnelle au déplacement. La déformation maximale est 0,00967 pour un déplacement de 0,29 cm.

- Le déplacement imposé



Figure 4.42 Effort et Déplacement du Voile

La figure 4.42 est une courbe de force-déplacement obtenue à partir du déplacement imposé. La force maximale est 344000 kg pour un déplacement de 0,48 cm.

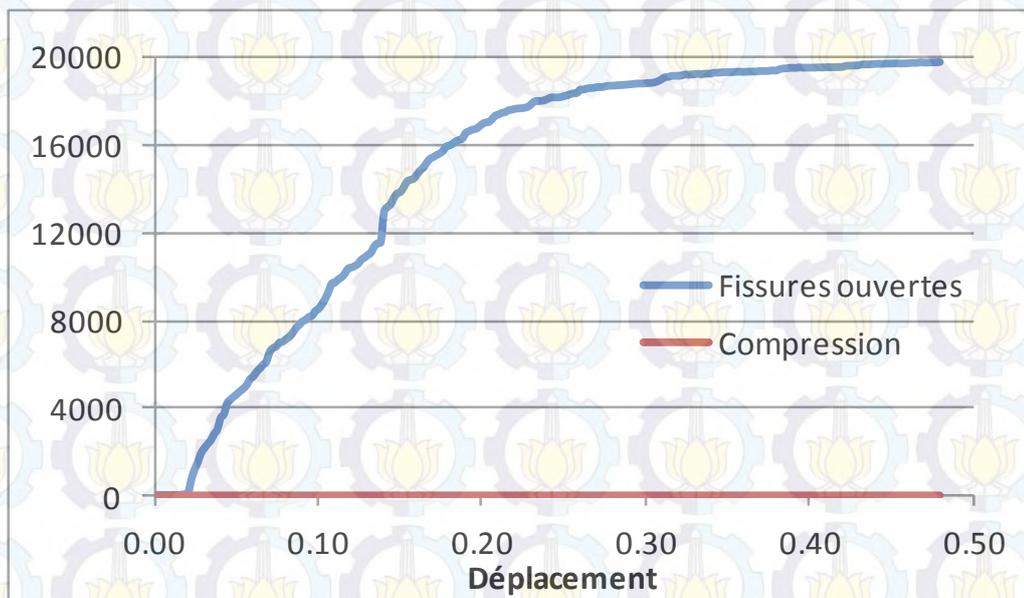


Figure 4.43 Points Affectés par la Fissuration et la Compression

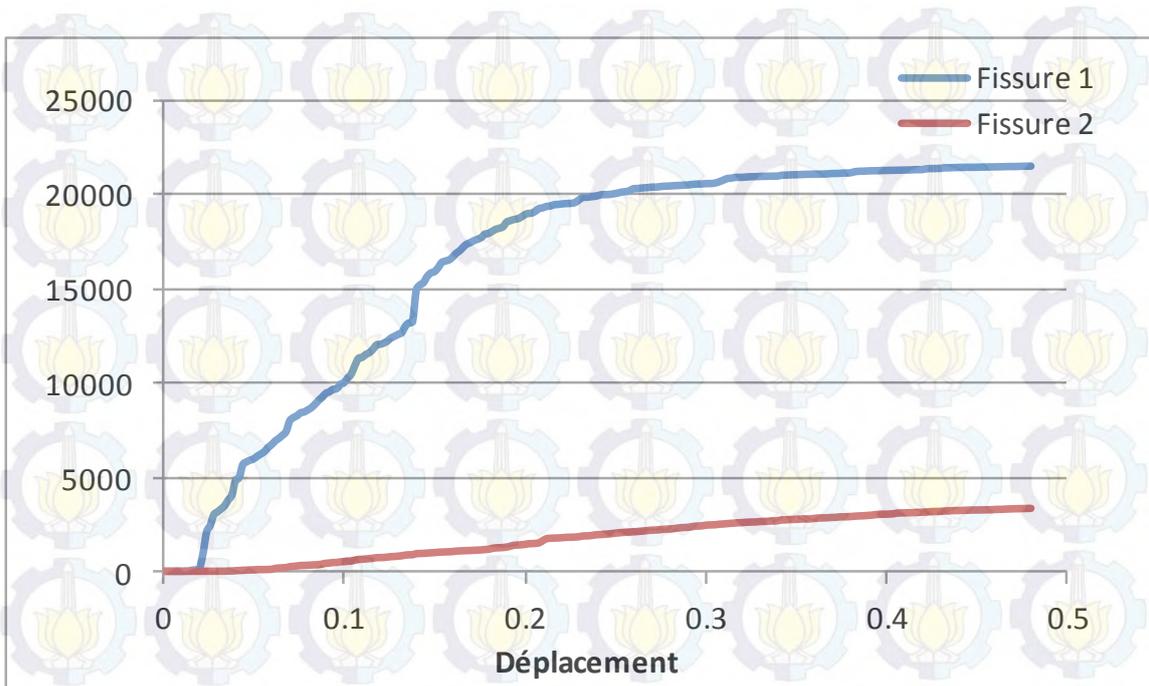


Figure 4.44 Points Affectés par la Fissuration

Même avec la force imposée, le nombre de points affectés par la fissuration est beaucoup plus élevé qu'à la compression. En outre, le nombre de points affectés par la fissure 1 est beaucoup plus élevé qu'à la fissure 2.

