

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU



FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVILE

MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE

Option : Structures & Matériaux.

Réalisée par:

M^{elle} SALHI *Lysa*

Thème:

Simulation avec Abaqus

Nouvelle disposition de ferrailage dans un voile court.

Président : Pr.AIT TAHAR Kamel

Promoteur : Mr BOUKAIS Said

Co-promoteur : Mr KAHIL Amar

Examineur : Mr MERRAKEB Seddik

Examineur :Mme OUKID Ouiza

Soutenu en juillet 2013



REMERCIEMENTS

Cette affirmation passe sous silence, l'importance de l'encadreur de recherche avant même l'intérêt pour un sujet bien précis. L'aventure commence avant tout par la rencontre avec un personnage qui réussit à vous motiver, à vous transmettre son enthousiasme, à écouter les autres pour les laisser libre de leurs choix et les accompagner selon leurs désirs au cours de ce laps de temps. Un immense merci à vous Monsieur BOUKAIS Saïd, pour tout ce que vous avez pu m'apporter scientifiquement et humainement.

Novice à mon arrivée dans l'art de penser une expérience, de la monter et de la mener correctement, j'ai dû interloquer plus d'un pour mener à bien toutes ces étapes, En premier lieu tout le corps enseignant du département de Génie de la Construction en particulier Mr RAHIL Amar, ALMOUSBA Madjid, BELALDI Ouardia, OULD Ouali, SALAM Mdjid et enfin ALI Kazmané je leurs dit Merci.

Merci aux membres du jury pour avoir accepté cette tâche et d'avoir pris le temps de lire ce manuscrit.

Je terminerai par ceux sans qui la rédaction n'aurait pas était aussi sympa, sans qui la motivation n'aurait pas été aussi importante, sans qui la volonté de continuer cette aventure n'aurait pas été aussi forte, à vous mes parents chéris, Frangins & frangines, amies & camarades qui seront se reconnaître. Son oublie d'exprimer ma sympathie à tout se qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de mon modeste travail.



DÉDICACES



Je dédie ce modeste travail :

A

mes très chers parents.

Confidential

TABLES DE MATIERES

INTRODUCTION

I.	Introduction	1
II.	Problématique	2
III.	Objectif.....	3

Chapitres I : Généralités sur le comportement des matériaux béton et acier

I.	Introduction	4
I.1.	Le béton.....	4
I.1.1.	Composant du béton	4
I.1.2.	Formulation du béton.....	6
I.1.3.	Comportement du matériau béton.....	6
I.1.3.1.	Comportement du béton sous contraintes uniaxiales	6
I.1.3.2.	Comportement du béton sous contraintes biaxiales.....	7
I.1.3.3.	Comportement triaxial du béton.....	9
I.1.3.4.	Comportement du béton sous sollicitations cycliques.....	11
I.1.4.	Modélisation numérique du comportement du béton.....	12
I.1.4.1.	Modèles de l'endommagement.....	13
I.1.4.2.	Modèles élastoplastiques.....	13
I.1.4.3.	Modèles basée sur le couplages plasticité- endommagement	15
I.1.4.1.	Modèles basée sur la théorie de la fissuration	15
I.2.	L'acier d'armature.....	16
I.2.1.	Composant mécanique de l'acier d'armature.....	16
I.2.1.1.	Traction – compression	17
I.2.1.2.	Chargement cyclique de traction –compression.....	17
I.2.2.	Quelques modèles numérique de l'acier	18
I.2.2.1.	Modèle élastoplastique	19
I.2.2.2.	Modèles de Pinto Menegotto.....	19
I.3.	Interface acier-béton	19
I.4.	Conclusion	22

Chapitres II : Généralités sur Le comportement des voiles

II.	Introduction.....	24
II.2.	Construction à voiles.....	25

II.2.1. Les différentes catégories des constructions en voile.....	28
II.3. Comportement des voiles en béton armé.....	32
II.3.1. Paramètres d'étude.....	32
II.3.2. Modes de fonctionnement des voiles.....	32
II.3.3. Modes de rupture des voiles.....	32
II.3.4. Comportement cyclique d'une voile en béton armé.....	36
II.4. Principe de dimensionnement d'une voile et choix du ferraillement	38
II.5. Modélisation du comportement non linéaire d'une voile	40
II.6. Modélisation d'une voile en béton armé soumis au cisaillement.....	45
II.7. Conclusion	47

Chapitres III : Travaux antérieurs

Partie 1 : Renforcement des voiles

III.1. Introduction.....	48
III.1.1. Renforcement des voiles courts en béton armé par matériau composite.....	49
III.1.2. Renforcement des voiles courts en béton armé par en bandes d'aciers ...	53
III.1.3. Simulation numérique des voiles renforcés par un matériau composite ...	58

Partie 2 : Nouvelles dispositions de ferraillement.

III.2. Introduction.....	61
III.2.1. Conception d'un ferraillement de voiles courts soumis à un effort sismique prépondérant : simulation numérique	62
III.2.2. Nouvelles techniques de ferraillement	66
III.3. Conclusion	69

Chapitres IV : Présentation des modèles et simulation numérique

Partie 1 : Présentation des modèles

IV.1. Introduction.....	70
-------------------------	----

IV.1.1. Dimensions et géométrie	70
IV.1.2. Chargement	71
IV.1.3. Ferrailages des modèles	71

Partie 2 : Simulation numérique

IV.2. Introduction.....	74
IV.2.1. Présentation du logiciel ABAQUS	74
IV.2.2. Modules d'abaqus et étapes de modélisation	78

Chapitres IV : Présentation des modèles et simulation numérique

V.1. Validation des modèles simulés :Modèle classique MC	90
V.2. Première comparaison : ferrailage en X.....	95-98
V.3. Deuxième comparaison	95-116

I. INTRODUCTION :

Compte tenu de sa localisation dans une zone de convergence de plaques, l'Algérie est une région à forte sismicité. Au cours de son histoire, elle a subi plusieurs séismes destructeurs. Parmi les plus notables, on peut citer : 1715, séisme d'Alger, 20000 morts ; 1954 séisme d'Orléansville (EL Asnam), magnitude 6,7, 1 200 morts, 20000 bâtiments détruits; 21 mai 2003 séisme de Boumerdes, de magnitude 6.7, 2.278 mort. Se doter de moyens préventifs par la mise en place de moyens techniques et le respect des règlements parasismiques est une nécessité vitale afin d'éviter ces répercussions dévastatrices.

A l'origine purement empirique, la construction parasismique s'est progressivement développée et pris sa place parmi les techniques de l'ingénieur. Elle est pluridisciplinaire par nature, puisqu'elle fait appelle aux géologues, sismologues, architectes, mécaniciens des sols, ingénieurs de structures et calculateurs, dont la collaboration est nécessaire pour tout projet important en zone sismique.

Les enseignements tirés aussi de ces séismes destructeurs ont un intérêt exceptionnel, car ils ont permis de tester en vraie grandeur l'efficacité des codes parasismiques sur un grand nombre de bâtiments et d'ouvrages soumis à de très fortes secousses et ont révélé que même les ouvrages conçus selon les codes et règlement parasismiques modernes ne sont pas à l'abri des catastrophes naturelles qui sont à l'origine des situations techno – économiques coûteuses et quelquefois graves. De plus, la nature des ouvrages de génie civil (bâtiments, ponts, centrales nucléaires, barrages etc.) fait que les conséquences d'un séisme dépassent souvent les capacités d'un pays touché. C'est la raison pour laquelle la prévention et la connaissance du comportement de ces ouvrages sont indispensables. [22]

II. PROBLEMATIQUE :

Les dommages que subit une structure ne sont pas seulement influencés par les caractéristiques des secousses telluriques mais aussi par la rigidité de la structure et sa capacité de dissiper de l'énergie.

Théoriquement, les structures en portique auto-stable sont censées se comportaient convenablement sous chargement sismique. La réalité est toute autre, à cause des importants déplacements relatifs entre deux étages consécutifs, mais aussi le problème de concentration de contrainte et déformation aux nœuds poutre-poteau, qui entraine l'apparition des rotules plastiques, et qui est accentué par la difficulté de réalisation de nœud conforme.

Par contre, lors des multiples tremblements de terre qu'a connue le monde, il a été constaté que les voiles en béton armé ont bien résisté et les dommages recensés étaient moins sévères.

Les voiles en béton armé, correctement dimensionné, reprennent efficacement les forces horizontales. Ainsi, permettant de réduire les risques de ruine fragile et présente ainsi des avantages plus importants comparés aux portiques auto-stable.

Mais les voiles présentent aussi deux inconvénients majeurs :

1. La rupture de la jonction semelle voile (au niveau de l'encastrement)
2. La rupture en diagonale du béton avec plastification des armatures ou rupture des armatures verticales et horizontales le long des fissures diagonales, **ce désavantage à été constaté dans les voiles court soumis essentiellement aux efforts de cisaillement.**

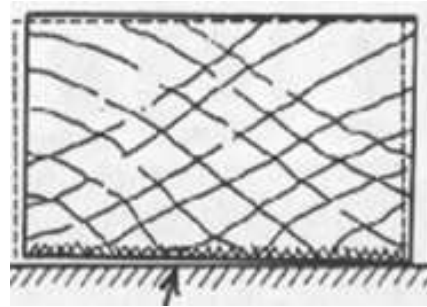


Fig I : rupture par glissement à la base. [31]

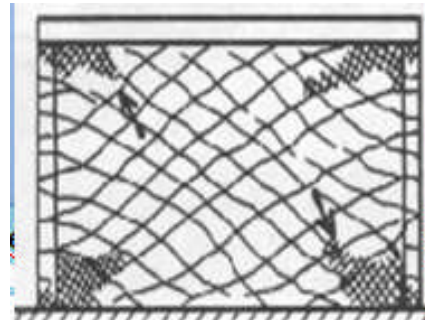


Fig II : Rupture en diagonale. [31]

III.OBJECTIF

L'objet de notre thèse est de reprendre les efforts véhiculés suivant les bielles de compression ou de traction, qui sont les causes essentielles de la rupture en X, et améliorer le comportement des ces voiles courts, cela en proposant différents dispositions de ferrailage.

Notre étude portera sur un voile réduit de dimension $(1.66 \times 1.25 \times 0.15) \text{ m}^3$ en adoptant un ferrailage classique, puis en augmentant les sections d'armatures des potelets, ensuite en incorporant des armatures disposée en X avec ou sans cadres (épingles).

Afin d'étudier cette problématique, on a tout d'abord analysé le comportement du voile ferrillé classiquement puis nous avons essayé d'améliorer son comportement avec différentes dispositions de ferrailage et en fin une comparaison entre les différents résultats obtenus.

L'analyse structurale est réalisée par le logiciel ABAQUS, avec les lois de comportement suivantes:

- Béton : le modèle numérique est élasto-plastique en dommageable en utilisant le modèle inclus dans abaqus «concrete damaged plasticity».

- Acier : le modèle numérique est un modèle élasto-plastique à écrouissage isotrope.

Dans le but d'atteindre les objectifs suscités, le présent mémoire est organisé comme suite :

Chapitre I : Ce chapitre consiste en une synthèse bibliographique sur le comportement général des matériaux béton et acier, ainsi que leurs modèles numériques.

Chapitre II : Présente le rôle et les caractéristiques essentielles des murs en béton armé dans une structure sous sollicitations sismiques. On a aussi défini leurs comportements sous différents chargement et leurs modes de ruine, que ça soit pour les voiles courts ou élancés, et les principes de dimensionnement ainsi que les divers choix de modélisation.

Chapitre III : Dans ce chapitre on a exposé quelques travaux de recherche, qui traitent du renforcement des voiles courts, ainsi que d'éventuelles nouvelles dispositions de ferrailage.

Chapitre IV : Ce chapitre se divise en deux parties. Dans la première partie, on présente les différents modèles à simuler, dans la deuxième on exposera notre travail de simulation.

Chapitre V : les résultats des simulations numériques basées sur une modélisation 3-D seront représentés. Une étude comparative globale et locale entre les sept modèles développés sera faite.

Enfin, la thèse se termine par des conclusions et des perspectives.

II.1.INTRODUCTION :

Les constructions à voile en béton armé deviennent de plus en plus courantes dans les régions sismiques. Reprenant la plus grande partie des efforts latéraux, les voiles en béton armé conditionnent le comportement de la structure et joue un rôle primordial pour la sécurité (V. Davidovici 1999).

Par rapport à d'autres systèmes constructifs ; tel que les portiques avec ou sans panneaux de remplissage ; les structures à voiles en béton armé présentent de multiple avantages :

- ♣ Par rapport à un poteau qui a une section relativement réduite, le voile avec sa section transversale assez importante dissipe plus facilement l'énergie induite par l'action sismique.
- ♣ Leur présence limite les déformations latérales.
- ♣ Leur rigidité permet de protéger les éléments non structuraux (et quelques poteaux existants) et diminue leur influence sur le comportement de la structure, une influence qui n'est pas maîtrisé à ce jour.
- ♣ leur présence permet de s'affranchir du difficile problème posé par la réalisation des nœuds des portiques.
- ♣ Rend le comportement de la structure plus fiable par rapport à une structure comportant que des portiques, dans la plus part des codes parasismiques on adopte pour la philosophie du « Capacity design », qui impose la création des rotules plastique dans les poutres, alors que les voiles restent dans le domaine élastique.

A ce jour la et après des séismes majeurs, les voiles en béton armé ont montré leur efficacité. On citera ci-dessous quelques exemples ou les voiles en béton armé ont sauvé la structure ainsi que des vies humaines:

● ANCHORAGE, ALASKA 1964:

Mc Kinley Building, un bâtiment de quinze (15) étages situé à ANCHORAGE en ALASKA.

Epaisseur des murs-voiles varie entre 20 et 30 cm.

Epaisseur des linteaux varie entre 15 et 20 cm.

Les dégâts consistent dans l'endommagement des linteaux insuffisamment armé par contre les murs-voiles se sont bien comportés.

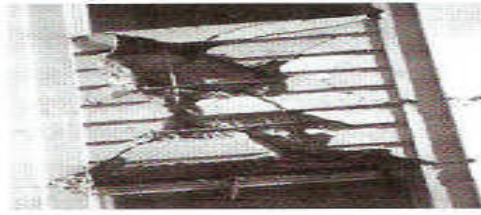


Figure II.1: Endommagement des linteaux.[12]

● **CARACAS, VENEZUELA 1967:**

Bâtiment Plaza, de dix sept (17) étages contreventé en voile, s'est bien comporté alors qu'un bâtiment voisin de dix (10) étages en portiques s'est effondré.

● **Mayagi-Ken-Oki, JAPON en 1978:**

Un séisme destructeur de magnitude de $M=7.4$, la faculté de l'ingénierie « Tohoku University » un bâtiment de neuf (09) étages, fissuration et dommage mineur. Le contreventement était assuré dans la direction transversale par des refends armés sur toute la hauteur du bâtiment et dans le sens longitudinal par un noyau centrale, l'épaisseur des voiles varie entre 15 et 50 cm.

● **El asnam (Chlef) ALGERIE (1980):**

Excellent comportement du bâtiment en voiles d'épaisseur de 15 cm armé sur toute la hauteur. [12]



c) El Asnam : excellent comportement du bâtiment avec voile en béton armé



d) El Asnam : façades principales des mêmes bâtiments

Figure II.2 : El Asnam –Algérie, contreventement assuré par des voiles en béton armé.

● **Spitak, Armenie 1988:**

Un bâtiment d'habitation de seize (16) étages contreventés par des voiles en béton armé a eu un comportement convenable bien que fortement endommagé au niveau du réz-de-chaussée. Le contreventement était assuré par le noyau central en voile en béton armé dont le

ferrailage ne comportait pas d'armature transversale, ce qui a provoqué une rupture par plastification et a engendré une inclinaison de 1.60 m.

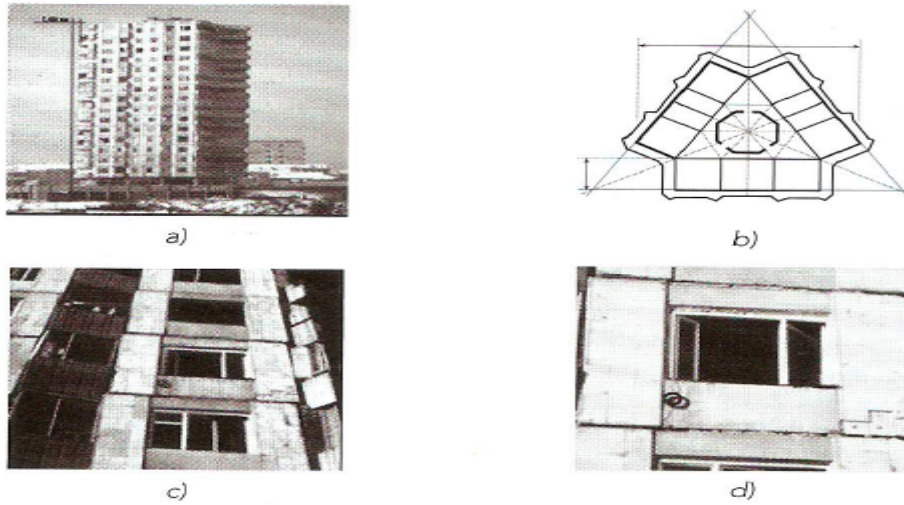


Figure II.3 : Bâtiment d'habitation [12].

- a) Vue d'ensemble comportant le faux aplomb de 1.60m.
- b) Vue en plan de l'étage courant.
- c, d) déplacement de 10cm par étage, des panneaux préfabriqués.

● **Boumerdes , Algérie (21 mai 2003) :**

Dans la zone épiscoptrale, à Zemmouri, les seuls dommages constatés sur les structures en voile concernent des panneaux qui se sont décrochés de la façade et certains sont tombés au pied de l'immeuble laissant apparaître la paroi d'isolation (**Figure II.4**). Leur mode de fixation n'était pas suffisant.



Figure II.4: Décollement de l'enrobage [12].

Dans la ville de Boumerdes, la solidarisation des voiles de la cage d'ascenseur à la superstructure de contreventement contribue de manière significative à réduire le risque sur la structure. Les dommages constatés sont essentiellement des ruptures de section à la base du voile et des fissures ouvertes en X dans la section centrale.



Figure II.5: Rupture de section à la base du voile [13].



Figure II.6: Fissures ouvertes dans le voile [13].

II.2. CONSTRUCTION A VOILES:

Tout d'abord faut préciser qu'un élément est considéré comme étant un voile s'il satisfait la condition suivante: $L \geq 4a$.

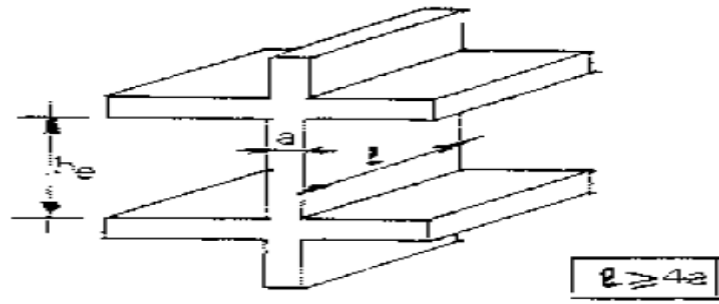


Figure II.7: Coupe en élévation d'un voile [14].

L'épaisseur minimale est égale à 15cm et elle est fonction de la hauteur libre h_e et des conditions de rigidité aux extrémités.

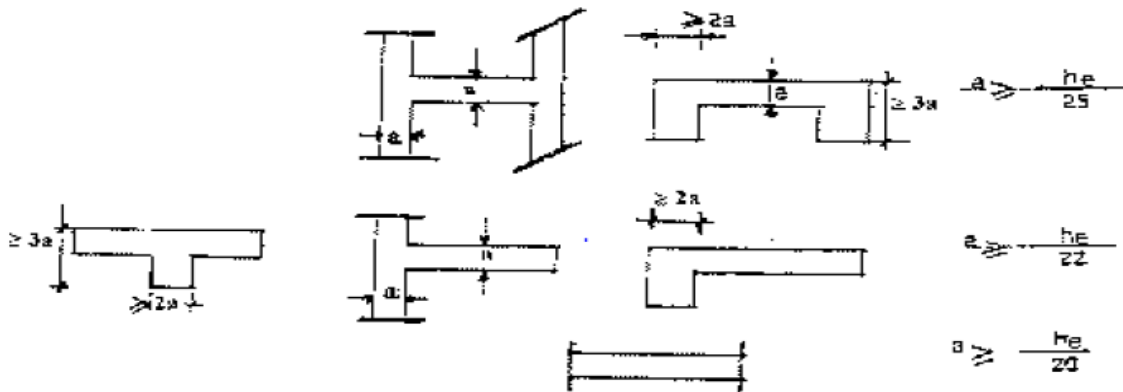


Figure II.8: Epaisseur minimale des voiles [14].

Selon leur conception dans la structure, les voiles peuvent avoir différentes configuration. Ils peuvent être isolés fonctionnant comme console ou associés à d'autres voiles coplanaires ou perpendiculaires ou encore à un système de portique.

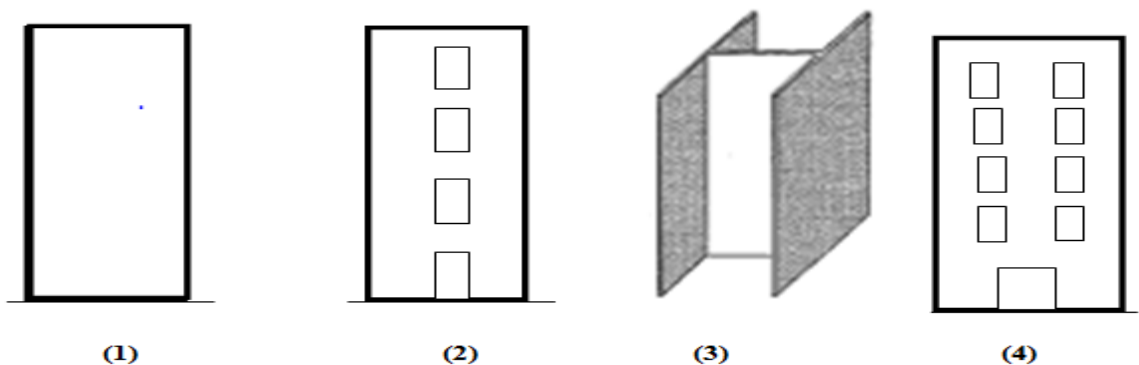


Figure II.9: Différentes configurations d'un voile.

II.2.1. Les différentes catégories de construction en voile:

On retrouve sur le terrain de multiples variétés de constructions à mur porteurs, mais on se limitera à une classification assez générale de ces constructions, il existe trois catégories:

- ▣ Structures « mixtes » avec des murs porteurs associés à des portiques;
- ▣ Structures à noyau central ;
- ▣ Structures uniquement à murs porteurs.

II.2.1.1. Structures « mixtes » avec des murs porteurs associés à des portiques:

Le rôle porteur vis-à-vis des charges verticales est assuré par les poteaux et les poutres (80% des charges verticales et les 20% restant repris par les voiles), tandis que les voiles assurent la résistance aux forces horizontales.

Des fois, les forces horizontales ainsi que les verticales sont reprise par le portique et les voile simultanément.

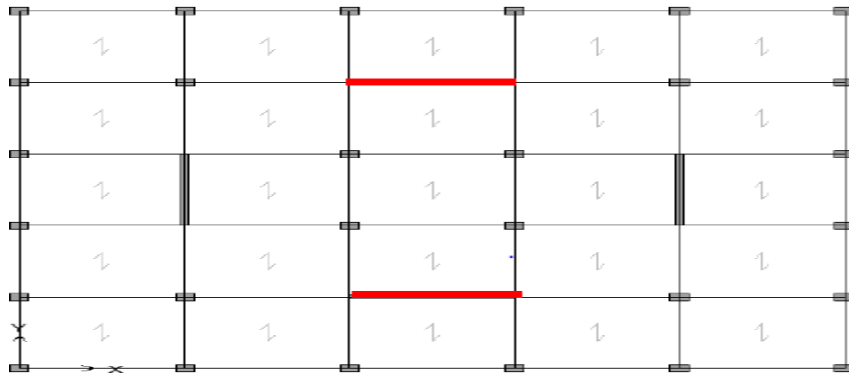


Figure II.10: Structures « mixtes » avec des murs porteurs associés à des portiques. [15].

II.2.1.2. Structures à noyau central:

Un noyau central formé de deux murs en U couplés à chaque étage tout au long de la structure par des poutres, assure majoritairement la résistance aux forces horizontales. Une certaine résistance supplémentaire peut être apportée par les portiques extérieurs.

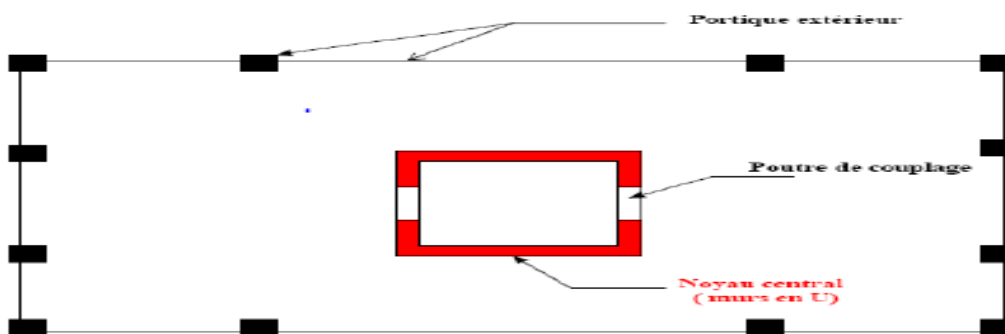


Figure II.11: Structures à noyau central [16].

II.2.2.3. Structures uniquement à murs porteurs:

Les voiles assurent en même temps le rôle porteur vis-à-vis des charges verticales et le rôle de résistance aux forces horizontales.

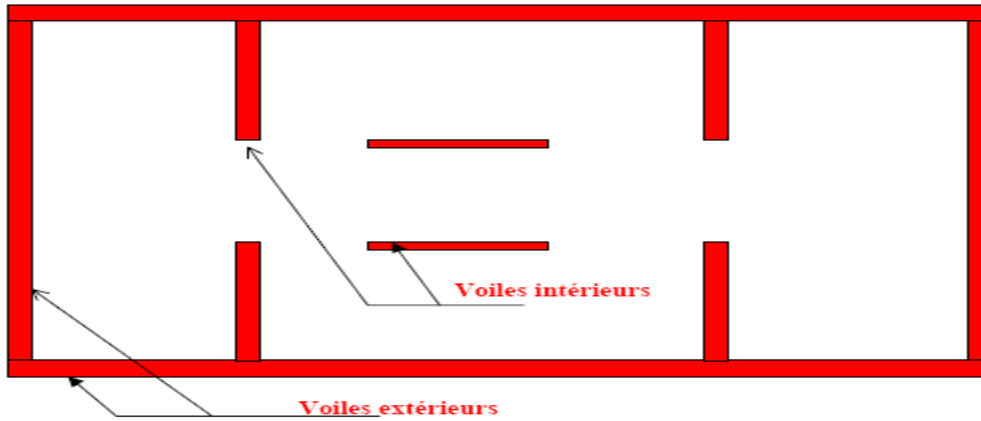


Figure II.12: Structures uniquement à murs porteurs [16].

Dans ce cas de structures, faut prévoir bien évidemment des ouvertures (portes et fenêtres), disposées généralement d'une façon régulière les unes au dessus des autres. Dans ce cas il est considéré comme un ensemble de voiles élémentaires isolés (appelés trumeaux) solidarisés par des éléments de liaison (appelés linteaux).

-Trumeaux : le cas simple d'un trumeau est assimilé à une console parfaitement encastree à sa base, de section rectangulaire ou en I symétrique, soumise à une charge verticale N et une charge horizontale V en tête, produisant un effort tranchant constant sur toute la hauteur et un moment maximal dans la section d'encastrement.

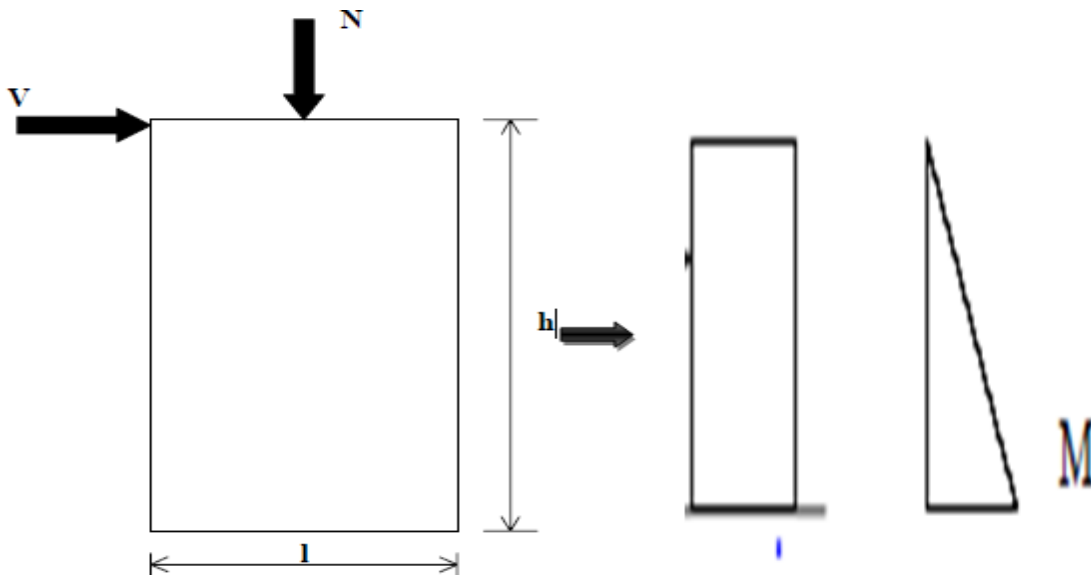


Figure II.13: Trumeaux

-Linteaux : l'effort tranchant est constant le long de l'élément et le moment fléchissant maximum aux deux extrémités, s'annule au milieu.

II.3. COMPORTEMENT DES VOILES EN BETON ARME:

II.3.1. Paramètre d'étude:

Un grand nombre d'essais sur les voiles en béton armé ont été réalisés dans le monde, dans ce qui suit nous allons citer les principaux paramètres considérés dans ces études :

- L'élanement défini comme le rapport de la hauteur par la largeur du voile (h/l qui varie de 0.25 et 3.4). On distingue les voiles élancés dont le rapport h/l est supérieur à 1.5 et les voiles courts défini par le rapport h/l inférieur à 1.5.
- Les caractéristiques géométriques de la section des éléments (élément à section rectangulaire, élément raidis à section en I).
- Les dispositions et pourcentages de ferrailage: le pourcentage des armatures réparties verticalement et horizontalement varie entre 0% et 3%, le pourcentage des armatures concentrées est généralement supérieur à 1%.
- Les sollicitations: un effort horizontal variable est généralement appliqué en tête du voile; dans un certain nombre d'essai le voile est sollicité aussi par un effort normal constant.
- Type de chargement : pratiquement tous les essais concernant les voiles pleins et les linteaux ont été réalisés sous chargement statique cyclique alterné (72%) ou monotone (25%). les essais dynamiques concernent surtout les voiles couplés et les voiles associés aux ossatures.

II.3.2. Mode de fonctionnement des voiles:

II.3.2.1. Mode de fonctionnement des voiles élancés:

Leur comportement est assimilé à celui des poutres, il est gouverné essentiellement par la flexion. La résistance est assurée par les armatures longitudinales concentrées au bord et celles réparties. Vis-à-vis de l'effort tranchant, La résistance est assurée par les armatures transversales.

II.3.2.2. Mode de fonctionnement des voiles courts:

Dans ce cas, le comportement n'est plus celui d'une poutre et il est régi par l'effort tranchant. La résistance à la flexion est assurée par l'ensemble des armatures longitudinales réparties et concentrées. Les armatures réparties transversalement perdent leur efficacité à la résistance à l'effort tranchant au profit des armatures réparties longitudinalement lorsque l'élanement décroît.

Le paramètre de l'élançement permet de classer les voiles en deux catégories de mode de rupture.

II.3.3. Mode de rupture selon l'élançement:

II.3.3.1. Mode de rupture des voiles élançés:

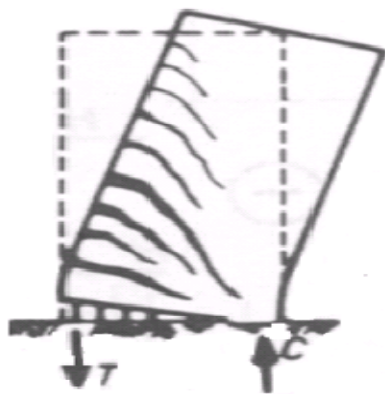
Pour ces éléments, la rupture peut être obtenue par flexion, par effort tranchant ou même par combinaison des deux, mais ça reste généralement concentrée près de la zone où le moment fléchissant est maximale (la base).

a-Rupture en flexion :

✧ **Mode EF 1** : rupture par plastification des armatures verticales tendues et écrasement du béton comprimé. Ce mode de rupture est ductile, c'est le schéma de ruine le plus satisfaisant qui correspond à la formation d'une rotule plastique dans la partie inférieure du voile avec une importante dissipation d'énergie. On observe ce mode de ruine dans les voiles très élançés, soumis à un effort normal de compression faible et à un cisaillement modéré. (**Figure II.18**).

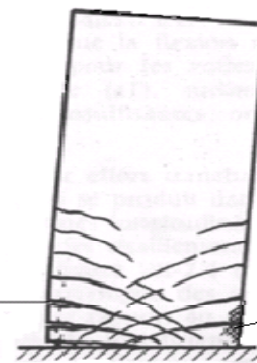
✧ **Mode EF 2** : rupture par écrasement du béton. Ce mode de ruine se rencontre pour les voiles assez fortement armés soumis à un effort normal important. Le mode f2 est moins ductile que le mode f1, surtout dans le cas d'une section rectangulaire (**Figure II.18**).

✧ **Mode EF 3** : rupture fragile par ruptures des armatures verticales tendues. C'est un mode de rupture qui se rencontre dans les voiles faiblement armés, lorsque les armatures verticales sont essentiellement réparties et non concentrées aux extrémités. la capacité de dissipation de l'énergie est pratiquement nulle (**Figure II.18**).



D'après PAULAY

Plastification des armatures tendues



Béton comprimé écrasé

D'après FOURE

Mode f1

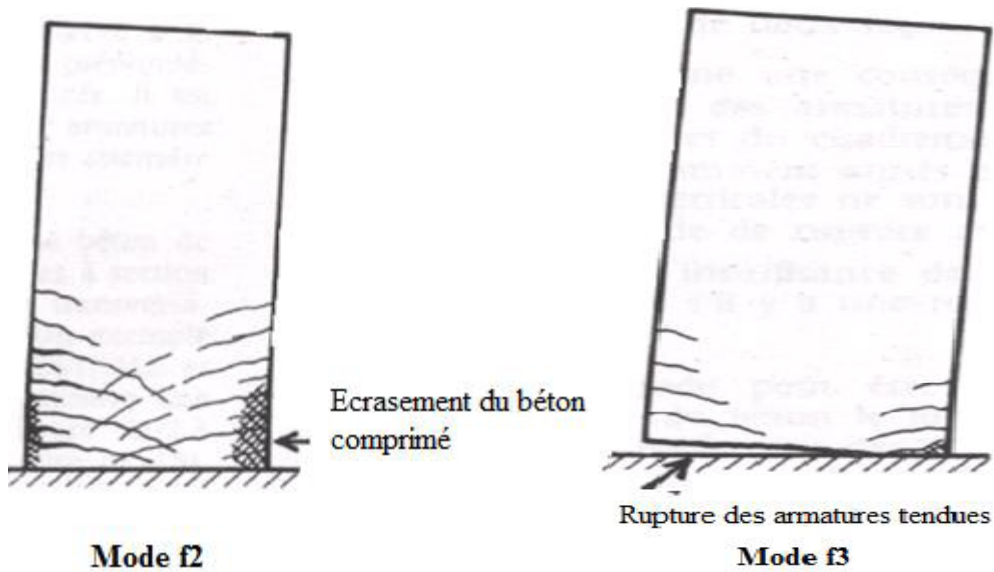


Figure II.18 : Mode de rupture des voiles élancés en flexion

b-Rupture par effort tranchant (mode ET) :

✧ **Mode tranchant** : rupture des bielles de compression développées dans l'âme du voile. On l'observe dans les voiles munis des raidisseurs, frottement armés longitudinalement est transversalement soumis à des cisaillements prépondérants

✧ **Mode glissement** : rupture par glissement au niveau des reprises de bétonnage. Ce mode de rupture apparait lorsque les armatures verticales réparties sont insuffisantes, la qualité des reprises de bétonnage est mauvaise et la valeur de l'effort normal est faible.

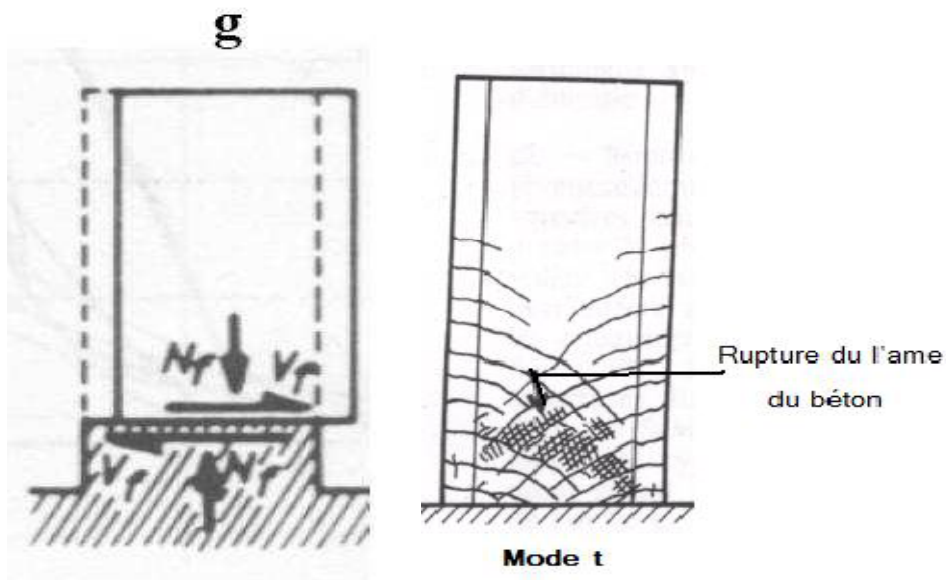


Figure II.19: Rupture par effort tranchant des voiles élancés.

c-Rupture par flexion-effort tranchant (mode EFT):

Elle se produit par plastification des armatures verticales de flexion et des armatures transversales. On a ce cas quand l'effort tranchant devient prépondérant vis-à-vis de la flexion.

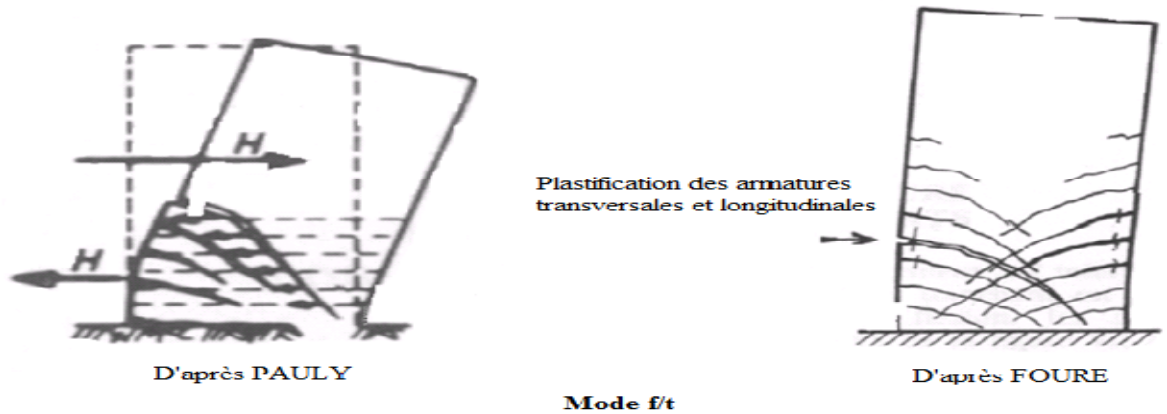


Figure II.20 : Rupture par flexion-effort tranchant (mode EFT) d'un voile élancé.

II.3.3.2. Mode de rupture des voiles courts:

Dans ce cas, la rupture est pratiquement toujours obtenue par effort tranchant et elle concerne généralement toute la hauteur de l'élément. On distingue trois modes:

✧ **MODE T1:** La rupture par glissement à l'encastrement (sliding shear), cette rupture peut être une conséquence de la plastification progressive des armatures verticales sous l'action de la flexion et du cisaillement. Ce mode de cisaillement est caractérisé par une fissure horizontale située à la base, et aussi par une perte de raideur. Il apparaît souvent pour des chargements cycliques.

✧ **MODE T2:** Rupture diagonale « diagonal tension failure » avec plastification ou rupture des armatures le long des fissures diagonales. On observe dans les voiles modérément armés et soumis à un effort normal faible.

✧ **MODE T3:** rupture par écrasement (« diagonal compression failure ») du béton de l'âme. Ce cas se rencontre dans les voiles fortement armés surtout s'ils sont associés à des raidisseurs sur les bords ou une insuffisance de l'épaisseur de l'âme. La destruction est obtenue à la base des bielles transmettant les efforts de compression.

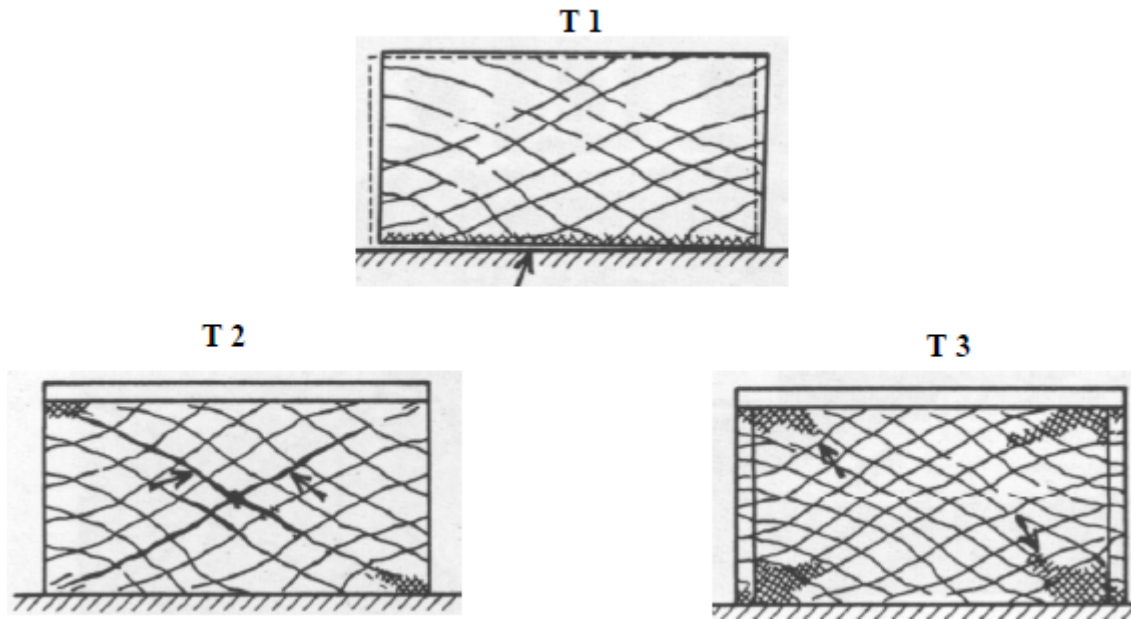


Figure II.21: Modes de rupture des voiles courts. [18]

I.3.4. Comportement cyclique d'un voile en béton armé :

La nature cyclique des sollicitations sismiques a poussé les chercheurs à étudier le comportement cyclique des voiles, pour s'assurer de leurs **capacités à développer suffisamment de ductilité** et à **dissiper le maximum d'énergie de déformation** afin d'éviter la rupture fragile.

