

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du diplôme de master
de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème

Modélisation du comportement non linéaire des murs en maçonneries renforcées par des matériaux composites

Présenté par :

M^r BRAHIMI Hakim

Devant le jury composé de :

Mr AKKOUCHE Karim	Maitre de conférences à l'UMMTO	Président
Mr MERAKEB Seddik	Maitre de conférences à l'UMMTO	Examineur
Mr SISALEM Abdelmadjid	Maitre de conférences à l'UMMTO	Encadrant
Mr CASCARD Alessio	Professeur à UniCal, Calabre, Italie	Co-Encadrant

Promotion : 2024/2025

Remercîment

*J'exprime toute ma gratitude à **Mr SISALEM Abdelmadjid**, Maitre de conférences à l'université de Tizi-Ouzou mouloud Mammeri, directeur de ce travail, pour son encadrement exceptionnel. Je lui suis particulièrement reconnaissant de m'avoir offert la possibilité de travailler dans le contexte de ces programmes de recherches. Outre ses qualités scientifiques, je le remercie aussi pour sa disponibilité, sa gentillesse et sa sensibilité.*

*J'exprime tous mon respect à **Prof Alessio CASCARDI** de l'université de Calabre, Italie, co-directeur de ce travail pour sa contribution à l'accès à la documentation scientifique et de nous avoir fournir toute les données expérimentales.*

*Je remercie également Messieurs **MERAKEB Seddik**, et **AKKOUCHE Karim** d'avoir accepté de faire partie de mon jury, et qui vont apporter des commentaires et critiques toujours constructives.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude à **Mourad, Melissa, Mouloud, Sonia, Sabrina et Tina**.*

*Merci pour votre **soutien constant**, vos **encouragements sincères** et les **moments partagés** tout au long de ce parcours universitaire.*

Votre présence a rendu cette aventure bien plus riche, plus humaine et inoubliable.

Je suis fier d'avoir cheminé à vos côtés.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à **mes deux piliers de vie**, mon père et ma mère, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour leur **soutien inconditionnel** et leurs **encouragements constants** tout au long de mon parcours.*

C'est grâce à leur présence, leur patience et leurs prières que j'ai pu franchir chaque étape.

Que Dieu leur accorde une longue vie, la santé et la paix.

*A mes frères et sœurs surtout **Merzouk** pour sa contribution*

A ma grand-mère

Je souhaite que ce travail soit à la hauteur de tout ce qu'ils ont pu faire pour moi.

Hakim

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction générale 1

Chapitre I : synthèse bibliographique

I.1	Introduction.....	4
I.2	Aperçu sur la brique de maçonnerie	4
I.2.1	Définition.....	4
I.2.2	Composition physico-chimique	5
I.2.3	Comportement mécanique de la brique	7
I.2.3.1	Comportement sous compression axial.....	7
I.2.3.2	Comportement sous traction... ..	9
I.3	Mortiers à base de liants minéraux	11
I.3.1	Mortiers à base de Chaux Hydraulique Naturelle (NHL).....	12
I.3.2	Mortiers à base de Ciment Portland.....	14
I.4	Confinement des murs de maçonnerie.....	16
I.4.1	Nécessité du confinement du mur en brique.....	17
-	Résister à la fissuration et à l'éclatement	17
-	Augmenter la résistance en compression.....	17
-	Améliorer la ductilité globale.....	17
-	Sécuriser les structures anciennes ou en zone sismique	18
I.4.2	Méthodes de confinement des murs (Renforcement)	18
I.4.2.1.	Confinement par chaînages en béton armé	18
I.4.2.2	Confinement par ceinturage métallique	18
I.4.2.3	Confinement par composites (FRCM, FRP).....	19
I.5	Revue bibliographique	21
I.6	Conclusion	25

Chapitre II : Modélisation et simulation numérique

II.1.	Introduction.....	27
II.2.	Présentation du modèle expérimentale	27
II.3.	Simulation avec ABAQUS	29
II.3.1.	Présentation du logiciel.....	29
II.3.2.	Étapes de simulation	31
-	MODULE PART	32
-	MODULE PROPERTY	33
-	MODULE ASSEMBLY	34
-	MODULE STEP.....	34
-	MODULE INTERACTION	35
-	MODULE LOAD	36
-	MODULE MESH	36
-	MODULE JOB	37
-	MODULE VISUALISATION.....	37
II.4.	Loi de comportement des matériaux.....	38
II.4.1.	Modèles pour la brique et les mortiers	38
II.4.2.	Modélisation des composites AR	42
II.5.	Stabilité de maillage	42
II.6.	Présentation des modèles.....	43
II.7.	Conclusion	44