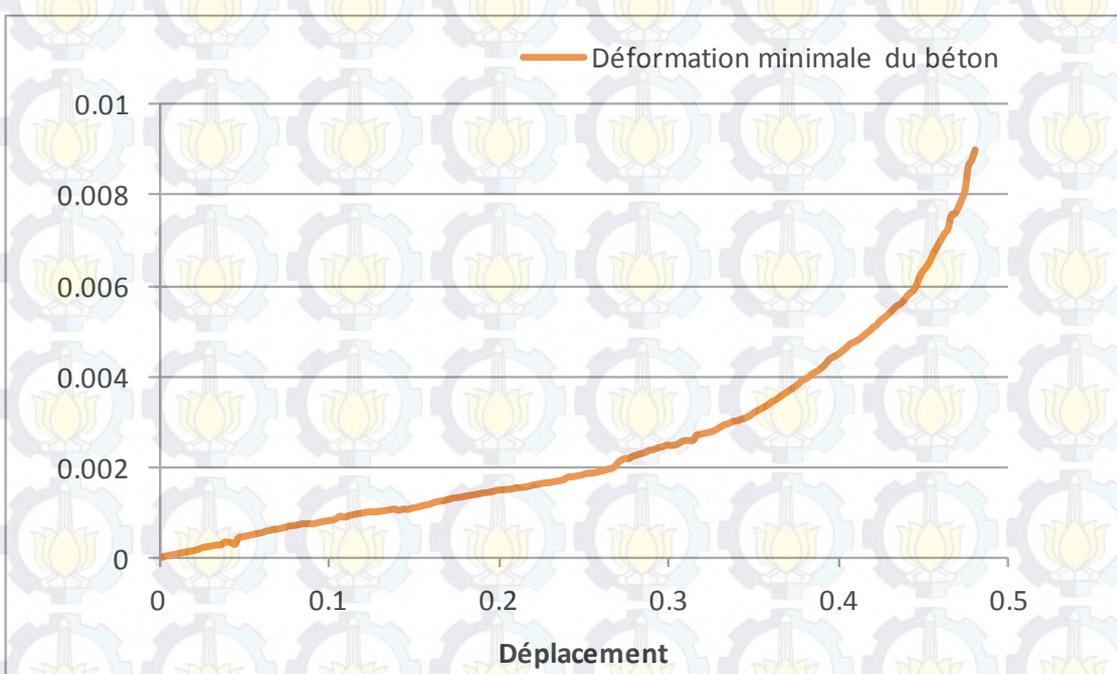


Figure 4.45 Déformation Minimale du Béton

La figure 4.45 représente la déformation minimale du béton. La déformation maximale est 0,00898 pour un déplacement de 0,48 cm. La figure 4.46 représente le nombre de points de l'armature qui a subi la plastification.

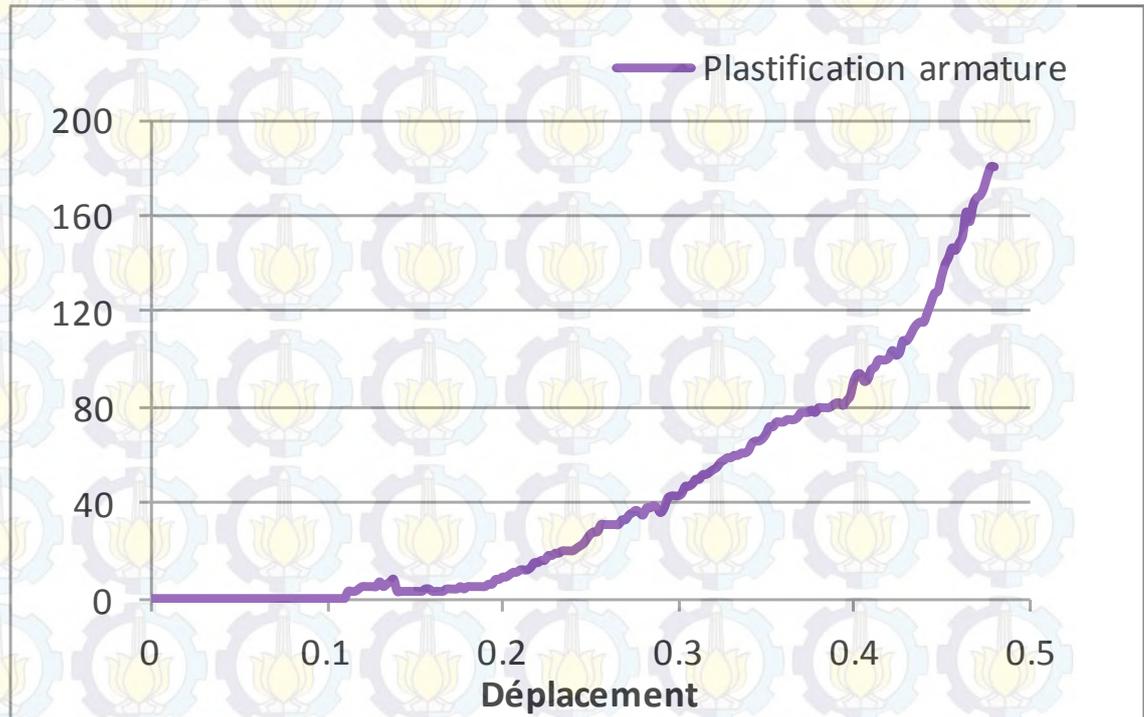


Figure 4.46 Plastification d'Armature

La figure 4.47 montre que la déformation de l'armature verticale est supérieure à la déformation de l'armature horizontale. C'est parce que dans cette modélisation, la force horizontale est plus dominante que la force verticale. L'armature qui détient la force horizontale (l'armature verticale) subit une plus grande déformation.