On distingue trois types de ductilité, celle du matériau, en rotation et en déplacement:

- ductilité du matériau caractérise les propriétés du matériau lui même, elle est définie par le rapport de la déformation correspondant à la contrainte ultime et la déformation correspondant à la limite élastique.
- ductilité en rotation permet d'évaluer le comportement individuel du voile à partir des valeurs de rotation aux nœuds, défini par le rapport entre la rotation ultime et la rotation correspondant à la limite élastique.
- ductilité en déplacement, elle caractérise le comportement global du voile, défini par le rapport du déplacement horizontal ultime et le déplacement correspondant à la limite d'élasticité.

C'est l'amortissement qui nous permettra de quantifier **l'énergie dissipée** par un voile ou une structure quelconque qui subit des déformations, cette dissipation peut dépendre de la vitesse de déformation, il s'agira dans ce cas d'un amortissement visqueux. Sous sollicitations cycliques quasi statique, elle retrouve son origine dans la non linéarité du comportement des matériaux constituant le voile en béton armé (fissuration du béton armé en traction, écrasement en compression, plastification des aciers...), dans ce cas on parlera d'un amortissement d'hystérésis .

II.3.4.1. Comportement d'hystérésis:

II.3.4.1.1. Comportement d'hystérésis d'un voile élancé:

Dans ce type de voile le comportement est gouverné par la flexion, la figure montre les boucles d'hystérésis d'un élément élancé soumis à la flexion simple ($N=0$ ce qui est favorable pour la ductilité). La ductilité et l'amortissement sont généralement importants.

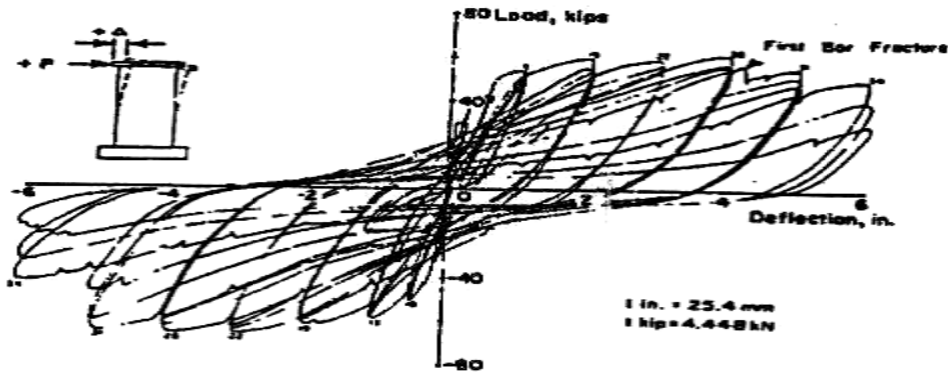
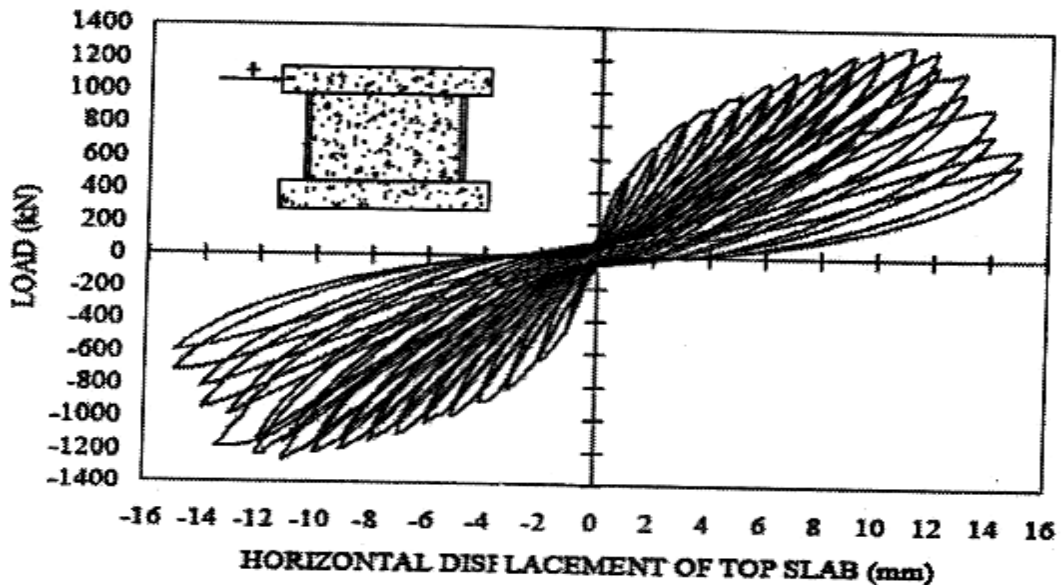


Figure II.22 : Boucles d'hystérésis d'un voile élancé en flexion. [19]

II.3.4.1. b. Comportement d'hystérésis d'un voile court:

Dans ce type de voile le comportement est gouverné par l'effort tranchant, les boucles d'hystérésis sont fortement pincées à l'origine, ce qui correspond à la fermeture et à la réouverture des fissures diagonales où à un glissement à l'encastrement lors de l'alternance du chargement.



Figure(II.23): Boucles d'hystérésis d'un voile élancé en flexion. [20]

II.4. PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT D'UN VOILE ET CHOIX DU FERRAILLAGE:

Le voile en béton armé étant un élément de contreventement, son dimensionnement doit se faire de telles sortes à résister aux sollicitations sismiques. Ce dimensionnement se fait de telle façon que l'énergie apportée lors d'un séisme soit absorbée et dissipée par la structure.

Un voile soumis à des efforts latéraux, est sollicité au delà du domaine élastique et se comporte d'une manière non linéaire, la dégradation apparaît progressivement ou brutalement en diverses parties du voile qui provoquera ainsi une plastification et une redistribution des efforts, la rigidité globale est modifiée. Les calculs non linéaires sont les seuls capables d'évaluer les effets de ces variations après plastification.

De nombreux pays ont adopté une conception de bâtiment avec des murs porteurs peu nombreux, assurant la fonction de contreventement. La base du voile doit être convenablement ancrée dans la fondation, et le ferrailage soit de telle façon que la formation de rotule plastique soit à la base.

Il existe plusieurs méthodes de conception, l'EUROCODE 8 se base sur la méthode de capacité « CAPACITY DESIGN », une grande capacité de déformation est organisée dans la zone critique (à la base) tout en assurant un comportement élastique au dessus de cette zone. Afin d'obtenir cette capacité de dissipation de l'énergie, les sources potentiels de rupture fragile par cisaillement doivent être éliminés. La présence des cadres autour des armatures verticales augmente la ductilité dans la section.

Les règles françaises (PS 92, 1998) adoptent un principe de conception différent celui des «murs banchés» faiblement armés, dans ce cas, le fonctionnement du voile permet de mobiliser à la fois une dissipation de l'énergie par endommagement du béton, plastification des armatures et soulèvement des masses. La fissuration et la plastification des aciers se produisent sur une hauteur plus grande que la zone critique. Sous l'action sismique, ces voiles ont un fonctionnement multi-fusible, qui est le résultat d'une ductilité répartie et une fissuration distribuée sur toute la hauteur du mur voile (Ile 2000, MAZARS et Al 2004, BISCH et al 2007).

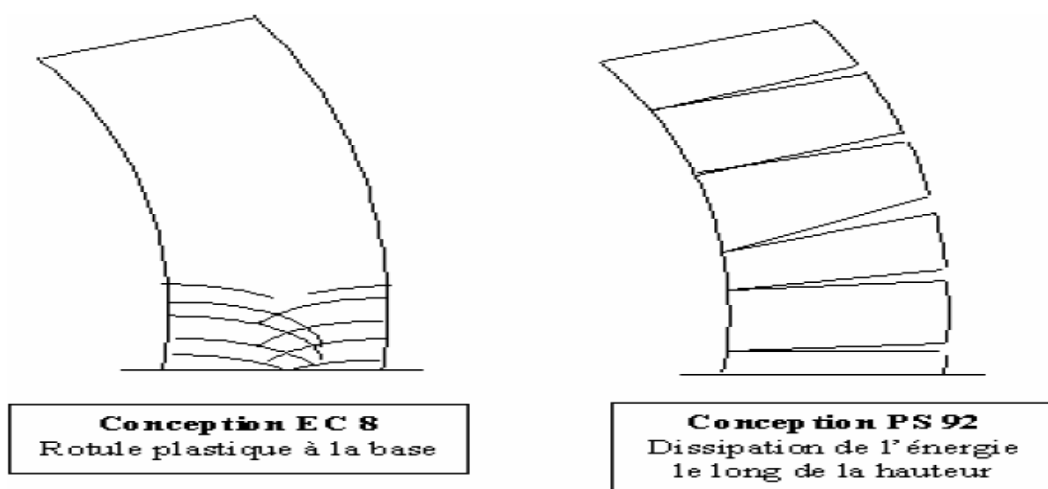
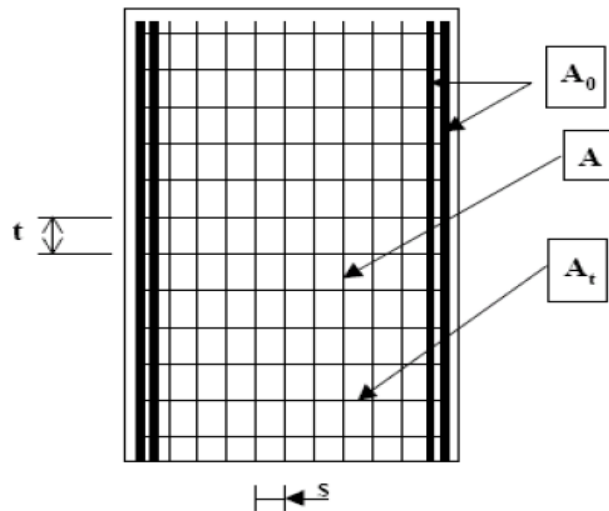


Figure II.24: Les conceptions de voile selon l'EC 8 et le PS 92.

Le mode de dimensionnement capacitif a pour objectif d'éviter l'apparition des déformations plastique, la rupture par fragile, ou la ruine par instabilité en dehors des zones dissipatives. Les zones adjacentes aux zones dissipatives doivent être dimensionnées pour que leurs résistances ne s'épuisent pas avant d'avoir pu développer le mécanisme plastique. Il est ainsi possible de concevoir des structures économiques capables de résister à des sollicitations sismiques importantes.

Un ferrailage classique d'un voile est composé d'armatures verticales uniformément repartis ($\rho\%$) et des armatures horizontales ($\rho_t\%$). Les armatures verticales sont soumises à d'importante force de traction-compression. Autour de ces armatures verticales, des cadres sont disposés afin d'assurer le rôle de la résistance à l'effort tranchant. Dans le règlement parasismique Algérien RPA, il est indiqué que le pourcentage minimal des armatures verticales sur la zone tendu doit être d'au moins égale à 0.20% de la section tendu du béton.



Armatures	Aire	Pourcentage
Verticales concentrées	A_0	$\rho_0 = A_0 / B$
Verticales réparties	A	$\rho = A / e \cdot s$
Horizontales réparties	A_t	$\rho_t = A_t / e \cdot t$

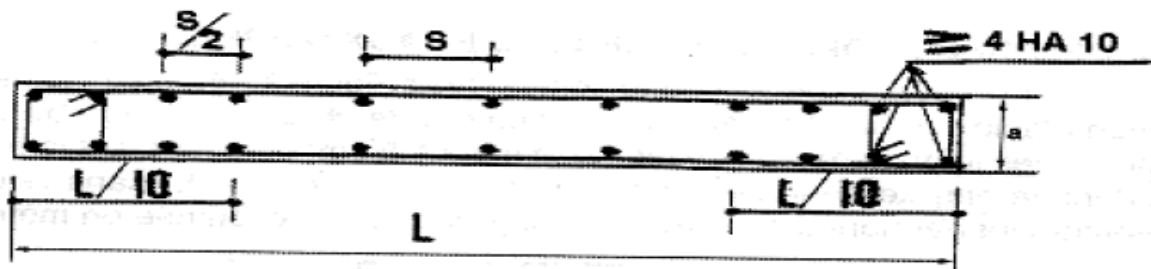


Figure II.25: Disposition du ferrailage dans un voile plein classique. [10]

II.5. MODELISATION DU COMPORTEMENT NON LINERAIRE D'UN VOILE :

Plusieurs recherches ont été menées afin de modéliser le comportement non linéaire des voiles et déterminer la meilleure approche.

On trouve dans la littérature deux familles de modélisation par éléments finis :

- Modélisation raffinée,
- Modélisation simplifiée.

II.5.1. Modélisation raffinée :

Cette modélisation se fait à l'échelle locale, les modèles élasto-plastiques permettent de prendre en compte les aspects essentiels du comportement cyclique du béton: dissipation d'énergie, dégradation du module, frottement des surfaces de fissure.

La figure ci-dessous, représente une simulation sur un voile faiblement armé (programme européen, maquette ECOLEADER) avec le code Castem 2000, le maillage utilisé est en 3D avec des éléments de type coque, choisi de tel façon à ce que la connexion acier-béton soit le plus exacte possible.

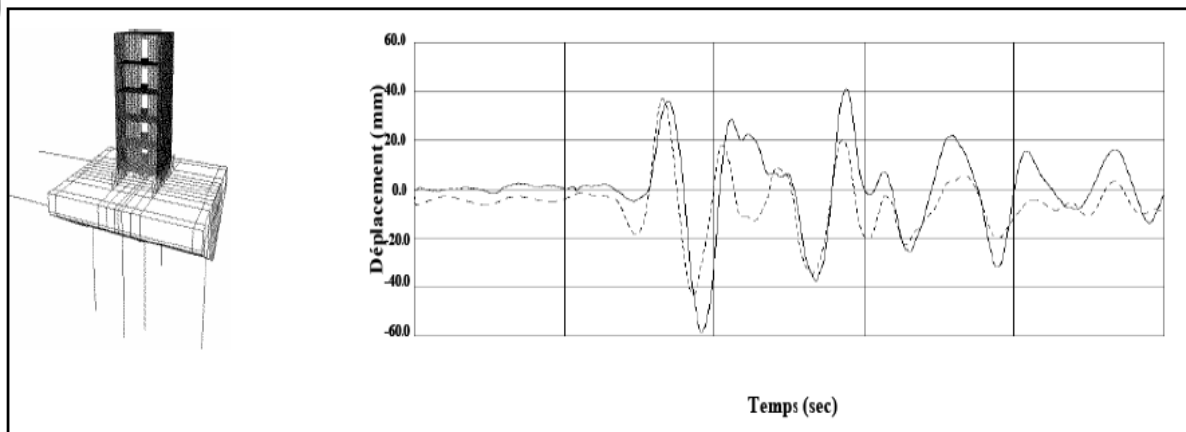


Figure II.26: Maquette ECOLEADER, maillage 3D (Nguyen et al 2007). [7]

La comparaison entre les résultats obtenus et les résultats expérimentaux révèle la capacité de cette modélisation à reproduire le comportement globale et local de la maquette jusqu'à la ruine. Cette approche est délicate, très laborieuse et demande des années d'expérience.

II.5.2. Modélisation simplifiée:

La modélisation simplifiée relève des échelles globales et semi globales, basée sur la mécanique de l'endommagement en prenant compte des aspects essentiels du comportement cyclique du béton. Cette modélisation peut être efficacement effectuée en utilisant des modèles analytiques et numériques basées sur une approche macroscopique. Avec cette

approche, le voile est modélisé par des éléments « poteau-poutre » équivalent situé à l'axe centrale du voile.

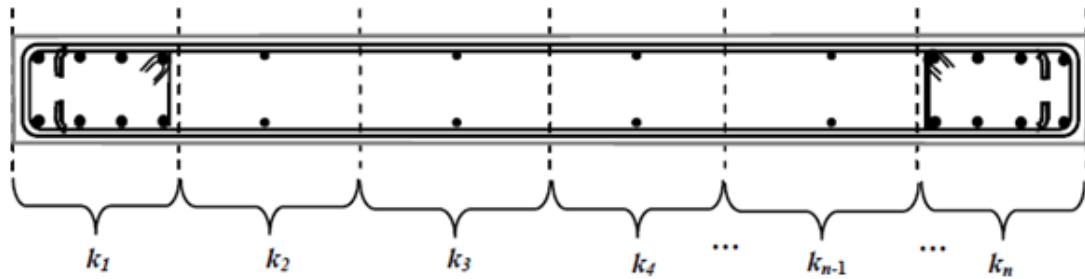
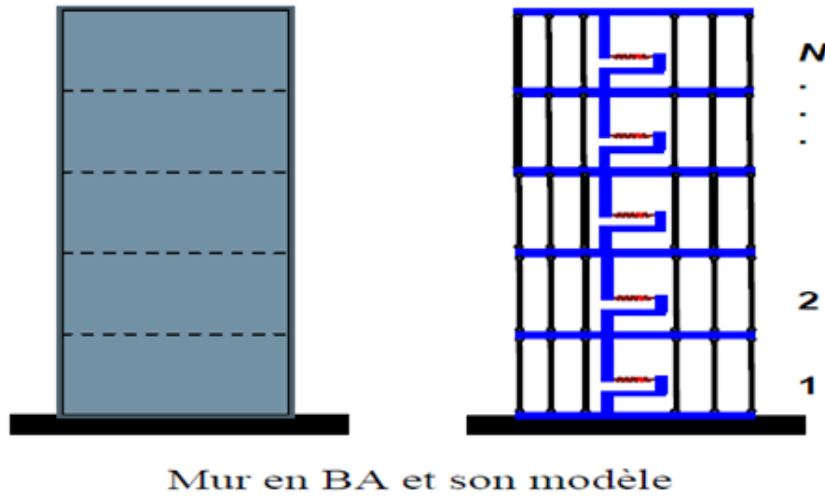


Figure II.27: Modélisation simplifié d'un voile. [22]

Le règlement Américain FEMA 358 propose deux modélisations des voiles, dans le cas ou $h/l \geq 3$ modèle poteau-poutre équivalent, sinon un modèle modifié.

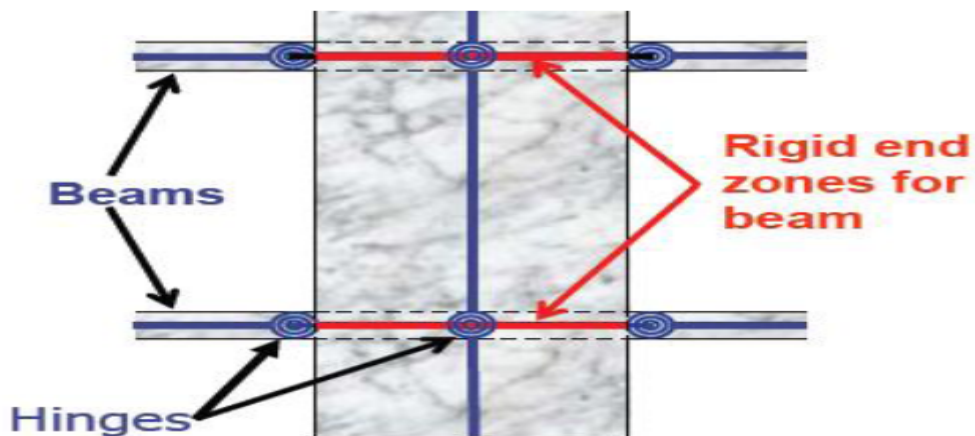


Figure II.28 : modèle « poteau-poutre équivalent »[15].

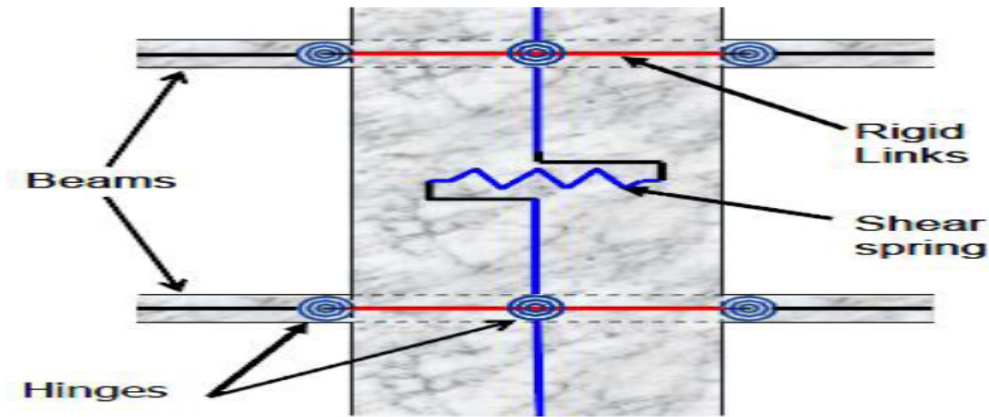


Figure II.29: modèle « poteau-poutre équivalent » modifiée. [15]

II.6. EFFET DU CISAILLEMENT SUR UN VOILE COURT:

Dans les voiles courts, l'effet de cisaillement est prépondérant, on s'intéressera par la suite au fonctionnement d'un voile court vis-à-vis du cisaillement.

L'équilibre d'une structure dépend de la disposition des voiles. V_1 un voile appartenant à une structure donnée de hauteur h , les voiles perpendiculaires d'une densité d'armatures verticales compatible à celle du voile V_1 sont connectés à cet élément, ses armatures jouent un rôle très important dans l'équilibre global.

Dans l'élément 1 ; représenté dans la figure ci-dessous; les armatures horizontales servent à transférer l'effort tranchant V de l'élément 1 à l'élément 2 à travers les fissures diagonales. Les armatures verticales seront activées quand le sens de l'effort s'inversera. Par contre, l'ensemble des armatures verticales et horizontales participent à la répartition de la fissuration sur l'élément.

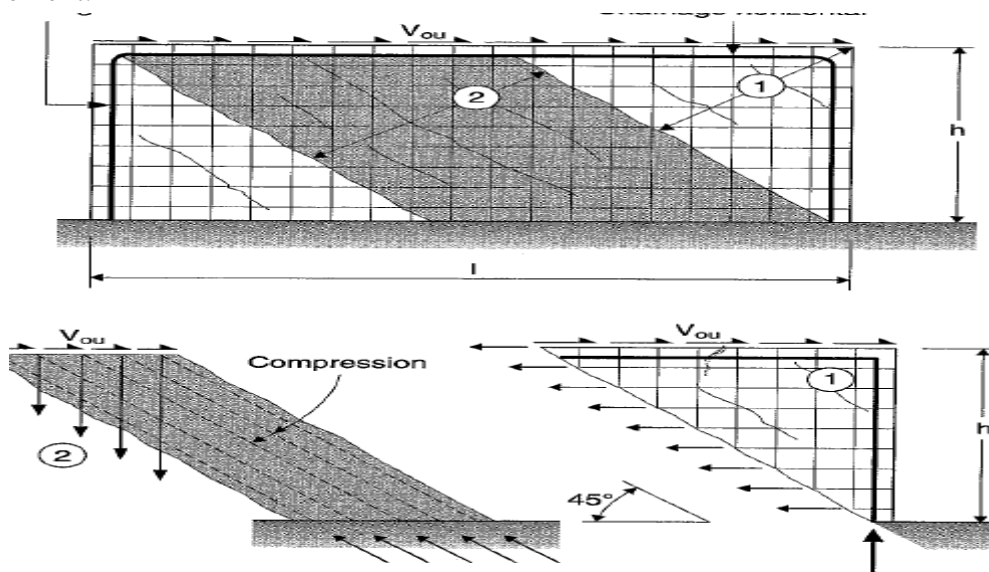



Figure II.30: Transmission des efforts horizontaux dans un voile court. [23]

L'élément 2 forme une bielle de compression, l'équilibre est assuré en partie basse par un ensemble de mécanismes dont le frottement sur l'élément inférieur, la butée de l'élément perpendiculaire et la participation des matériaux acier béton.

Dans les codes de dimensionnement, l'effort tranchant V repris par une section est divisé en un terme apporté par le béton V_c («concrete contribution») et un terme apporté par l'acier transversal V_s («steel contribution») : $V=V_c + V_s$. La contribution du béton est souvent considérée comme un paramètre fixe, empirique, qui est insensible aux séquences de chargement et à sa magnitude. Afin de calculer cette contribution, plusieurs recherches ont été faites, l'équation proposée par Pérez et Pantazopoulou (1998) est :



$$V_c = \frac{\beta \rho_t}{(1 + \mu)} \sqrt{f_c} \left[1 - \gamma \frac{n}{\sqrt{f_c}} \right] \text{ (MPa)}$$

Tél que :

- f_c : résistance de béton en compression issue d'un essai de compression sur cylindre ;
- n : effort axial ;
- β : constante (estimée égale à 37) ;
- γ : constante (estimée égale à 7.6) ;
- μ : demande en ductilité ;
- ρ_t : pourcentage volumique d'armatures transversales.

La contribution apportée par l'acier est calculée à partir du modèle de treillis à 45°.

L'analogie du treillis à 45° a été introduite par Ritter (1899) et Mörsch (1909) afin de décrire le comportement non linéaire d'une poutre fissurée, des fissures inclinées qui séparent le béton en une série de bielle de diagonales.

Néanmoins, dès son apparition le modèle a été sérieusement critiqué. Les expériences Withey (1908) et Talbot (1909) ont montré que les résultats étaient souvent trop conservateurs, surtout pour les poutres avec de faibles pourcentages de renforcement.

Pour le cas de murs à faible élancement le modèle semble surestimer la résistance jusqu'à 50% (Hsu 1988).

Les chercheurs se sont vite aperçus que le problème du cisaillement est très compliqué et que des paramètres supplémentaires doivent être pris en considération (qualité et résistance du béton, longueur de la poutre par rapport à sa hauteur etc.). Depuis 1960 plusieurs chercheurs ont travaillé sur le problème et aujourd'hui quatre développements majeurs sont proposés afin d'expliquer la différence entre le modèle des bielles à 45° et les résultats des essais :

- Généralisation de l'inclinaison des bielles : Les expériences ont montré que l'inclinaison des bielles de compression n'est pas en général égale à 45° et qu'elle varie entre 31° et 59°.

- Détermination de l'angle des bielles de compression : H.A.Wagner (1929) considère qu'après flambage l'élément ne peut plus résister en compression et le cisaillement est transféré par un champ de traction diagonale. Afin de déterminer l'angle de l'inclinaison de la traction diagonale, Wagner considère les déformations du système. Il suppose que l'angle de l'inclinaison de la contrainte de traction diagonale coïncide avec l'angle de l'inclinaison de la déformation principale de traction. Son approche est connue sous le nom de «*Tension Field Theory*». En se basant sur les développements de Wagner, Collins (1978) suppose qu'après fissuration le béton n'a plus de résistance en traction et le cisaillement est transmis par un champ de compression diagonale. Il arrive ainsi à calculer l'angle de la compression diagonale pour tout le domaine de chargement à partir des déformations des armatures et du béton.
- L'adoucissement des bielles de béton : La prédiction du comportement non linéaire d'un élément en béton armé nécessite non seulement des équations d'équilibre et de compatibilité, mais aussi des lois de comportement pour le béton et l'acier. La résistance du béton fissuré en diagonales de compression diminue avec l'augmentation des déformations de traction. Après quantification cette diminution à partir des résultats expérimentaux, une loi est proposée où l'adoucissement dépend de la proportion des deux déformations principales en traction et en compression (Vecchio et Collins 1986).

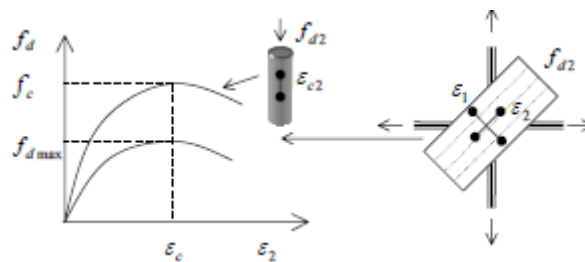


Figure II.31 : adoucissement des bielles de béton [18].

- La contrainte de traction dans le béton: Le modèle des bielles à 45° suppose que le béton ne résiste pas en traction. Cependant, plusieurs essais prouvent que le béton, même après avoir subi une fissuration importante, est capable de transmettre des contraintes de traction (Vecchio et Collins 1986). Ces contraintes diminuent les déformations, rigidifient l'élément et le rendent capable de résister à de plus grandes déformations de cisaillement.

Le comportement des voiles courts soumis à des efforts de cisaillement est un problème compliqué qui nécessite de prendre en compte plusieurs paramètres. Le modèle de Ritter - Morsch qui considère le voile fissuré comme un *treillis* formé par des *bielles de compression en béton* (parallèles aux fissures) et des *armatures* (perpendiculaire aux fissures), doit être enrichi afin de donner des résultats satisfaisants pour le cas de cisaillement statique. Si les pratiques de dimensionnement donnent cependant des résultats satisfaisants pour des problèmes de cisaillement statique, ceci n'est pas le cas pour des problèmes dynamiques. Les

résultats qu'on obtient lors de la simulation du comportement des structures soumises à des charges dynamiques sont souvent différents des résultats expérimentaux. Des recherches supplémentaires semblent nécessaires afin de quantifier le phénomène de l'adoucissement sous charges dynamiques (Mo et Rothert 1997).

II.6.1. Modélisation d'un voile en béton armé soumise au cisaillement:[24]

L'étude numérique qui a été faite par Collin Frédéric et al, consiste à une reproduction des essais sur voile (nommé voile 3), grâce à une modélisation par éléments finis en 2D en contraintes planes. Ils ont étudié l'endommagement d'un voile court; en utilisant la loi de MAZARS et la loi de DAMAGE-TC.

La discrétisation éléments finis adoptée pour la partie béton du voile est présentée sur la (Figure II.30). Des éléments quadratiques à 4 nœuds sont utilisés formulés en contraintes planes. Les modèles d'endommagement sont introduits uniquement dans la partie centrale du voile. Les parties supérieures et inférieures sont supposées élastiques. Le treillis d'acier est composé de 4956 éléments finis barres ayant un comportement élastique-plastique avec écrouissage positif.



Figure II.30 : discrétisation par éléments finis du voile .

d- Résultat numériques et comparaisons avec les résultats expérimentaux:

d-1. Comportement global:

d-1-i. Raideur en comportement élastique :

La raideur élastique issue du modèle Mazars (le modèle Damage_DC donnant des résultats similaires en élasticité). Cette raideur est proche des données expérimentales.

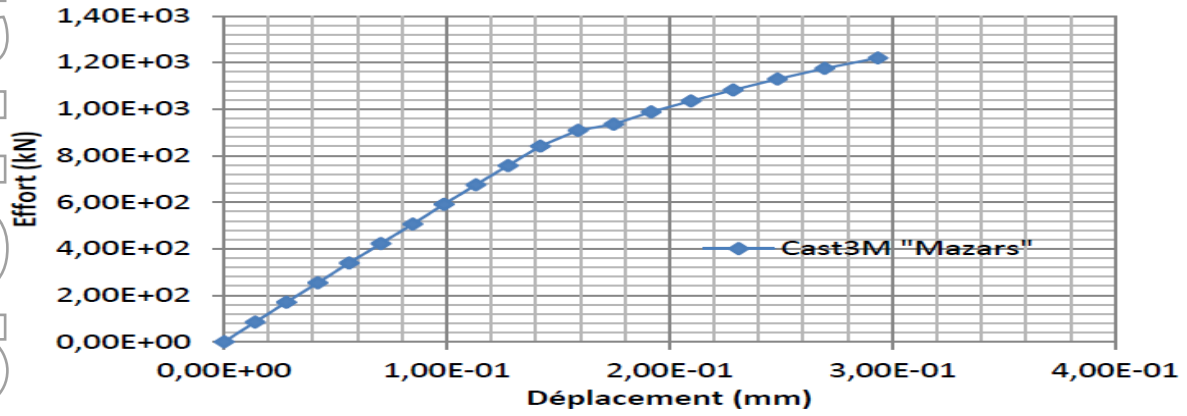


Figure II.31: Résultats numériques : Raideur élastique.

d-1-ii. Courbe effort-déplacement :

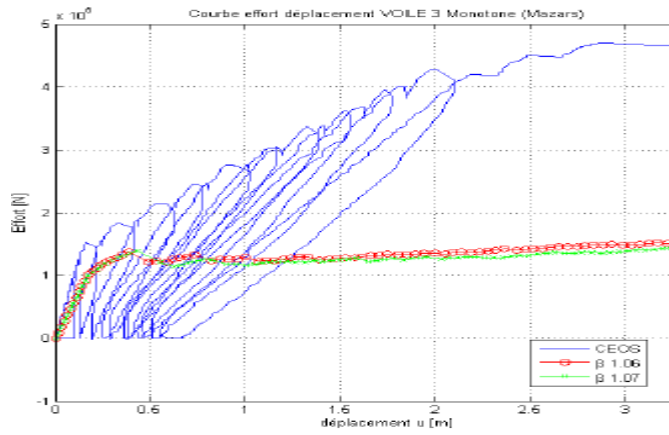


Figure II.32: 1 La courbe force-déplacement avec la loi de MAZARS Vs résultats expérimentaux .

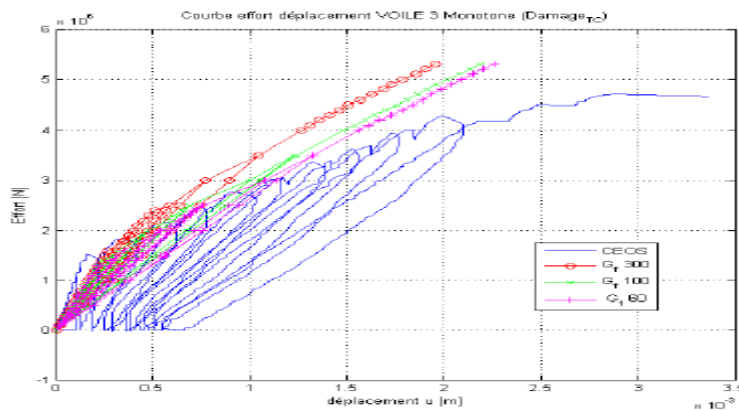


Figure II.33: La courbe force-déplacement avec la loi de DAMAGE-TC Vs résultats expérimentaux .

c-Conclusion :

L'emploi de deux lois d'endommagement permet de mettre en évidence leurs avantages et leurs limites pour modéliser une structure soumise à des importantes forces de cisaillement.

La loi Mazars, malgré le coefficient de correction de cisaillement β , ne permet pas d'atteindre les résistances obtenues expérimentalement pour ce type de sollicitation. Le modèle peut être aisément calibré lors d'un essai traction compression contrairement à un essai en cisaillement.

La simplicité de la loi est aussi sa faiblesse : le critère d'endommagement n'est défini que par les déformations positives, la capacité de la structure de reprendre des forces s'avère très faible par rapport aux résultats expérimentaux une fois l'endommagement enclenché. Or, dans le cas du cisaillement, on distingue dans le tenseur des contraintes principales une composante positive (bielle de traction) et une composante négative (bielle de compression) : cette double composante, une fois l'endommagement enclenché, n'est pas bien reproduite et entraîne la rupture brutale de la structure. La loi Damage_TC introduit de nombreuses améliorations par rapport au modèle précédent : Plus de paramètres permettant de mieux définir les seuils aussi bien en traction qu'en compression, ainsi que l'introduction de déformation permanentes mais uniquement pour un endommagement par déformations négatives..

II.7.CONCLUSION:

Dans ce chapitre, on a pu voir le rôle capital que joue un voile en béton armé dans une construction. Afin d'accomplir sa fonction de contreventement, une bonne conception est exigée.

On s'est aussi intéressé au comportement des voiles sous différents types de sollicitation, et leurs modes de rupture.

Enfin, on s'est concentré sur les voiles courts, sujet de notre travail, et l'effet du cisaillement sur ce type d'élément.

PARTIE 1 :

RENFORCEMENT DES VOILES.

III.1.INTRODUCTION :

Le renforcement d'une structure ou d'un élément donné, endommagé ou pas, consiste en une amélioration de ses performances, pour répondre à de nouveaux besoins ou pour une remise en conformité. Les objectifs du renforcement peuvent être de différente nature : une augmentation de la résistance aux efforts latéraux, augmentation de la ductilité, ou encore combiner ces deux aspects, afin de satisfaire aux nouvelles exigences de résistance aux séismes.

Plusieurs études ont été faites afin de renforcer les murs porteurs en béton armé pour améliorer ses propriétés mécaniques de la façon la plus optimal et économique possible.

On présentera par la suite quelques travaux fait dans ce sens.

III.1.1.Renforcement des voiles courts en béton armé par un matériau composite:[25]

Cette étude a été faite par QAZI Samiullah et al afin caractériser l'apport des matériaux composites dans le renforcement des voiles court en béton armé dans le cadre de la mise en conformité parasismique. Plusieurs spécimens ont été réalisés et testés expérimentalement afin de quantifier leur capacité structurale mais aussi de prévoir différentes dispositions constructives vis-à-vis des renforts composites mis en place. Un modèle bielles-tirants est ensuite présenté. Ce modèle permet de prédire un comportement global des structures voiles béton armé courts pour différentes configurations et différents types de renforts.

III .1.1.1.Description de la géométrie du voile court: Le choix de la géométrie des voiles courts est dérivé des travaux de recherches de Greifenhagen. Dans la présente étude, les voiles testés représentent un voile de bâtiment à échelle une échelle réduite.

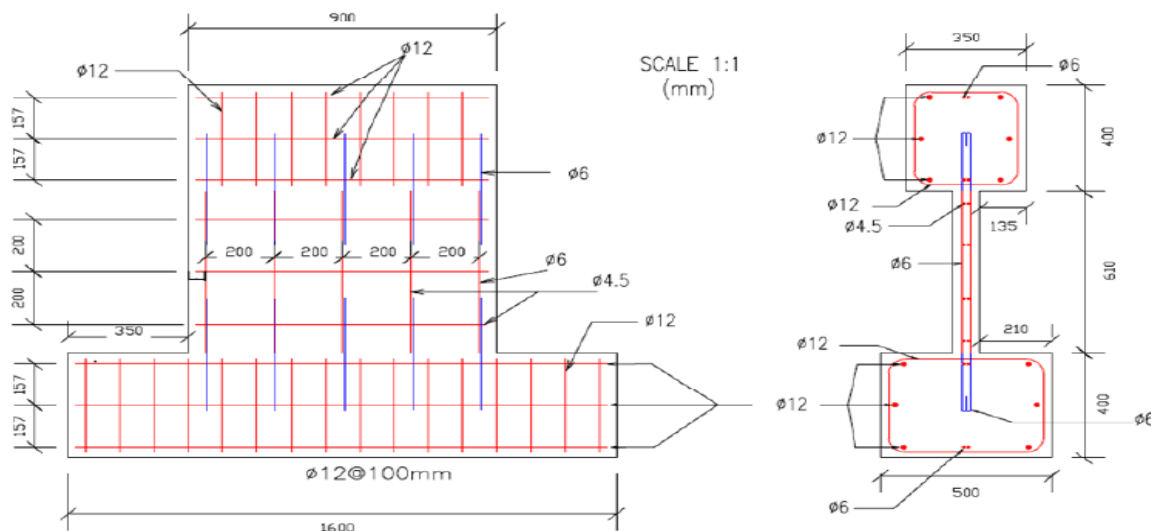


Figure III.1: Détails des caractéristiques géométriques des éléments béton armé.

III .1.1.2.description du renfort: Le renforcement utilisé est un tissu de fibres de carbone bidirectionnel fourni sous forme de bandes composites de 50 mm de largeur et une épaisseur de 0,48 mm.

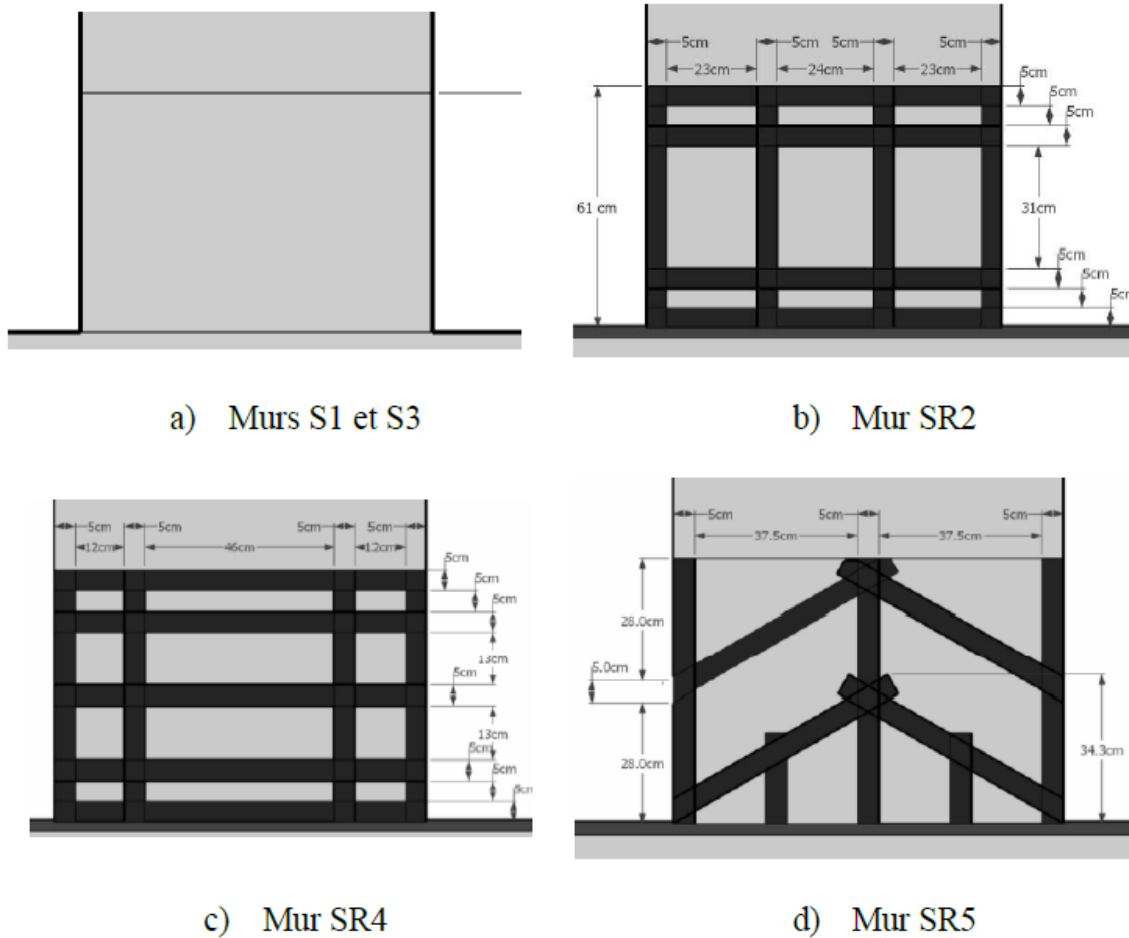


Figure III.2 : Détails des caractéristiques géométriques des renforcements.

III .1.1.3. Description des essais:

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un mur de réaction permettant de solliciter les éléments suivant deux directions, verticale et horizontale. Pour l'ensemble des essais le chargement vertical est constant et égal à 110 KN, cet effort correspond à la masse du plancher supérieur couramment prise en compte. Le chargement horizontal est appliqué sur le bloc supérieur suivant un pilotage en déplacement.

Deux types de chargement horizontaux ont été mis en œuvre. Dans un premier temps, un chargement monotone a été effectué sur les voiles S1 et SR2 afin de caractériser le voile BA témoin et d'estimer l'apport du renfort composite sur la structure. Le chargement en déplacement a été mené à une vitesse de 1 mm/min. Dans un second temps, un chargement cyclique a été imposé aux voiles S3, SR4 et SR5.