Chapitre III : Résultats, analyses et discussion

III.1	Introduction.....	47
III.2	Validation des modèles	47
III.2.1	Validation du modèle URM.....	47
III.2.2	Validation du modèle NHL.....	48
III.2.3	Validation du modèle FRCM.....	50
III.3	Discussion des résultats de la simulation.....	53
III.3.1	Mur témoin URM.....	53
III.3.2	Mur confiné NHL.....	57
III.3.3	Mur confiné FRCM.....	62
III.5	Conclusion	68

Chapitre IV : Etude paramétrique

IV.1	Introduction	70
IV.2	Effet de l'épaisseur de matrice NHL.....	70
IV.3	Effet dimension de la maille du tissu AR.....	73
IV.4	Effet de l'épaisseur de AR Glass Fabric	75
IV.5	Conclusion... ..	78
	Conclusion générale	80
	Références bibliographiques	82

Liste des figures

Figure I.1. La construction royale en Mésopotamie	4
Figure I.2. Différentes briques	5
Figure I.3. Courbe force-déplacement typique représentant le comportement d'une brique soumise à un chargement compression.....	8
Figure I.4. Courbe force-déplacement typique représentant le comportement d'une brique soumise à un chargement de traction.....	9
Figure I.5. Sac commercialisé de chaux hydraulique naturelle	12
Figure I.6. Courbes Force – déplacement des éprouvettes de mortier NHL sous compression.....	13
Figure I.7. Courbes Force – déplacement des éprouvettes de mortier NHL sous flexion.....	14
Figure I.8. Exemple de la poudre de ciment portland.....	14
Figure I.9. Exemple d'un sable fin utilisé dans la conception des mortiers	14
Figure I.10. Courbes de capacité des éprouvettes de mortier sous compression et traction...	15
Figure I.11. Les courbes typiques de contrainte-déformation de mortiers renforcés.....	16
Figure I.12. Les appareillages de construction des murs en maçonnerie.....	16
Figure I.13. Mécanisme de rupture de murs en maçonnerie sous cisaillement.....	17
Figure I.14. Confinement par chaînage en béton.....	18
Figure I.15. Confinement par chaînage en béton selon.....	19
Figure I.16. Confinement par chaînage en acier.....	19
Figure I.17. Exemple de fibre de verre AR.....	20
Figure I.18. Confinement par collage externe de PRF et FRCM	21
Figure I.19. Système de confinement par FRCM	21
Figure I.20. Courbe de capacité du système de confinement	22
Figure I.21. Système de confinement proposé par Zhanga.....	22
Figure I.22. Mode de rupture des murs confinées proposé par Zhanga	23
Figure I.23. Résultats expérimentaux et théoriques obtenus Zhanga	23
Figure I.24. Système de confinement proposé par Silvia Calo.....	24

Figure I.25. Modèle de prédiction de système confiné et témoin proposé par Silvia.....	24
Figure I.26. Système de confinement proposé par Belliazzi	25
Figure I.27. Résultats obtenu par Belliazzi.....	25
<hr/>	
Figure II.1. Dimensions du mur en brique expérimenté par Longo	27
Figure II.2. Conception du mur en brique renforcé par une matrice NHL.....	28
Figure II.3. Conception du mur en brique renforcé par une matrice NHL et un tissu	28
Figure II.4. Schéma de résolution d'un problème mécanique sous ABAQUS.....	31
Figure II.5. Les étapes de simulation d'ABAQUS	32
Figure II.6. Création des modèles géométriques le module part	33
Figure II.7. Création des lois de comportement des matériaux dans le module Property.....	34
Figure II.8. Assemblage des éléments de la structure dans le module Assembly	34
Figure II.9. Gestion des résultats et temps de calcul dans le module Step.....	35
Figure II.10. Gestion des interfaces et contacts dans le module Interaction	35
Figure II.11. Gestion des conditions aux limites dans le module Load.....	36
Figure II.12. Gestion du chargement en déplacement imposé dans le module Load	36
Figure II.13. Maillage en éléments finis dans le module Mesh.....	37
Figure II.14. Création du fichier de gestion des résultats dans le module Job	37
Figure II.15. Loi de comportement en compression du CDP.....	40
Figure II.16. Evolution des endommagements en compression du CDP	41
Figure II.17. Loi de comportement en traction du CDP.....	41
Figure II.18. Evolution des endommagements en traction du CDP	41
Figure II.19. Courbes de convergence du maillage des murs simulés.....	43
Figure II.20. Modèle simulé du mur témoin, noté : URM	43
Figure II.21. Modèle simulé du mur renforcé par un mortier NHL, noté : NHL	44
Figure II.22. Modèle simulé du mur renforcé par un mortier NHL et un tissu, noté : FRCM. ...	44