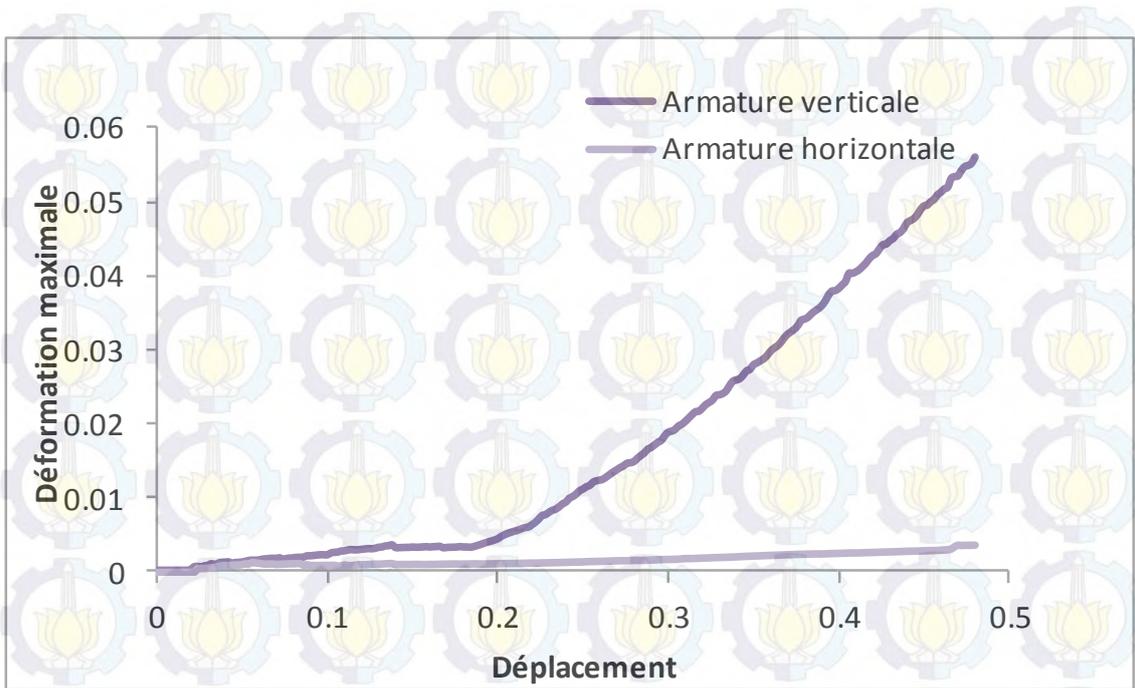


Figure 4.47 Déformation d'Armature Horizontale et Verticale

4.3.5.2 Le Chargement Pseudo-Dynamique

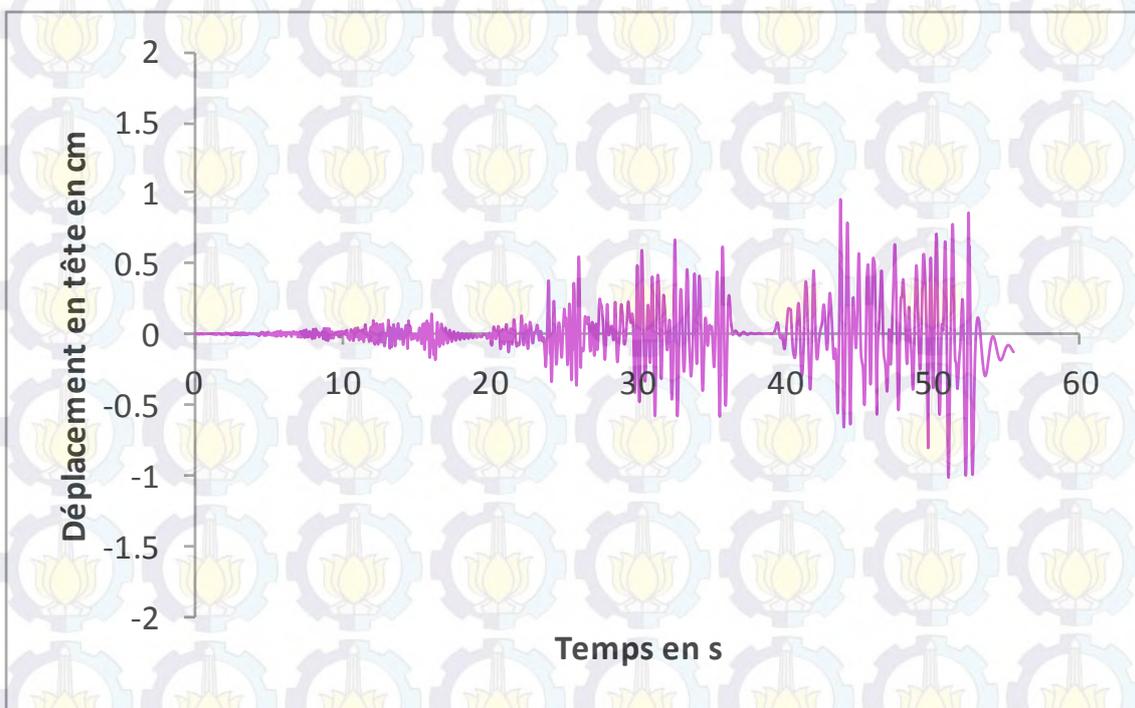


Figure 4.48 Déplacement en Tête du Voile T13

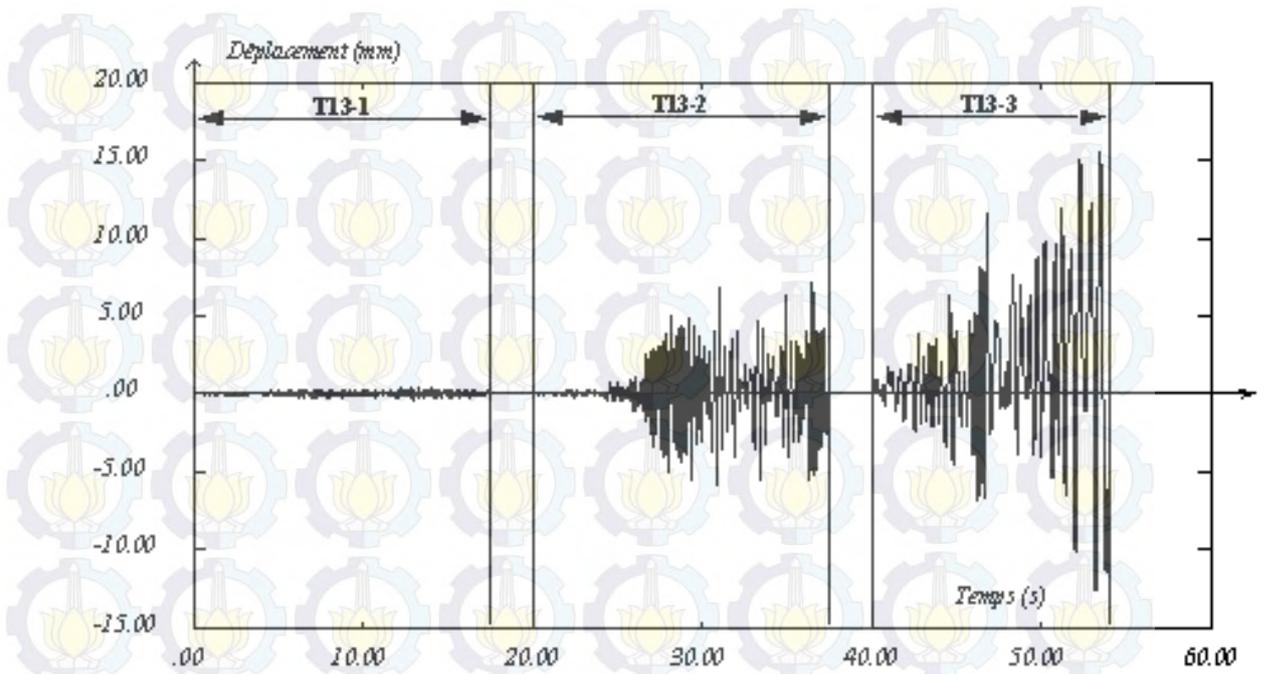


Figure 4.49 Déplacement en tête pour le test T13

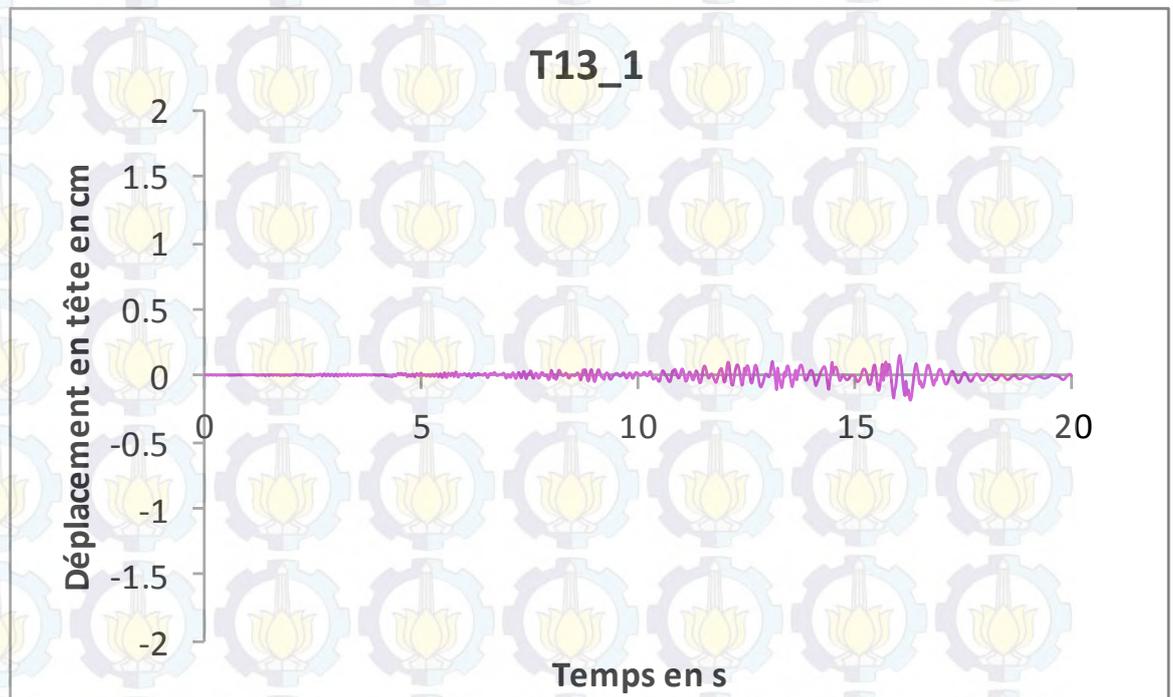


Figure 4.50 Déplacement T13_1

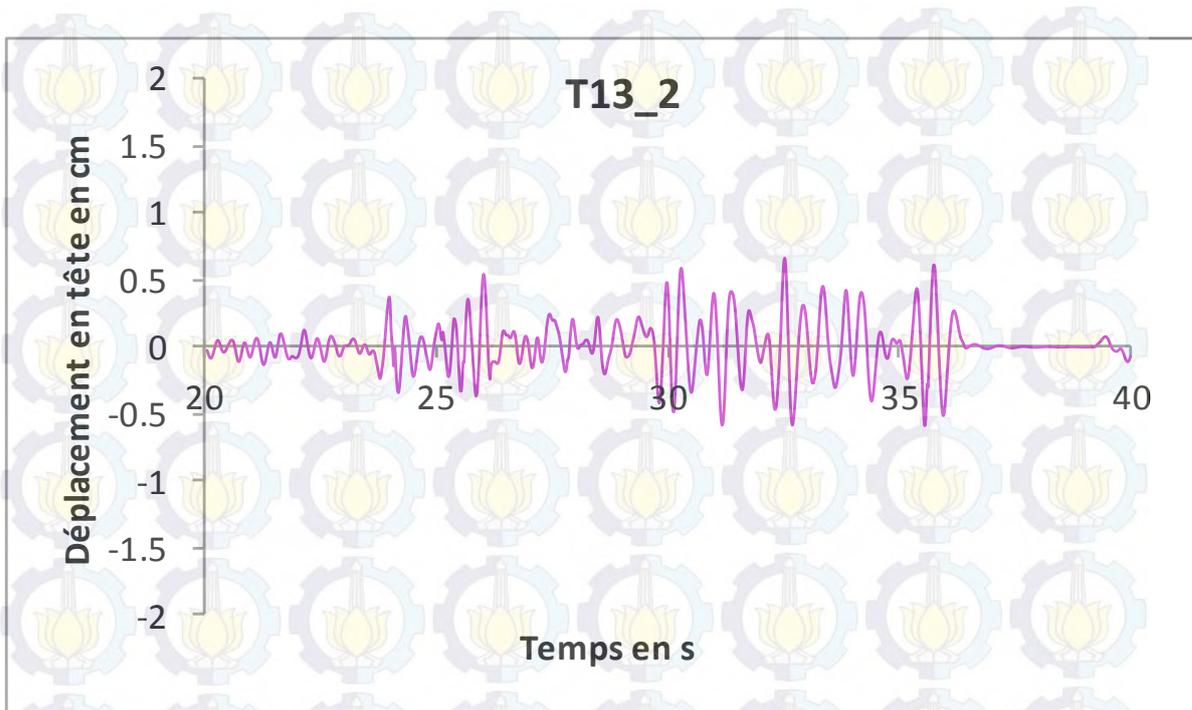


Figure 4.51 Déplacement T13_2



Figure 4.52 Déplacement T13_3

Le déplacement calculé est le déplacement en tête du voile. On peut voir que dans T13_1, le plus grand déplacement est d'environ 0,14 cm. Dans

T13_2 et T13_3, le déplacement augmente de manière significative. Le déplacement maximal de T13_2 est d'environ 0,67 cm, tandis que, le déplacement maximal de T13_3 est d'environ 1,01 cm. Et le déplacement minimal de T13_1, T13_2, et T13_3 sont -0,15 cm, -0,58 cm, et -1,03 cm. Bien que les résultats expérimentaux montrent que le déplacement maximal de T13_1, T13_2, et T13_3 sont 0,09 cm, 0,65 cm, et 1,51 cm. Et le déplacement minimal de T13_1, T13_2, et T13_3 sont -0,09 cm, -0,60 cm, et -1,25 cm.