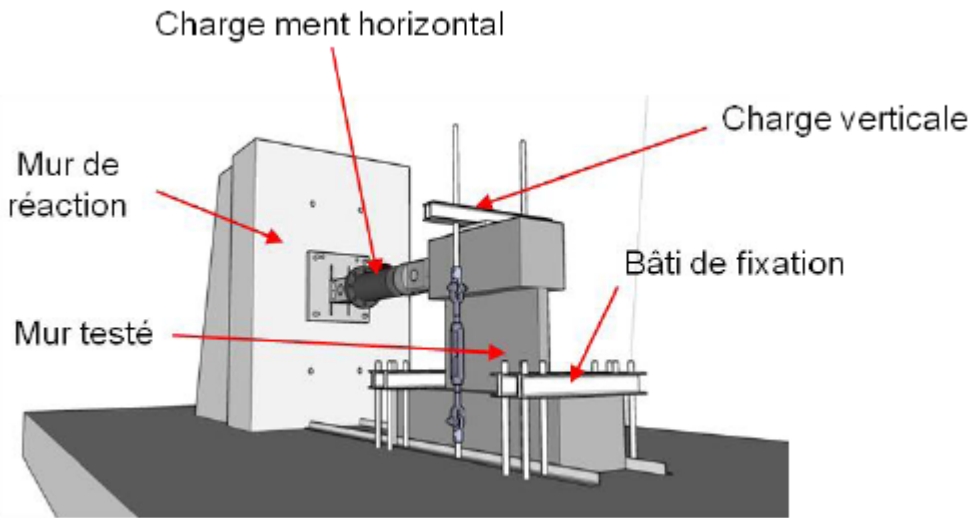


Figure III.4: Visualisation du système de chargement mis en place.

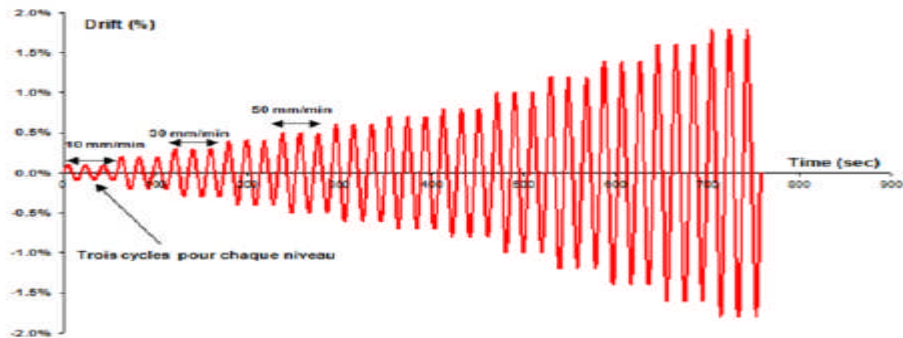


Figure III.5 : Descriptif du train de cycles imposé dans le cas des sollicitations alternées

Pour chaque essai, six capteurs de déplacement ont été mis en place, deux capteurs d'effort et des jauges d'extensométrie afin de décrire et visualiser le comportement du voile au court de l'essai.

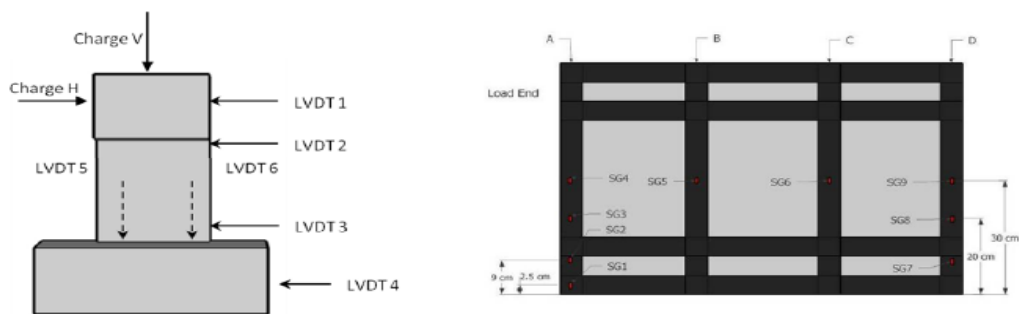


Figure III.6: Positionnement de l'instrumentation des corps d'épreuve.

III .1.1.4. Résultats des essais:

III.1.1.4.1. Essais statiques: La figure présente les courbes charge-déplacement en tête du voile des murs S1 et SR2. Les essais confirment que le renfort composite n'influe pas sur le comportement initial des murs. Par conséquent, la charge correspondant à la limite d'élasticité des armatures est proche dans les deux cas de 108 kN pour un déplacement de 0,8 mm. Au-delà de cette valeur, la contribution des composites devient évidente et permet d'augmenter à la fois la charge de ruine mais également le déplacement ultime.

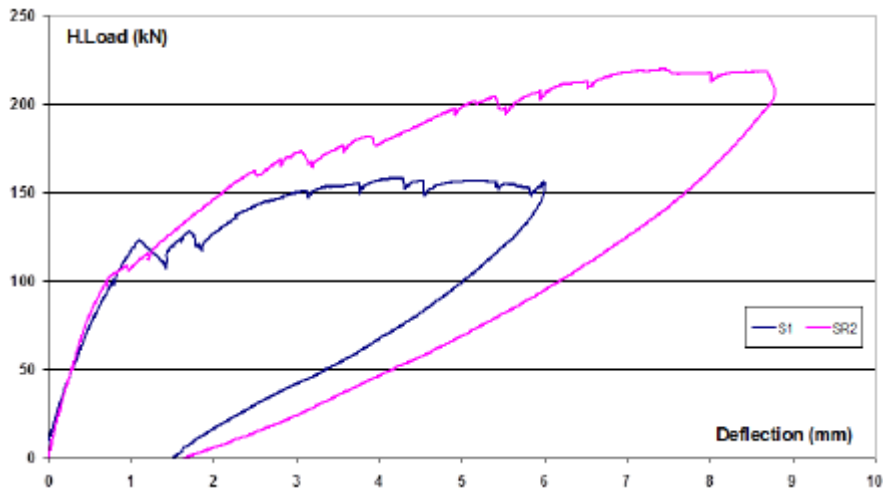


Figure III.7: Courbes charge-déplacement en chargement monotone.

III.1.1.4.2. Essais cycliques: Les courbes présentées sur la Figure exposent les variations de la réponse cyclique des voiles béton armé S3, SR4 et SR5. Les valeurs maximales de charge obtenues sont respectivement 138,7 kN, 170,5 kN et 169,5 kN. Les courbes d'hystérésis indiquent une augmentation de la raideur initiale des murs SR4 et SR5 par rapport au voile court de référence cyclique S3.

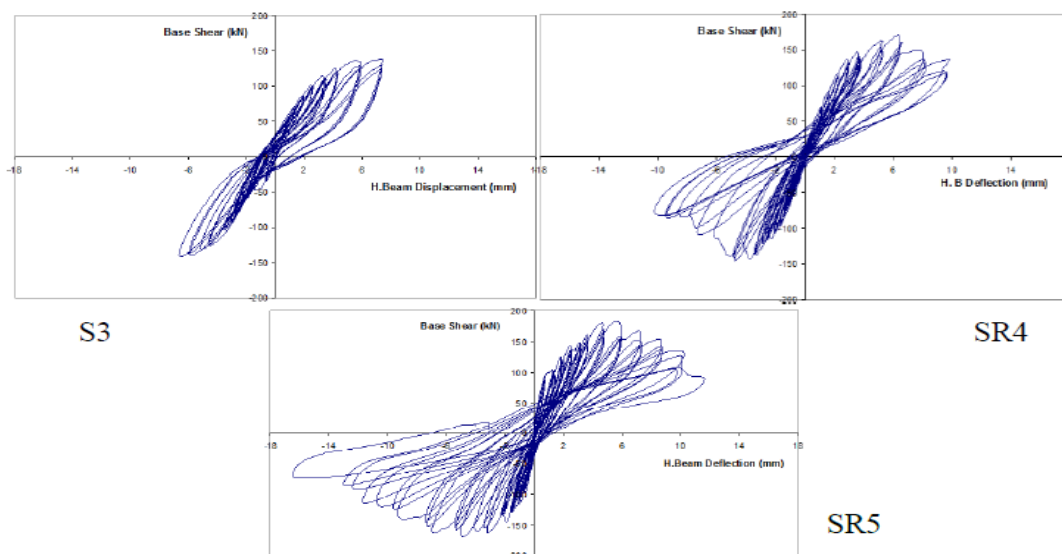


Figure III.8: Courbes d'hystérésis des voiles sollicités en cyclique.

III .1.1.5. Modélisation:

La modélisation des voiles courts est de type Bielles-Tirants 2D. Les bielles comprimées en béton sont représentées par les lignes pointillées et les tirants sont représentés par les lignes pleines.

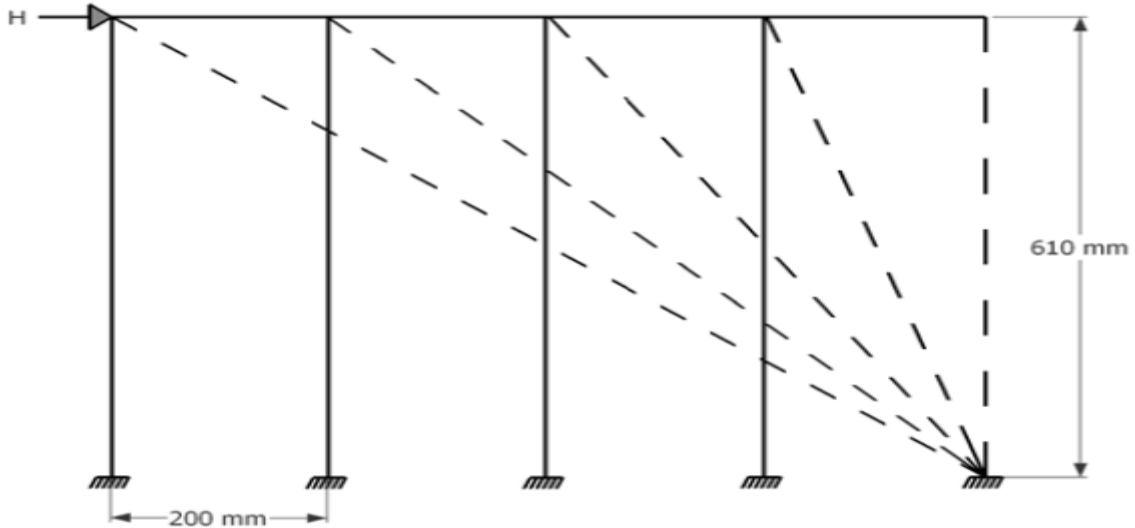


Figure III.9: Schéma synthétique de la configuration prise en compte dans le modèle.

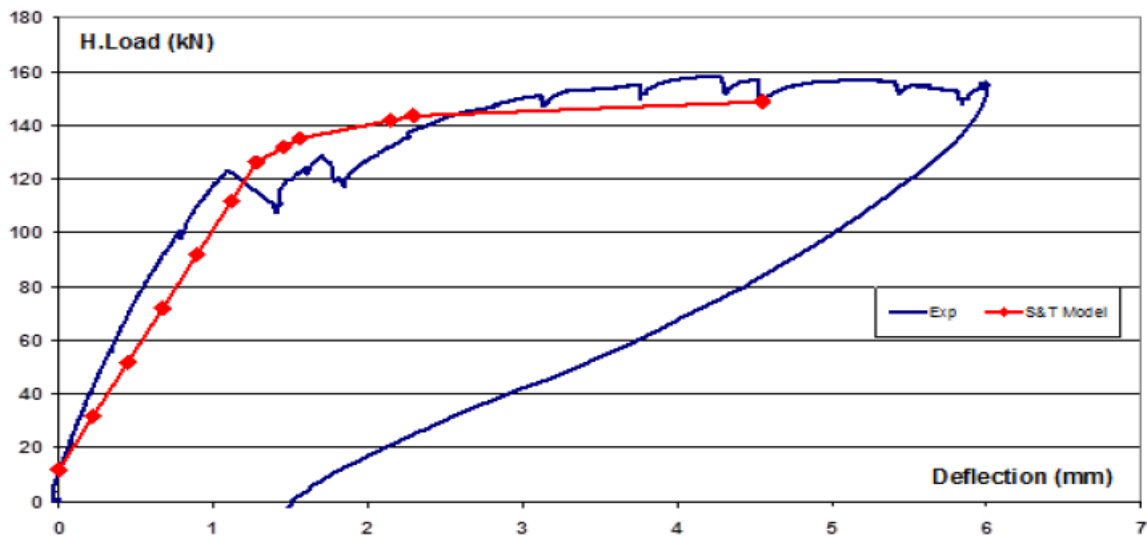


Figure III.10: Calage des paramètres du modèle des murs courts.

La (Figure III.10) montre le résultat du modèle bielles-tirants appliqué sur un voile béton armé court renforcé par matériaux composites. La réponse du modèle retrace relativement bien le comportement général du voile renforcé. Il s'avère que les modes de rupture spécifiques aux renforcements composites doivent impérativement être pris en compte pour garantir une réponse cohérente du modèle. La courbe verte considère ainsi le phénomène de décollement des bandes composites au niveau du support béton. On peut noter qu'avec le

modèle, la contrainte maximale obtenue dans les composites est proche de 316 MPa, soit une valeur relativement proche de celle obtenue dans l'expérience.

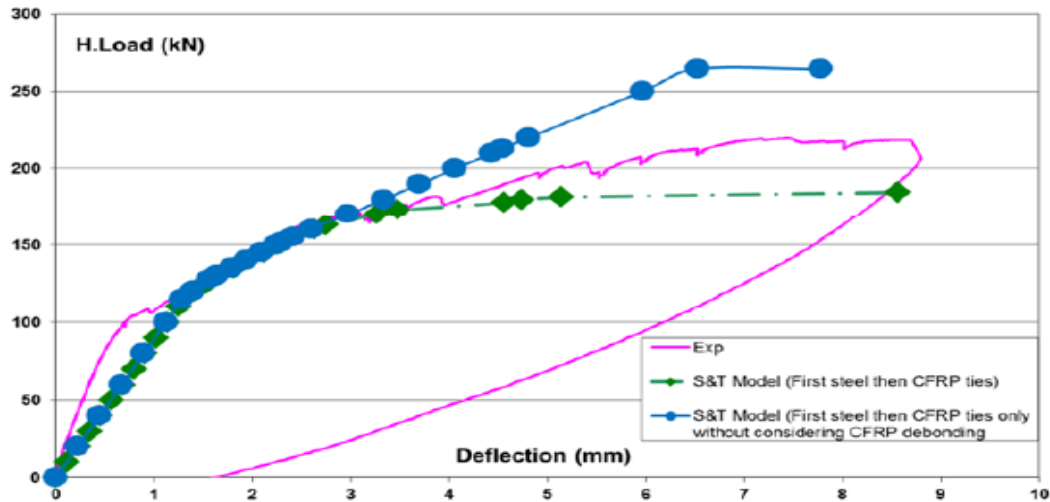


Figure III.11 : Réponse du modèle bielles-tirants d'un voile court renforcé.

III .1.1.5. Conclusion:

L'étude confirme dans le cas des voiles courts soumis à des sollicitations cycliques alternées, qu'il est possible d'augmenter de 22% l'effort à la rupture tout en garantissant une augmentation des déplacements autorisés de l'ordre de 35%. Le modèle 2D de type Bielles-Tirants mis en place permet de prédire d'une façon correcte (différence de l'ordre de 15%) le comportement de voiles béton armé renforcés par matériaux composites. Néanmoins, il reste nécessaire de prendre en compte des effets locaux permettant une corrélation plus précise entre le modèle et l'expérience. Cette démarche doit également être complétée par une étude paramétrique sur les différents composites pouvant être utilisés.

III .1.2. Renforcement des voiles en Béton armé avec des Bande en Acier :[26]

Cette étude expérimentale a été faite par Sinan Altin et al sur quatre spécimens de voile court confectionnés et mis en essais en le soumettant à des sollicitations latérales cycliques. Trois de ces spécimens ont été renforcé avec des bandes en Acier en diagonal horizontal et en combinaison en bandes horizontales et verticales. Toute les configurations sont renforcé des deux coté symétriquement.

III .1.2.1. Présentation des spécimens:

Les dimensions et le ferrailage du voile référence est représenté dans la figure ci-dessous.

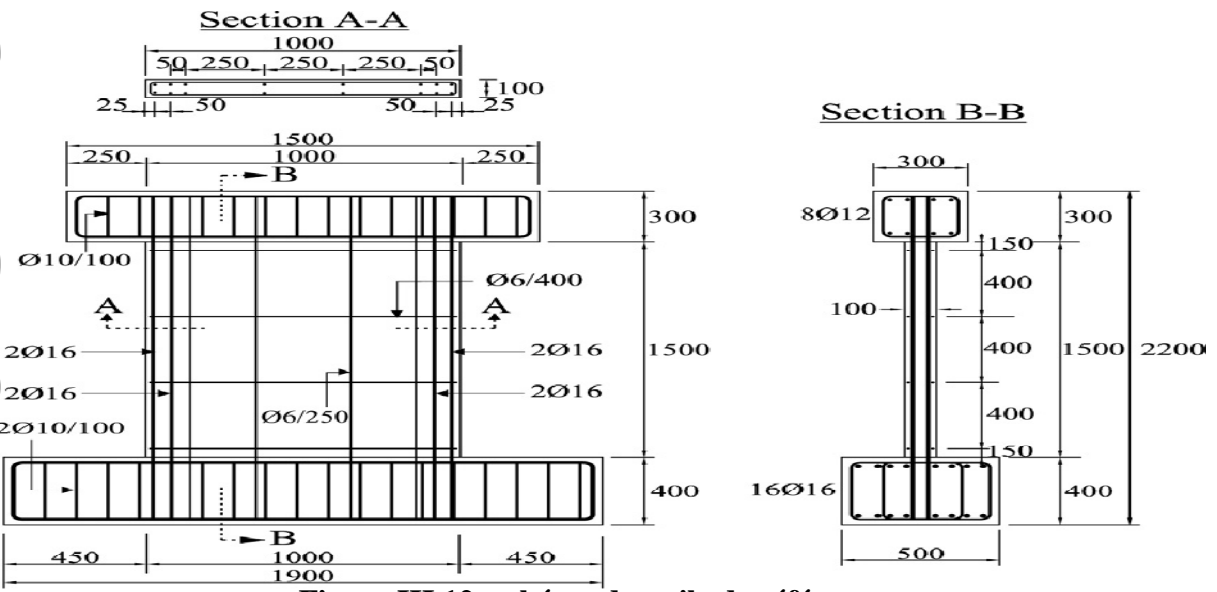


Figure III.12: schéma du voile de référence.

Les renforcements en diagonal, horizontal et combinaison en vertical et horizontal sont illustré dans la figure ci dessous, ainsi que les boulons d’ancrage des bandes en aciers sur le béton.

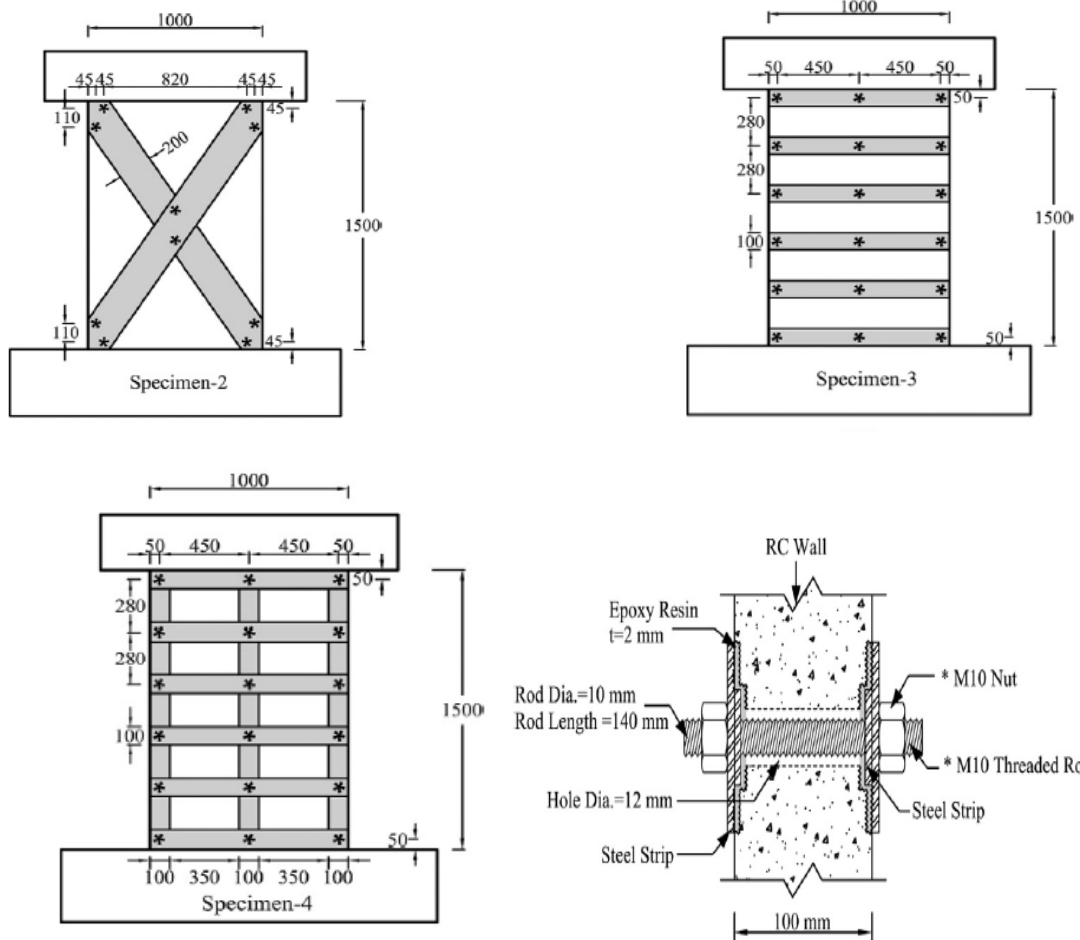


Figure III.13: Représentation du renforcement.

III .1.2.2. Description des essais:

Le système de chargement et l'instrumentation sont montrés dans la figure.

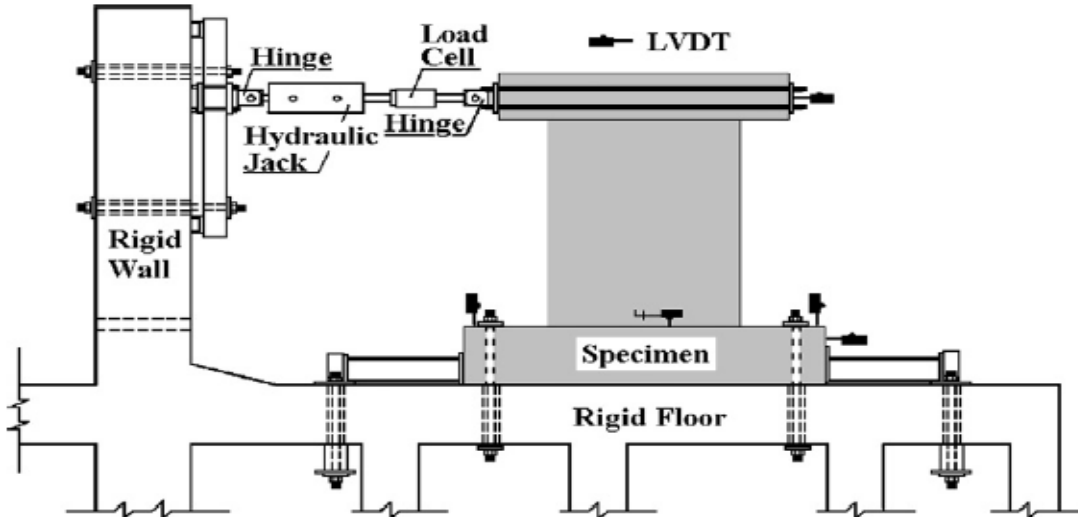
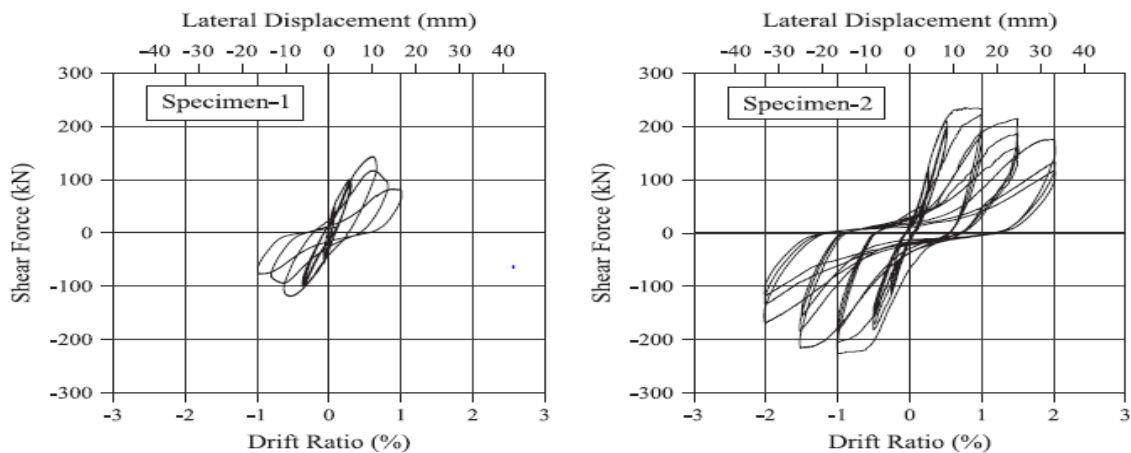


Figure III.14: description de l'instrumentation.

III .1.2.2. Résultats:

Des courbes d'hystérésis en cisaillement pour les spécimens d'essai sont montrées dans figure. Comme le montrent ces figures, la portance latérale, déplacement latéral et capacités de dissipation d'énergie ont sensiblement augmenté dans les spécimens renforcés. Les bandes extérieurement collées d'acier, améliorent la résistance au cisaillement et empêchent les fissurations en diagonale. Les boulons d'ancrage ont empêché le soulèvement prématuré des bandes en acier de la surface du voile. En conséquence, les bandes limitent l'ouverture des fissures.



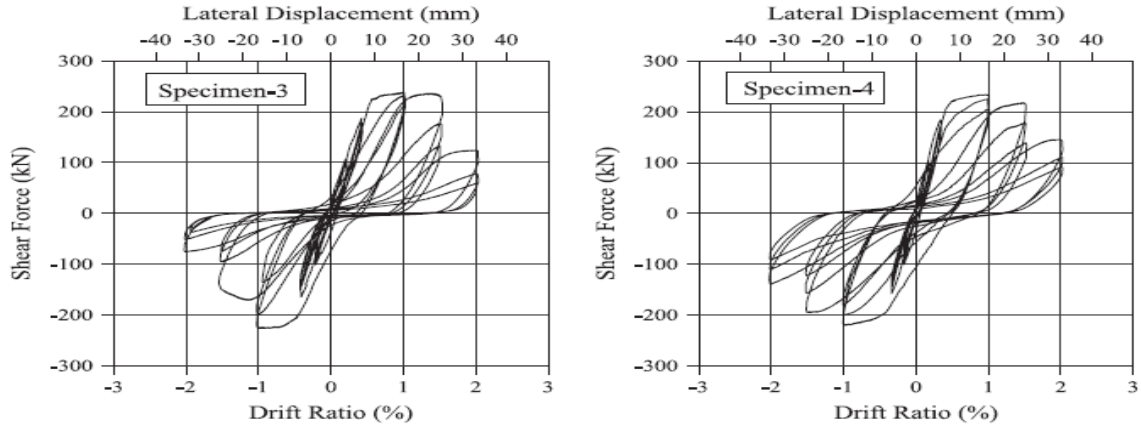


Figure III.15: Les courbes d'hystérésis en cisaillement pour les quatre spécimens d'essai.

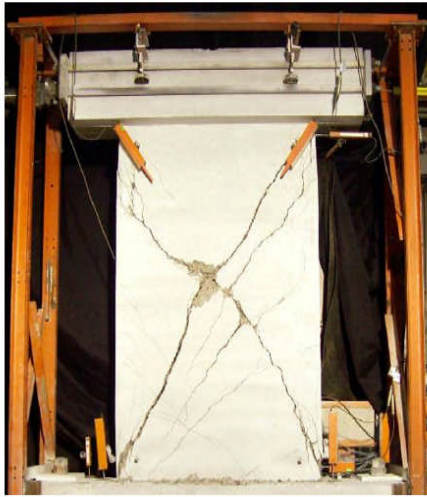


Figure III.16: Fissuration du spécimen de référence.



Figure III.17 : Fissuration du spécimen 2.



Figure III.18: Fissuration du spécimen 3.

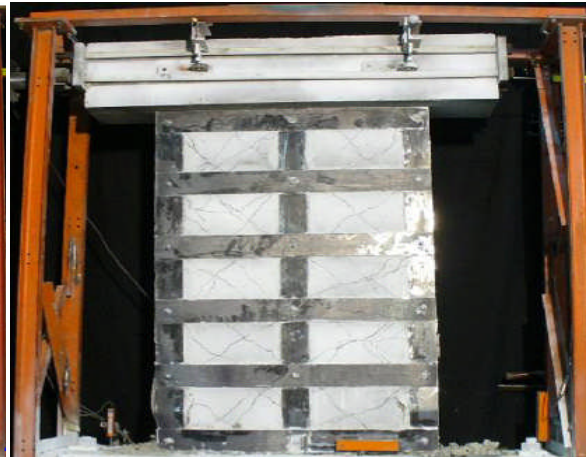


Figure III.19: Fissuration du spécimen 4.

III .1.3. Simulation numérique des voiles en béton armé renforcés par un matériau composite:[29]

Une simulation numérique des voiles courts en béton armé renforcés par un matériau composite (fibres de carbone + époxy) à été menée par l'équipe de recherche [29], pour mettre en exergue la nécessité de ce type de renforcement, en matière de performance mécanique de l'élément.

III .1.3.1. Présentation des modèles:

Dans cette étude sept voiles ont été considérés, le premier voile est celui testé expérimentalement (spécimen témoin sans composite), cinq suivants sont renforcés par des bandes composites collées sur la surface externe : une bande le long du pourtour de l'âme et une autre bande suivant la bielle diagonale (**Figure 2.a**). Cette dernière est inclinée de 45° par rapport à l'horizontale, a une largeur de 100mm et une épaisseur minimale de 1mm, dont les fibres de carbone sont orientées d'un angle α de : $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ par rapport à l'horizontale (MR 0° , MR 30° , MR 45° , MR 60° , MR 90°) afin de voir l'influence de l'orientation de ces fibres sur le comportement. Le dernier voile est renforcé par le collage du matériau composite sur toute sa surface externe, avec des fibres orientées suivant la direction de 45° . Il est noté MRT.

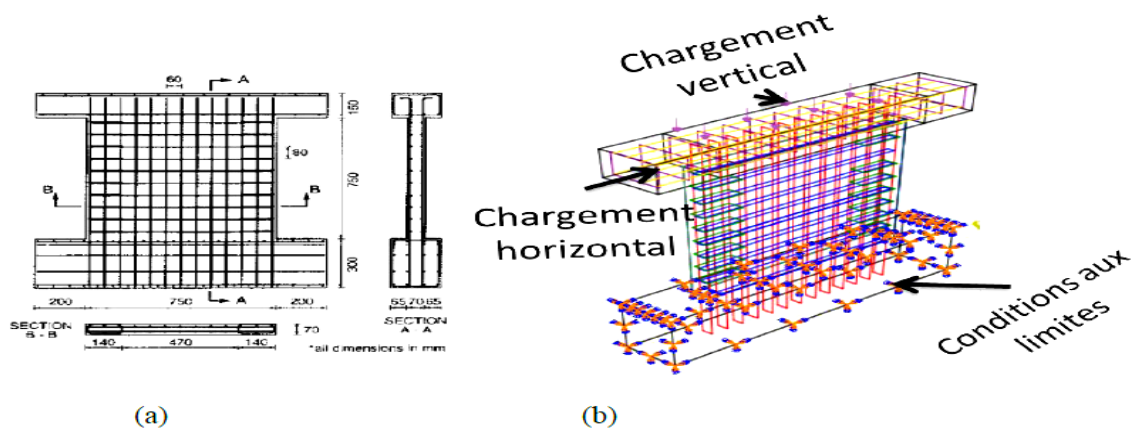


Figure III.20: (a) Dimensions et ferrailage des voiles (spécimens LEAFS 90), (b) modèle éléments finis.



Figure III.21 : (a) Géométrie du renforcement des modèles (MR0°, MR30°, MR45°, MR60°, MR90°), (b). Géométrie du renforcement de modèle MRT.

III .1.3.2. Comparaison entre le modèle numérique et l'expérimental :

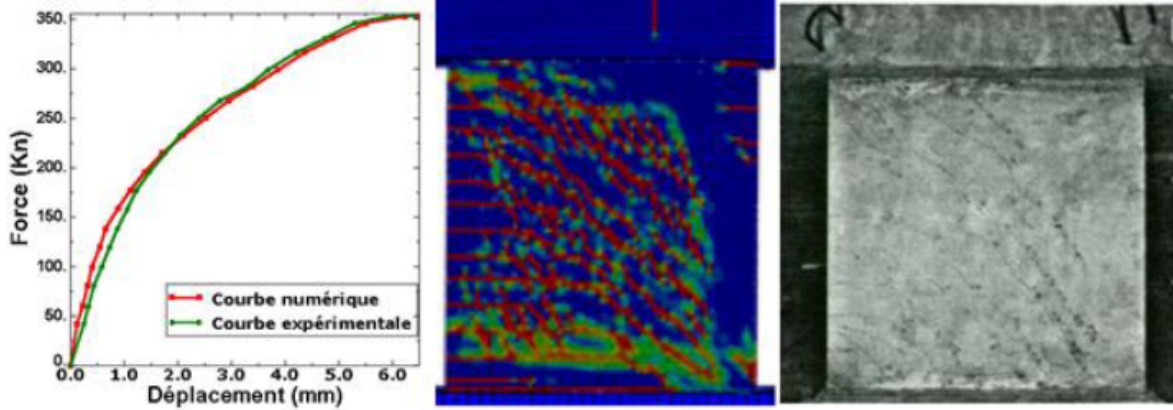


Figure III.22: Comparaison entre le modèle numérique et l'expérimental, courbe force-déplacement

La figure met en évidence qu'il y a une très bonne corrélation entre le résultat expérimental et le résultat numérique.

III .1.3.3. Résultats :

a)-*Dommage en traction :*

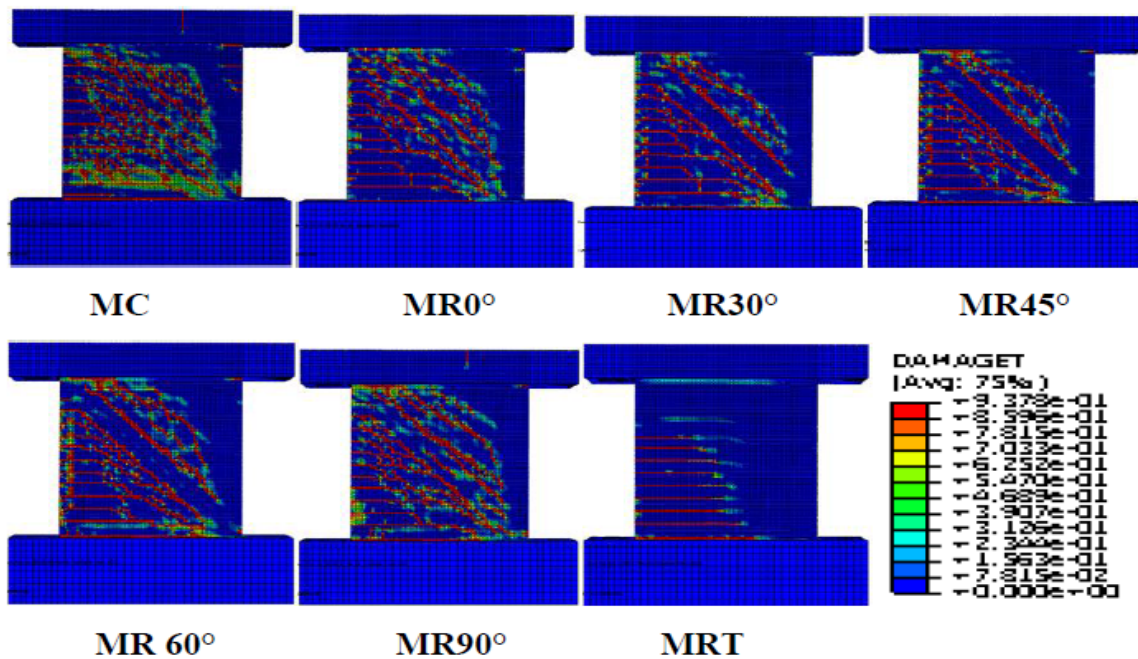


Figure III.23 : Dommage en traction.

b)-dommage en compression :

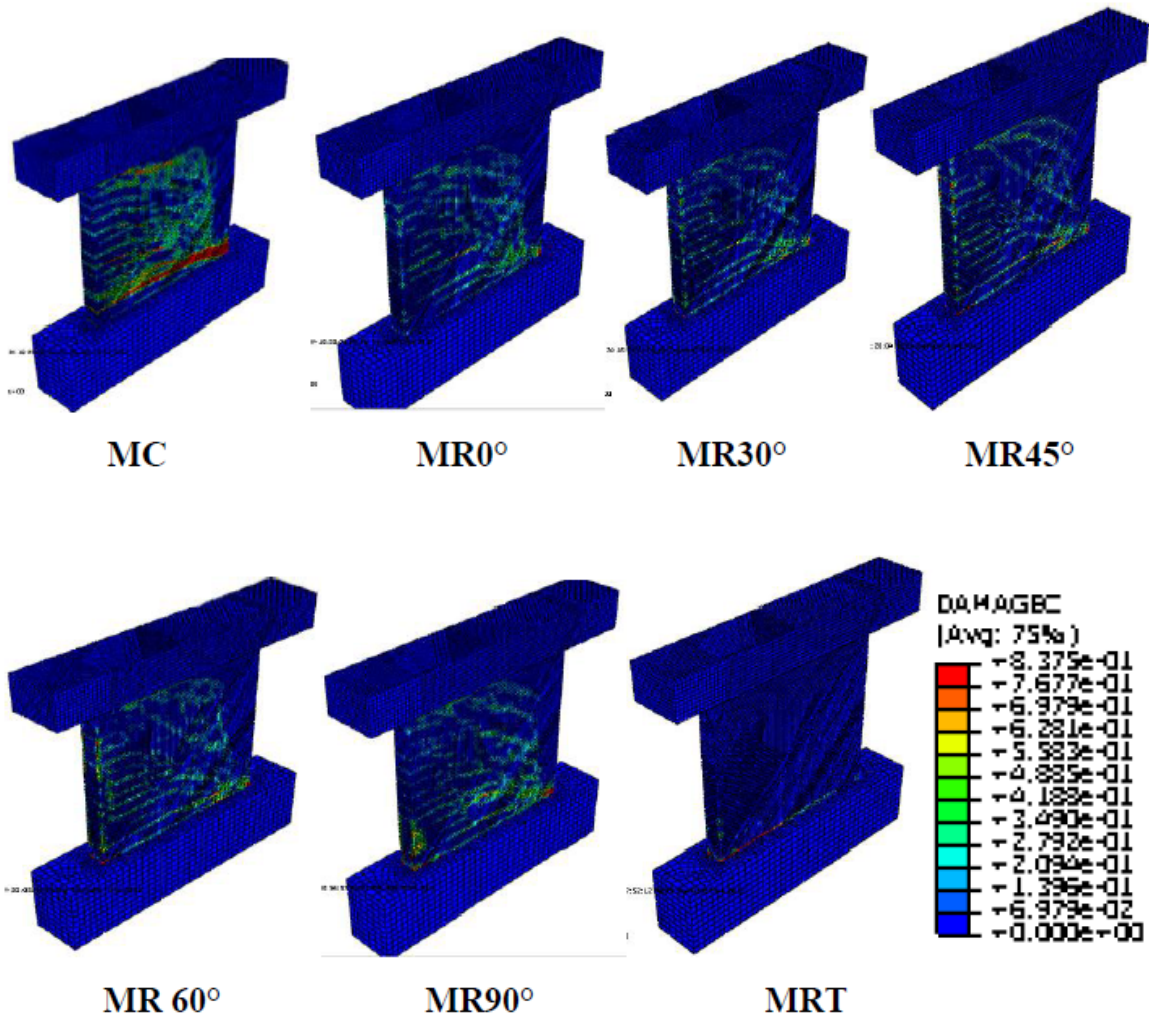


Figure III. 24 : Dommage en compression

c)-Courbe force-déplacement :

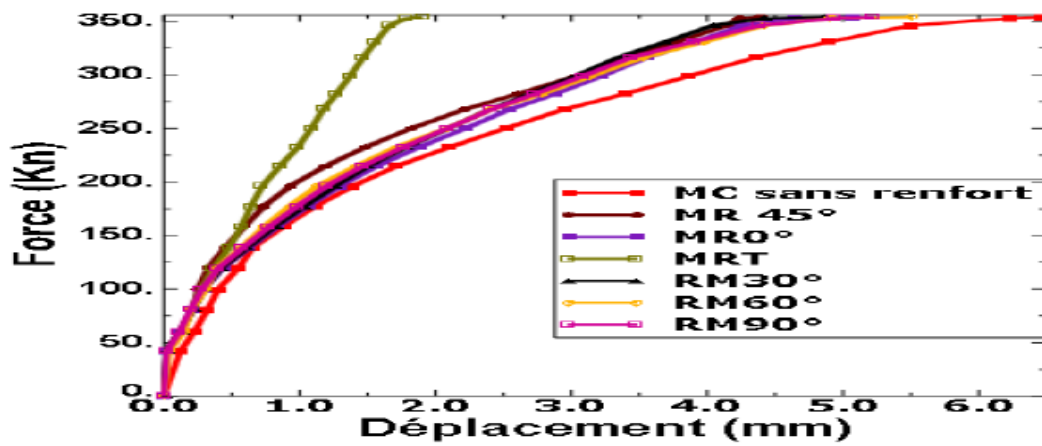


Figure III. 25 : Courbe force-déplacement.

III .1.3.4..Conclusion :

L'utilisation du renfort par composite s'avère alors efficace sur bien des aspects (endommagement, charge-déplacement...). L'évaluation des dommages ont également permis de mettre en évidence l'intéressante contribution du composite au-delà d'un certain chargement critique causant une fissuration importante de la structure. A partir de ce chargement critique et à l'échelle de l'élément, le composite contrôle l'endommagement de la structure et modifie les mécanismes de fissuration en assurant une redistribution des efforts dans les éléments. Le résultat global pour le voile court est une augmentation de la capacité de déplacement, la réduction des dommages d'une manière très significative.

La comparaison des cinq modèles dont l'orientation des fibres de carbone est différente montre que 45° est l'angle le plus performant pour faire travailler le composite d'une manière optimale. Ceci implique que 45° est la direction la plus proche des contraintes principales développées dans le cas d'un élancement égal à 1.

Le collage du composite sur toute la surface du voile a donné un résultat trop satisfaisant, mais ce choix n'est pas économique, d'où l'utilisation du principe d'optimisation topologique est nécessaire pour bien localiser les zones de renforcement.

Cependant, il faut rester objectif quant à l'application des composite dans les éléments de béton armé car ces derniers peuvent créer des ruptures prématurées des éléments, d'où la nécessité d'approfondir les recherche dans les deux aspects (numérique et expérimentale) concernant le collage externe des composite.

PARTIE 2 :

NOUVELLES DISPOSITIONS DE FERRAILLAGE.

III.2.INTRODUCTION :

D'autre travaux de recherche se sont orienter sur vers la confection de nouvelles techniques de ferrailage afin de remédier aux multiples défauts et défautsités que peut présenter un ferrailage classique lors d'un éventuel séisme.

III.2.1. Conception d'un ferrailage de voiles courts, soumis à un effort sismique prépondérant : simulation numérique: [27]

Une simulation numérique a été conduite par l'équipe de recherche [27], afin de d'élaborer une nouvelle technique de ferrailage qui consiste en l'incorporation de l'armature suivant les diagonales.

III.2.1.1 Présentation des voiles simulés :

Le voile (MC : modèle classique) est caractérisé par un ferrailage classique suivant le règlement parasismique algériens. Le voile (MR4 : modèle renforcé à 4barres) ayant un ferrailage conformément au premier modèle (MC) avec incorporation d'un renfort de quatre barres suivant les bielles magistrales de compression et de traction, inclinées d'un angle de 45° par rapport à l'horizontale. Le voile MR8, similaire à MR4 mais renforcé à 8 barres. Il sont soumis au même chargement dynamique (de type choc) qui croit linéairement avec le temps pendant une durée d'une seconde.

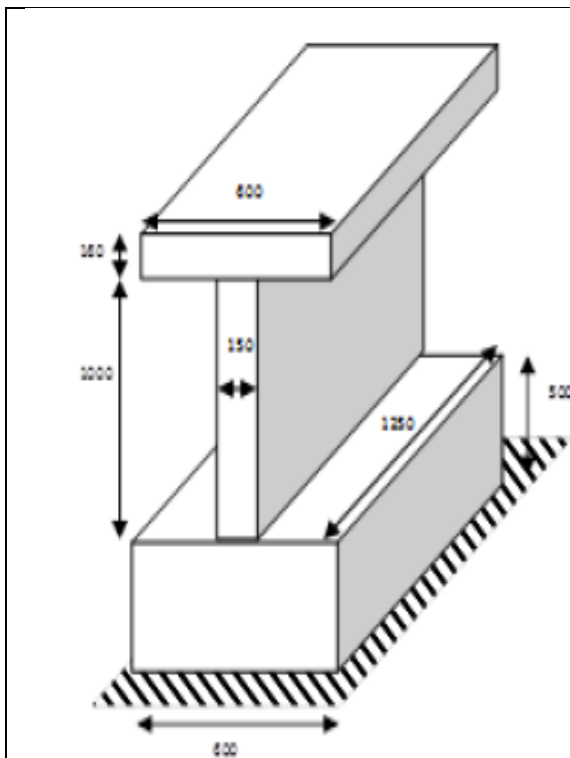
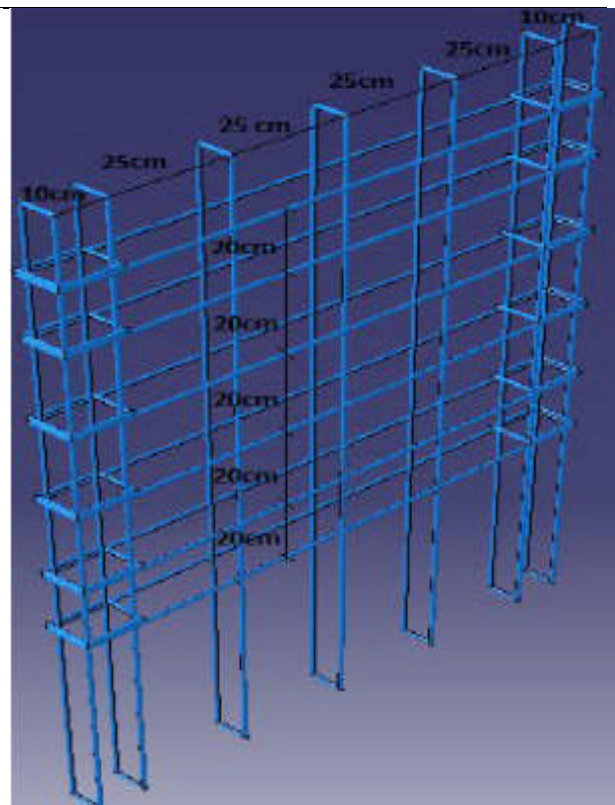
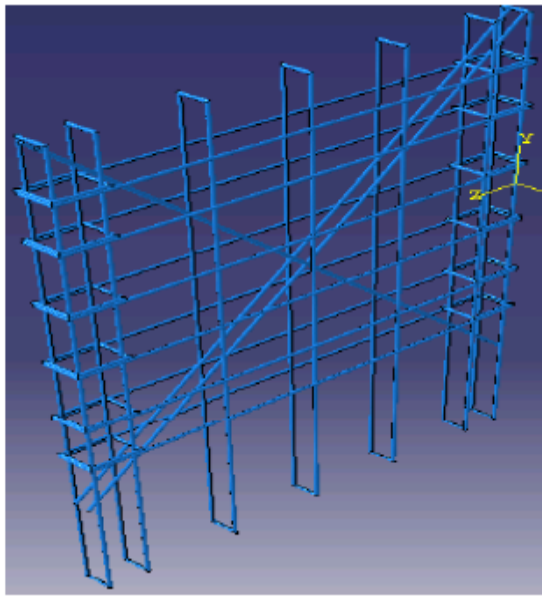


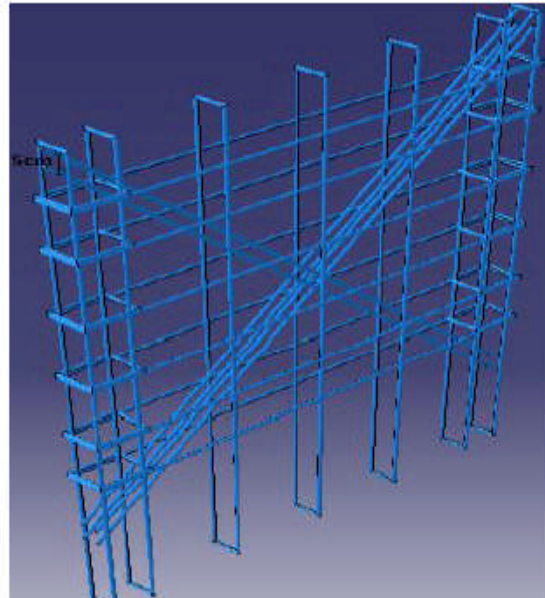
Figure (III.26) : Dimension et géométrie des trois modèles.



Figure(III.27) : Ferrailage du voile (MC)



Figure(III.28) : Ferrailage du voile (MR4)



Figure(III.29) : Ferrailage du voile (MR8)

III.2.1.2. Résultats :

III.2.1.2. 1.Comparaison globale des résultats :

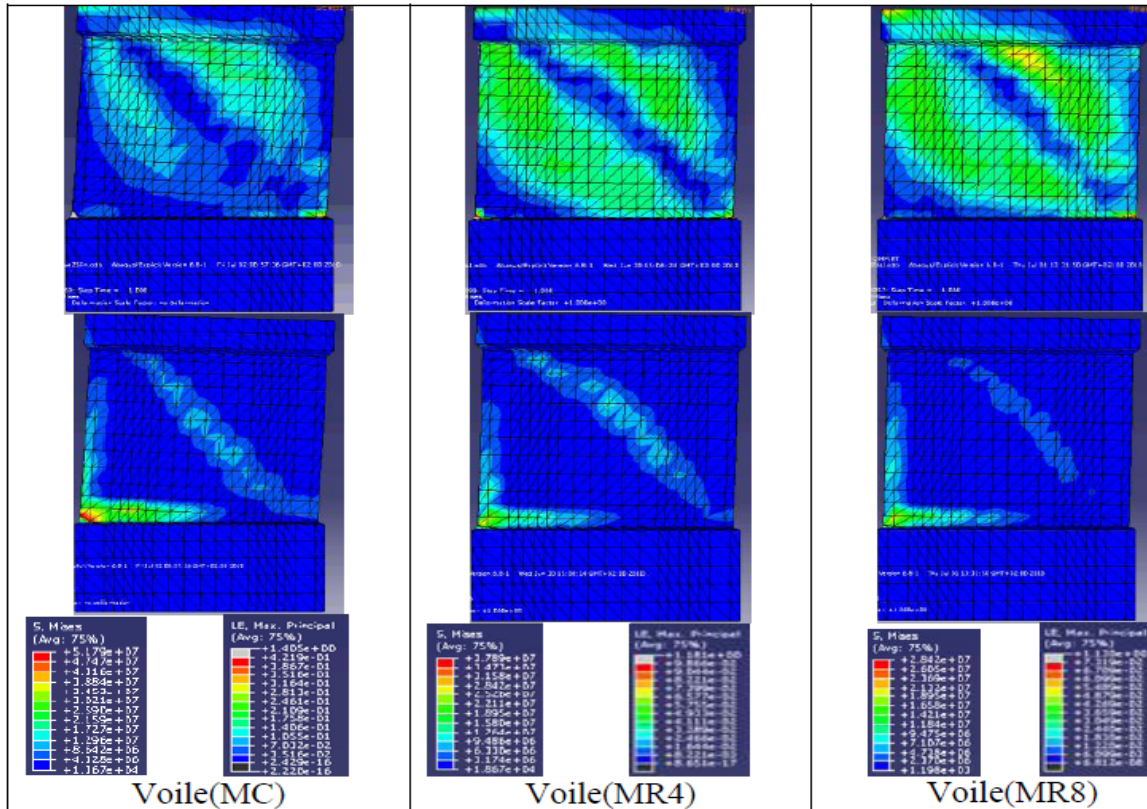
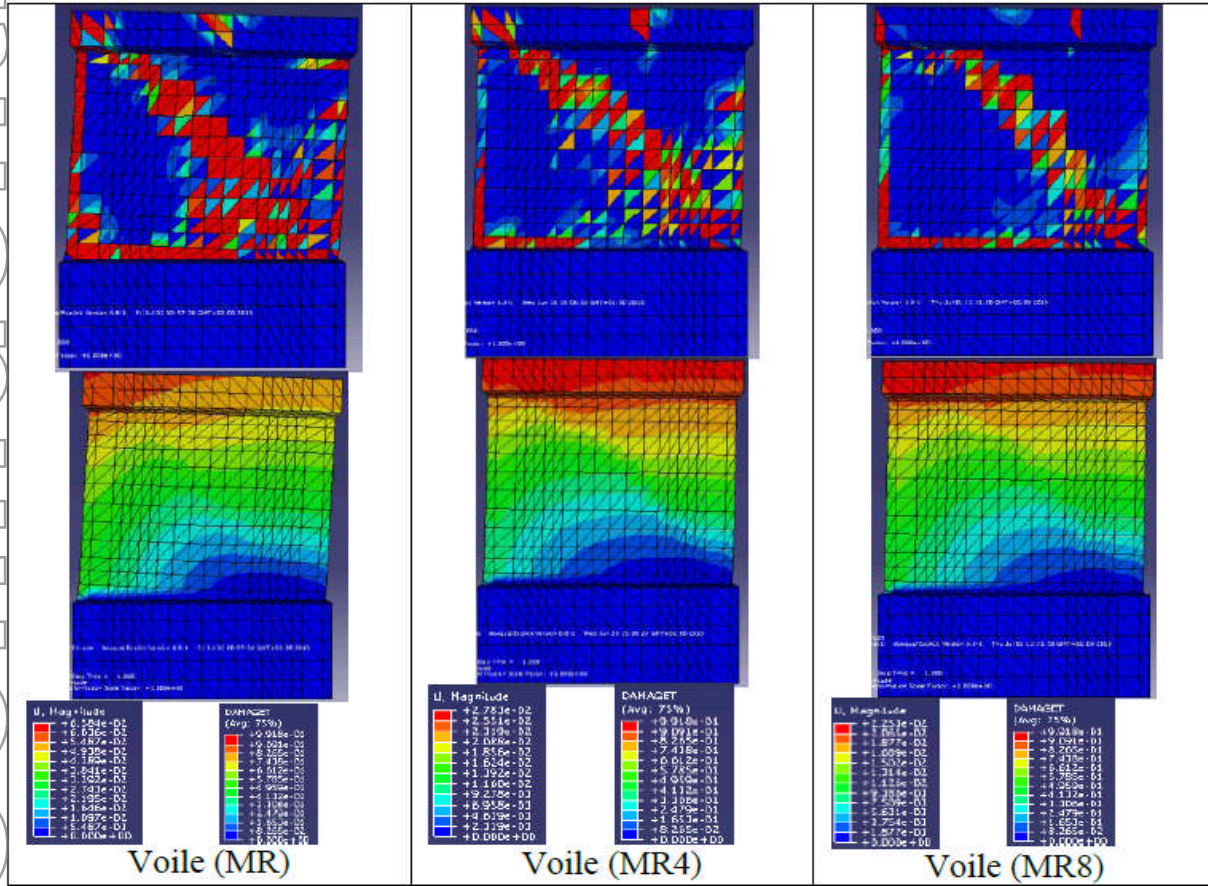
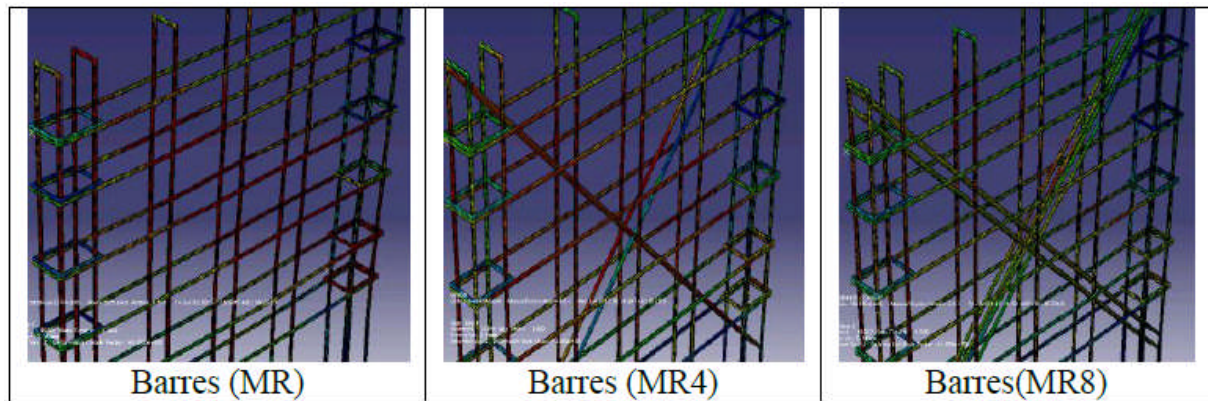


Figure (III.30): Comparaison des : contraintes et déformations respectivement.



Figure(III.31) : Comparaison : des dommages et des déplacements



Figure(III.32) : Comparaison des contraintes dans les aciers.

III.2.1.2. 2. Comparaison locale des résultats :

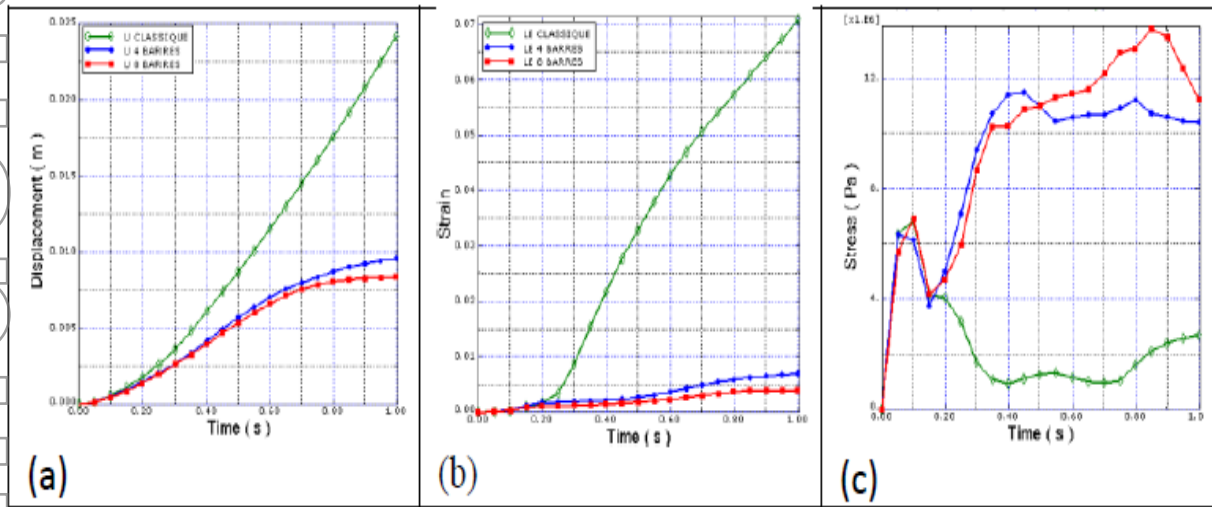


Figure III.33: Courbes de comparaison en fonction du temps des : (a) déplacements, (b) déformation et (c) contraintes.

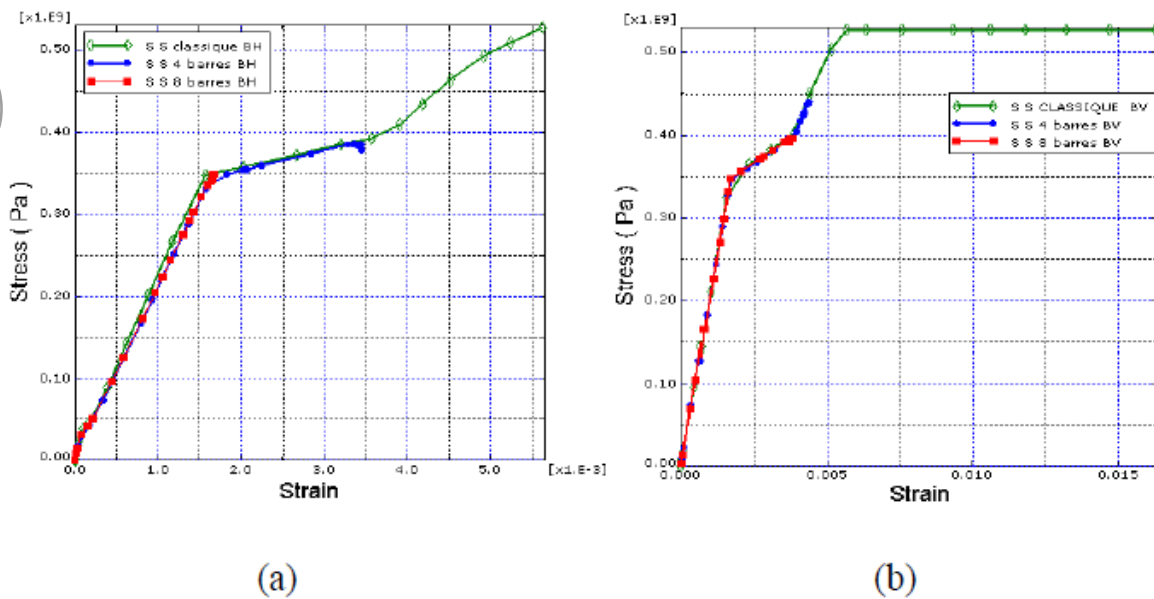


Figure III.34 : Courbe contraintes déformation dans les barres : (a) horizontales, (b) verticales.

III.2.1.3. Conclusion :

Cette étude a permis, de comparer et de mettre en évidence l'apport de cette technique de ferrailage par rapport au ferrailage classique : en termes de déplacement, une réduction du déplacement maximal de 57.75% pour le voile (MR4), et de 65.80 % pour le modèle (MR8). En termes de contraintes, une réduction de la contrainte de 30% pour le voile (MR4), et de 43% pour le voile (MR8). En termes de dommage, cette technique à permet de les réduire considérablement. Cette étude montre aussi qu'à partir d'un un certain seuil de

contraintes (reste à définir) les efforts sont véhiculés suivant les bielles diagonales, ainsi que le nombre et le diamètre de barres placé suivant les diagonales de compression et de traction influent sur le comportement du voile.

III .2.2. Nouvelle technique de ferrailage des voiles courts : [28]

Une simulation numérique à été réaliser par l'équipe de recherche [28] d'un voile, un modèle ferrillé conventionnellement (MC : Model Classique) et cinq (05) autres modèles avec un ferrailage diagonal (MD : Modèle Diagonal) dont l'angle d'inclinaison α varie de 30° à 50° .

III .2.2.1. Présentation des modèles :

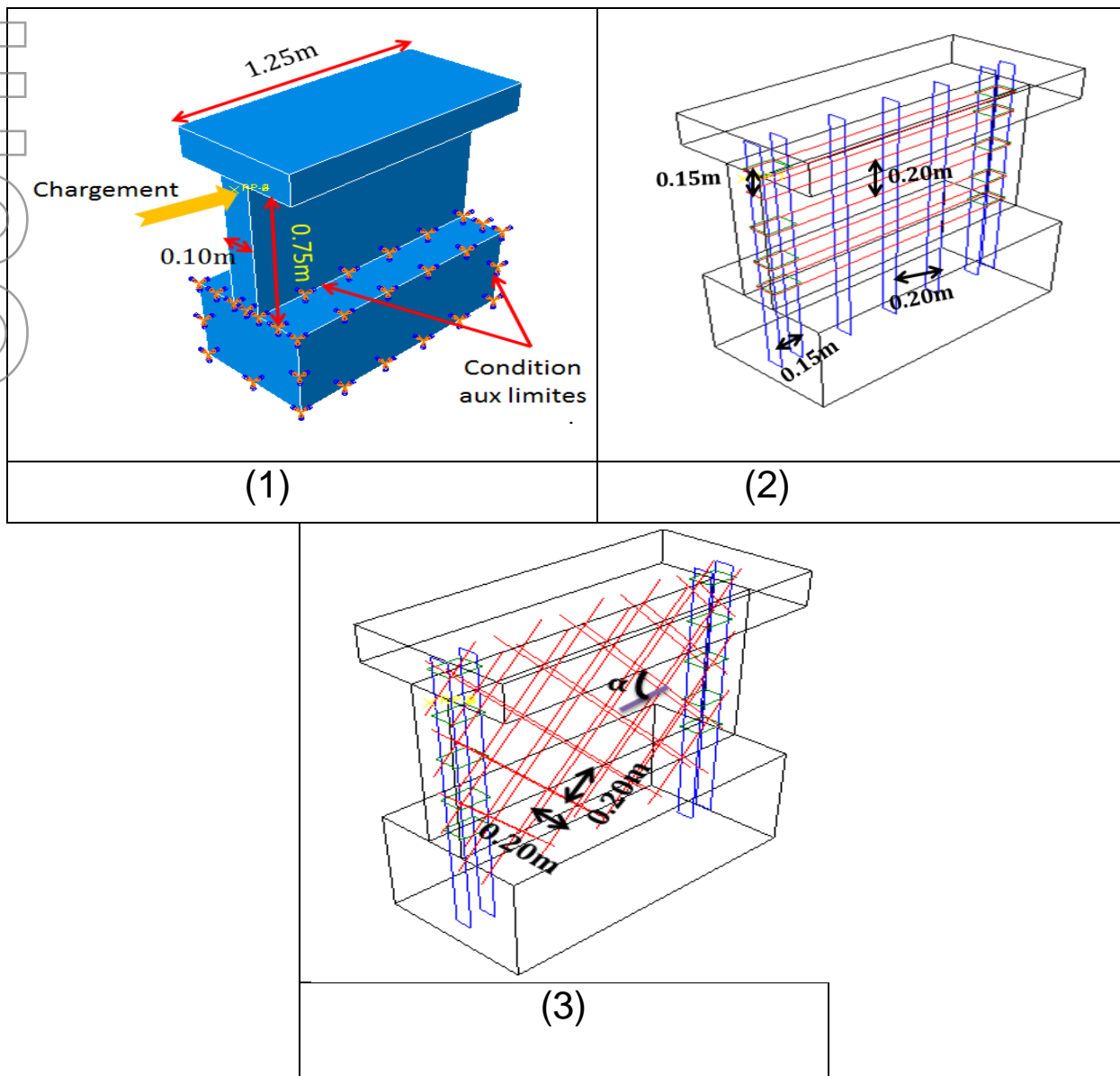


Figure III.35 : (1) dimension et géométrie, (2) ferrailage du model classique (CM), (3) ferrillages des modèles proposés (α varie entre 30° et 50° avec un pas de 5°).

III .2.2.2. Les résultats :

1)-Résultats en termes de déplacement global :

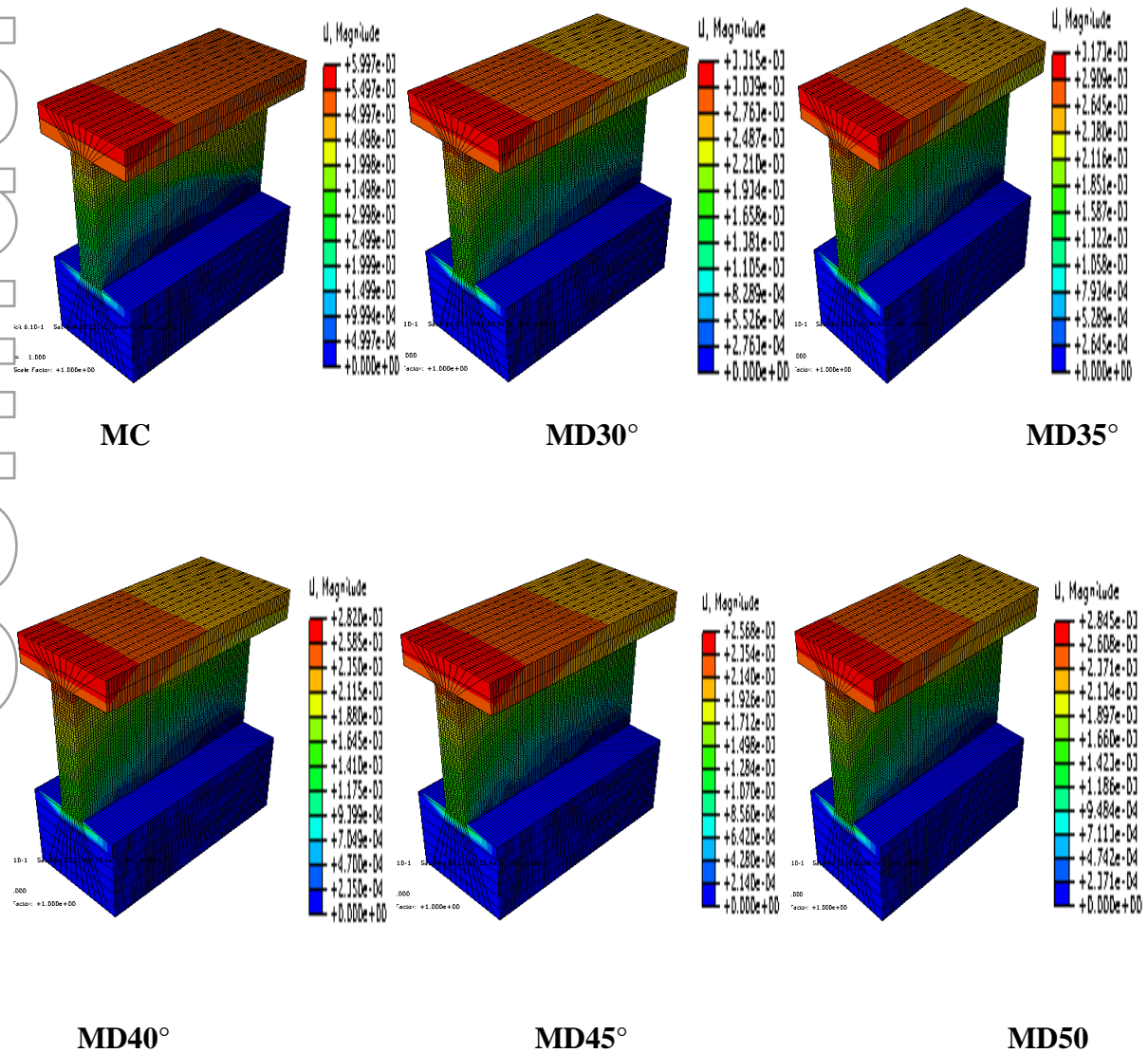
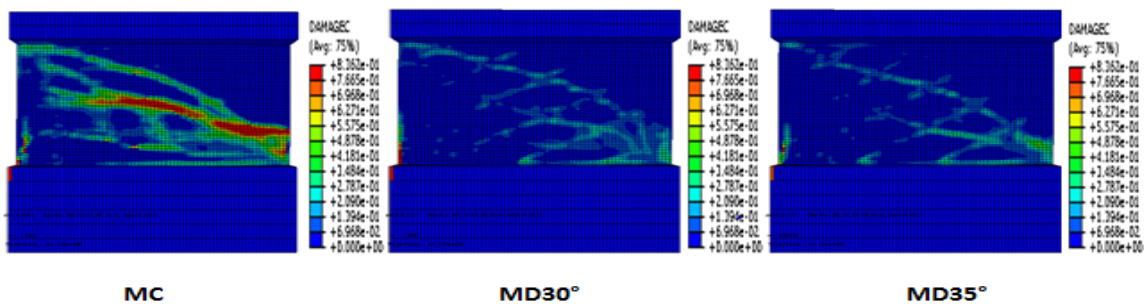


Figure III. 36 : Résultats en termes de déplacement global.

2)-Résultats en termes de dommage :

-en compression :



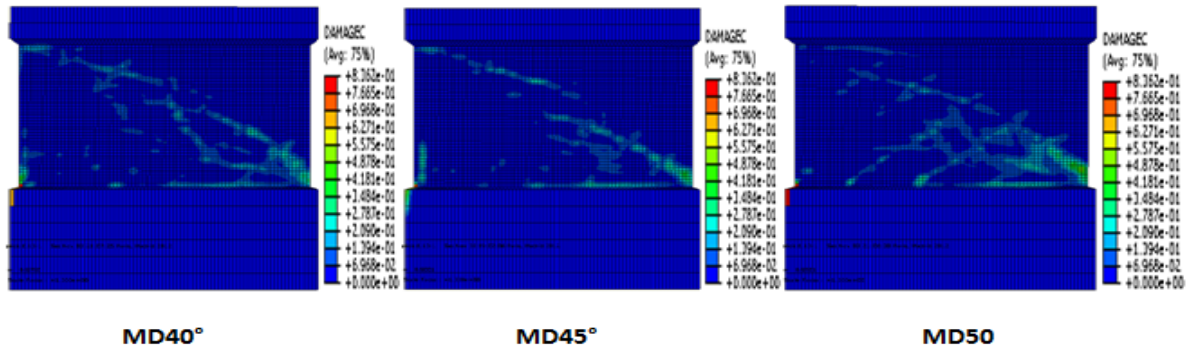


Figure III.37 : Résultats en termes de dommage compression.

-en traction :

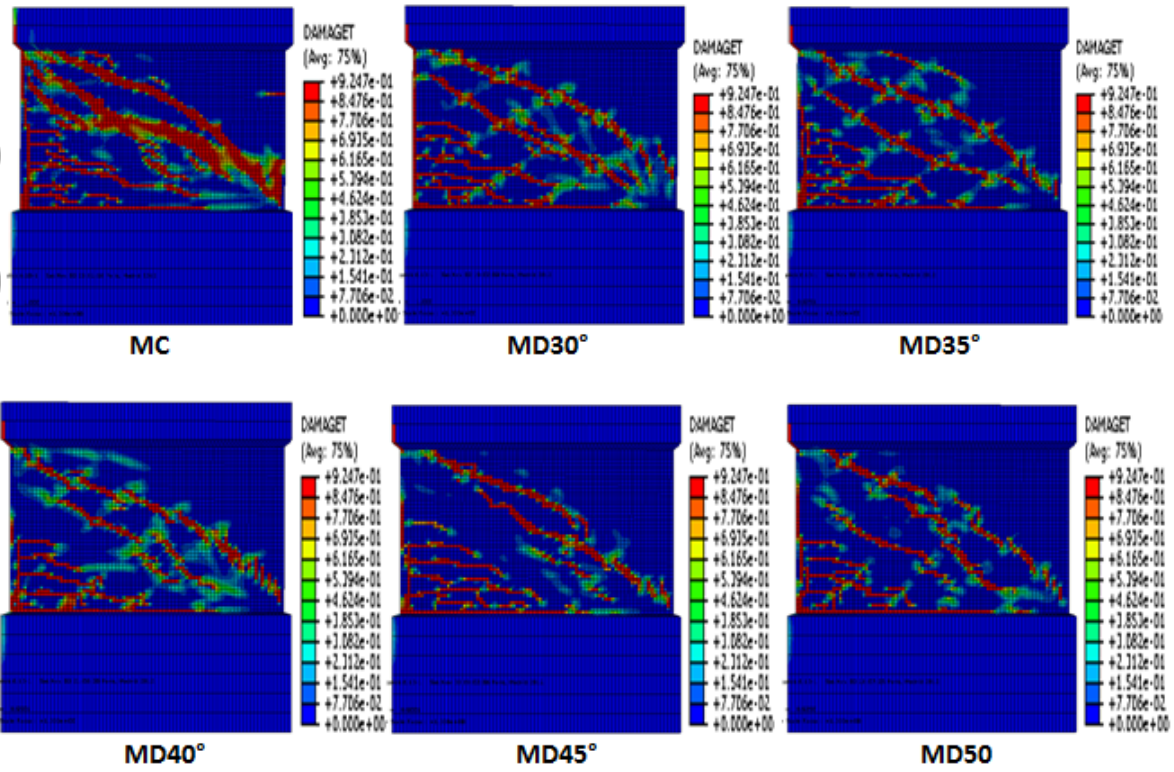


Figure III.38 : Résultats en termes de dommage Traction.

3)-Résultats en termes courbe charge-déplacement :

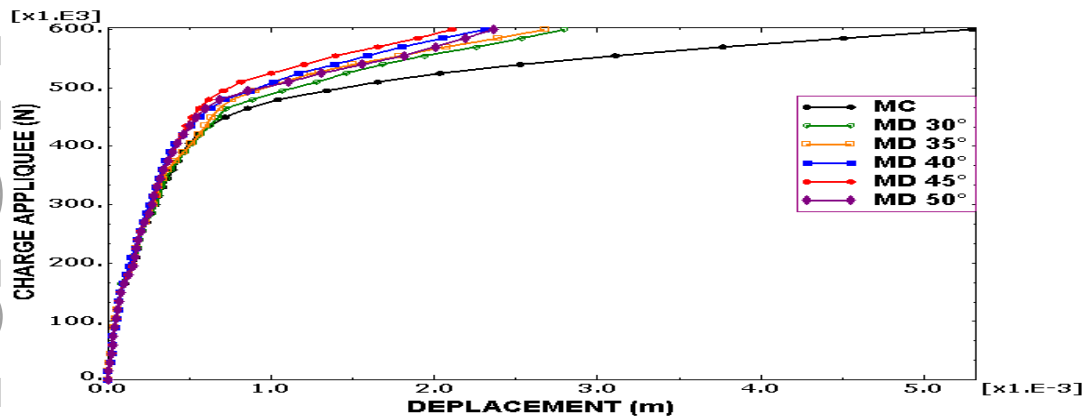


Figure III.39 : Résultats en termes courbe charge-déplacement.

III .2.2.3. Conclusion :

Pour une même quantité d'armatures, Les résultats de cette simulation montrent que : le ferrailage diagonal est efficace pour transmettre d'une manière directe les efforts de cisaillement à la fondation du voile, ainsi que, les efforts de cisaillement porter par le bielles de compression sont réduits en présence du ferrailage diagonales.

La comparaison des cinq modèles sous ferrailage diagonal montre que 45° est l'angle le plus performant pour transmettre les efforts de cisaillement plus directement à la fondation. Ceci implique que 45° est la direction la plus proche des contraintes principales développées. Il convient de noter que 45° est l'angle le plus performant, seulement dans le cas de notre géométrie où le rapport hauteur-largeur (élancement) égale à 0.6.

III.3.CONCLUSION :

Les modes de défaillance qu'on rencontre dans un voile court en béton armé sont soit un glissement à la liaison avec la fondation, soit une fissure diagonale de cisaillement dans le plan du mur. Plusieurs travaux de recherche ont été fait afin de réduire ou même d'éliminer ce défaut que présente ces voiles.

Dans la première partie de ce chapitre, on a exposé les travaux portés vers la quête d'un renforcement optimal.

Dans la deuxième partie, on s'est intéressé aux études orientées vers l'élaboration de nouvelles dispositions de ferrailage.

Avant de penser a renforcé un élément, une bonne conception est indispensable pour son bon fonctionnement et économiquement plus avantageuse. Notre travail aura pour objectif la recherche d'une meilleure disposition de ferrailage et une comparaison entre les différents modèles proposés

IV.1.INTRODUCTION :

Notre travail consiste a simuler sept modèles de voile courts sur ABAQUS, ayant les mêmes dimensions,des ferrailages différents et soumis au même chargement

IV.1.1.DIMENSIONS ET GEOMETRIE :

Les sept voiles ont le même élancement ($h/l=0.8$). L'âme du voile fait 1000mm de hauteur avec une largeur de 1250mm et une épaisseur de 150mm. Une semelle de section $(1250 \times 600) \text{mm}^2$ avec une épaisseur de 500 mm, considérée parfaitement encastree. A l'entête de l'âme se trouve une masse de volume $(600 \times 1250 \times 160) \text{mm}^3$, qu'on assimile à la masse d'un plancher pour rendre l'étude plus réaliste.

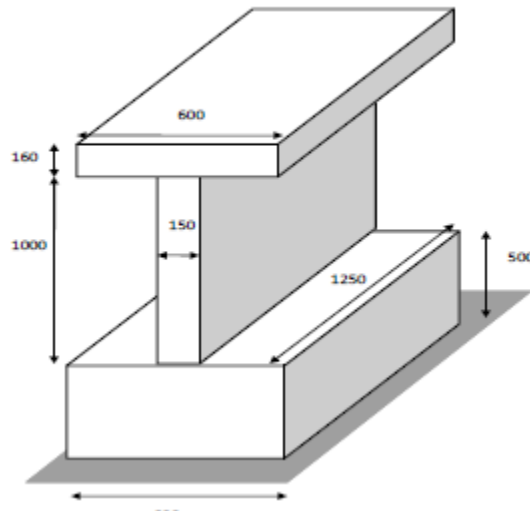


Figure IV.1: dimensions et géométrie des voiles.

IV.1.2 : CHARGEMENT :

Les sept voiles sont soumis au même chargement statique, d'une intensité induite par la contrainte de cisaillement défini par les règlements (RPA99 , BAEL91), cette contrainte est multipliée par la section transversale pour obtenir une force concentrée.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_u \leq 0.2 f_{c28} \\ \tau_u = \text{Min} (0,2 f_{c_j} / \gamma_b : 5 \text{MPa}) \\ \tau_u = 0.2 \times 25 \text{MPa} = 5 \text{MPa} \end{array} \right. \rightarrow F = 5 \times (1250 \times 150) = 937500 \text{ N.}$$

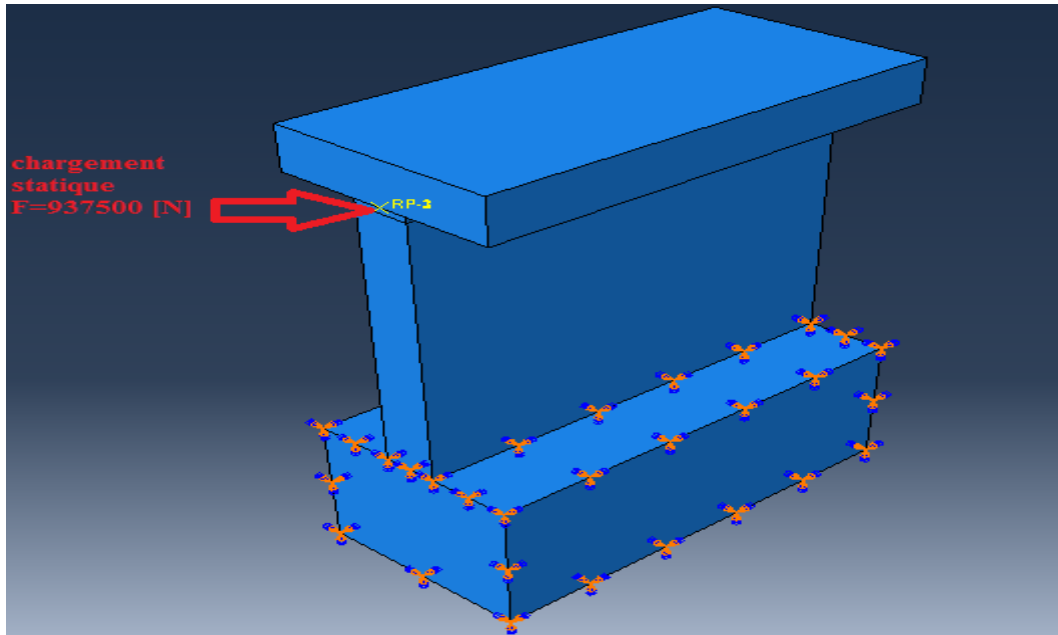


Figure IV.2 : Chargement et conditions aux limites.

IV.1.3. Ferrailage des modèles :

IV.1.3 .1.Premier modèle, classique (MC):

Ce premier modèle est ferrillé classiquement selon les codes parasismiques Algérien comme suit :

- ▣ 14 barres verticales en T10 réparties en deux nappes, dont le pourcentage est supérieur à 0.15% dans toute la section transversale du béton, avec un potelet à chaque extrémité.
- ▣ 12 barres horizontales en T10 réparties en deux nappes avec un espacement qui varie entre 20 cm en zone courante et 15 cm aux extrémités
- ▣ 6 cadres en T10 réparties sur toute la hauteur du chaque potelet avec un espacement qui varie entre 20 cm en zone courante et 15cm aux extrémités.

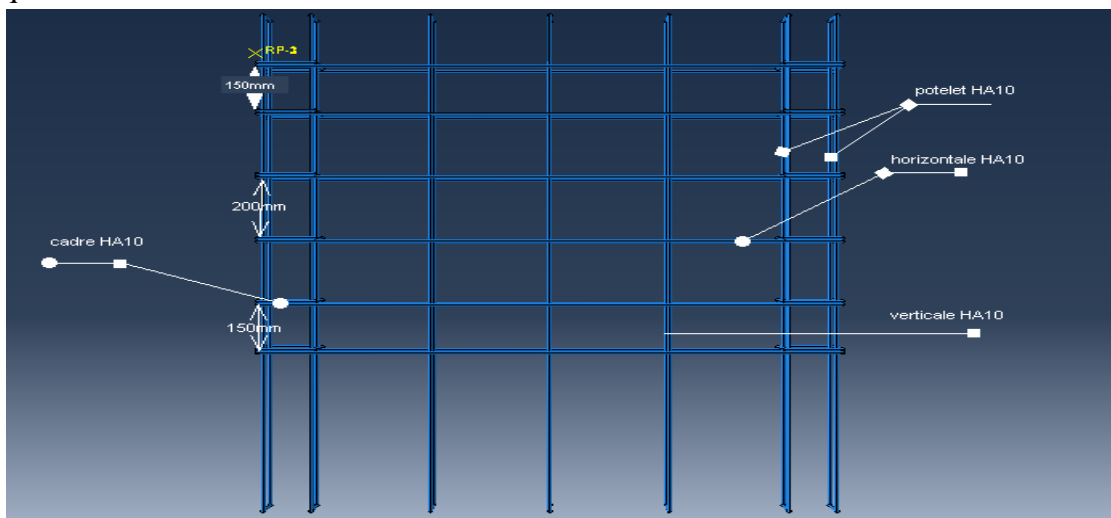


Figure IV.3 : Ferrailage du modèle MC

IV.1.3 .2. Deuxième modèle (MP-HA12):

Même ferrailage que le modèle MC, mais en augmentant la section des potelets ,au lieu des barres en HA10,on opte pour des HA12.

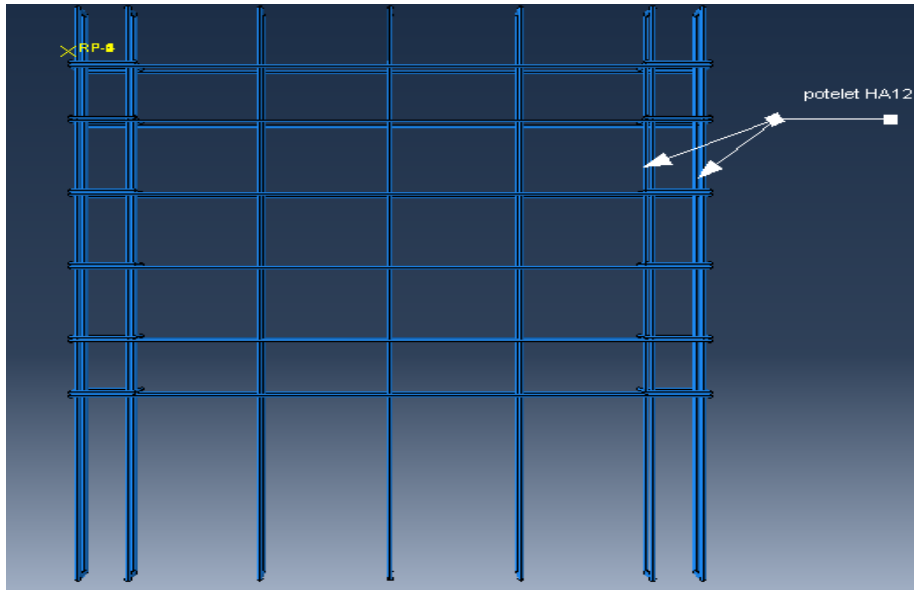


Figure IV.4 : Ferrailage du modèle MP-HA12

IV.1.3 .3. Troisième modèle (MP-HA14):

Même ferrailage que le modèle MC, mais en augmentant la section des potelets ,au lieu des barres en HA10,on opte pour des HA14.