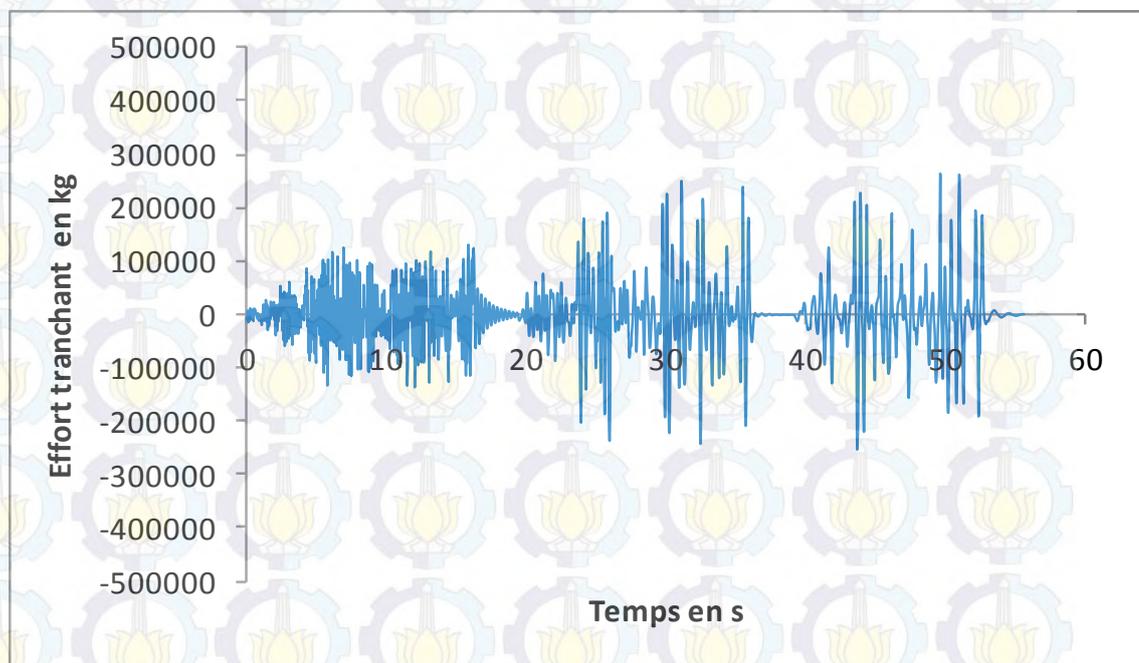


Figure 4.53 Effort Tranchant du Voile T13

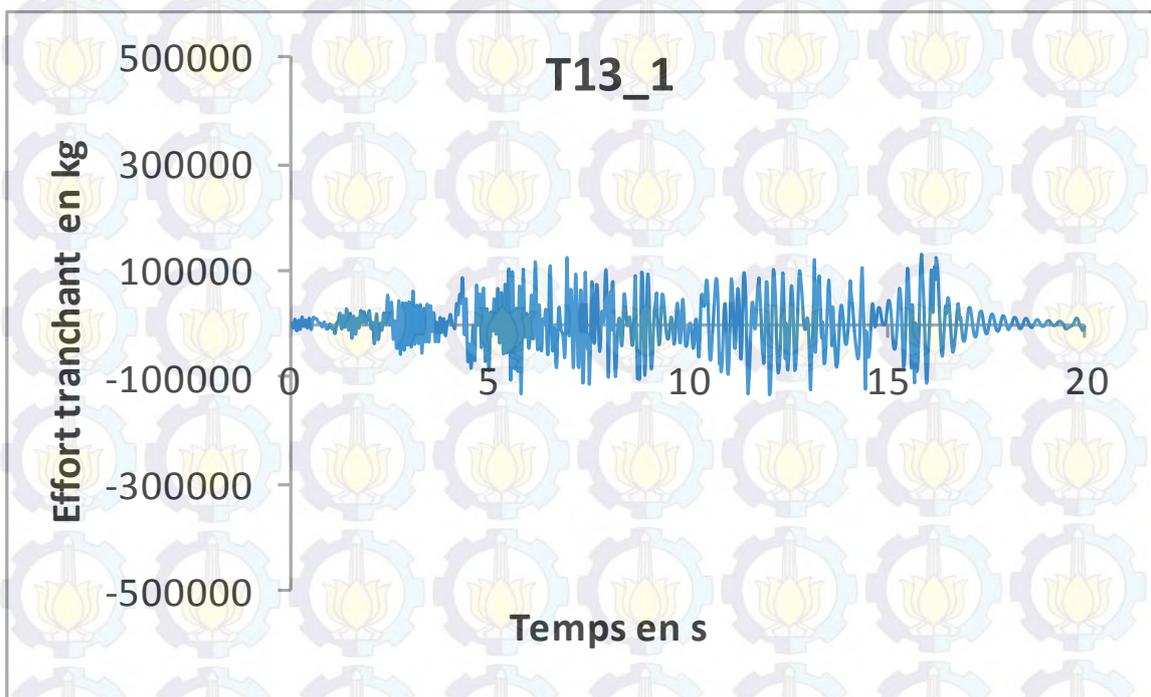


Figure 4.54 Effort Tranchant T13_1

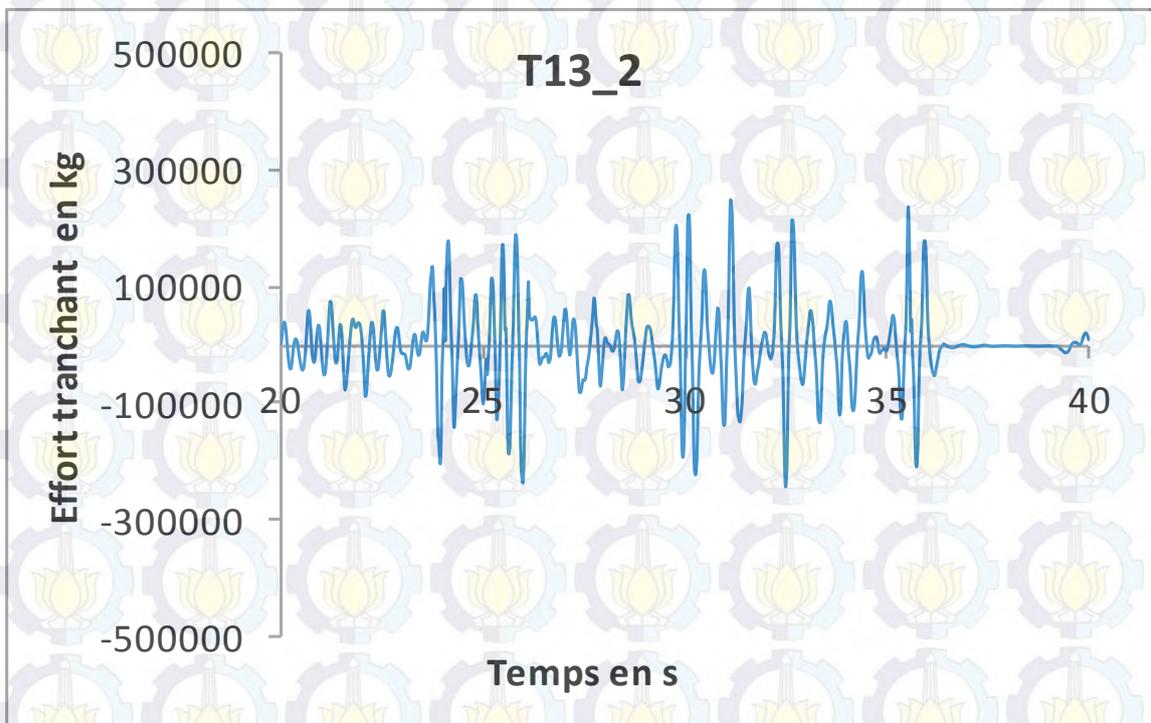


Figure 4.55 Effort Tranchant T13_2