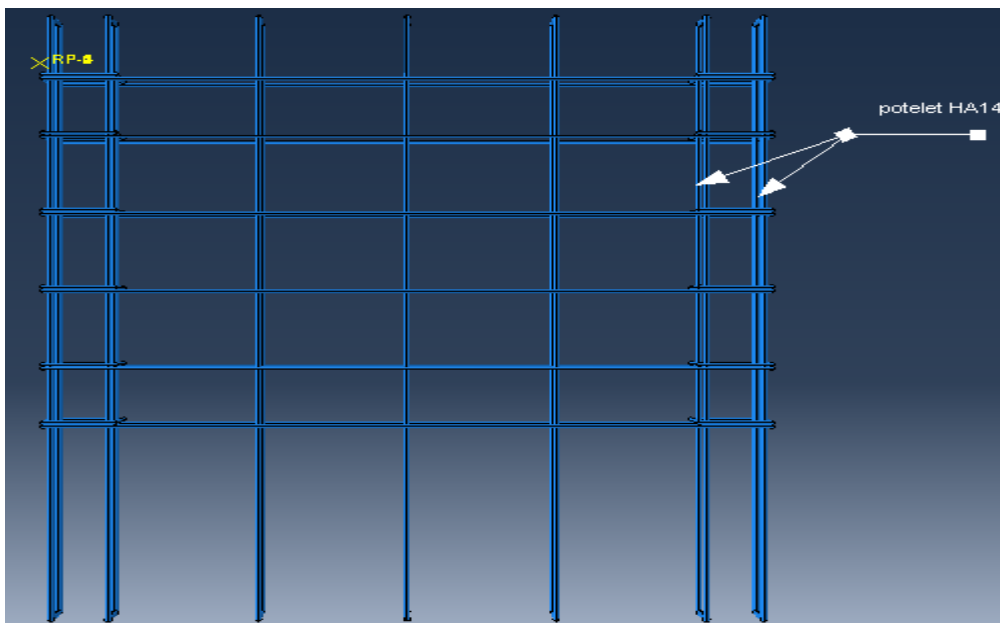


Figure IV.5: Ferrailage du modèle MP-HA14.

IV.1.3 .4.Quatrième modèle (MD4):

Ce modèle est ferrailé identiquement comme le MC , en ajoutant quatre barres en HA10 croisées en diagonale (en X), inclinées par rapport à la base du voile d'un angle de 45° .Elles sont disposées de l'intérieur .

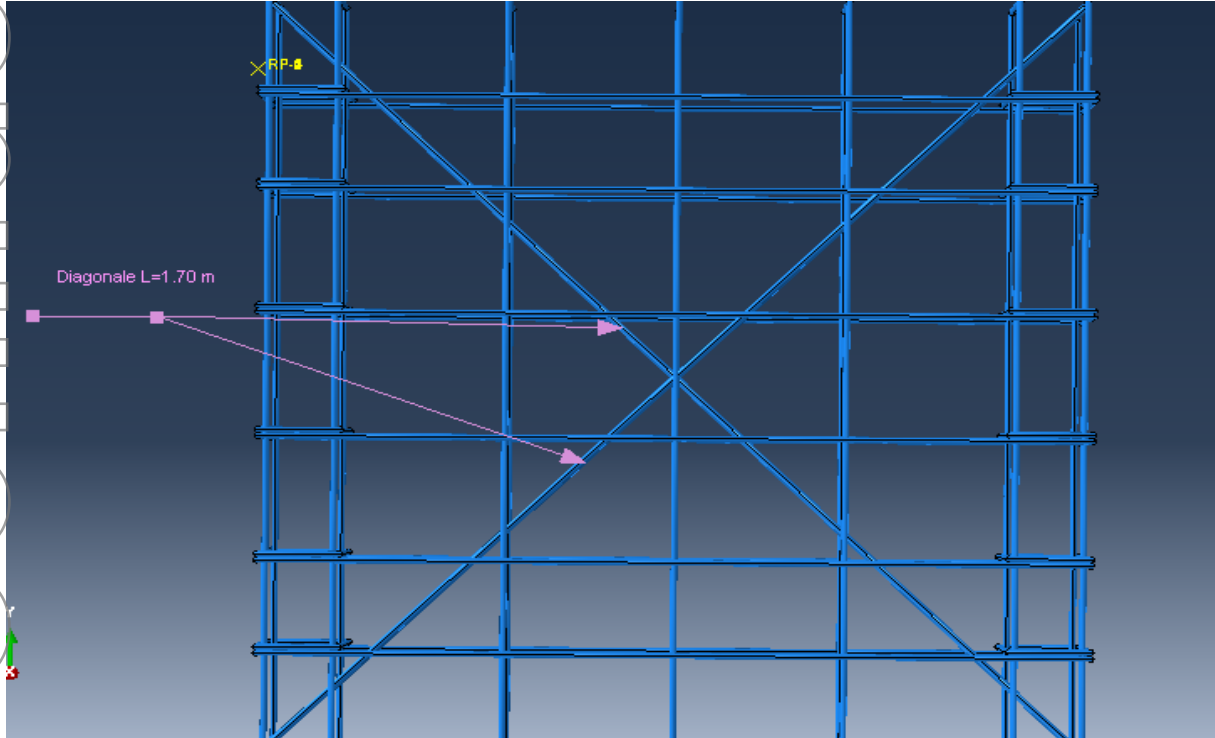


Figure IV.6 : Ferrailage du modèle MD4.

IV.1.3 .5.Cinquième modèle (MD8):

Ce modèle est ferrailé identiquement au MC, en ajoutant huit barres en HA10 croisées en diagonale (en X), inclinées par rapport à la base du voile d'un angle de 48° , disposées à l'intérieur du voile.

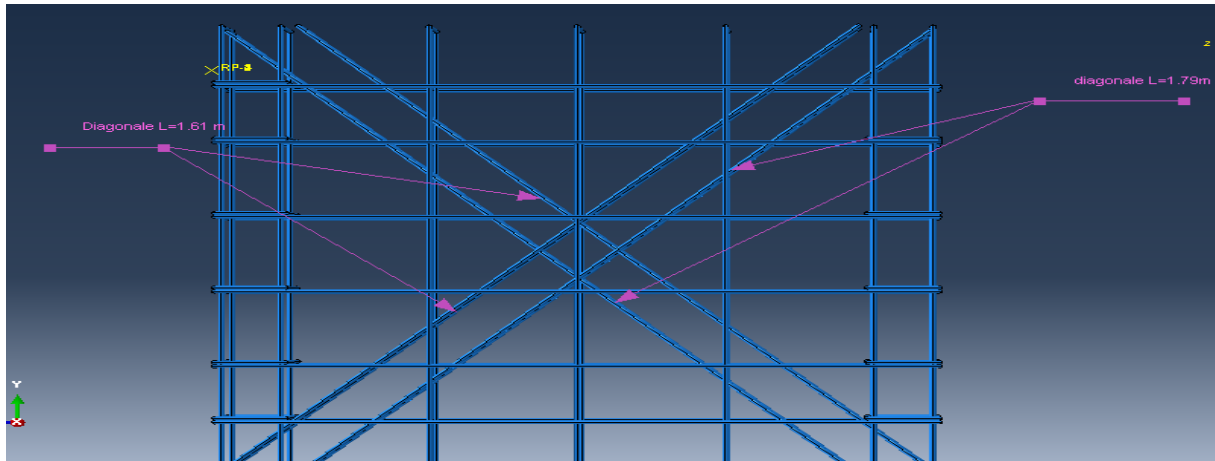


Figure IV.7: Ferrailage du voile MD8.

IV.1.3 .6. Sixième modèle (MD-E):

Ce modèle est ferrillé identiquement comme le MD4 avec ajout d'épingles autour des barres diagonales.

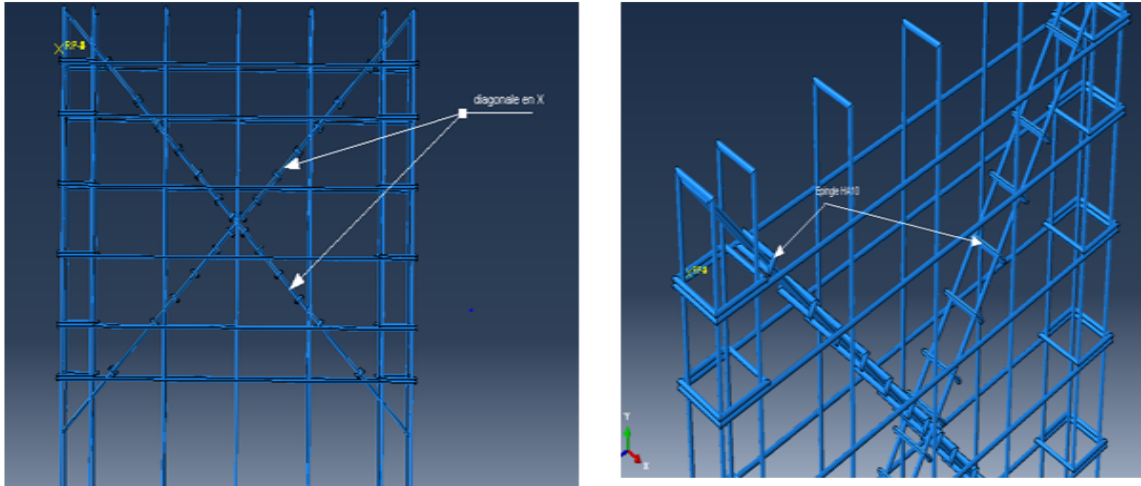


Figure IV.8 :Ferrillage du modèle MD-E.

IV.1.3 .7. Septième modèle (MD-C):

Ce modèle est ferrillé identiquement au modèle MD8 avec ajout des cadres autour des barres diagonales.

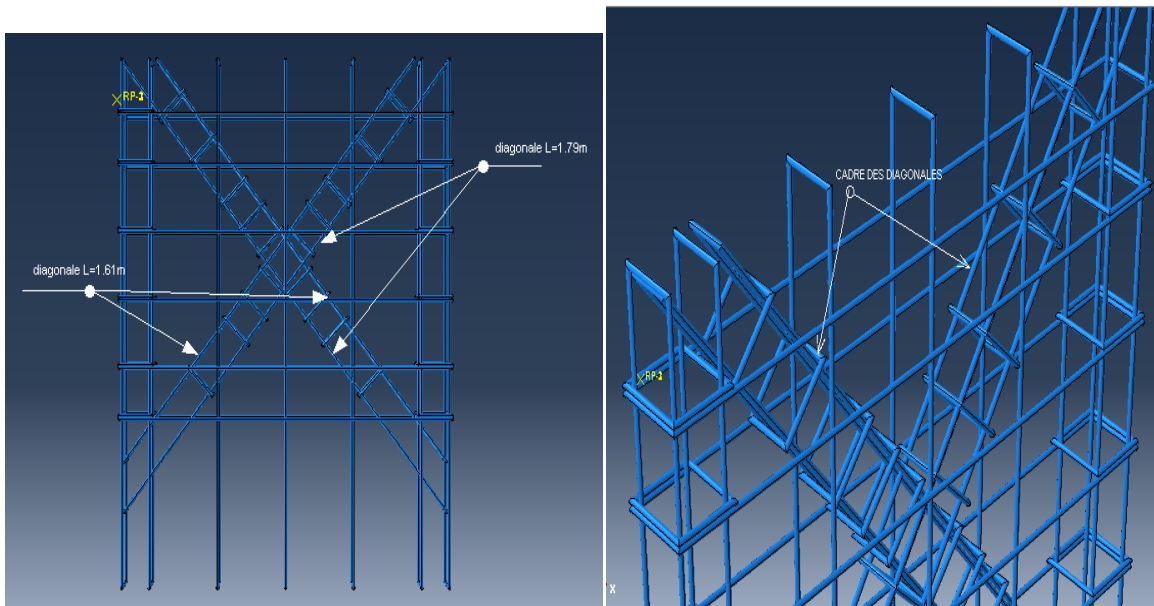


figure IV.9 : Ferrillage du modèle MD-C.

IV.2. INTRODUCTION :

La recherche est en plein essor et de jour en jour de nouveaux paramètres émergent en surface et laissent place à des idées innovantes. Pour pouvoir mettre en études toutes ces nouvelles idées, des moyens de plus en plus sophistiqués doivent être disponibles.

Les essais en laboratoire sont dispendieux et prennent beaucoup temps, la simulation numérique est la pour éviter ceci et amener un apport inestimable en matière de productivité de rendement ainsi qu'en performance.

Le numérique est utilisé pour étudier et résoudre des problèmes structurels, thermiques, électroniques avec des aspects linéaires et non linéaires.

La simulation virtuelle est basée sur la méthode des éléments finis et son problème major demeure dans la difficulté de reproduire et de créer un modèle qui s'apparente de ce qui existe sur le terrain.

Les logiciels de conceptions et de calculs assistés par ordinateur sont très nombreux sur le marché. Les plus utilisés sont Nastran, Catia, ABAQUS et SolidWorks. Tous ces logiciels effectuent les mêmes tâches, c'est à dire qu'ils génèrent des structures, ses caractéristiques et celles du problème étudié, ensuite ils calculent le devenir de cette structure (déformations, ruptures, plastification...) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir avec des données utilisables et exploitables.

Dans notre travail, on a réalisé une simulation numérique à l'aide du logiciel ABAQUS 6.10.

Dans ce qui suit, on présentera ce logiciel, ses différents modules et conjointement les étapes suivies dans l'élaboration de nos modèles.

IV.2.1. PRESENTATION DU LOGICIEL ABAQUS :

ABAQUS a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS), en 1978, au début de la théorie des éléments finis .Il a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie , et il est ensuite racheté par l'entreprise Dassault industries en Octobre de l'année 2005.

ABAQUS est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires.

Le cœur du logiciel ABAQUS est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données (caractérisé par le fichier.inp), qui décrit l'ensemble du

problème, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier .odb.

Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier .odb (ou post traitement).

La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc.... Il faut savoir que le pré traitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. ABAQUS propose le module ABAQUS CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation.

Le logiciel Abaqus travaille sans unités, il est donc préférable de les définir avant et de s'en tenir tout au long du calcul.

Quantity	SI	SI(mm)	SI	US Unit(ft)
Length	<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>	<i>ft</i>
Force	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>kN</i>	<i>lbf</i>
Mass	<i>kg</i>	<i>tonne (10³kg)</i>	<i>tonne</i>	<i>slug</i>
Time	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>
Stress	<i>Pa (N/m²)</i>	<i>MPa (N/mm²)</i>	<i>kPa</i>	<i>lbf / ft²</i>
Energy	<i>J</i>	<i>mJ (10⁻³J)</i>	<i>KJ</i>	<i>ftlbf</i>
Density	<i>kg/m³</i>	<i>tonne/mm³</i>	<i>tonne/m³</i>	<i>slug/ft³</i>

Tableau IV.1 :Tableau des unités .

ABAQUS se divise en trois grands codes :

- ABAQUS /Standard .
- ABAQUS/Explicit.
- ABAQUS/cae.

IV.2.1.1. ABAQUS /Standard :

Ce code permet d'effectuer des études statiques, dynamiques, linéaires ou non linéaires.

Dans un calcul implicite, la méthode de Newton est généralement utilisé pour résoudre les problèmes non –linéaire, son but est d'obtenir une valeur approchée de l'équation $F(u)=0$, ce qui signifie que l'équilibre par rapport à la variable nodale est considéré.

L'équation $F(u)=0$ peut s'écrire sous la forme d'une série de Taylor :

$$F[u(i)] + (\partial F[u(i)] / \partial u(i)) * c(i+1) + (\partial^2 F[u(i)] / \partial u(i)^2) * c^2(i+1) + \dots = 0$$

$u(i)$ étant la solution approximative après i itérations sur l'incrément du temps et $c(i+1)$ la différence entre la solution exacte et $u(i)$.

Si $u(i)$ est proche de la solution exacte, $c(i+1)$ s'annule et l'équation ci-dessus devient :

$$(\partial F[u(i)]/\partial u(i)) * c(i + 1) = F [u(i)].$$

Cette méthode est lente et la matrice jacobienne $\partial F[u(i)]/\partial u(i)$ peut présenter des problèmes de singularité ce qui rend la dernière équation insoluble.

IV.2.1.2. ABAQUS /explicite :

Ce code effectue des analyses dynamiques et quasi-statiques moyennant de quelques précautions. L'algorithme explicite assure une certaine robustesse, il est plus efficace et conduit à des temps de calcul réduits comparés à l'algorithme implicite.

Le schéma d'intégration se fait par différence centrales exprimé par les deux équations ci-dessous :

$$du(i+1)/dt = du(i-1/2)/dt + [\Delta t(i+1) + \Delta t(i)/2] * d^2u(i)/dt^2;$$

$$u(i+1) = u(i) + [\Delta t(i+1) * du(i+1/2)/dt].$$

Cette méthode est rapide, mais instable si le pas de temps n'est pas suffisamment petit. Sinon, une petite différence sur les conditions initiales risque de se traduire par une grande différence sur la solution approchée.

Toutes ces méthodes (explicite et implicite) peuvent en fait s'exprimer de façon générale en fonction d'un paramètre θ (le paramètre d'implicite) qui désigne une méthode explicite ($\theta = 0$), Implicite ($\theta = 1$).

IV.2. 1.3. ABAQUS /CAE :

Environnement complet pour la création des modèles, le lancement d'une analyse et le traitement des résultats.

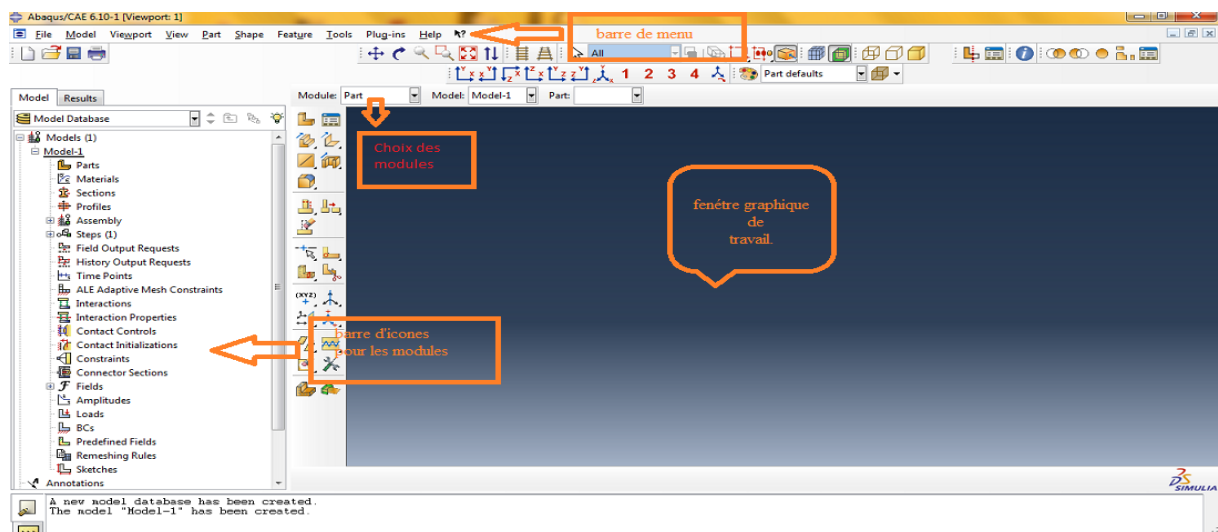


Figure IV.10 : L'interface ABAQUS /CAE.

ABAQUS n'est qu'un solveur (Standard, Explicit, etc.) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier « entrée » et dont il écrit la solution vers un fichier « de sortie ».

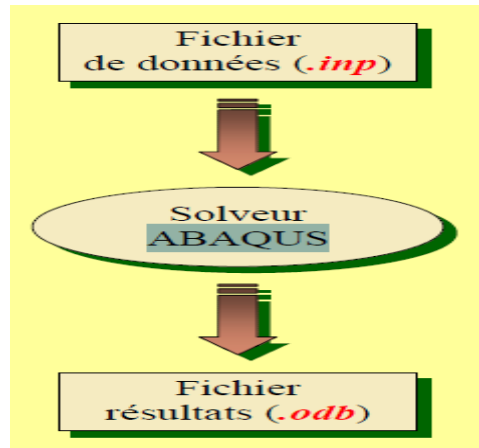


Figure IV.11: Fonctionnement du code ABAQUS.

Description des possibilités d'ABAQUS :

Comme on l'a déjà mentionné ABAQUS s'étend sur de nombreux domaines et a de multiples possibilités en ce qui concerne l'analyse, les éléments et la non linéarité.

- L'analyse :
ABAQUS effectue des analyses dans de diverses disciplines : Mécanique, thermique, électrique (piézo et thermique) , en statique et dynamique, linéaires et non linéaires
Dynamique des corps rigides: depuis version 6.1.
- Les éléments :
Un très large choix d'éléments (plus de 100) et la possibilité de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN sur ABAQUS/Standard).

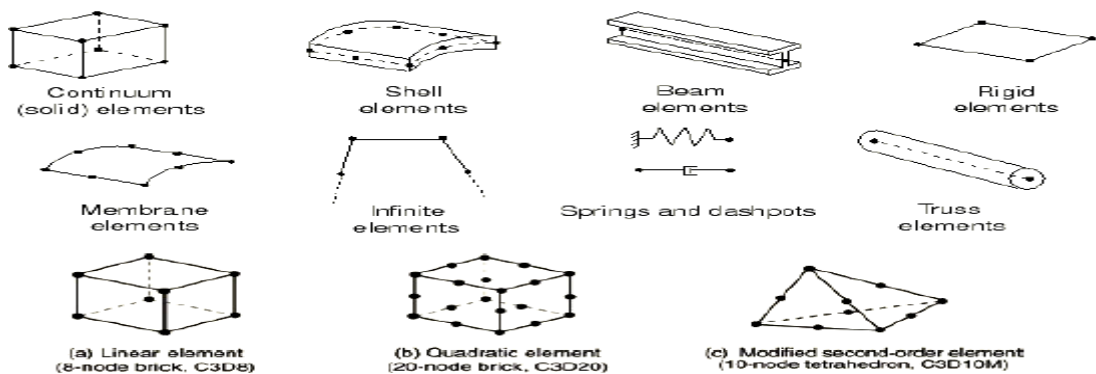


Figure (IV.12): Quelques éléments modélisés sur ABAQUS. [30]

- Les types de non linéarité :
 - **Non-linéarités matérielles :**
Hyper-élasticité, plasticité, viscoplasticité, endommagement et la non-isotropie.
Possibilités de programmer de nouvelles lois de comportement.

- Non-linéarités géométriques :

Grandes déformations, grands déplacements, grandes rotations et instabilités.

- Non-linéarités de contact :

Grands déplacements, contact 2D et 3D, possibilité de contact rigide/rigide, rigide/déformable, déformable. /déformable.

IV.2.2. MODULES D'ABAQUS ET ETAPES DE MODELISATION :

ABAQUS comporte en tout huit modules pour la modélisation et introduction des données et un neuvième module qui sert à visualiser les résultats ; qui sont :

- Module Part;
- Module Property;
- Module Assembly;
- Module Step;
- Module Interaction;
- Module Load;
- Module Mesh ;
- Module Job ;
- Module de visualisation.

IV.2.2.1. Module part :

Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans ABAQUS CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.

L'outil « create part » nous permet de créer n'importe quelles pièces qui est défini par ses caractéristiques .En premier lieu définir l'espace de modélisation : en 3D, 2D ou en axisymétrique pour un modèle simplifié, ensuite définir le type de pièce, déformable ou non déformable ainsi que ses caractéristiques mécaniques : solide, coque, fil ou en point.

L'épaisseur de la pièce en cas de 3D sera créée dans notre travail, extrusion pour le voile et « sweep » pour les armatures.

La figure ci-dessous, on montre les étapes qu'on a suivies et les paramètres utilisés dans ce module.

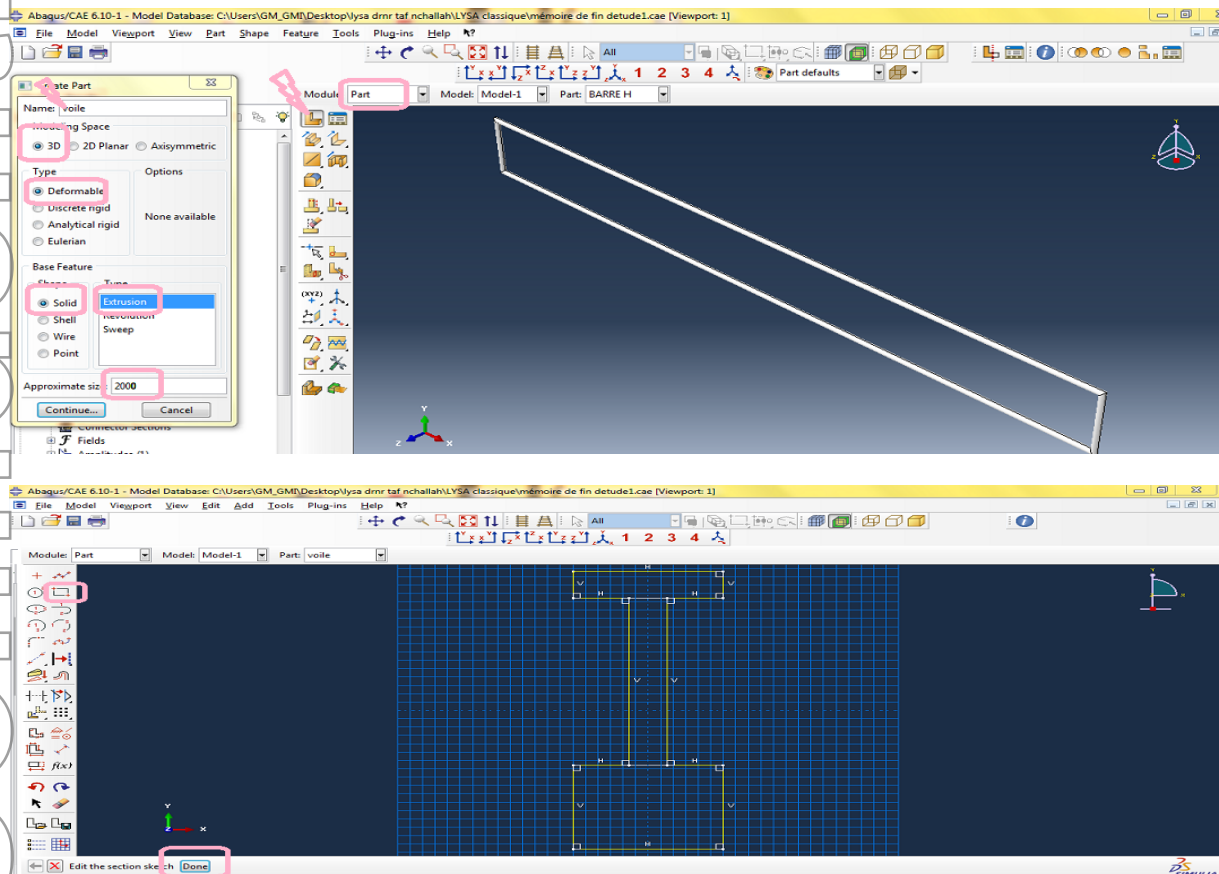



Figure IV.12 : Module part.

IV.2.2.2. Module property :

Le module Property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet. Dans ce module, on peut créer des matériaux, des sections et les affecter, des repères d'orientation et des types de profils.

IV.2.2.2.1. Création des matériaux :

Avec l'outil « create material » , on peut définir la loi de comportement du matériau de la pièce à modéliser et élaborer toutes ses propriétés mécaniques, thermiques ou acoustiques

Plusieurs lois de comportement de matériau ont été incluses dans le code d'ABAQUS, pour ainsi répondre aux multiples hypothèses du domaine de la recherche.

Dans notre travail, on a été amené à définir deux matériaux ,le béton et l'acier.les lois de comportement utilisée seront présenté ci-dessous .

IV.2.2.2.1.1. Modèle pour le matériau béton :

Ils existent trois modèles de comportement du béton dans ABAQUS :

- Brittle Cracking.

- Concrete smeared cracking.
- Concrete damaged plasticity.

Afin de modéliser le comportement du béton élasto-plastique endommageable, on a défini sa densité .Son domaine élastique sera défini avec le modèle « elastic » en introduisant le module de Young et le coefficient de poisson, et le domaine plastique en utilisant le modèle « *concrete damaged plasticity* ».

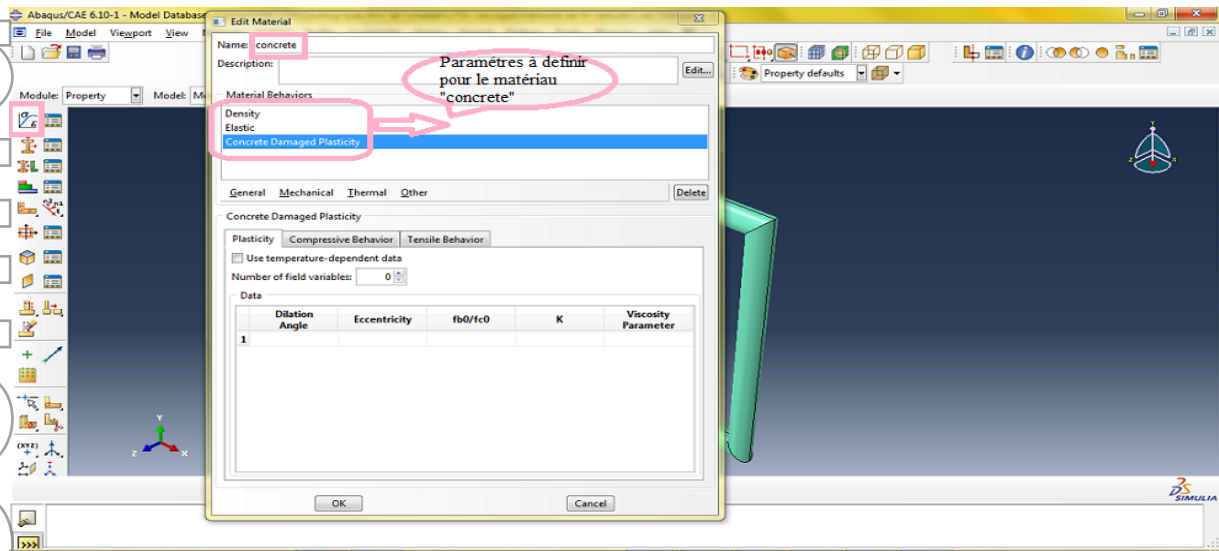


Figure IV.13 : Modélisation du matériau béton.

Présentation du modèle concrete damaged plasticity :

« Concrete damaged plasticity » est un modèle basé sur la plasticité et l'endommagement du béton, il suppose que les deux principaux mécanismes de rupture sont la fissuration en traction et le broyage (écrasement) en compression.

Ce modèle :

- Fournit une capacité générale pour la modélisation du béton et d'autres matériaux quasi-fragile dans tous les types de structure (poutres, poutrelles, coques etc.),
- Utilise des concepts d'élasticité isotrope endommagée en combinaison avec la traction et la plasticité isotrope de compression pour représenter le comportement inélastique du béton ,
- Peut être utilisé pour le béton ordinaire, même s'il est destiné principalement à l'analyse des structures en béton armé,
- Est aussi conçu pour les bétons soumis à une charge monotone, cyclique, ou sous une charge dynamique,
- Permet le contrôle des effets de récupération de rigidité lors des inversions de charge cyclique.

L'état de la surface du matériau est contrôlé par les deux variables suivantes :

$\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$: Déformation plastique équivalente, liée à un mécanisme de rupture sous un chargement de traction ;

$\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$: Déformation plastique équivalente, liée à un mécanisme de rupture sous un chargement de compression.

🔔 Comportement à la traction :

Sous traction simple de la courbe contrainte-déformation suit une relation linéaire élastique jusqu'à ce que la valeur de la contrainte à la rupture σ_{t0} soit atteinte. La contrainte à la rupture correspond à l'apparition de microfissures dans le matériau de béton et leur localisation progressive jusqu'à engendrer la rupture totale du matériau.

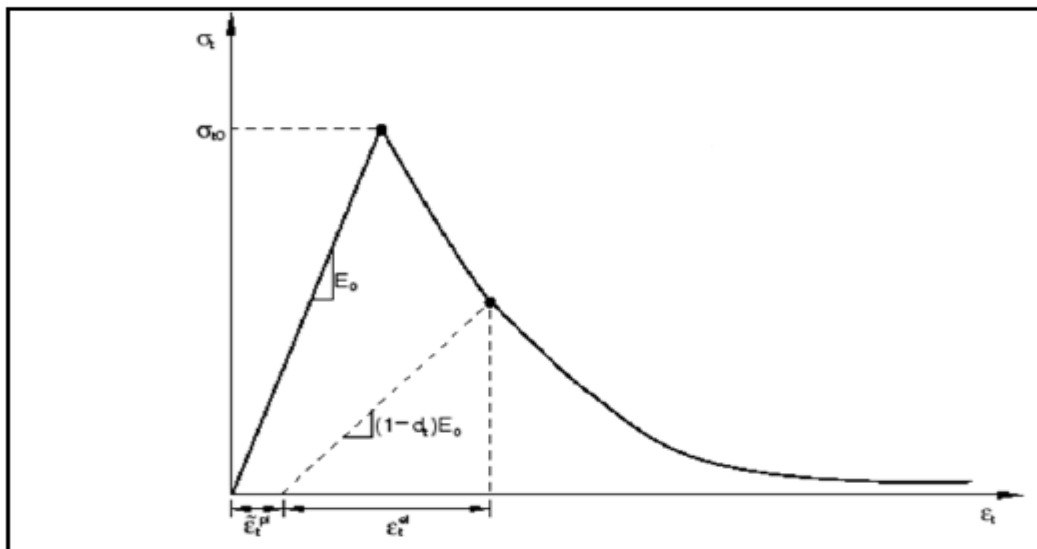


Figure IV.14: Réponse du modèle à la traction simple . [30]

🔔 Comportement à la compression :

Dans le cas de compression simple la réponse est linéaire jusqu'à la valeur de la limite élastique σ_{c0} . Dans le domaine plastique la réponse est généralement caractérisée par un écrouissage suivi d'adoucissement, au-delà de la contrainte de rupture σ_{cu} .

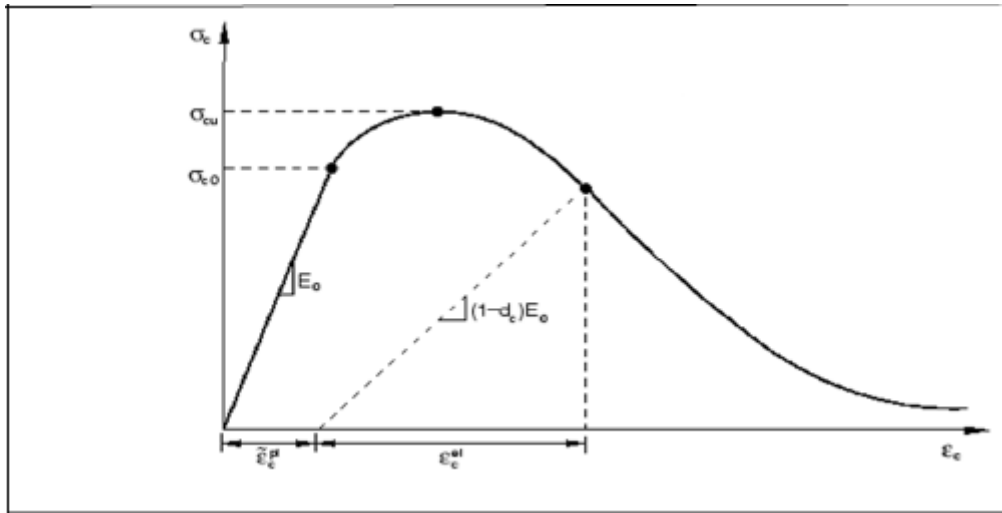


Figure IV.15 : Comportement du béton en compression simple. [30]

Les contraintes en compression et en traction peuvent être définies en fonction des déformations équivalentes en plastique, et leurs équivalents en taux de déformation plastique, la température, et d'autres variables de champs prédéfinies.

$$\sigma_t = \sigma_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \dot{\tilde{\varepsilon}}_t^{pl}, \theta, f_i),$$

$$\sigma_c = \sigma_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \dot{\tilde{\varepsilon}}_c^{pl}, \theta, f_i),$$

Lorsque le béton est déchargé à partir de n'importe quel point après atteinte de la contrainte limitée (σ_{c0} ou σ_{t0}), la rigidité du matériau est endommagée (ou dégradée).

La dégradation de la rigidité élastique est caractérisée par deux variables d'endommagement, et qui sont des fonctions des déformations plastiques.

$$d_t = d_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_i); \quad 0 \leq d_t \leq 1$$

$$d_c = d_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i); \quad 0 \leq d_c \leq 1$$

Comme on le remarque dans les figures précédentes, la rigidité du béton connaît une dégradation beaucoup plus significative en traction qu'en compression.

Les variables d'endommagement sont comprises entre 0 et 1, pour la valeur de zéro cela signifie que le matériau est intact et vierge de tout endommagement, par contre pour la valeur égale à 1 c'est l'endommagement total (la ruine).

Si on définit E_0 est la rigidité initiale du matériau intact, la relation contrainte-déformation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\sigma_t = (1-d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl})$$

$$\sigma_c = (1-d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl})$$

Ainsi on pourra déterminer la contrainte effective reprise par la partie non endommagée du matériau par la relation suivante :

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0 (\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl})$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0 (\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl})$$

Sous un chargement cyclique uniaxial, le mécanisme de l'endommagement est assez complexe, on observe l'ouverture et la fermeture des microfissures et la reprise de rigidité lors de la variation du chargement. Le modèle « concrete damaged plasticity », suppose que la réduction du module d'élasticité est donné en fonction de la variable scalaire d'endommagement : $E = (1 - d) E_0$.

Le modèle tient compte de la récupération de la rigidité sous chargement cyclique uniaxial par l'expression suivante : $(1-d) = (1-S_t d_c) (1-S_c d_t)$.

S_t et S_c sont des fonctions de l'état de contraintes, qui sont introduites pour modéliser les effets de récupération rigidité, telle que :

$$\begin{cases} S_t = 1 - w_t r^*(\sigma_{11}) ; & 0 \leq w_t \leq 1 ; \\ S_c = 1 - w_c (1 - r^*(\sigma_{11})) ; & 0 \leq w_t \leq 1 ; \end{cases}$$

Où

$$r^*(\sigma_{11}) = H(\sigma_{11}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sigma_{11} > 0 \\ 0 & \text{si } \sigma_{11} < 0 \end{cases}$$

w_t et w_c sont des facteurs poids, supposés être des propriétés du matériaux, qui contrôle la récupération de la rigidité à la traction et à la compression lors de l'inversion de charge.

- si $w_c = 1$, le matériau a récupéré sa rigidité et retrouve son module d'élasticité initial E_0 ;
- si $0 < w_c < 1$, la récupération est partielle ;
- si $w_c = 0$, la récupération est nulle.

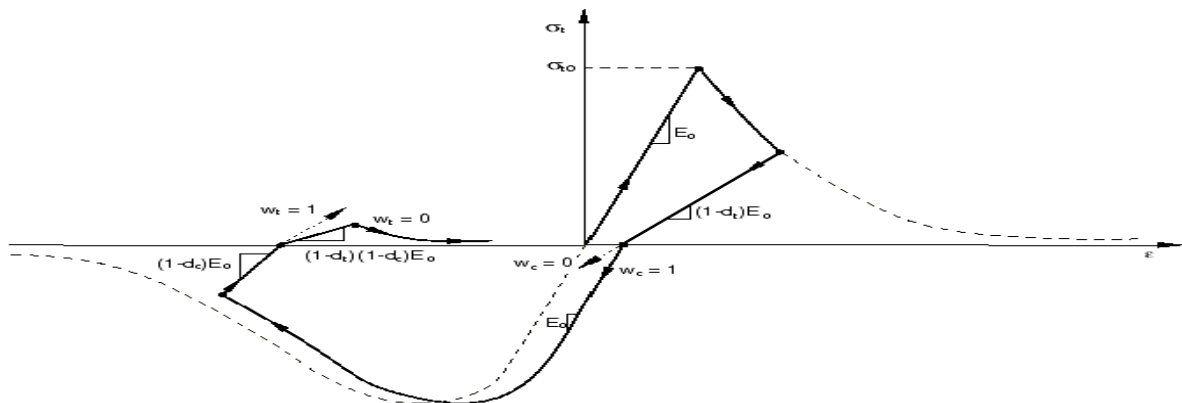


Figure IV.16: Récupération de la rigidité lors d'un cycle complet .[30]

Pour un comportement multiaxial , les relations contrainte-déformation sont données par l'équation suivante : $\sigma = (1 - d) D^{el}_0 : (\varepsilon - \varepsilon^{pl})$.

Ou D^{el}_0 est la matrice d'élasticité initiale (pas d'endommagement).

Dans notre travail, les paramètres introduit pour le modèle « concrete damaged plasticity » seront représenté sous forme de courbes.

IV.2.2.2.1.2. Modèle pour le matériau acier des armatures :

Le modèle utilisé pour le matériau acier dans notre simulation est le modèle élasto-plastique à écrouissage isotrope .Ses paramètres seront introduite dans le fichier de données.

IV.2.2.3. Module assembly :

Chaque partie du modèle à réalisé existe dans son propre système de coordonnée, indépendamment des autres parties. Le module « assembly » nous permet de rassembler toutes ces parties sous un même système de coordonnée.

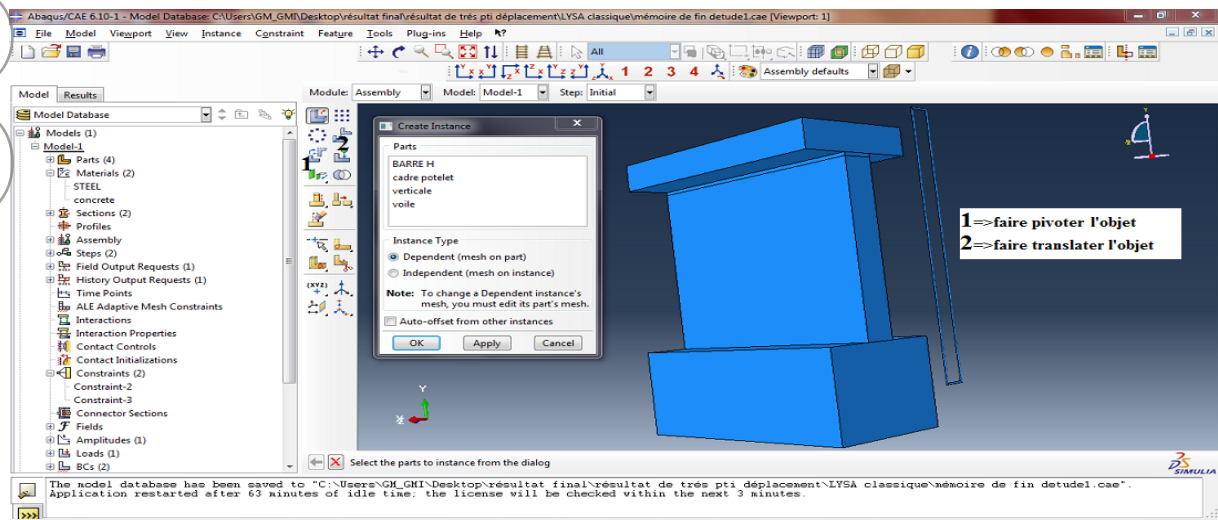


Figure (IV.17): module assembly.

IV.2.2.4. Module step :

Dans ce module, on défini l'incrémentation, la valeur du pas de temps, et la valeur du temps final, qui est un temps « virtuel », mais aussi nous permet d'introduire les variables de sortie qu'on juge nécessaires afin de les visualiser dans le module « visualisation ».

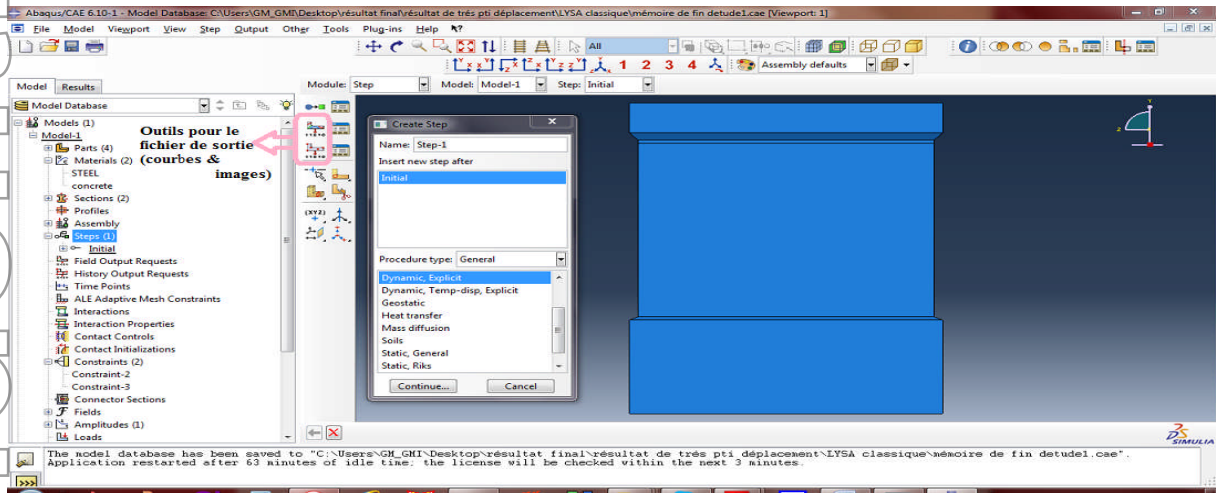
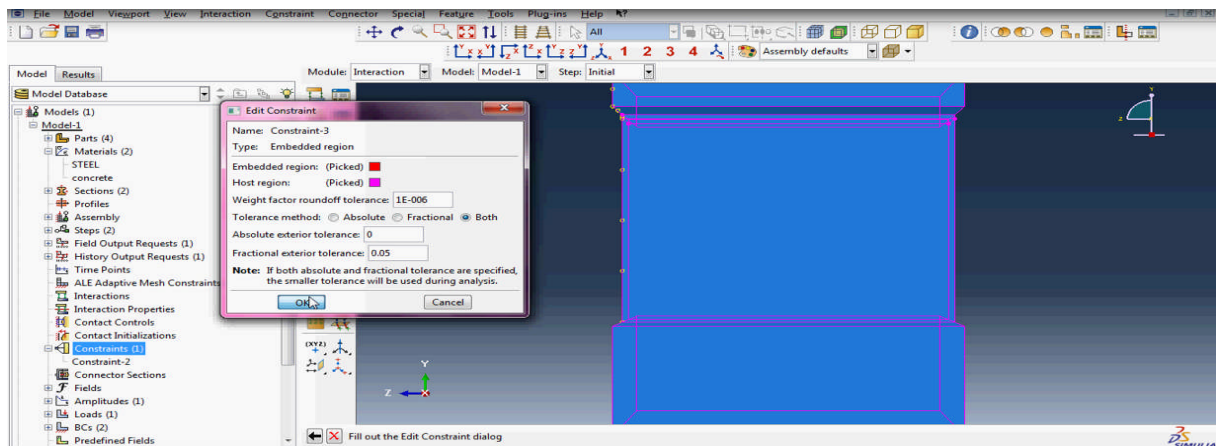
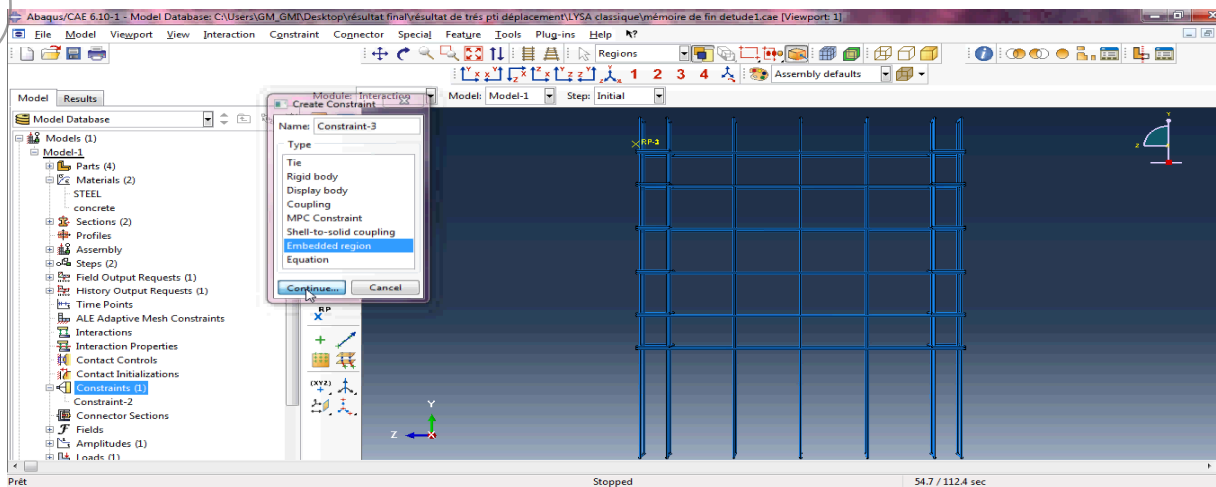


Figure IV.18: Module step.

IV.2.2.5. Module interaction :

Grâce à ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions (contacts et connections) entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies.



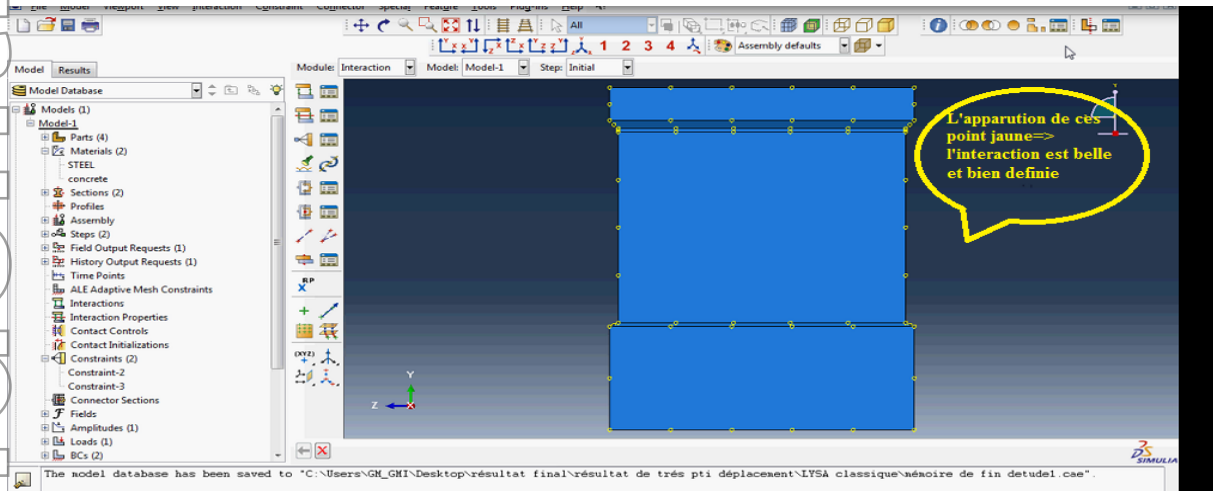


Figure IV.19 : Module interaction .

IV.2.2.6. Module load :

Le module Load permet de spécifier tout les chargements, conditions aux limites. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites dépendent des steps , par exemple on pourra définir une force au step 1 mais qui sera inactive au step 2.

-Définition des conditions aux limites :

Avec l'outil « create Boundary condition » , on peut définir les conditions aux limites, ou même imposer un déplacement .

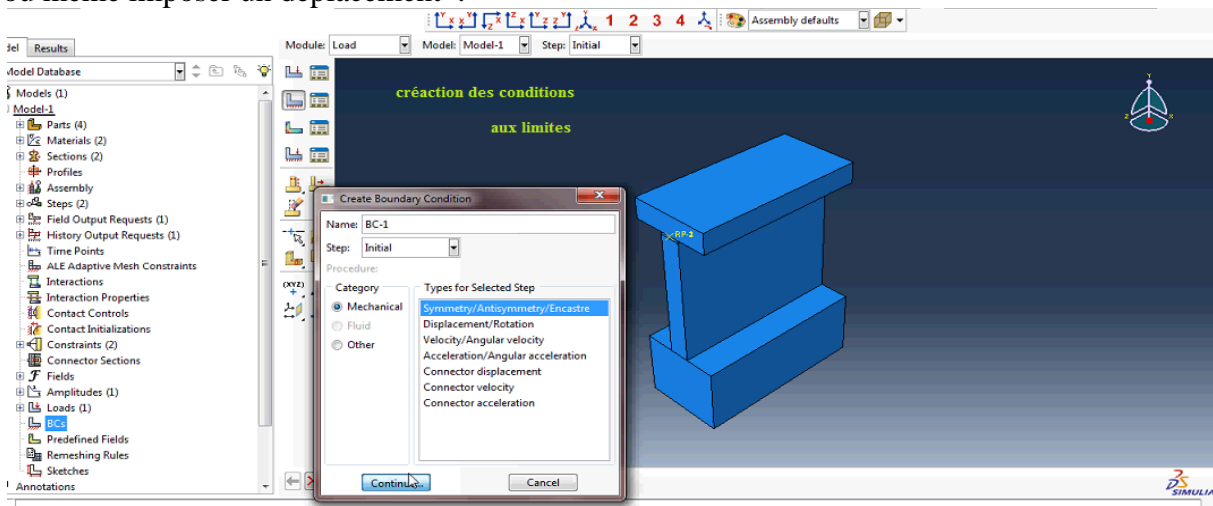

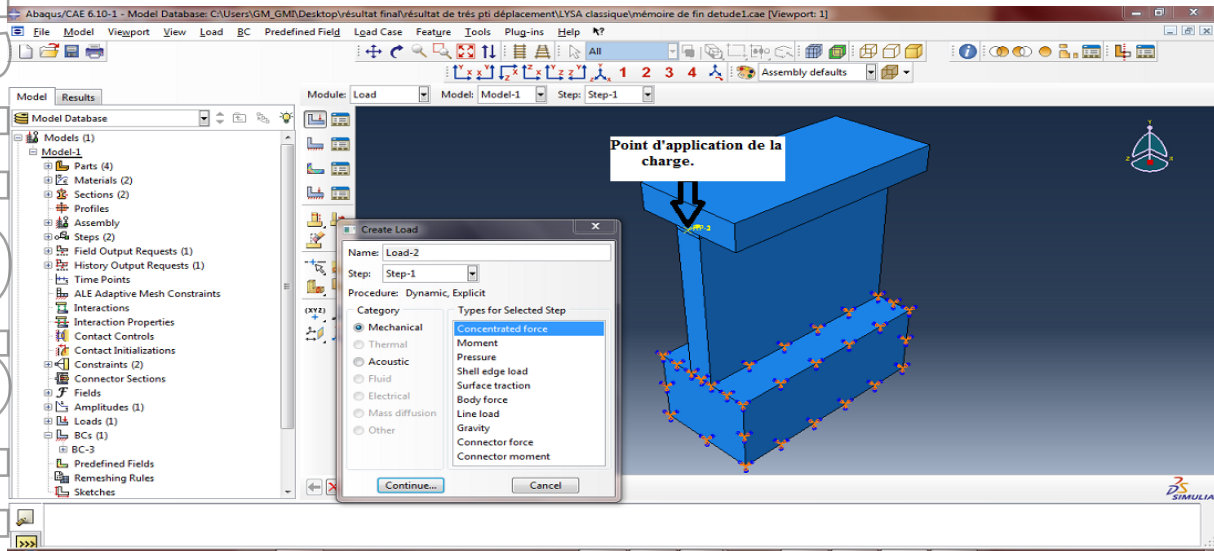


Figure IV.20 : Création des conditions aux limites.

-Définition du chargement :

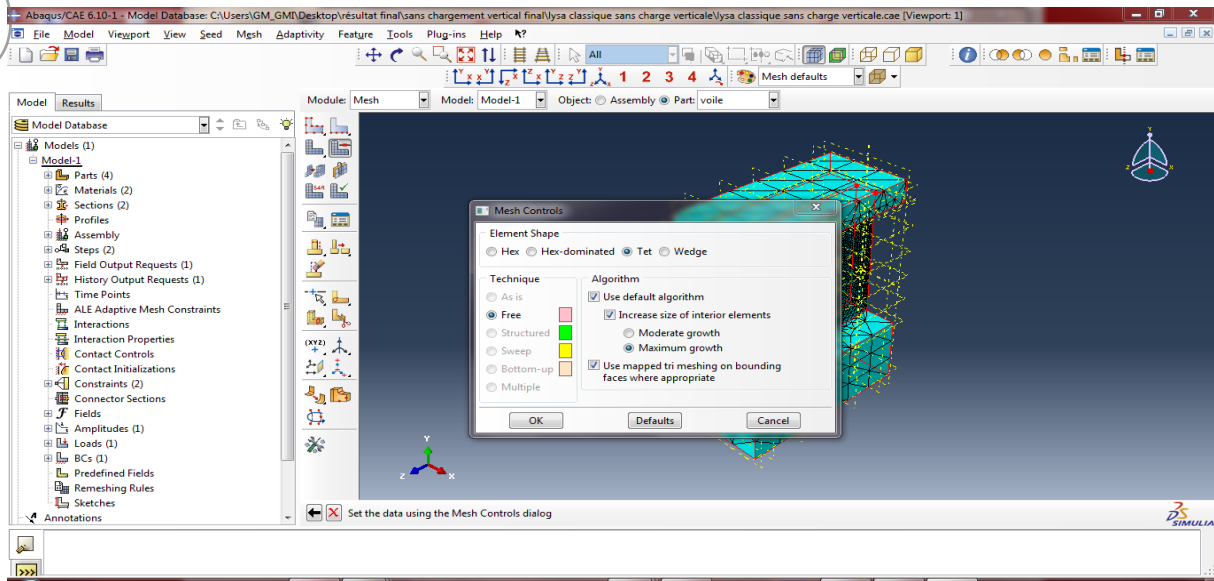
Afin d'appliquer un chargement à la structure modélisée, on fait appel à l'outil « create load » , on peut choisir une charge concentrée ,une pression ,un moment ect , tout en définissant son amplitude.



Figure(IV.21) : définition de la charge.

IV.2.2.7. Module Mesh :

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.



Figure(IV.22) : module mesh.

IV.2.2.8. Module Job:

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. On lance le calcul à l'aide de module Job, qui reprend les caractéristiques de ce calcul à partir du module Step.

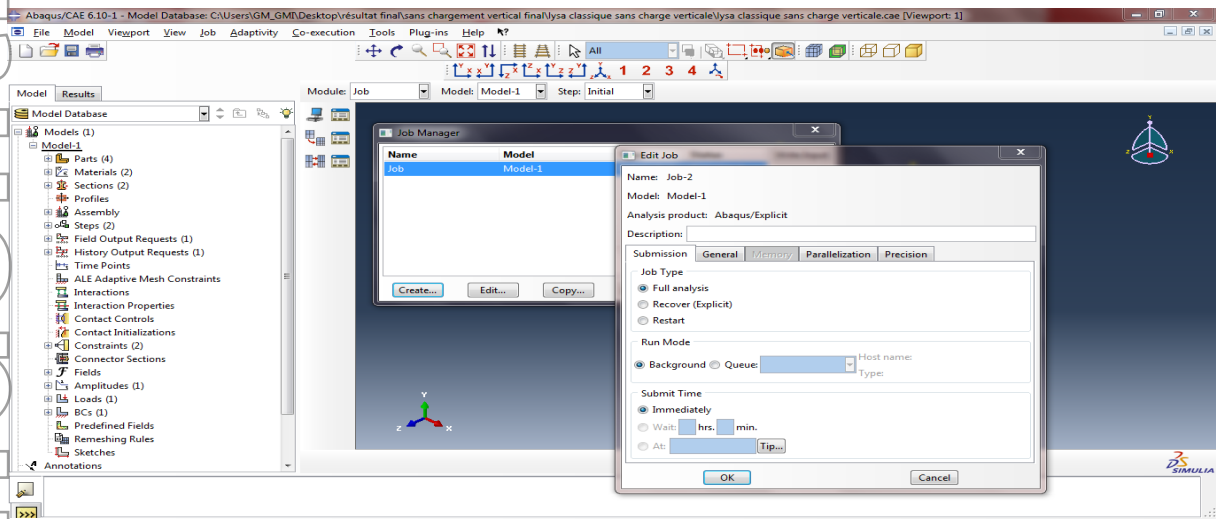


Figure IV.23 : Module Job.

IV.2.2.9. Module Visualisation :

Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations, les contraintes.

Dans notre travail, lors de l'exploration des résultats de nos modèles, on a été amené à utiliser plusieurs variables qui décrivent le comportement de nos éléments, on les citera ci-dessous.

- 1)- DAMAGEC → un paramètre qui décrit les dommages en compression, avec possibilité de tracer son évolution en fonction du temps (ou d'un autre paramètre, la charge par exemple) pour un élément (une maille).
- 2)- DAMAGET → les dommages en traction.
- 3)-PE → déformations plastiques.
- 4)-RF → force de réaction dans un nœud.
 - RF3 → force de réaction dans un nœud dans le sens de l'axe Z-Z.
- 6)-S → Contraintes
 - S :Mises → contraintes de Von mises.
- 7)- U → déplacement des nœuds.
 - U3 → déplacement des nœuds dans le sens de l'axe Z-Z.

8)-LE → déformations logarithmiques

Dans Abaqus , on peut pas extraire les déformations réelles ,pour cela on exposera la relation qui lie les deux déformations : réelle et logarithmique.

$$\text{Déformation logarithmique} = \epsilon_{LE} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

$$\text{déformation réelle} = \epsilon_{réelle} = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \rightarrow 1 + \epsilon_{réelle} = \frac{l}{l_0}$$

$$\rightarrow \ln (1 + \epsilon_{réelle}) = \ln \frac{l}{l_0} = \epsilon_{LE}$$

$$\rightarrow \ln (1 + \epsilon_{réelle}) = \epsilon_{LE} \cdot$$

V.1 .Validation des modèles simulés : Modèle classique MC.

V .1.1. Vérification du critère énergétique :

Quand on soumet une structure à un chargement statique, un critère énergétique devra être vérifié. Ce critère énonce que l'énergie interne doit être d'environ 15 fois plus importante que l'énergie cinétique. La figure ci-dessous est la courbe comparative entre ces deux énergies dans le cas du modèle classique.

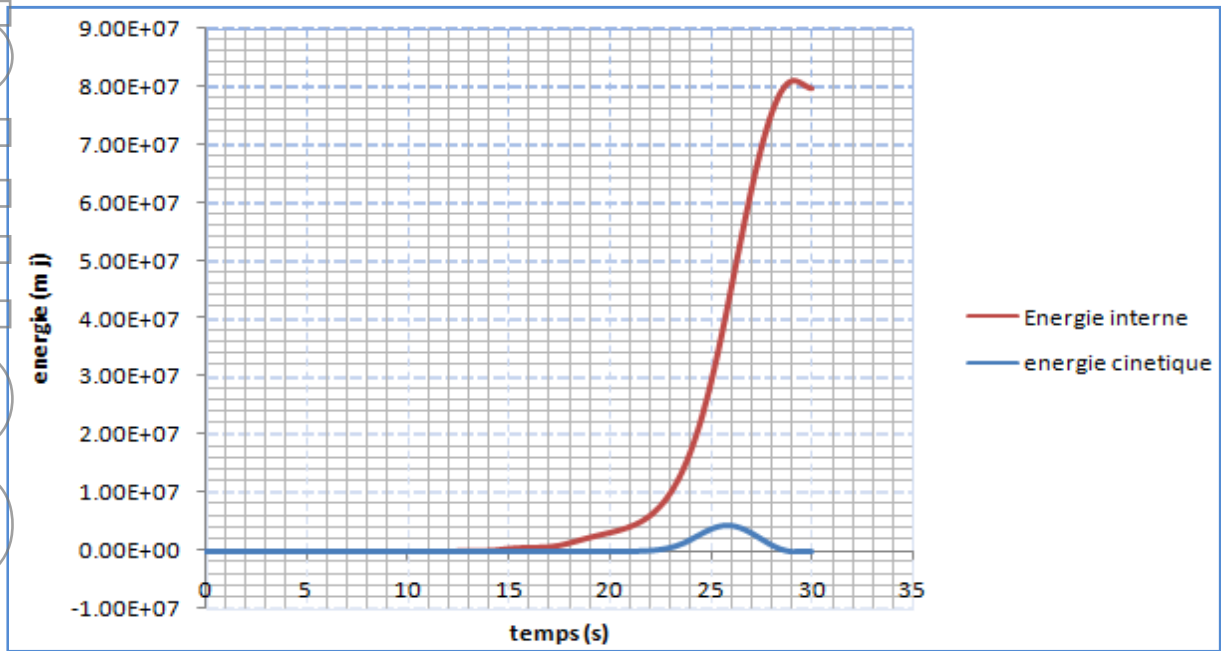


Figure V.1 : Vérification du critère énergétique pour le modèle MC.

La (Figure V.1) montre clairement que ce critère énergétique, l'énergie cinétique de ce modèle est minime devant son énergie interne .Ceci nous permet de stipuler qu'on est dans un cas **statique**.

V .1.2.Allure de l'endommagement :

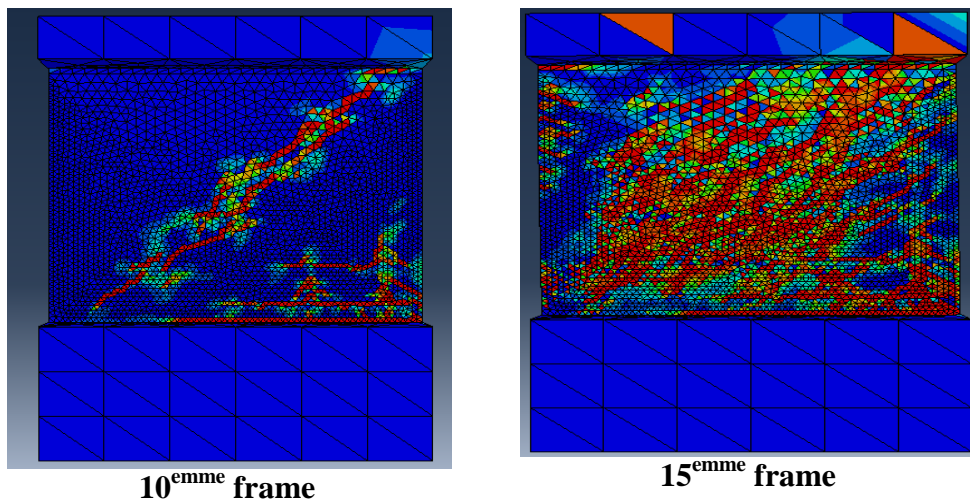


Figure V.2 : Allure de l'endommagement dans le modèle MC.

Le modèle classique présente deux modes d'endommagement : un mode de rupture en diagonale «diagonal tension failure» et un glissement au niveau de l'encastrement « sliding shear » [18].

V .1.3.Plastification des aciers :

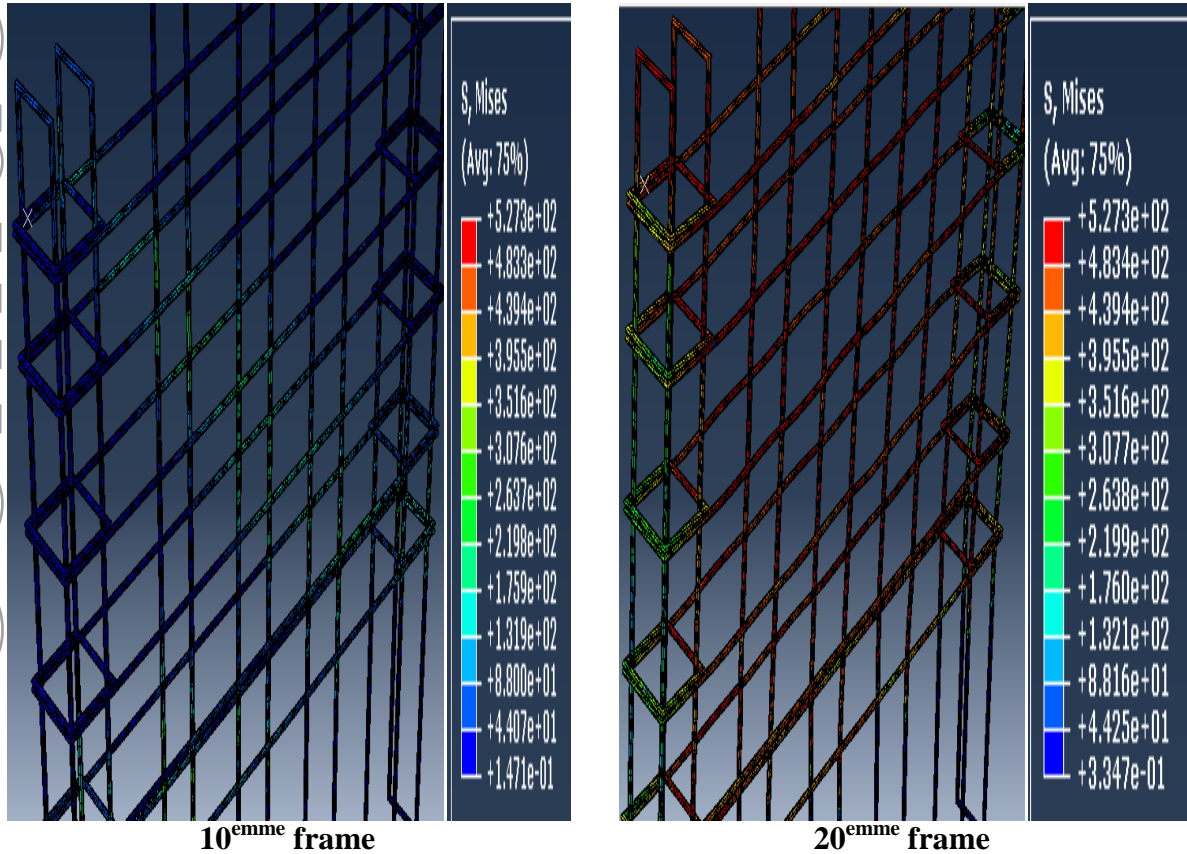


Figure V.3 : Plastification des armatures.

Les efforts sont véhiculés suivant des diagonales à partir du 10^{ème} frame. Ceci est confirmé par l'apparition d'un début de plastification des armatures en bande diagonale (mode T1). Le phénomène se propage en fonction du chargement jusqu'à une plastification totale des armatures verticales, confirmant le cisaillement à la base du voile (mode T2).

V .1.4.Courbe de capacité :

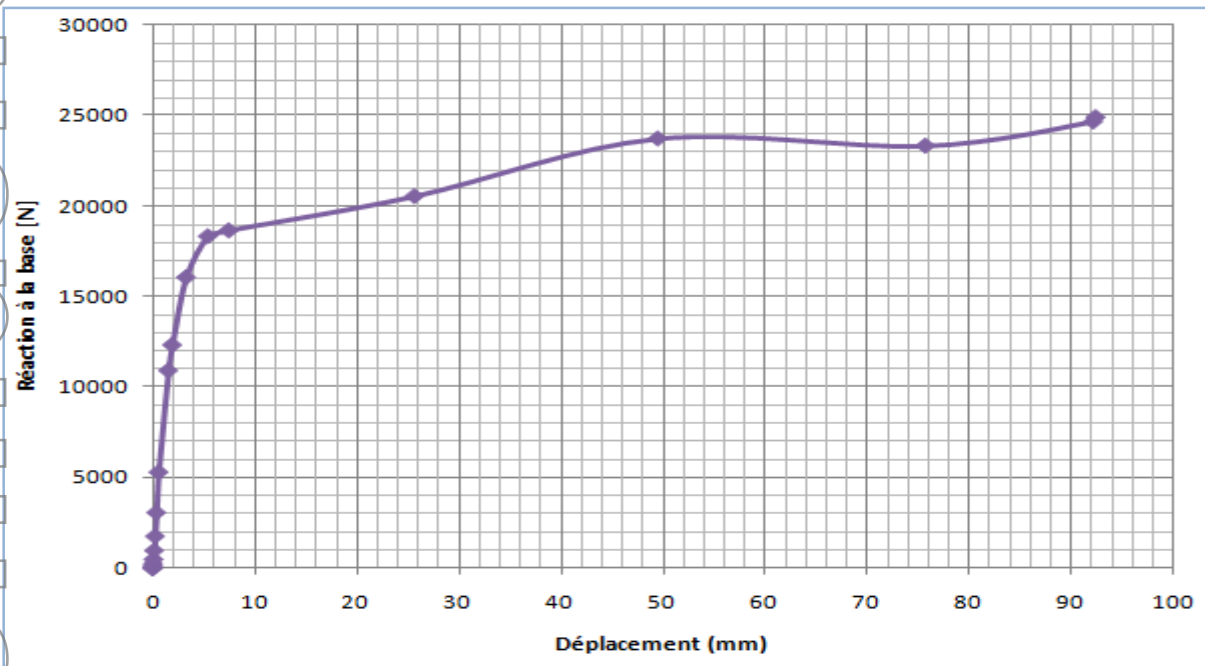


Figure (V.4): Courbe de capacité du modèle MC

On distingue dans « la Courbe de capacité du modèle MC » deux phases de la réponse du voile.

La 1^{er} phase : le voile a un comportement élastique (rigidité initiale) jusqu'à un déplacement égal à 3.25 [mm] correspondant à une capacité portante de 16053.7 [N].

La 2^{ème} phase : au delà du déplacement 3.25 [mm], le voile a un comportement plastique et perd sa rigidité initiale .le modèle MC atteint une capacité portante maximale égale à 24882.1 [N] correspondant au déplacement maximale de 92.12 [mm].

V .1.5.Courbe « contrainte-déformation » :

V .1.5.1.Courbe « contrainte-déformation » dans le béton :

Les courbes ci-dessous montrent la rupture fragile (figures V.5 et V.6) que subit le modèle classique MC dans la zone centrale et à la base (zone tendu) ; ainsi que le comportement du béton dans la zone comprimée à la base (figure V.7).

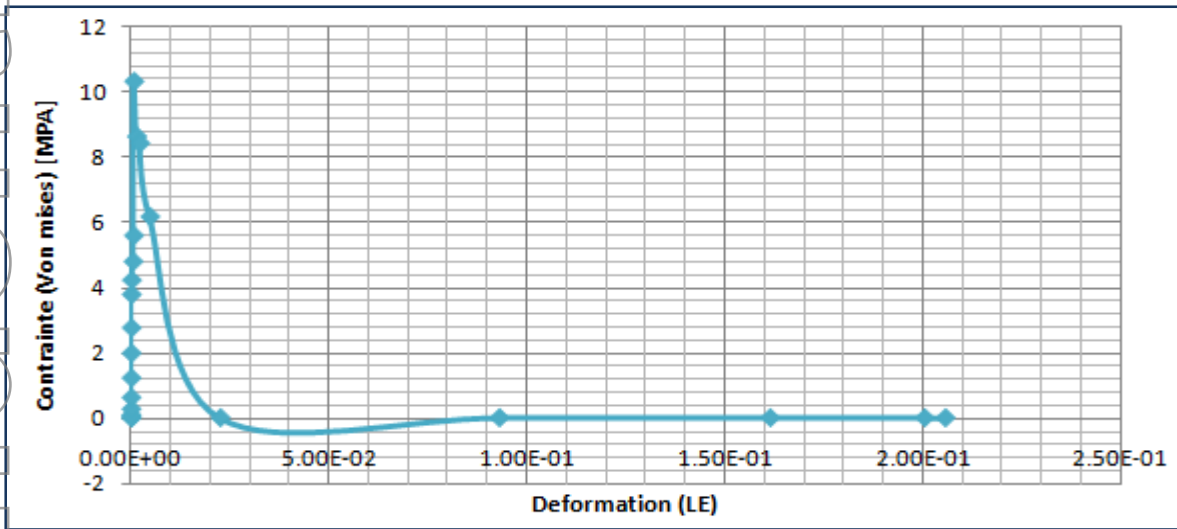


Figure V.5: Courbe « contrainte-déformation » de la zone centrale.

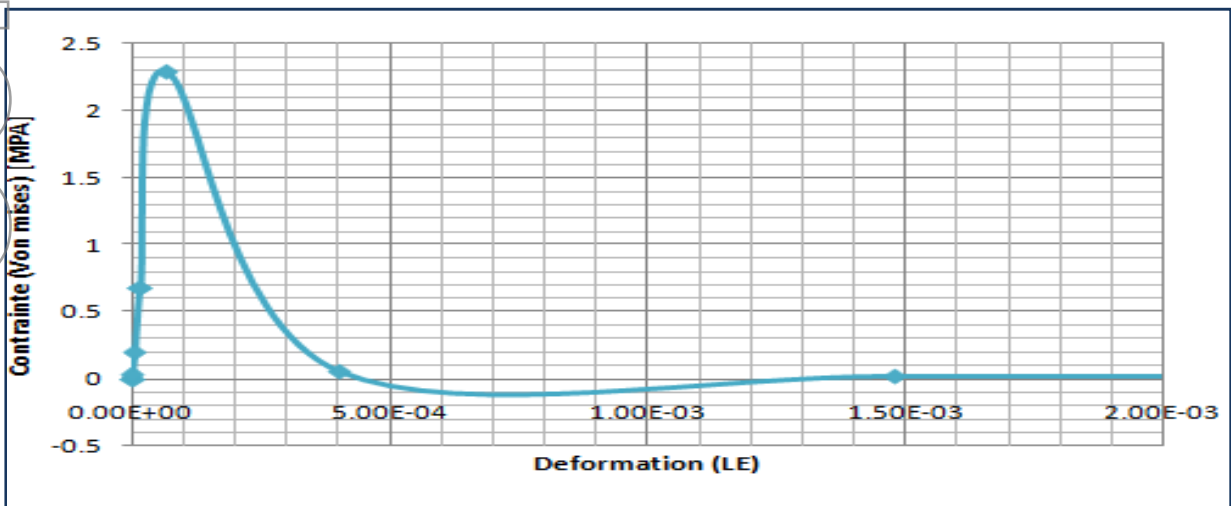


Figure V.6 : Courbe « contrainte-déformation » à la base (zone tendue).

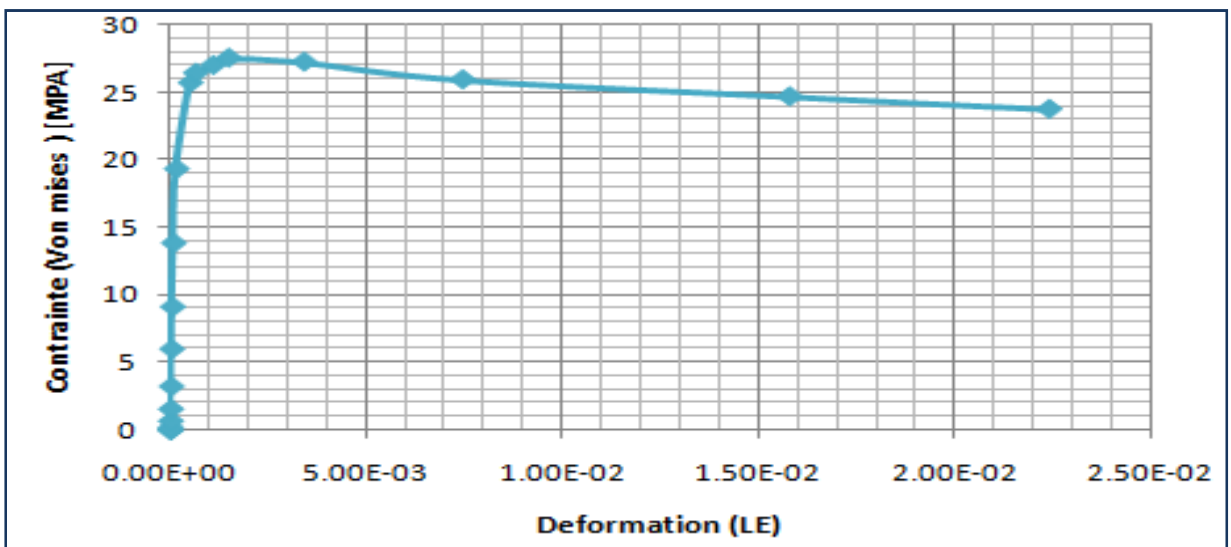


Figure V.7 : Courbe « contrainte-déformation » à la base (zone comprimée).

V.1.5.2. Courbe « contrainte-déformation » dans les aciers :

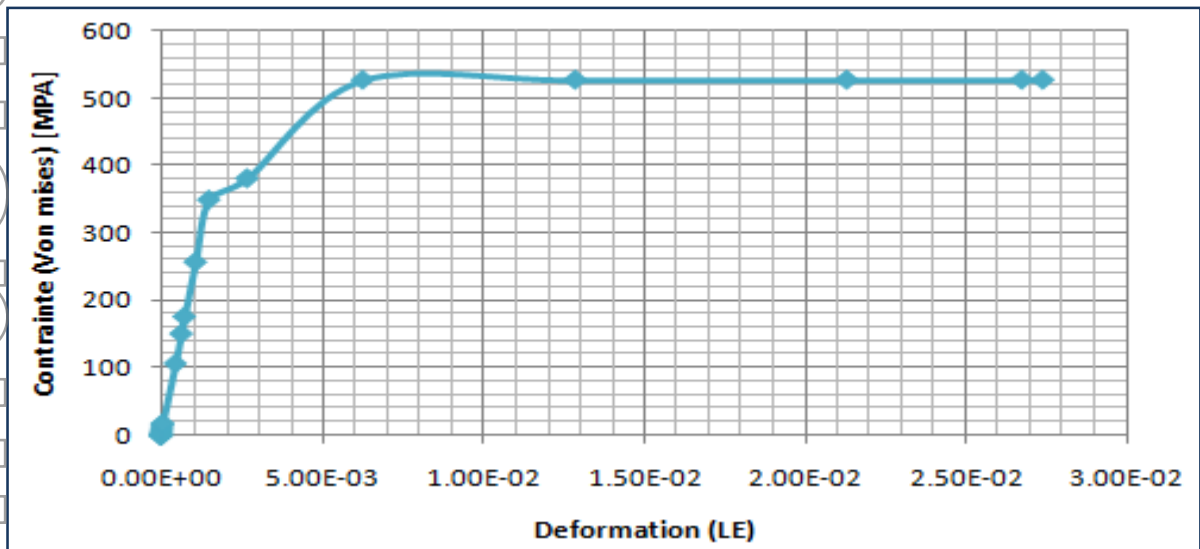


Figure V.8 : Courbe « contrainte-déformation » dans les aciers horizontaux

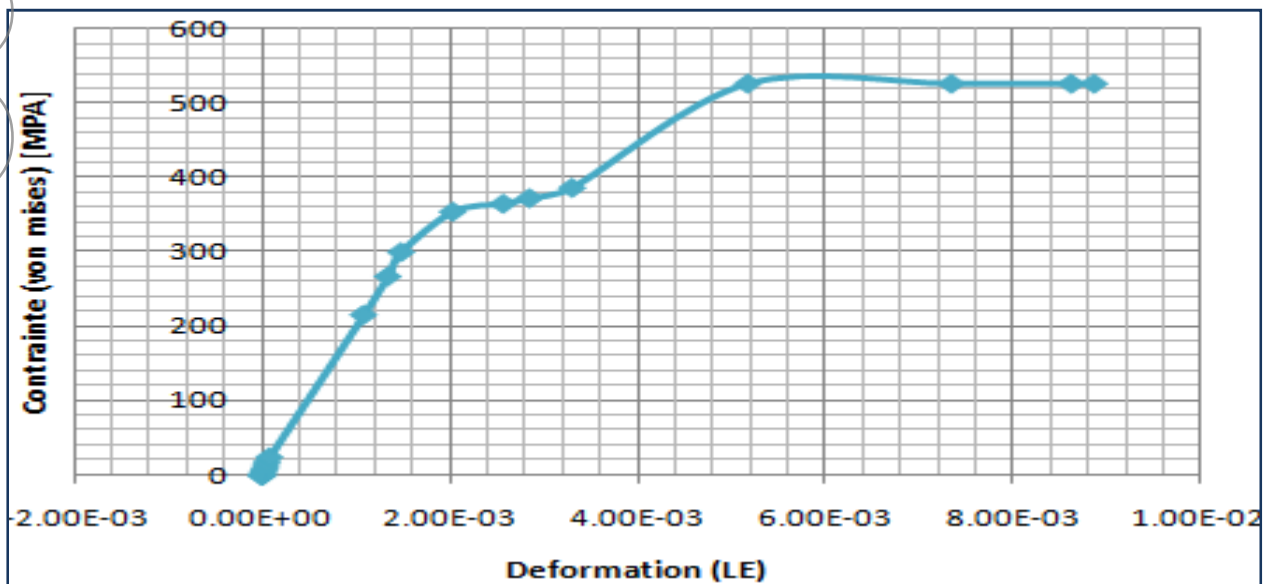


Figure V.9 : Courbe « contrainte-déformation » dans les aciers verticaux

Les Courbes (V.8) et (V.9) traduisent très bien la loi de comportement du matériau introduite dans le fichier de données.

V.2 .PREMIERE COMPARAISON : FERRAILLAGE EN DIAGONAL.

Dans cette partie, on comparera les modèles ferrillés suivants les diagonales avec ou sans cadres (ou épingles).

La comparaison se fera comme suit :

-entre les modèles MD4 et MD-E.

-entre les modèles MD8 et MD-C.

V .2.1.Comparaison entre les modèles MD4 et MD-E :

V.2.1.1. Les Courbes de capacité :

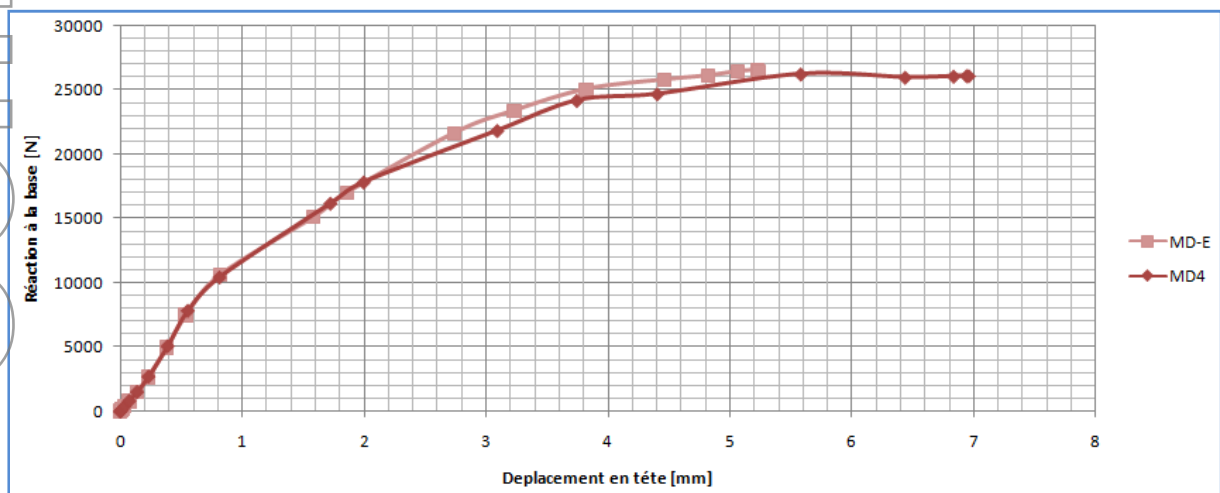


Figure V.10 : Les Courbes de capacité.