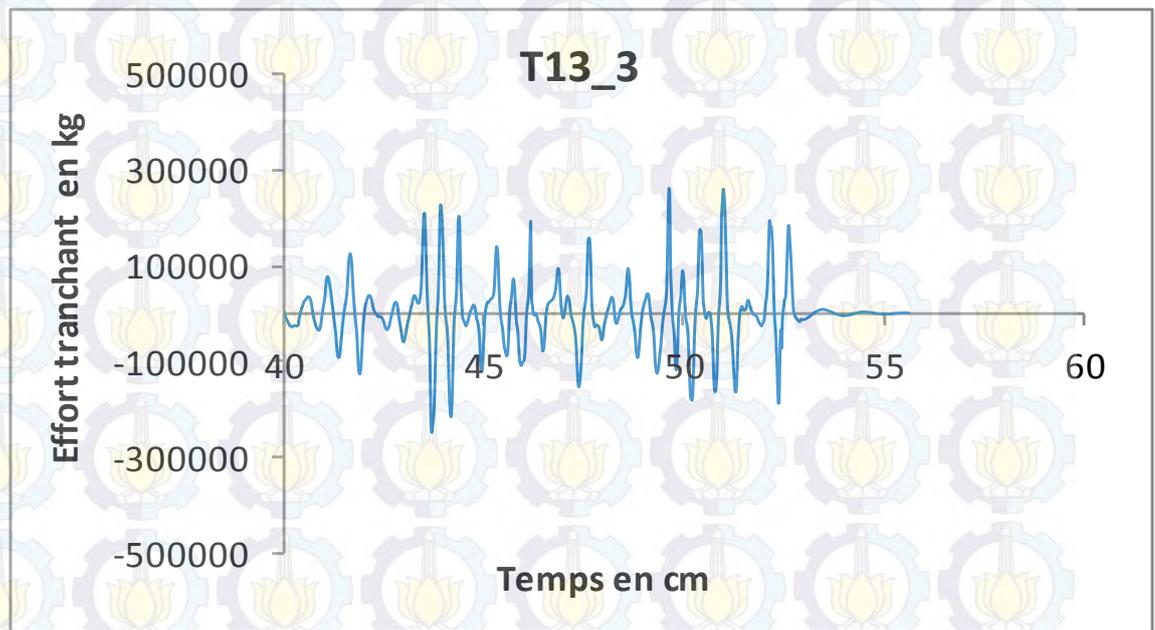


Figure 4.56 Effort Tranchant T13_3

On peut voir que dans T13_1, le plus grand effort est d'environ 130000 kg. Dans T13_2, l'effort maximal est 250183 kg. Tandis que dans T13_3, l'effort maximal est 264000 kg.

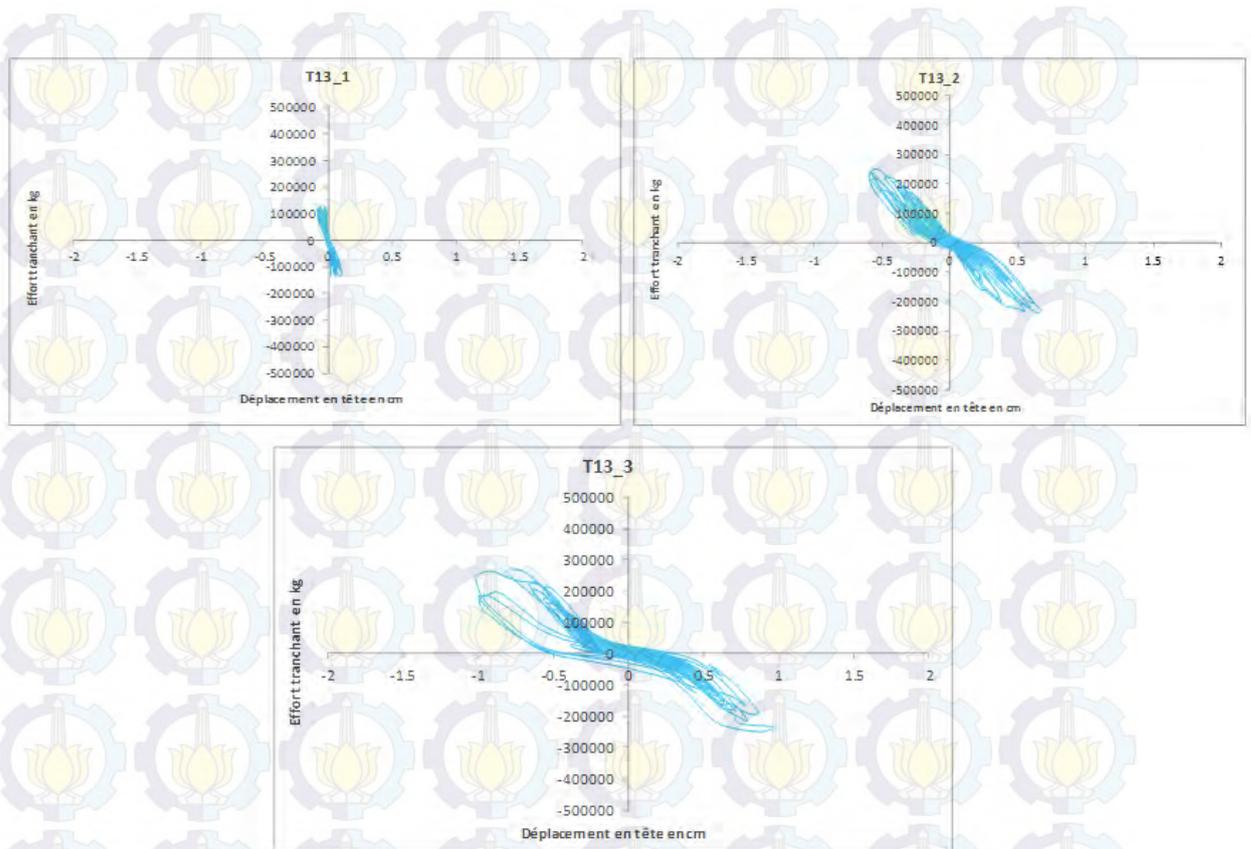


Figure 4.57 Courbes Effort Tranchant-Déplacement en Tête de T13

La figure 4.56 montre les courbes entre effort tranchant et déplacement en tête du voile (courbe d'hystérésis) pour chacun des chargements de T13. Cette courbe montre le comportement ductile de la structure et la capacité d'amortissement de la structure. Même avec les résultats expérimentaux, la courbe d'hystérésis de T13_1 est stable. Dans ce T13_1, le voile reste pratiquement intact. Tandis que sur T13_2, à cette étape, le voile se fissure légèrement. On peut voir que dans ce T13_2, la courbe d'hystérésis est assez stable bien qu'elle n'est pas aussi stable que la courbe T13_1. Et pour le test T13_3, on peut voir que la courbe d'hystérésis n'est pas stable. L'augmentation de la force n'est pas trop grande, mais l'augmentation du déplacement est assez grande. Dans ce T13_3, le voile se fissure massivement et détruit.

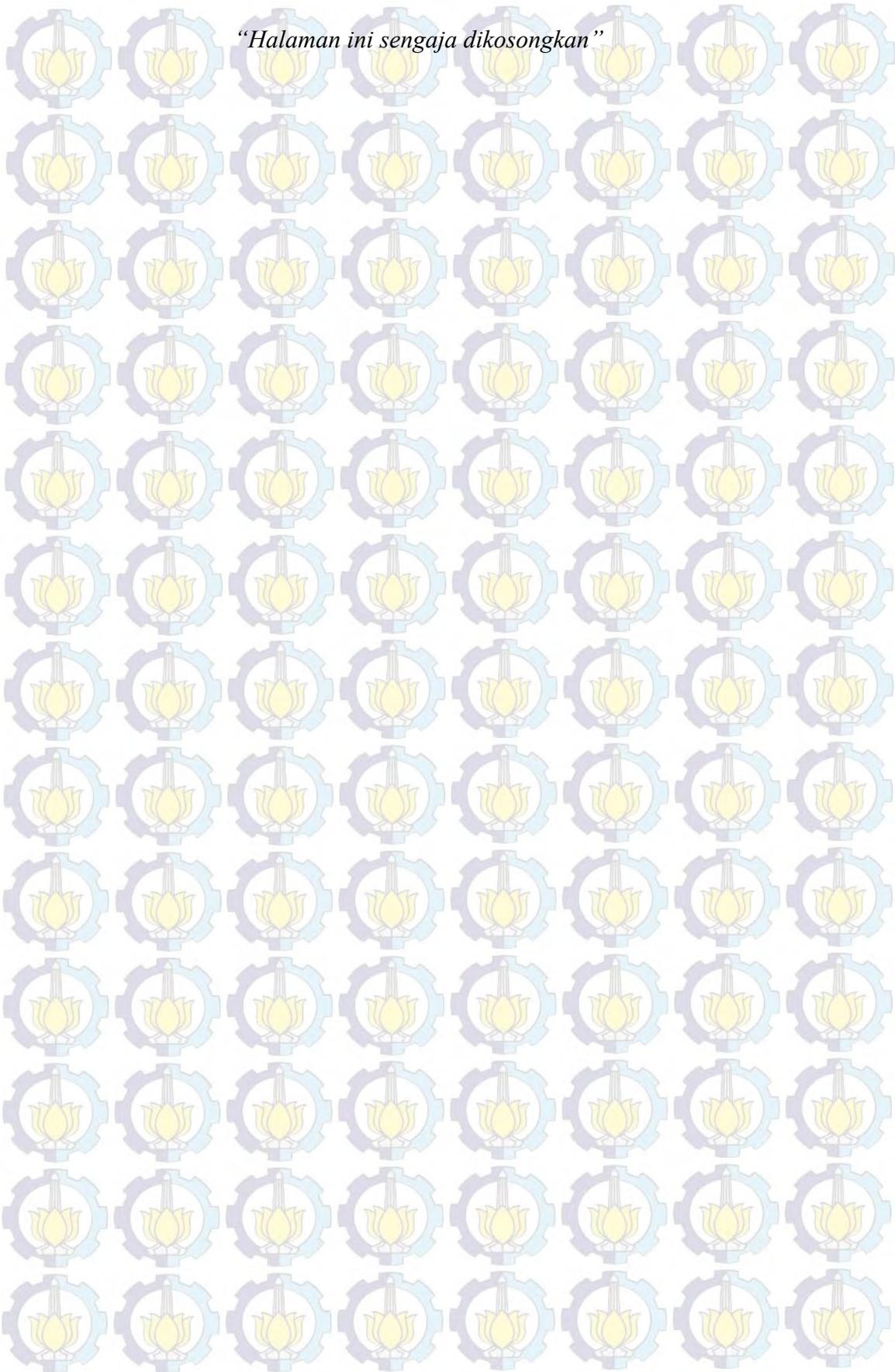
CHAPITRE V CONCLUSION

5.1 Conclusion

Le but de ce travail est de faire une modélisation numérique du voile en béton armé à l'aide du CAST3M en 2D. Les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette modélisation sont obtenues à partir des caractéristiques des matériaux du voile T8 et du voile T13 qui ont été menées par EDF et COGEMA en 1997-1998.

- Les chargements donnés à ces deux types de voiles sont les mêmes.
- Pour le maillage, la taille du maillage du voile T13 est beaucoup plus fine que le voile T8.
- Les courbes d'hystérésis de l'essai et les courbes d'hystérésis de la modélisation numérique rapprochent l'un de l'autre (pour le voile T8 et le voile T13).
- La courbe déplacement-temps de l'essai et la courbe déplacement-temps de la modélisation numérique se rapprochent aussi (pour le voile T8 et le voile T13).
- En outre, si la taille du maillage utilisé est plus petite (plus fine), les résultats obtenus seront plus détaillés. On peut les voir dans les résultats du voile T13 qui sont plus proches des résultats expérimentaux que les résultats du voile T8.
- Le CFRP donne effet au voile en béton armé. Avec CFRP, le déplacement du voile est inférieur que le déplacement du voile sans CFRP.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BIBLIOGRAPHIQUE

Antonious. 2012. Evaluation of The Constitutive Equation of Confined Normal and High-strength Concrete Based on Yield Criterion Approach. *Dinamika Teknik Sipil*, vol 10, n° 2, pp 159-167.

Aktan, H.M. 1986. Pseudo-dynamic Testing of Structures. *J. Eng. Mech.* 112, pp. 183-197.