On remarque qu'au début, jusqu'à un déplacement égal à 2 [mm] les courbes sont confondues. Les deux modèles se comportent de la même façon.

Après un déplacement de 2[mm], les courbes se distinguent l'une de l'autre, c'est à partir de ce point que les épingles commencent à jouer un rôle, celui de reprendre une partie des efforts.

Les épingles dans le modèles MD-E apportent un pourcentage de capacité portante égal à 4%. Par contre, en terme de déplacements on constate une réduction d'environ 26% pour le modèle MD-E.

V.2.1.2. Endommagement :

V.2.1.2.1 .Comportement globale :

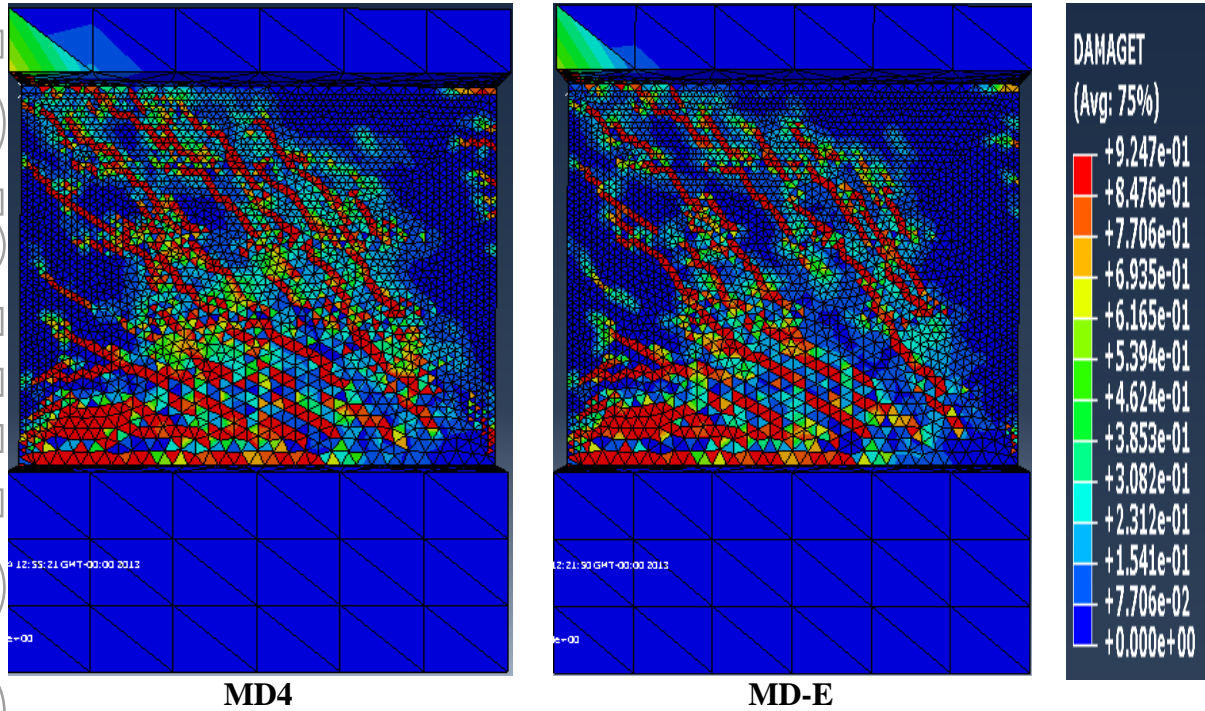


Figure V.11 : Endommagement des modèles MD4 et MD-E.

La figure illustre une diminution de la propagation de l’endommagement dans la zone centrale du modèle MD-E.

V.2.1.2.2 .Comportement local :

V.2.1.2.2 .1.Zone centrale :

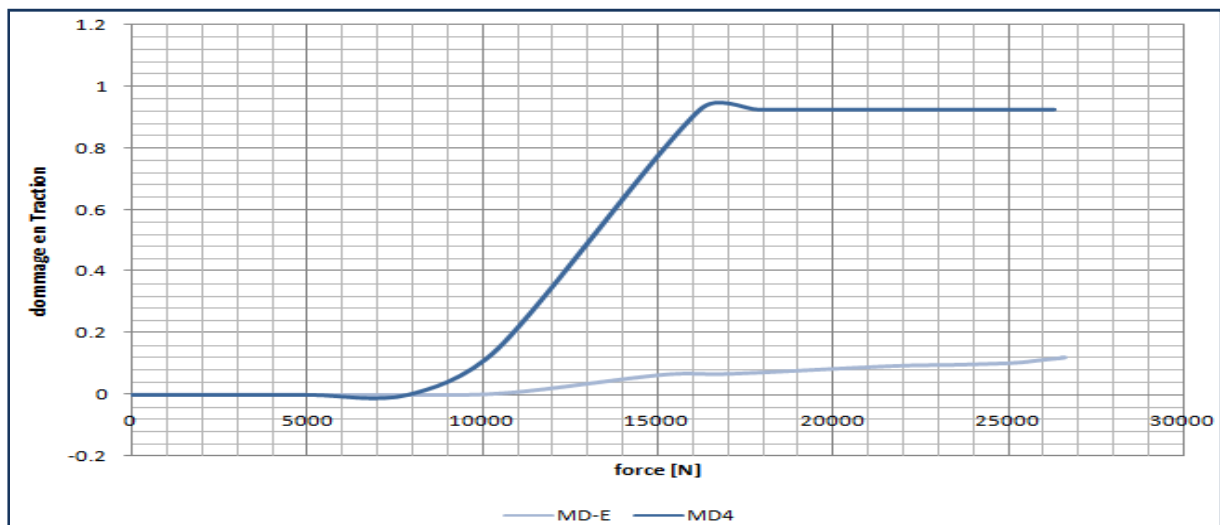


Figure V.12 : Comparaison des dommages dans la zone centrale.

Dans la zone centrale, l'endommagement est réduit d'une façon impressionnante, d'un pourcentage de 92 %.

V.2.1.2.2 .2.Zone à la base :

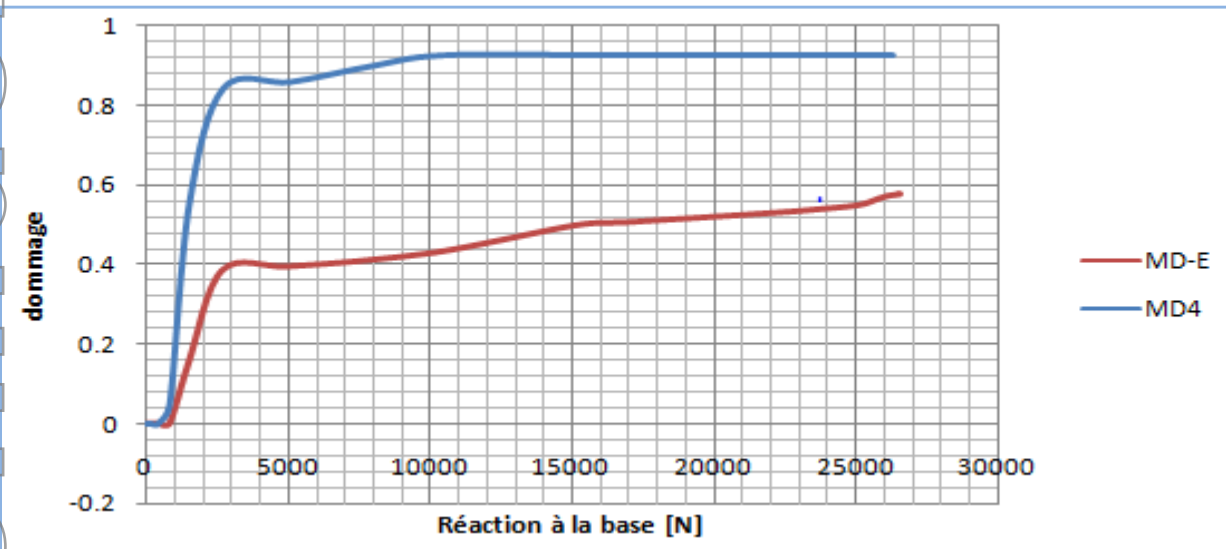


Figure V.13 : Comparaison des dommages à la base.

Une réduction de du taux l'endommagement de 54,50 % est à noter dans la base du voile MD-E.

V .2.2.Comparaison entre les modèles MD8 et MD-C :

V.2.2.1. Les Courbes de capacité :

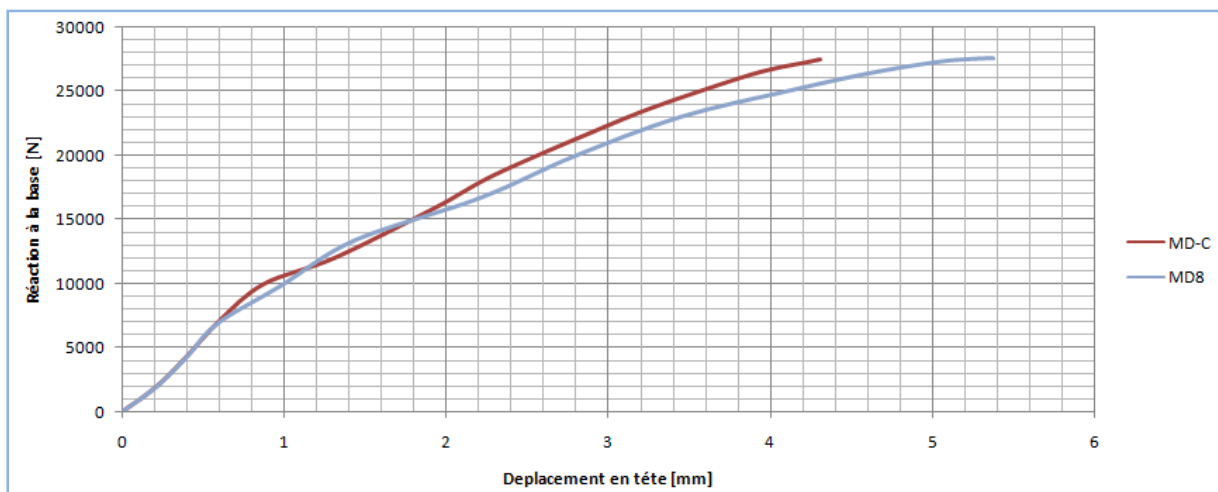


Figure V.14 : Les Courbes de capacité.

On remarque qu'au début, jusqu'à un déplacement égal à 1.80 [mm] les courbes sont presque confondues .Au delà de ce déplacement, les courbes divergent (participation des cadres)

Les cadres dans le modèles MD-C apportent un pourcentage de capacité portante égal à 8 %. Par contre, en terme de déplacement on note une réduction de 21% pour le modèle MD-E.

V.2.2.2. Endommagement :

V.2.2.2.1 .Comportement globale :

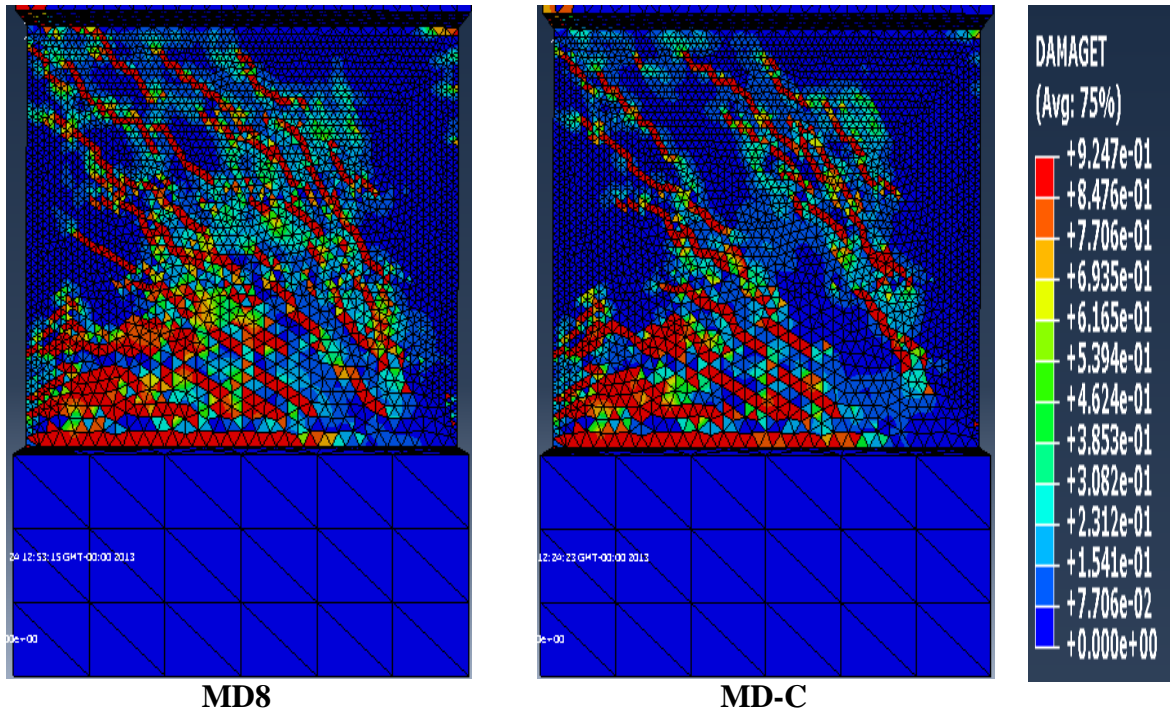


Figure V.15 : Endommagement des modèles MD8 et MD-C.

On remarque dans la (Figure V.15), que la propagation de l'endommagement dans le modèle MD-C a été considérablement réduit par rapport au modèle MD8, surtout dans la zone centrale et tout au long de la bande diagonale, comme on peut remarqué une réduction au niveau de la base et à la tête du voile.

V.2.2.2.2 .Comportement local :

V.2.1.2.2 .1.Zone centrale :

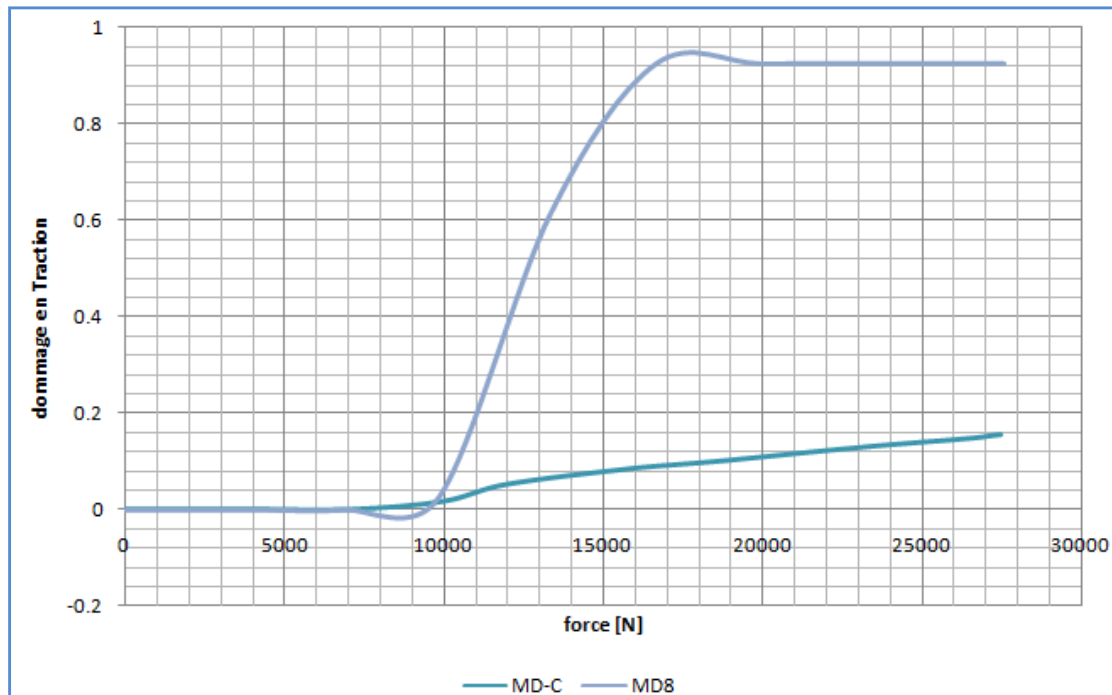


Figure V.16 : Comparaison des dommages dans la zone centrale.

Dans la zone centrale, l'endommagement est réduit d'une façon impressionnante dans le modèle MD-C, d'un pourcentage de 90 %.

V .2.3. Conclusion de la première comparaison :

La comparaison des quatre modèles montre l'importance des armatures transversales (cadres et épingles incorporé dans le ferrailage diagonal) sur le comportement mécanique du voile. Cet apport peut s'expliquer par le confinement de cette zone là, ou par la ligature des fissures.

Pour la suite , on retiendra les deux modèles renforcé avec cadres et épingles (MD-C et MD-E) .

V.3 .DEUXIEME COMPARAISON :

Cette partie est relative aux cinq modèle: MC , MP-HA12, MP-HA14 ,MD-E et MD-C.

V.3.1.Comportement global :

V.3.1.1. En terme de déplacement :

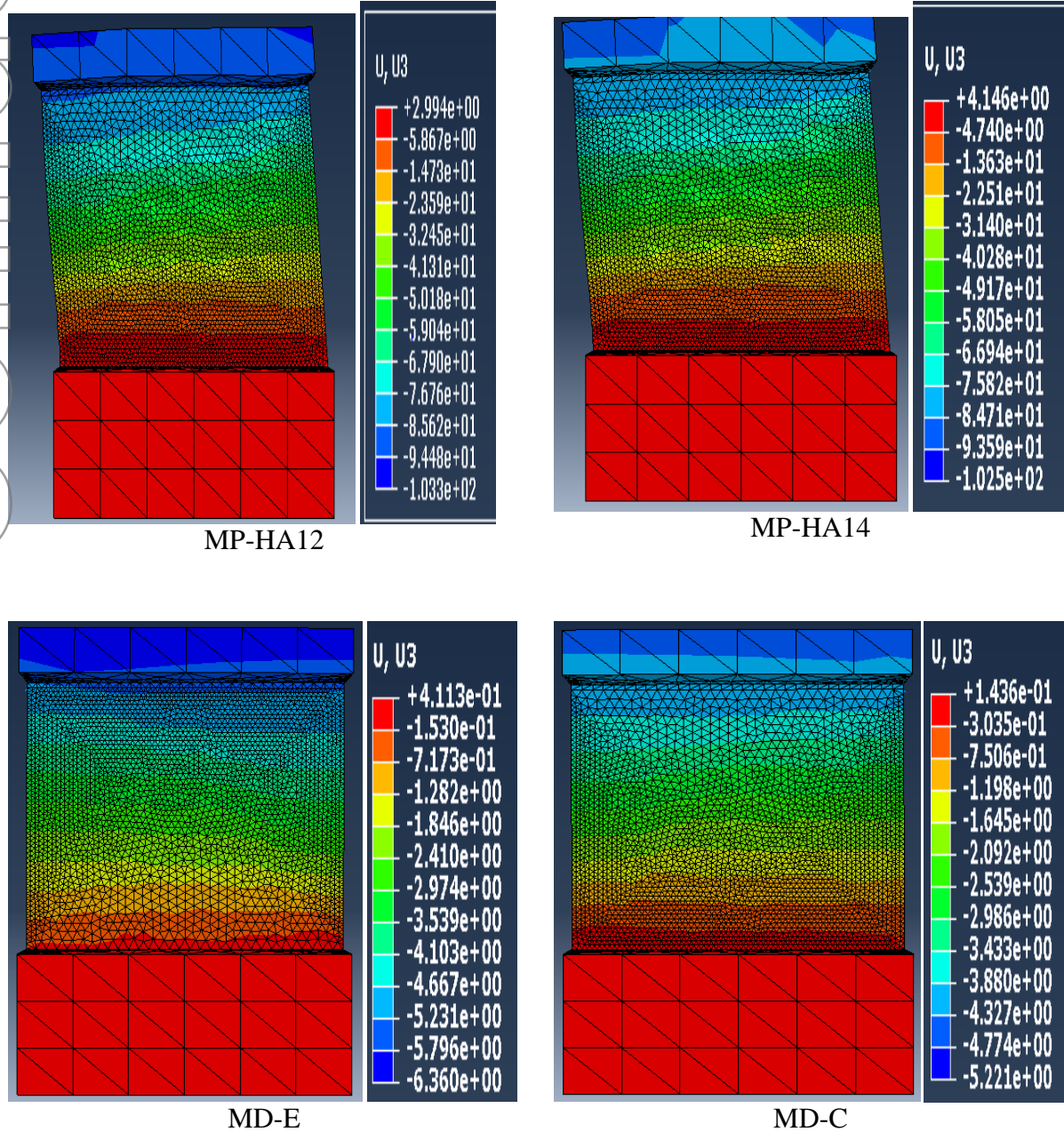
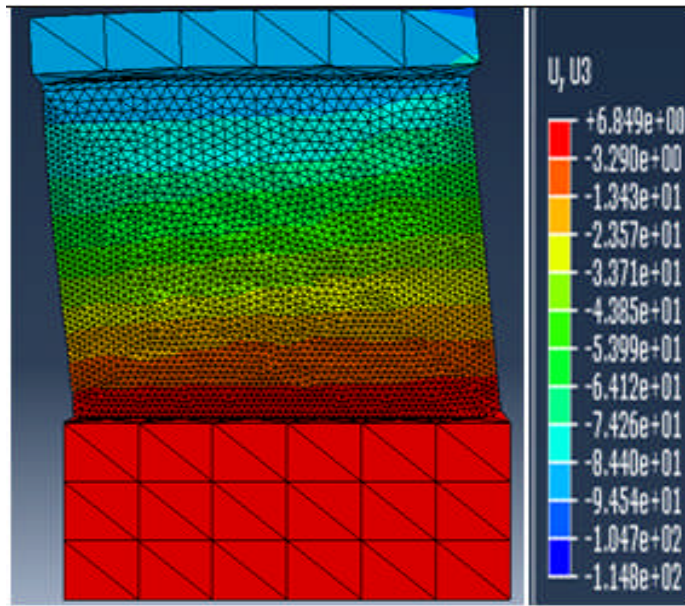


Figure V.18 : Comportement global en termes de déplacement.



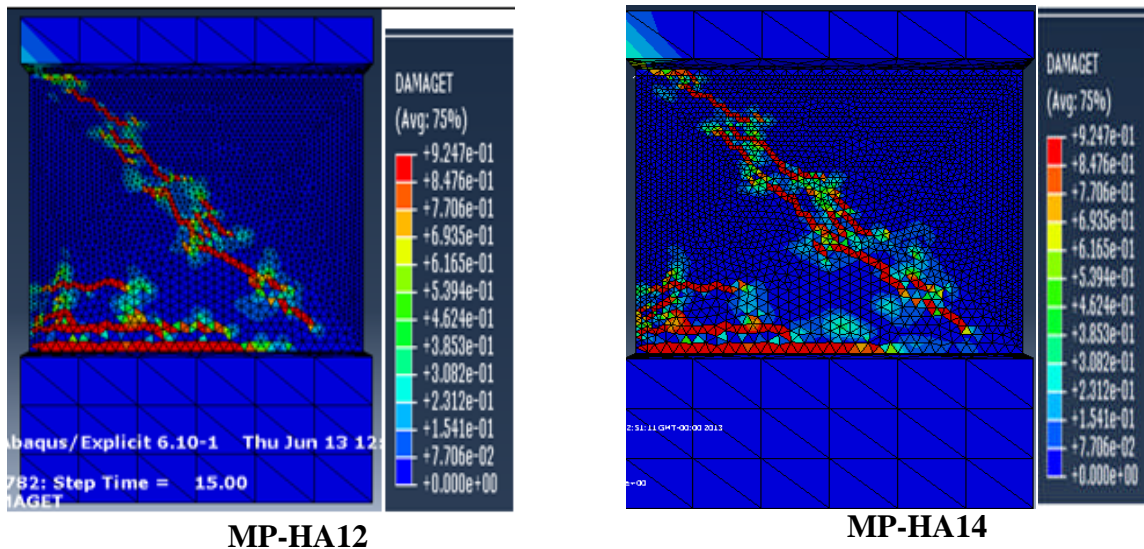
MC

Figure V.18 : Comportement global en termes de déplacement.

En augmentant la section d'acier des potelets en barres de HA12 puis de HA14, on a diminué le déplacement en tête du voile de quelques centimètres, de 9.50% pour le modèle MP-HA12 et 19.78% pour le modèle MP-HA14.

Le renforcement suivant les bielles de compression et de traction modifie fortement le comportement du voile. Ainsi, par rapport au modèle classique, on note une réduction importante, allons jusqu'à 93.87% pour le MD-E et 95.79% pour le MD-C.

V.3.1.2. En terme d'endommagement en traction :



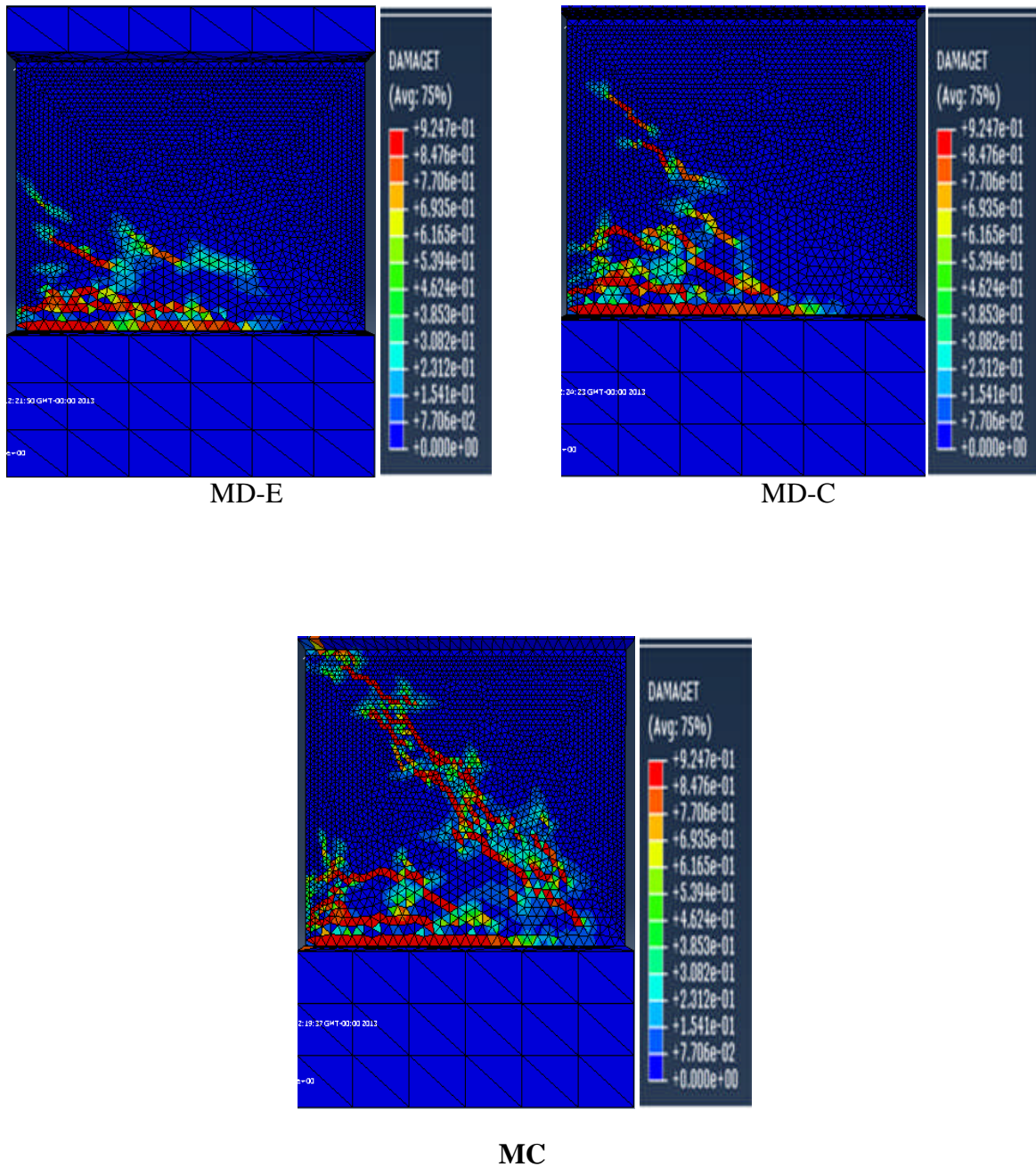


Figure V.19 : Comportement global en terme d’endommagement en traction.

On remarque que le voile avec ferrailage classique (MC) est fortement endommagé ; que ce soit à la base ou globalement dans l’âme du voile. Ce dernier se déforme en losange engendrant la fissuration du béton en diagonale.

La propagation de l’endommagement est réduite de peu dans le modèle MP-HA12 et MP-HA14, cette réduction apparait plus à base du voile.

Par contre, pour les modèles MD-E et MD-C on observe une réduction de la propagation des dommages en traction dans la zone centrale et tout au long de la bande diagonale.

V.3.1.3. En terme de déformation dans le béton :

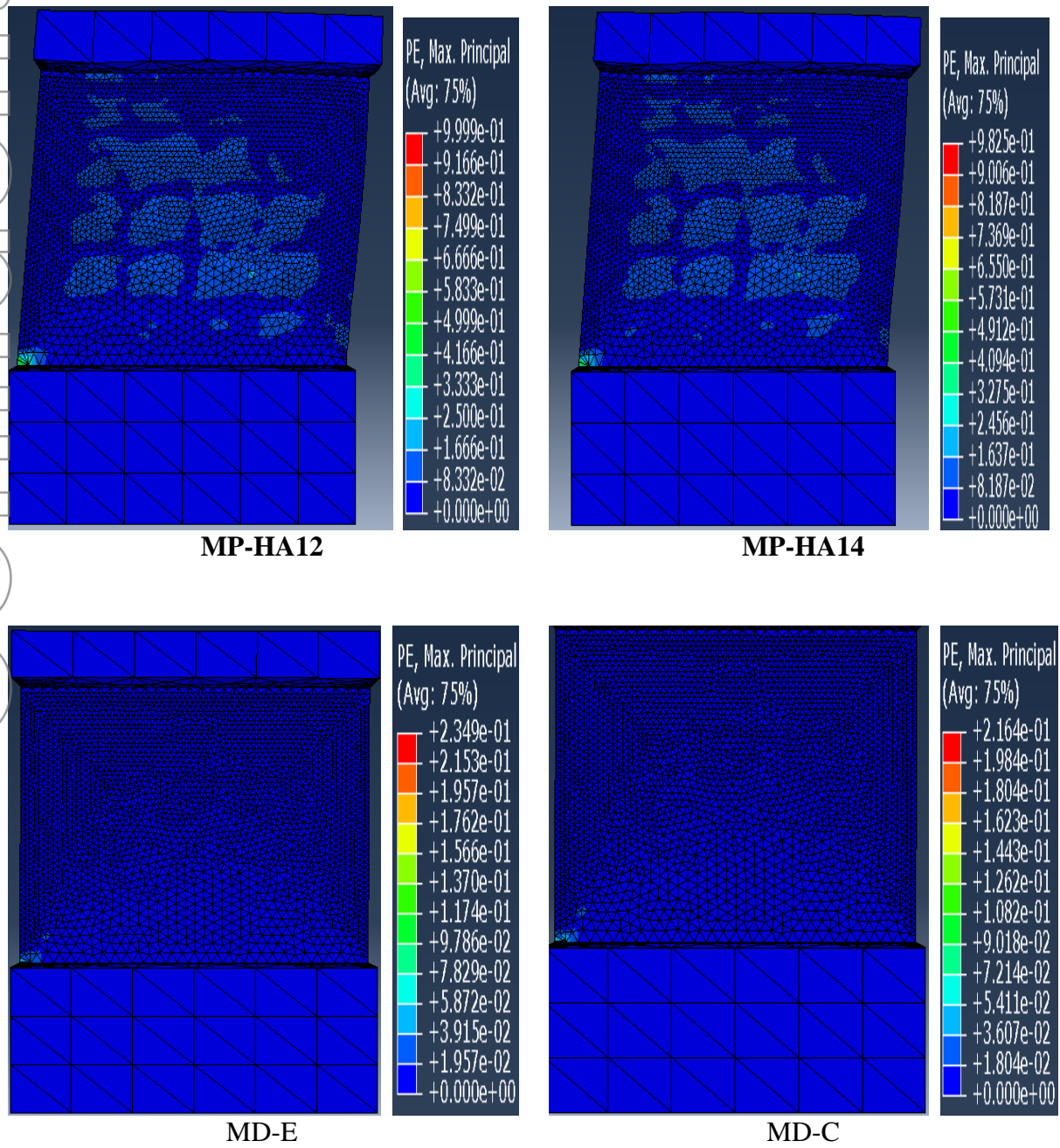
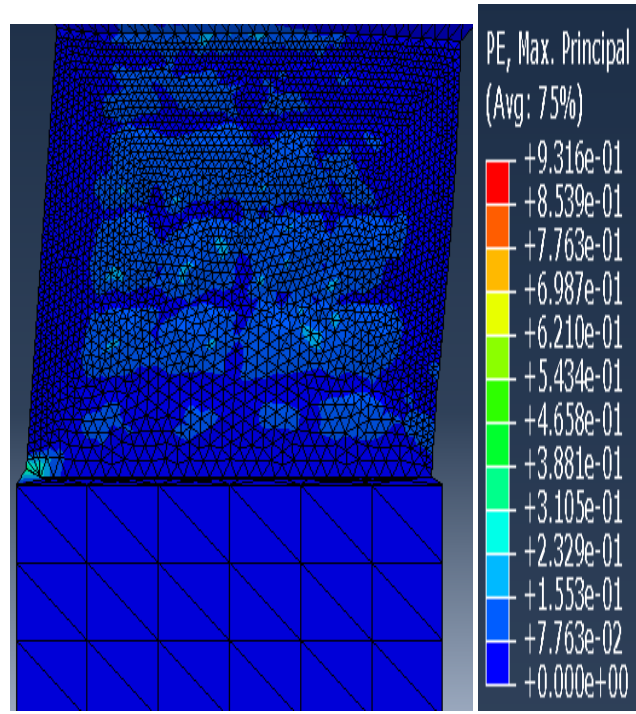


Figure V.20 : Comportement global en termes de déformation dans le béton.



MC

Figure V.20 : Comportement global en termes de déformation dans le béton.

Les déformations dans la région centrale du voile classique (MC) sont de l'ordre de 10^{-1} , Dans le cas des modèles MP-HA12 et MP-HA14, elles sont du même ordre de grandeur que le MC, mais on note une réduction de 28.18% pour le MP-HA12 et 29.44% pour le MP-HA14. Le renforcement en barres diagonales réduit les déformations suivant les bielles et à l'encastrement, elles sont de l'ordre de 10^{-2} , avec une réduction de 91.58% pour le MD-E et 93.86% pour le MD-C .

V.3.1.3. En termes de déformation dans les aciers :

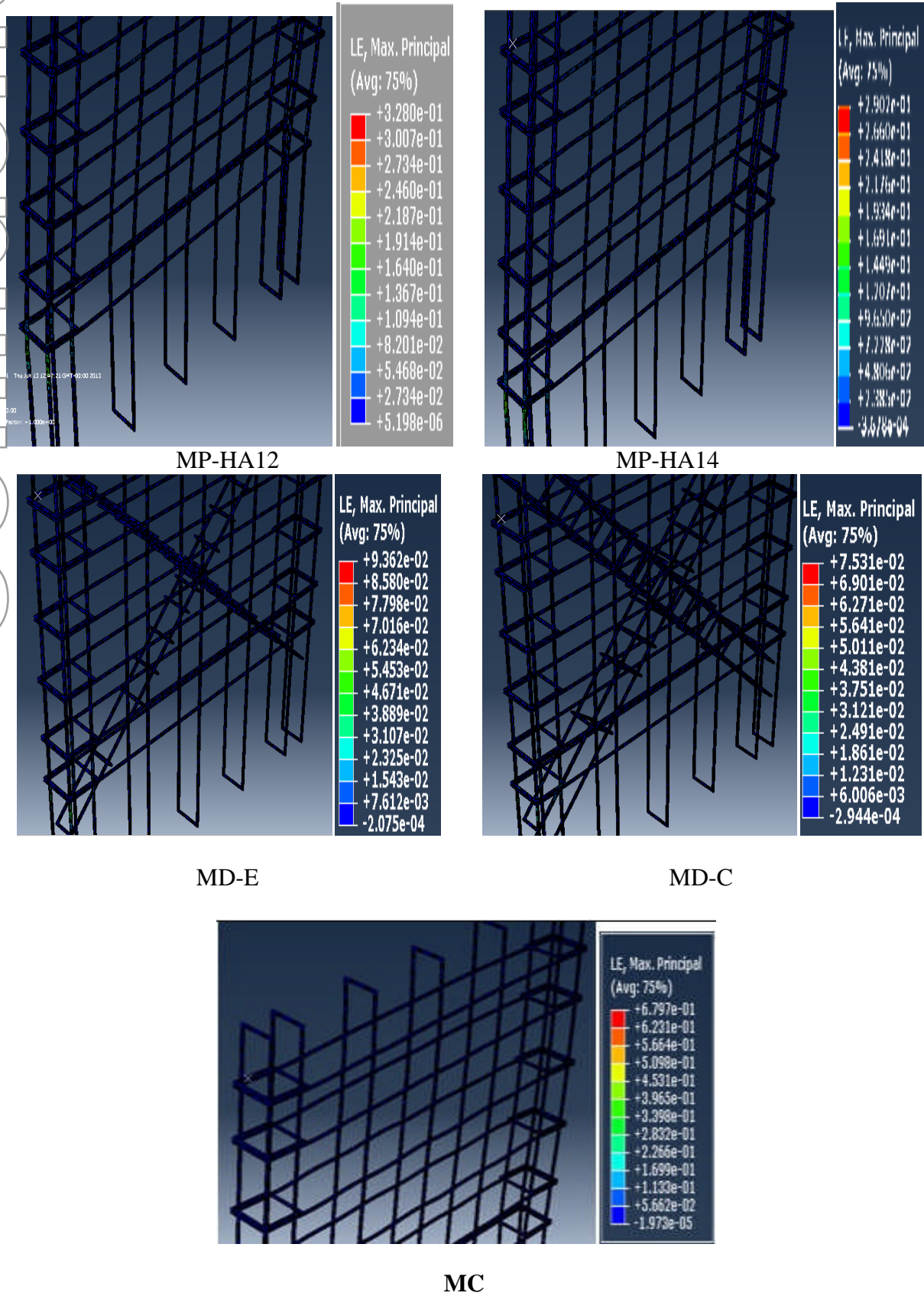


Figure V.21 : Comportement global en termes de déformation dans l'acier.

En termes de déformation, le modèle classique MC a subi des déformations apparentes de l'ordre de 10^{-1} (déformation maximale égale à 1.13×10^{-1}), avec concentration dans les barres des potelets. On remarque une diminution des déformations dans les modèles MP-HA12 et MP-HA14, assez considérable de l'ordre de grandeur de 10^{-2} , d'un pourcentage de 75.84% pour le MP-HA12 et 78.93% pour le MP-HA14.

Par contre, dans les modèles MD-E et MD-C les déformations sont de l'ordre de 10^{-3} , une réduction très importante. La déformation maximale diminue jusqu'à 99.33% pour le modèle MD-E et jusqu'à 99.47% pour MD-C.

V.3.1.4. En termes de contrainte :

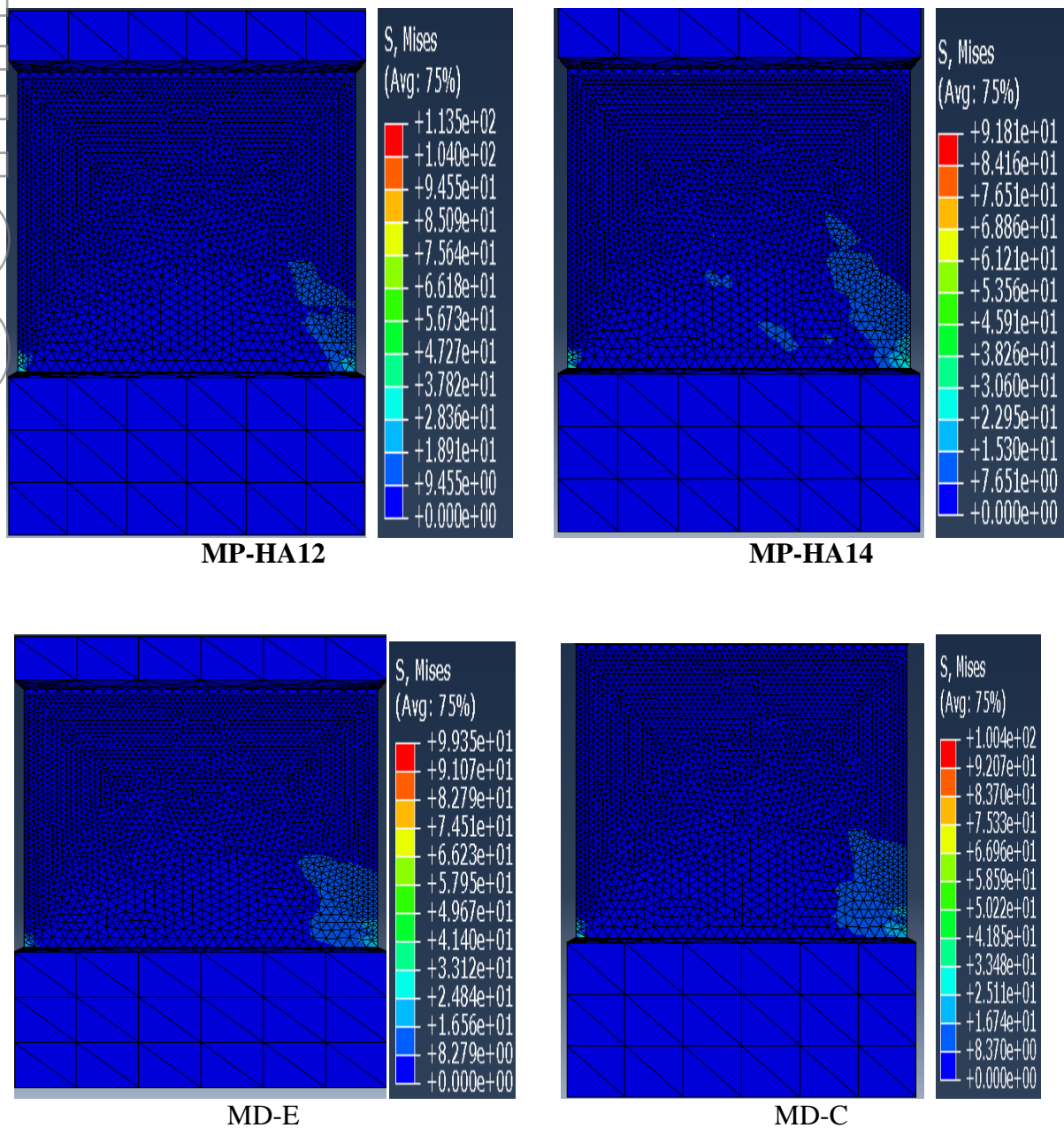
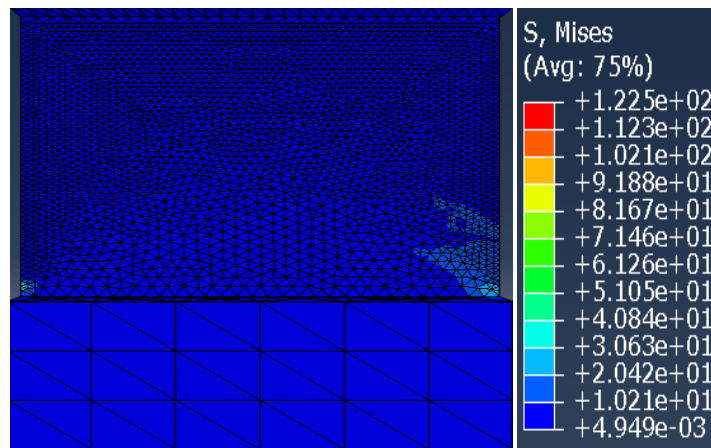


Figure V.22 : Comportement global en terme de contrainte.