Bali, Ika. 2008. Prediction of Behavior of RC Squat Walls. *Jurnal Sains dan Teknologi EMAS*, vol. 18, n° 2.

Brun, Michael. Contribution à l'Etude des Effets Endommageants des Seisme Proches et Lontains sur des Voiles en Béton armé: Approche Simplifiée Couplant la Dégradation des Caractéristiques Dynamiques avec un Indicateur de Dommage. INSA de Lyon. Lyon.

Brun, Michael dkk. 2011. Pseudo-dynamic Test on Low-rise Shear Walls and Simplified Model Based on The Structural Frequency Drift. *Engineering Structures*, n° 2, pp. 796-812.

E.B. Pereira and J. Barros. 2009. 3D Behaviour of a Parameter Isotropic Nonlinear Hardening Plasticity Model for Concrete. *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*.

Ile, N. 2000. Contribution à la Compréhension du Fonctionnement des Voiles en Béton Armé Sous Sollicitation Sismique : Apport de l'Expérimentation et de la Modélisation à la Conception. INSA de Lyon. Lyon.

R. Irwin and A. Rahman. 2002. Strengthening of Concrete Structures - Design Constraints and Practical Effects on Construction Detailing, 14 p.

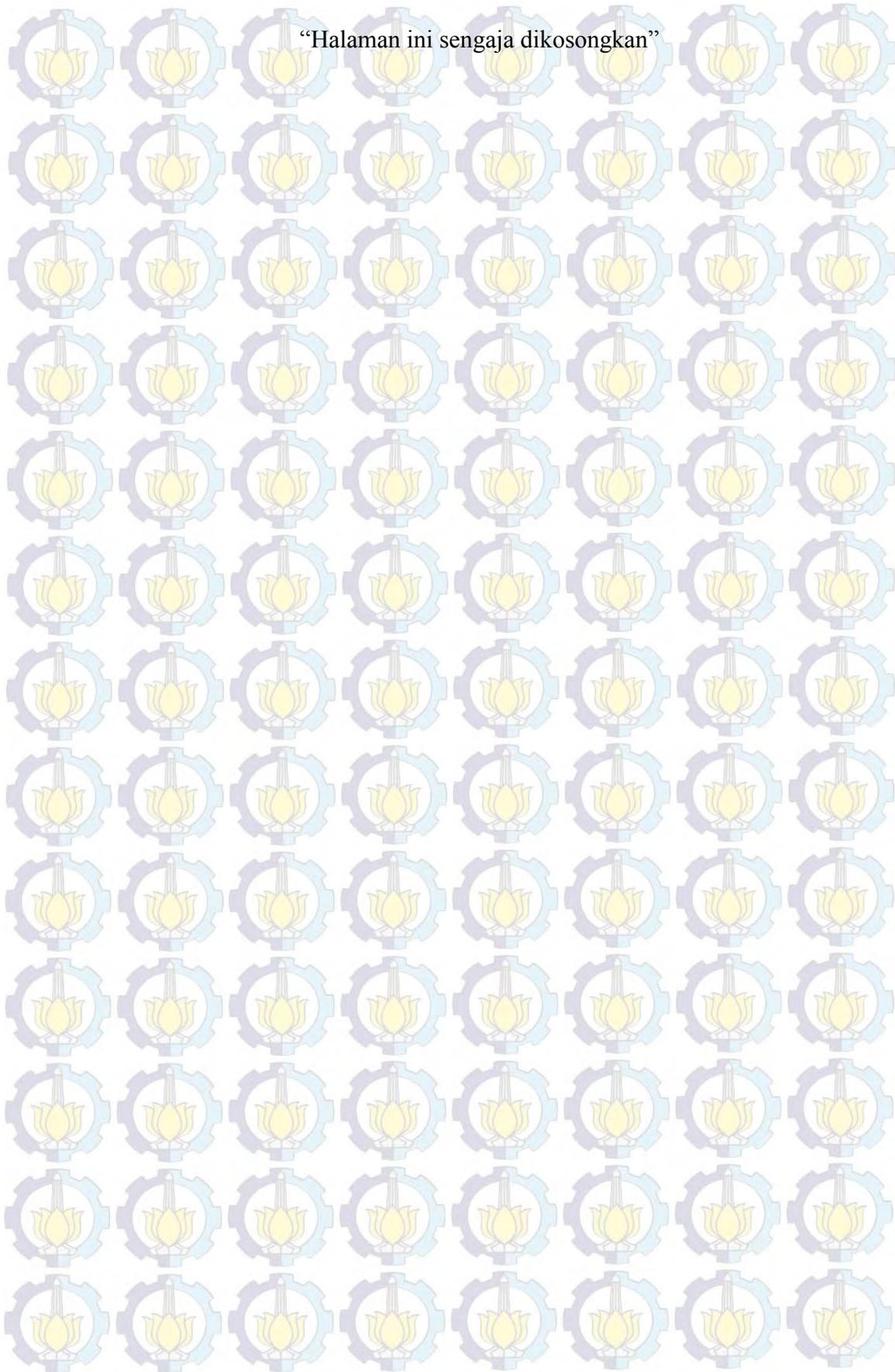
H. Niu and Z. Wu. Analytical Modeling on Debonding Failure of FRP-Strengthened RC Flexural Structures. Hitachi, 11 p. Ibaraki University.

Parulekar, Y.M. 2014. Simulation of Reinforced Concrete Short Shear Wall Subjected to Cyclic Loading. *Nuclear Engineering and Design*, 270, pp. 344-350.

T. Paulay and M.J.N. Priestley. 1992. Seismic Design of reinforced Concrete and Masonry Buildings. United States of America. 707 p.

U.R.G.C. – Structure. 1999. Formulation d'Un Modèle Elasto-plastique Fissurable pour le Béton Sous Chargements Cycliques. INSA de Lyon. Lyon.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BIODATA PENULIS



Penulis yang dilahirkan di Jember pada tanggal 10 Juni 1989 merupakan anak kedua dari tiga bersaudara pasangan Kunto Adji dan Sugiharti Hidayat. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Jember Lor 1 (1996-2002), SLTPN 2 Jember (2002-2005), dan SMAN 1 Jember (2005-2008). Penulis diterima melalui jalur SNMPTN di Jurusan Teknik Sipil ITS Surabaya pada tahun 2008 dan berhasil menyelesaikan masa studi S1 selama 4 tahun. Selama menempuh pendidikan di Jurusan Teknik sipil penulis melakukan kerja praktek di PT Waskita Karya. Penulis dapat dihubungi berkenaan dengan tesis maupun kepentingan lain pada alamat email annisagati@gmail.com