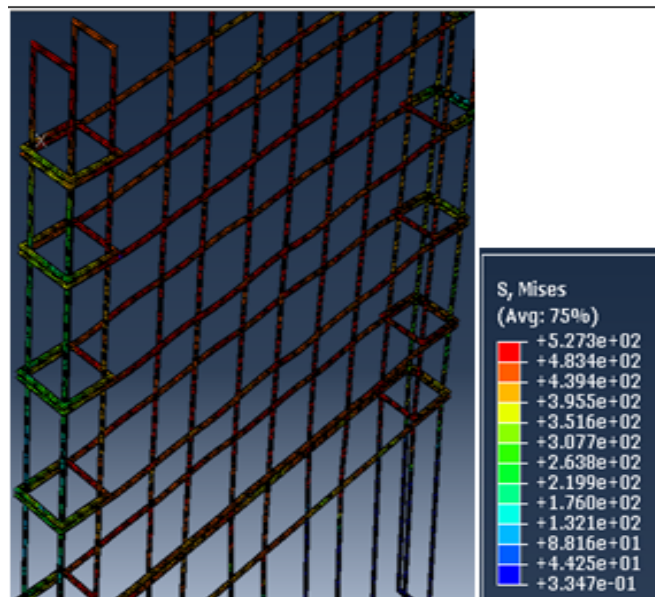


MC

Figure V.22 : Comportement global en terme de contrainte.

Sous l'effet d'une sollicitation horizontale, le modèle (MC) se déforme en prenant la forme d'un losange. Ce comportement provoque une rupture par traction à l'extrémité gauche de l'encastrement, et, un écrasement du béton à l'extrémité droite de celui-ci, ainsi on remarque une concentration de contrainte dans ces zones la. On note une réduction des contraintes dans les quatre autres modèles : 5.4 % pour le MP-HA12, 23.5% pour le MP-HA14, 44.8% pour le MD-C et 44.2% pour le modèle MD-E.

V.3.1.4. En terme de contrainte d'aciers:



MC

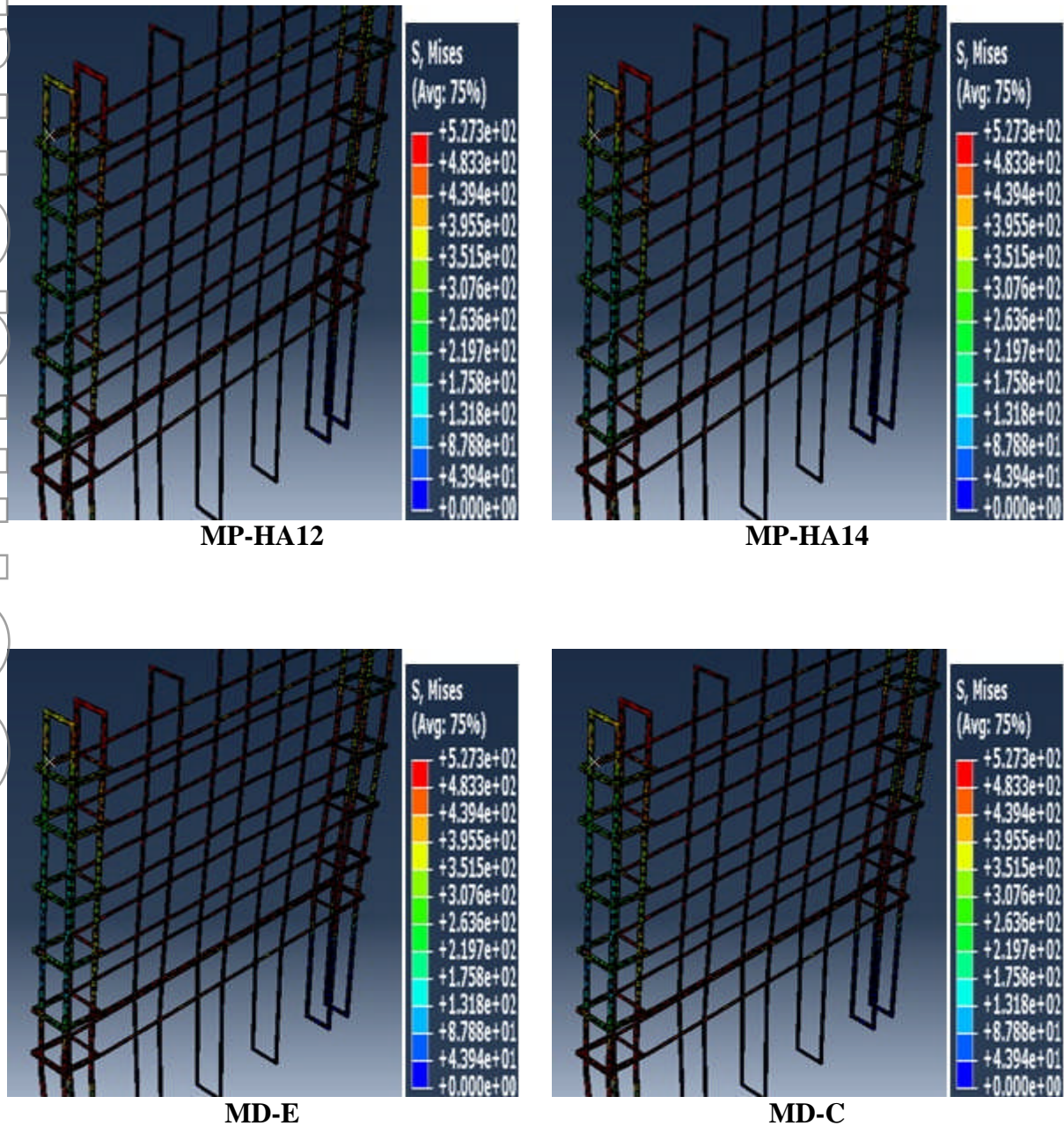


Figure V.23 : Comportement global en terme de contrainte d'acier.

Dans les trois modèles (MC, MP-HA12, MP-HA14), On remarque une plastification des armatures verticales et horizontales suivant la diagonale, ce qui explique les grands dommages dans le béton suivant cette direction. A la jonction voile-semelle, apparait une plastification des armatures verticales des potelets

Par contre, l'incorporation des aciers suivants les diagonales à permet de soulager les armatures verticales et horizontales. On remarque que les armatures diagonales se sont plastifiées confirmant que les efforts sont bien véhiculés suivant ces directions.

V.3.1.5. Comparaison des courbes de capacité :

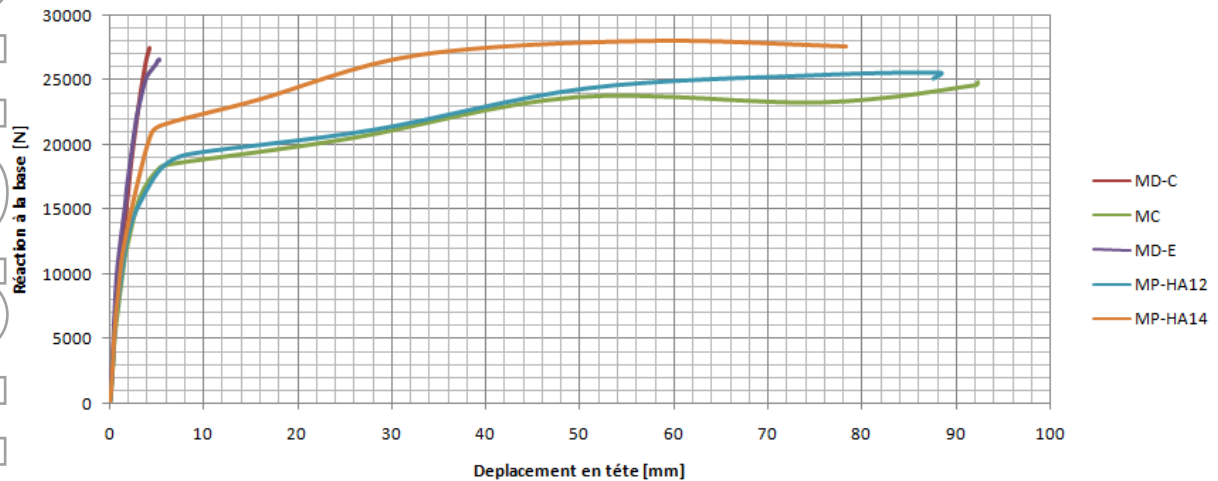


Figure V.24 : Les Courbes de capacité des cinq modèles.

Ces courbes « force-déplacement » décrivent le comportement global des différents modèles simulés, en représentant leurs capacités résistantes issues de l'analyse non linéaire effectuée en poussée progressive.

En analysant ces courbes, on remarque que les cinq modèles présentent pratiquement le même comportement jusqu'à un déplacement égal à 2[mm]. on note aussi que la capacité portante du modèle classique (MC) est égale à 24882 [N] engendrant un déplacement de 92,3728[mm].

Lorsqu'on a augmenté les sections de potelet, en HA12 et HA14, la capacité portante a aussi augmenté respectivement de 37,20% et 76%.

La capacité portante s'est accrue par rapport au modèle classique MC, pour le modèle MD-E d'un pourcentage égale à 96,10% et de 96.21% pour le modèle MD-C.

V.3.2.Analyse locale:

V.3.2.1. Courbes e de d'endommagement :

V.3.2.1.1.Zone centrale :

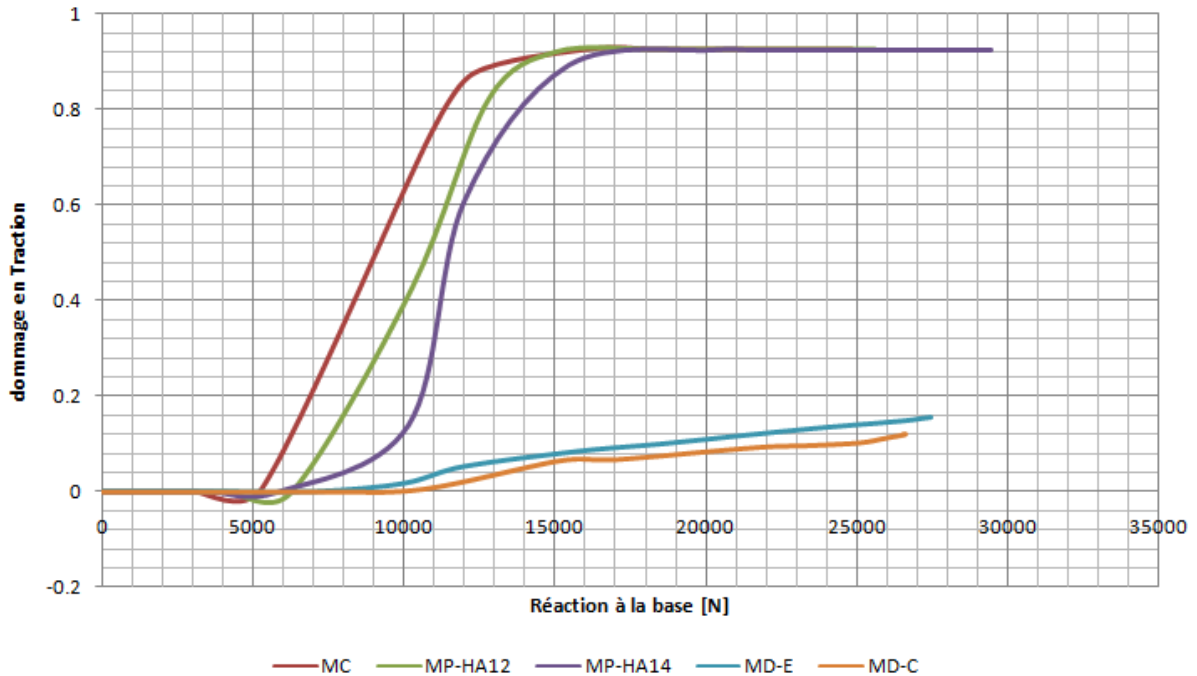


Figure V.25 : Courbes d'endommagement des modèles.

On remarque que l'endommagement dans la zone centrale a diminué dans tous les modèles renforcé mais avec des pourcentages plus au moins importants.

Pour les modèles renforcés au niveau des potelets, on a une réduction d'endommagement de 33.33% pour le MP-HA12, 52 % pour le MP-HA14, 96.66% pour le MD-C et le modèle MD-E 98.33%.

V.3.2.1.1.Zone à la base des modèles :

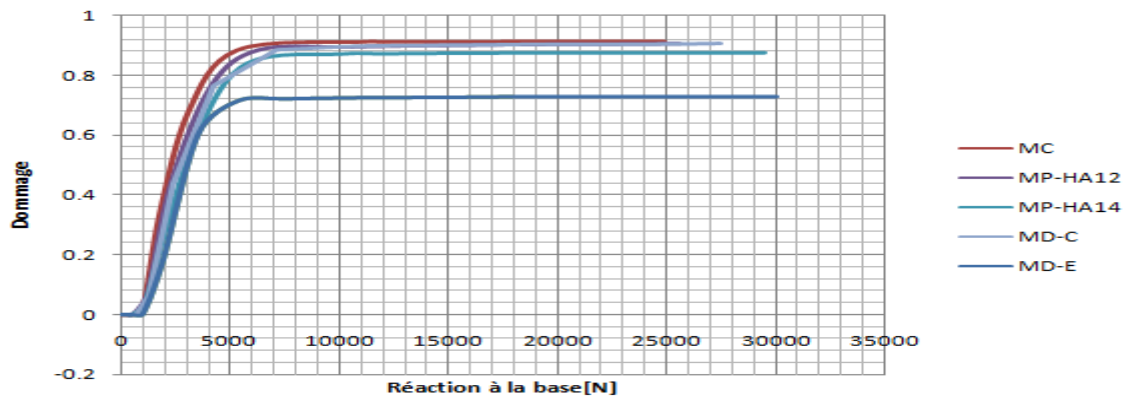


Figure V.26 : Courbes des dommages à la base des modèles.

A partir des courbes « endommagement-force » de la figure V.26 , on observe une réduction de l'endommagement dans les quatre modèles renforcés avec des pourcentages différents

Pour le modèle MP-HA12 on a une réduction de 2%, pour le MP-HA14 13%, 10.80% pour le MD-C et de 23.9% pour le MD-E.

V.3.2.2.Courbes des déformations pour le béton :

V.3.2.2.1.Courbes des déformations en zone centrale :

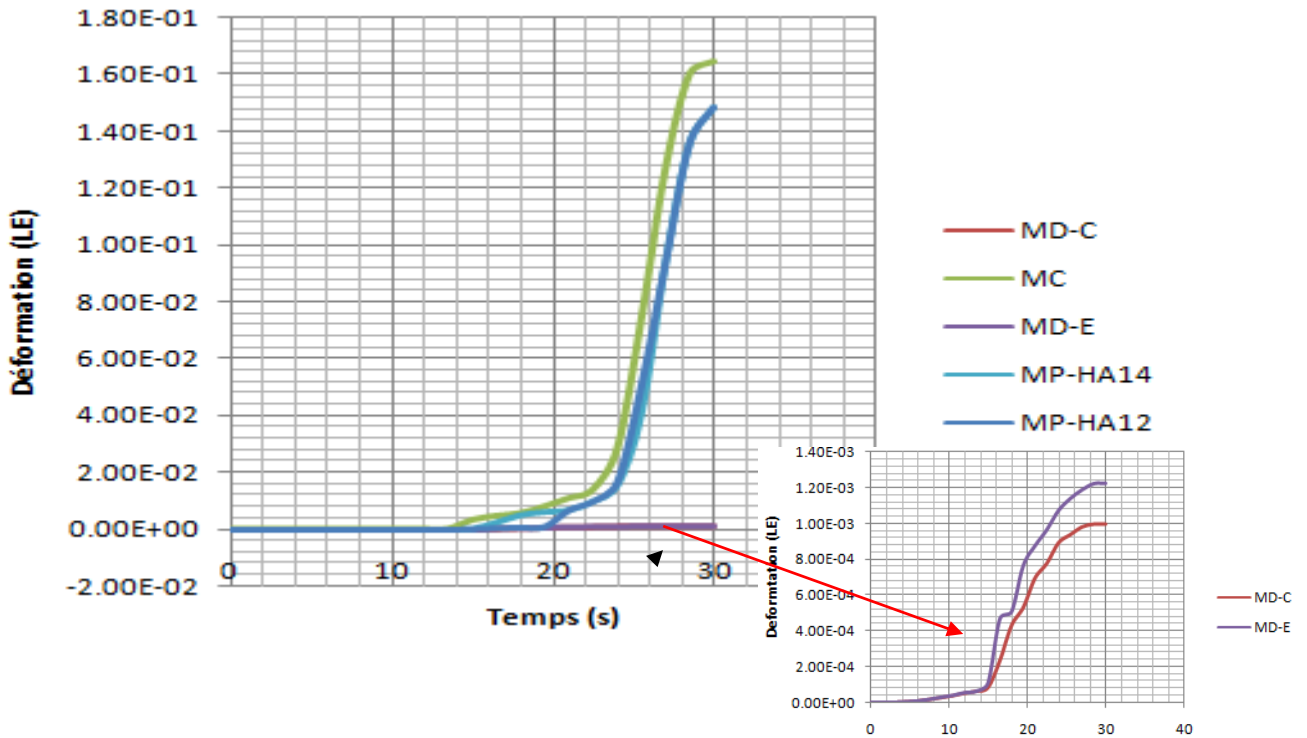


Figure V.27 : Les courbes de déformation dans la zone centrale.

En observant cette (Figure V.27), on remarque que les courbes de déformations des modèles MP-HA12 et HA-14 se confondent et le pourcentage d'apport est d'environ de 12.5 % pour les deux modèles, et pour les deux autres (MD-C et MD-E) est d'environ 99.37 %.

V.3.2.2.2. Courbes des déformations à la base :

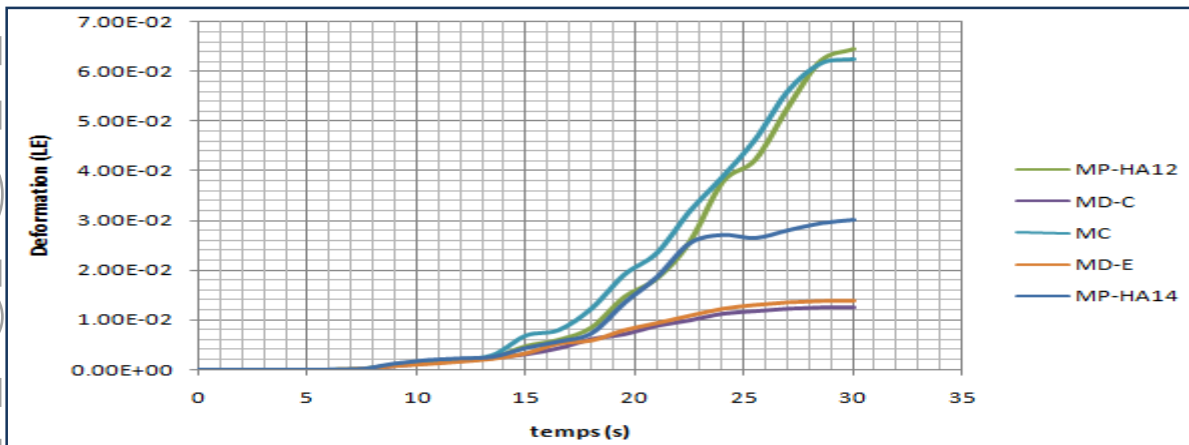


Figure V.28 : Les courbes des déformations à la base.

On remarque dans ce cas (**Figure V.28**), que les déformations dans les cinq modèles commencent et évoluent de la même façon jusqu'à t=14 s, à partir de ce point les modèles divergent et se déforment différemment.

On note une réduction des déformations dans les quatre modèles renforcé, avec des pourcentages différents : 6.9% pour le modèle MP-HA12, 34.88% pour MP-HA14, 69.77% pour le MD-E et de 72.09% pour le modèle MD-C.

V.3.2.3. Courbes de contrainte pour le béton:

V.3.2.3.1. Courbes de contrainte dans la zone centrale:

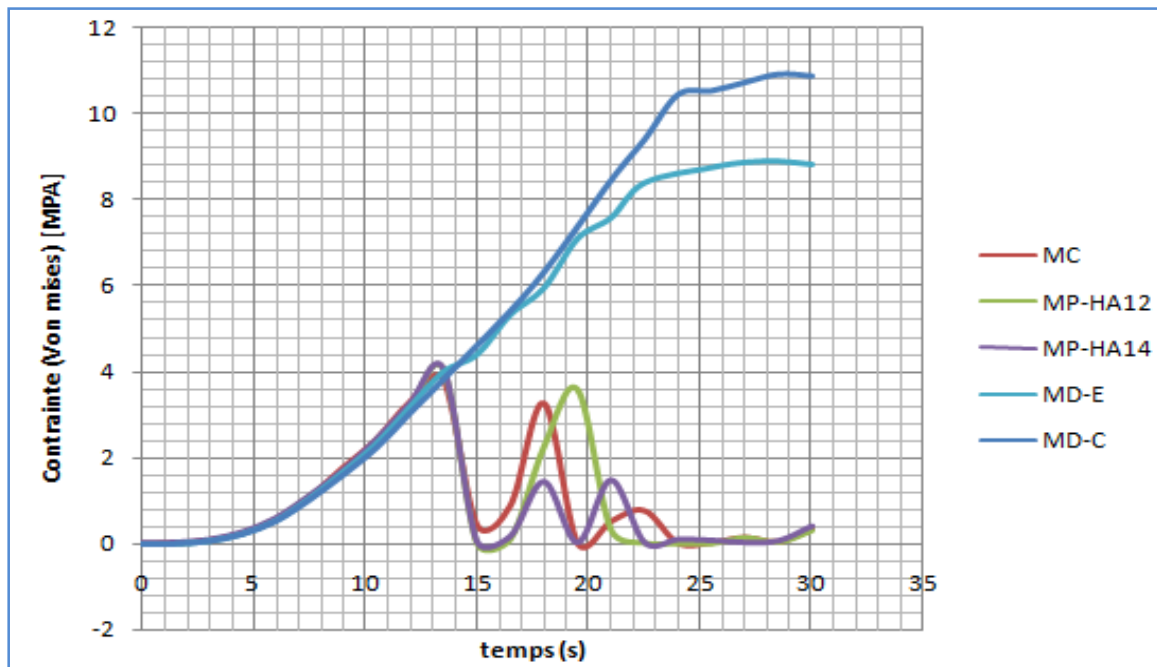


Figure V.29 : Courbes de contrainte dans la zone centrale.

On remarque dans la figure ci-dessous que jusqu'à $t=12.5$ s les cinq modèles se comportent de la même façon.

A partir de ce point, les modèles « MC, MP-HA12, MP-HA14 » ont un comportement fragile avec contraintes maximales égales respectivement à : 3.80 MPA ,4.04 MPA et 4.06 MPA.

Par contre, pour les modèle MD- E et MD-C, on constate une augmentation des contraintes, ce qui démontre une mobilisation de l'effort pour les bielles de compression diagonales.

V.3.2.3.2.Courbes de contrainte à la base :

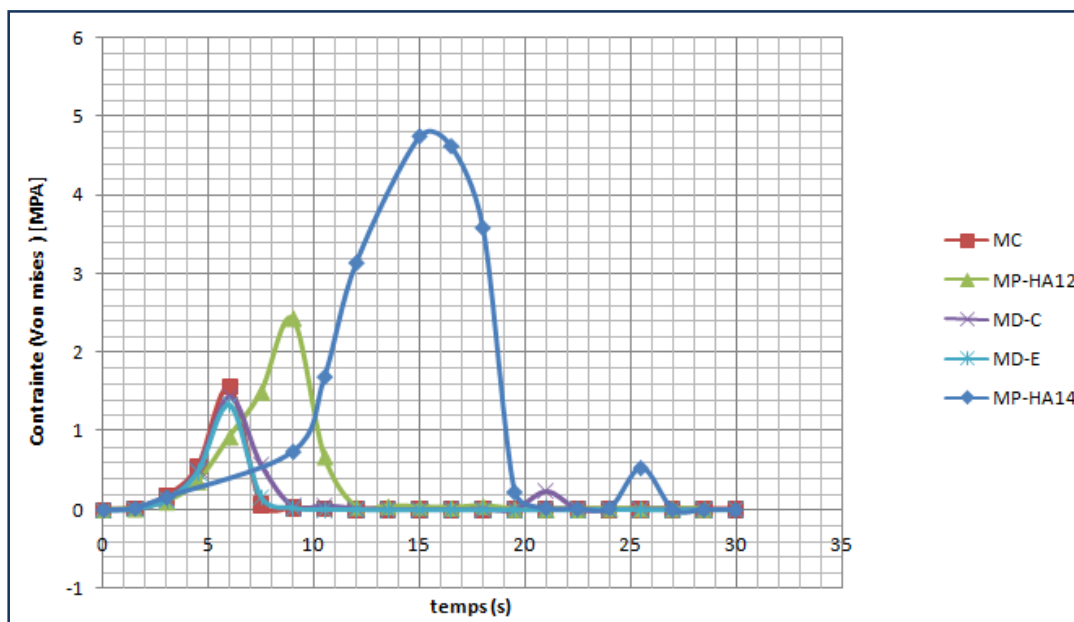


Figure V.30 : Courbes de contrainte dans à la base.

On remarque dans la figure ci-dessous que jusqu'à $t= 4$ s les cinq modèles se comportent de la même façon.

Les cinq modèles ont un comportement fragile, avec des contraintes maximales différentes. Le modèle classique MC atteint une contrainte maximale égale à 1.55 [MPa], pour le MD-C elle est de 1.48 [MPa] ,1.33 [MPa] pour MD-E, 2 .42 [MPa] pour le MP-HA12 et de 4.75 [MPa] pour le modèle MD-HA14.

V.3.2.4.courbes « contrainte-déformation » pour les aciers:

V.3.2.4.1. courbes « contrainte-déformation » pour les aciers horizontaux :

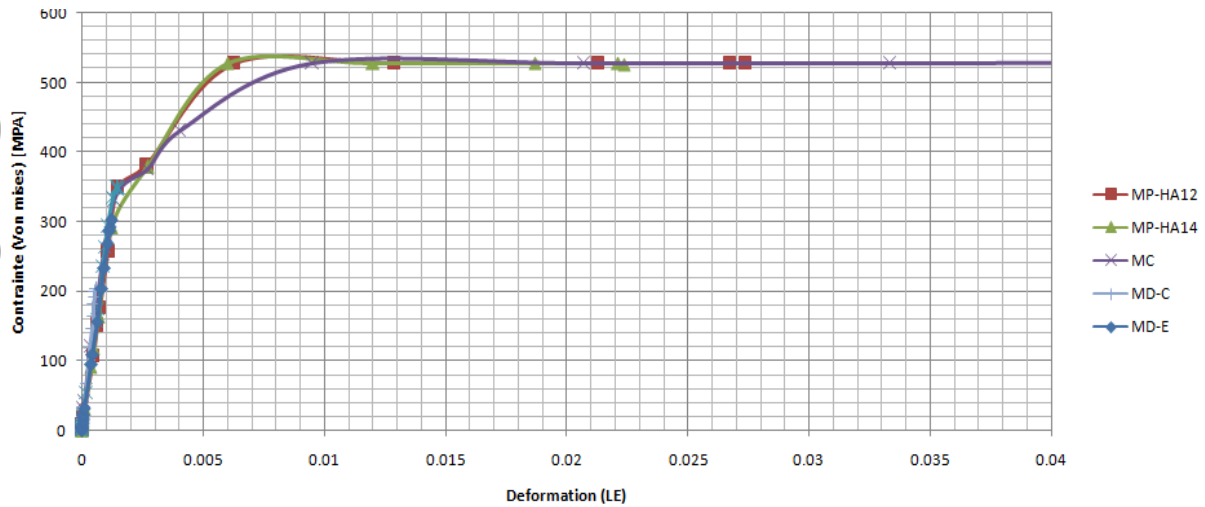


Figure V.31 : courbes « contrainte-déformation » pour les aciers horizontaux.

Initialement, les courbes contraintes déformations ont une allure linéaire jusqu'à une valeur qui proche de 300 [MPa] pour les cinq modèles, ce qui signifie que les barres d'aciers horizontales travaillent dans le domaine élastique.

A partir d'un taux de déformation qui est de 0.001, on remarque que les courbes ont des allures non linéaires, ce qui traduit que les barres horizontales travaillent en plasticité.

Pour les modèles « MC, MP-HA12 et MP-HA14 » à partir d'une déformation qui est un peu plus de 0.01, on a une plastification totale des barres horizontales,

Par contre, on note que les armatures du modèle MD-E se sont peu plastifiées avec une contrainte maximale de 350 MPA. Dans le voile renforcé MD-C, on a une contrainte maximales qui ne dépasse pas 210 MPA.

V.3.2.4.2. courbes « contrainte-déformation » pour les aciers verticaux :

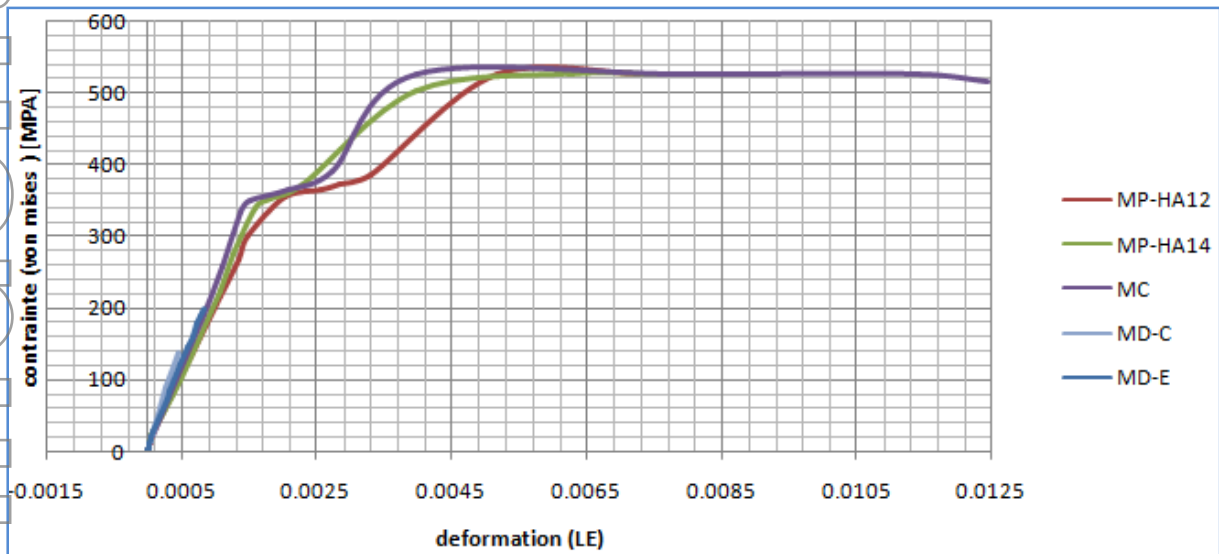


Figure V.32 : Courbes « contrainte-déformation » pour les aciers verticaux.

Au commencement, les courbes contraintes déformations des modèles « MC, MP-HA12 et MP-HA14 » ont une allure linéaire jusqu'à une valeur qui proche de 340 [MPa], ce qui signifie que les barres d'aciers verticaux travaillent dans le domaine élastique. A partir d'un taux de déformation qui est de 0.001, on remarque que les courbes ont des allures non linéaires, les barres verticales travaillent en plasticité.

Par contre dans le modèle MD-E, il n'y a pas de plastification des aciers, et la valeur de la contrainte est de 200 MPA. Dans le voile renforcé MD-C, on note une valeur de la contrainte maximale égale 130 MPA.

V.3.2.4.3. Courbes « contrainte-déformation » pour les aciers diagonaux :

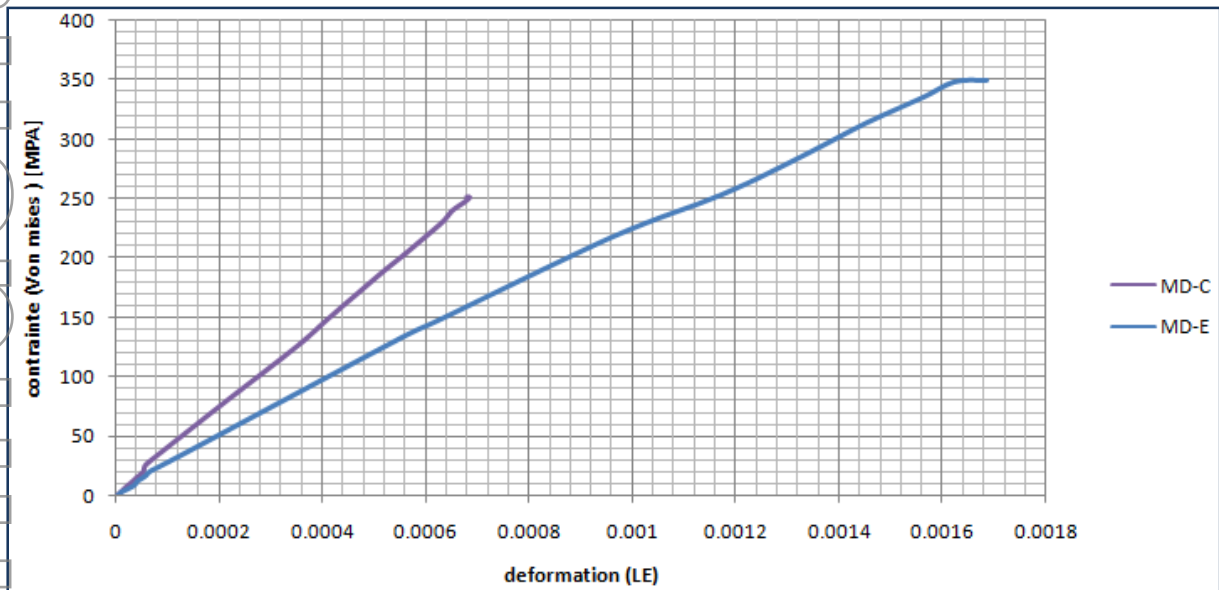


Figure V.33 : Courbes « contrainte-déformation » pour les aciers diagonaux.

Initialement, les courbes contraintes déformations ont une allure linéaire jusqu'à une valeur proche de 350 [MPa] pour le modèle MD-E et de 250 [MPa] pour le modèle MD-C, ce qui signifie que les barres diagonales travaillent dans le domaine élastique.

Des courbes contraintes déformations dans les armatures des différents modèles, on déduit que le renforcement en barres diagonales empêchent la plastification total des armatures verticales, réduit le palier de plasticité et fait travaillé les aciers dans leurs domaines élastiques.

Ce projet nous a permis de découvrir l'analyse non linéaire à travers la simulation d'un voile en béton armé avec le logiciel ABAQUS et d'acquérir de nombreuses connaissances en ce qui concerne la modélisation numérique.

D'un point de vu résultats de la simulation :

1^{er} comparaison :

Cette comparaison a été faite entre les modèles de voiles en béton armé renforcés en diagonales avec ou sans cadres (ou épingles). Cette analyse nous a permis de mettre en évidence l'apport des cadres (ou épingles) dans le comportement global et local de l'élément et ainsi sélectionner les modèles les plus performants pour la 2^{ème} comparaison.

1. Analyse globale :

- Les épingles dans les modèles MD-E apportent un pourcentage en capacité portante égal à 4%.
- l'endommagement a été réduit dans le modèle MD-E par rapport à MD4, particulièrement dans la zone centrale et tout au long de la bande diagonale.
- Les cadres dans les modèles MD-C apportent un pourcentage de capacité portante égal à 8 %.
- Réduction du taux d'endommagement dans le modèle MD-C par rapport au MD8 dans la zone centrale et tout au long de la bande diagonale, ainsi qu'au niveau de la base et à la tête du voile.

2. Analyse locale :

- une réduction de l'endommagement a été observé dans le modèle MD-E par rapport au MD4, de 92 % en zone centrale et de 54.50% à la base du voile.
- une réduction de l'endommagement a été observé dans le modèle MD-C par rapport au MD8, de 90% en zone centrale.

les modèles MD-E et MD-C ont été retenus pour la suite, leurs apports que ce soit en comportement local ou global est très importants par rapport aux modèles sans cadres (ou épingles). Cet apport est engendré par le phénomène de ligature des fissures dû à l'ajout des cadres (ou épingles).

2^{ème} comparaison :

Cette comparaison s'effectue entre cinq modèles, y compris les deux modèles déjà retenus dans la première comparaison, globalement et localement en terme de capacité portante, d'endommagement, déplacement, déformation, contrainte .

1. Analyse globale :

- En termes de capacité portante, une augmentation a été noté pour les modèles MP-HA12 et MP-HA14, respectivement de 37,20% et 76%. Pour le modèle MD-E d'un pourcentage de 96,10% et de 96.21% pour le modèle MD-C.
- En termes de déplacement, une diminution du déplacement maximale dans les modèles renforcés a été notée, de 9.50% pour le modèle MP-HA12 ,de 19.78% pour le modèle MP-HA14, de 93.87% pour le MD-E et de 95.79% pour le MD-C.
- une réduction des dommages dans les modèles MD-C et MD-E dans la zone centrale et tout au long des diagonales est observé .Par contre, amélioration minime a été noté dans MP-HA12 et MP-HA14 à la base du voile.
- En terme de déformation dans le béton, on a noté une réduction de 28.18% pour le MP-HA12 et 28.18% pour le MP-HA14.l'apport est plus important dans les modèles renforcés en diagonal, de 91.58% pour le MD-E et de 93.86% pour le MD-C .
- En termes de déformation dans les aciers, des réductions de 75.84% pour le MP-HA12 et 78.93 % pour le MP-HA14 sont notées, ainsi que 99.33% pour le modèle MD-E et jusqu'à 99.47% pour MD-C, un apport qui est très important.
- On a observé dans les modèles « MC,MP-HA12 et MP-HA14 » une plastification totale des armatures verticales et horizontales ,contrairement aux armatures des modèles MD-C et MD-E qui ne se plastifient pas .

2. Analyse local :

- Dans la zone centrale du voile, On note réduction d'endommagement de 33.33% pour le MP-HA12, 52% pour le MP-HA14, 96.66% pour le MD-E et le modèle MD-C de 98.33%. A la base, une réduction moindre de 2 % pour le MP-HA14 ,pour le MP-HA14 13 %, 10.80% pour le MD-C et de 23.9% pour le MD-E.
- En terme de déformation, on a un apport de 12.5 % pour les deux modèles(MP-HA12 et MP-HA14), et pour les deux autres (MD-C et MD-E) de 99.37 % en zone centrale.
- Le renforcement en diagonales empêche la plastification des armatures du voile et fait travaillé les aciers dans leurs domaines élastiques.

Ces conclusions nous permettent de mettre en évidence l'apport des cadres (ou épingles) dans le comportement du voile, et nous amènent à déduire que le renfort des voiles en diagonale est efficace soit en termes de capacité portante, de déplacement, de contrainte, et de déformation.

Toutefois pour réussir à tirer des conclusions représentatives et explicatives, Il ya lieu d'approfondir l'étude :

- ✓ En s'intéressant non seulement aux fissures en diagonale mais aussi au glissement qui apparait à la base du voile .
- ✓ En variant l'angle d'inclinaison des aciers diagonaux.
- ✓ Compléter ce travail avec une étude expérimentale.

Références bibliographiques :

- [1] RPA 99 ver 2003, « règlement parasismique algérien, 1999 version 2003 ».
- [2] Jean PERCHAT, Béton armé : règles BAEL.
- [3] Etienne GALLITRE, « Fissurations de voiles en béton armé soumis a des sollicitations sismique, évaluation des ouvertures des fissures », *thèse de doctorat* (2008) .
- [4] HAMMAR.R, « Etude de la réponse des éléments bidimensionnels en béton armé sous l'action des charges monotones en tenant compte de l'effet d'engrènement et de la densité du maillage », *thèse de magister* (2011).
- [5] Chen W.F. , [1982]. Plasticity in reinforced concrete □. New York: McGraw-Hill Bookstore.
- [6] Ramtani. S, « Contribution à la modélisation du comportement multiaxial du béton endommagé avec description du caractère uniaxial », *thèse de doctorat* (1990).
- [7] Xuân Huy NGUYEN , « Vulnérabilité des structures en béton armé à voiles porteurs: expérimentation et modélisation », *thèse de doctorat* (juin 2006).
- [8] EUROCODE.
- [9] Olivier GAGLIARDIN, « Cours de béton armé », (2004-2005).
- [10] Kezmane A, « Etude d'un voile renforcé avec des barres diagonales internes par abaqus », *thèse de master*, (2010).
- [11] Hervé Oudin , « Introduction à la plasticité », *école centrale de Nantes*, (2009).
- [12] Amir Mazaheri et V .Davidovici , « Renforcement parasismique des bâtiments , Guide méthodologique pour le renforcement préventif ».
- [13] Rapport du seisme de Boumerdes , Mai 2003, Dynamique Concept – V. Davidovici .
- [14] Cours de Béton armé, Dr Boevaeva.
- [15] Belkheir M.A. , « Influence de la disposition des voiles sur la performance sismique du bâtiments », *thèse de magister*, (2012).
- [16] Nicolae ILE, « Contribution a la compréhension du fonctionnement des voiles en béton arme sous sollicitation sismique: apport de l'expérimentation et de la modélisation a la conception », *thèse de doctorat*, (2000).
- [17] V. Davidovici, « Conception et réalisation d'hôpitaux en zone sismique », *chapitre 5*, (2007).
- [18] Panagiotis KOTRONIS , « Cisaillement dynamique de murs en béton arme modèles simplifiés 2d et 3d », *thèse de doctorat*, (2000).
- [19] Osterles et al, « Earthquake resistant structural walls tests of isolates walls », Report to the national science foundation , (1976) .
- [20] ESSADI .S, « Comportement non linéaire des bâtiments nucléaires constituées de voile à faible élancement sous chargement alterné » *thèse de doctorat* ,1985 .

- [21] « Règles de construction parasismiques », règles PS applicable aux bâtiments dit PS92,1995.
- [22] Miloud HEMSAS , « Modélisation par macroélément du comportement non linéaire des ouvrages à voiles porteurs en béton armé sous action sismique » *thèse de doctorat* ,Avril 2010 .
- [23] Formulaire de béton armé, chapitre II : construction en murs porteurs.
- [24] Frédéric COLLIN et al « Modélisation des voiles court sous cisaillement » dans le cadre du programme CEOS.fr, 2013.
- [25] Qazi Samiullah et al, « Renforcement des voiles courts en béton armé par un matériau composite », université de Lyon ,31^{ème} rencontre de l'AUGC ,ENS, Cachan, 29au 31 Mai 2013.
- [26] Sinan Altin, Yagmur Koprama & Mehmet Baran, « Strengthening of RC walls using externally bonding of steel strips », 17 Décembre 2012.
- [27] Ali KEZMAN, « Conception d'un ferrailage de voiles courts, soumis à un effort sismique prépondérant : simulation numérique», *Thèse de master*, 15 juillet 2010.
- [28] Ali KEZMAN, « Simulation numérique des voiles en béton armé renforcés par un matériau composite » , 31^{ème} rencontre de l'AUGC ,ENS, Cachan, 29au 31 Mai 2013.
- [29] Ali KEZMAN, « Simulation numérique des voiles en béton armé renforcés par un matériau composite »,2011.
- [30] Document ABAQUS V.6,10 , « Logiciel de calculs numériques »
- [31] BOUKAIS Said, « Simulation of shear walls behavior, strengthened by composite materials », 2012.
-