Figure III.1 : Motifs de fissuration expérimentaux des mur témoin URM	47
Figure III.2 : Progression des dommages en traction dans un mur URM.....	48
Figure III.3 : Courbes de contrainte de cisaillement - déformation d'un mur URM : Modélisation FEM et résultats expérimentaux	48
Figure III.4 : Motifs fissuration expérimentaux des murs NHL	49
Figure III.5 : Progression des dommages dans le mur NHL.....	49
Figure III.6 : Courbes de contrainte de cisaillement - déformation d'un mur NHL : Modélisation FEM et résultats expérimentaux	50
Figure III.7 : Motifs fissuration expérimentaux des mur FRCM.....	50
Figure III.8 : Progression des dommages dans le mur FRCM.....	51
Figure III.9 : Courbes de contrainte de cisaillement - déformation du mur FRCM : Modélisation FEM et résultats expérimentaux	51
Figure III.10 : Distribution des dommages et des fissures dans les éléments modélisés.....	52
Figure III.11 : Evolution des déplacements dans les éléments du mur URM.....	54
Figure III.12 : Propagation des contraintes dans le Mur témoin.....	55
Figure III.13 : Propagation des dommages en traction dans le mur témoin URM	56
Figure III.14 : Propagation des dommages en compression dans le mur témoin URM	57
Figure III.15 : Propagation des déplacements dans le Mur NHL.....	58
Figure III.16 : Propagation des contraintes dans le Mur NHL.....	59
Figure III.17 : Propagation des dommages dans le Mur NHL	61
Figure III.18 : Propagation des dommages de compression dans le Mur NHL.....	62
Figure III.19 : Propagation des déplacements dans le Mur FRCM.....	63
Figure III.20 : Propagation des contraintes dans le Mur FRCM.....	64
Figure III.21 : Propagation des dommages dans le Mur NHL+AR GLASS	65
Figure III.22 : Propagation des dommages de compression dans le Mur FRCM.....	66
Figure III.23 : Confrontation des courbes de contrainte- déformation des murs simulés	67

Figure IV.1 : Effet de l'épaisseur NHL sur la distribution des dommages	70
Figure IV.2 : Variation de la Force en fonction du Temps pour différents épaisseur NHL	72
Figure IV.3 : effet maillage AR Glass sur la distribution des dommages	73
Figure IV.4 : Variation de la Force en fonction du Temps pour les mailles du tissu... ..	74
Figure IV.5 : effet épaisseur AR Glass sur la distribution des dommages.....	76
Figure IV.6 : Variation de la Force - Temps pour différentes épaisseurs du tissu AR	76

Liste des tableaux

Tableau I.1 – Principaux composants chimiques des briques en terre cuite et leurs rôles.....	6
Tableau I.2. Principales caractéristiques physiques de la brique	6
Tableau I.3 – facteurs influant du comportement en traction.....	10
Tableau I.4. Comparaison des facteurs de ductilité pour différents matériaux.....	11
Tableau I.5 – Types de mortier : composition, usages et caractéristiques principales.....	11
Tableau I.6. Constituants principaux de la chaux NHL (% en masse)....	12
Tableau I.7 – Valeurs typiques de résistance à la compression (selon EN 459-1).....	13
Tableau I.8 – Propriétés des fibres de verre AR selon.....	20
<hr/>	
Tableau II.1. Caractéristiques des matières premières évaluées par Longo.....	28
Tableau II.2 – Tableau des unités correspondant à ABAQUS.....	29
Tableau II.3 – Lois régissant le modèle CDP.....	39
Tableau II.4 – Paramètres utilisés pour définir le comportement des matériaux	40
Tableau II.5 – Paramètres utilisés pour définir le comportement des matériaux	42
<hr/>	
Tableau III.1 – Récapitulatif des résultats de validation des modèles	53
<hr/>	
Tableau IV.1 – Évolution de la force appliquée en fonction du temps pour différentes épaisseurs de mortier NHL (10 mm, 15 mm, 20 mm)	71
Tableau IV.2 – Évolution de la force appliquée en fonction du temps pour différents maillages de AR Glass Fabric (6x6, 12x12 et 18x18).....	74
Tableau IV.3 – Évolution de la force appliquée en fonction du temps pour différentes épaisseurs du tissu AR (0.055mm, 0.1mm, 0.5mm et 1mm)....	77

Résumé

Bien que plusieurs études expérimentales aient démontré l'efficacité des matériaux composites à base de matrice cimentaire (FRCM) pour améliorer la résistance et la ductilité des murs en maçonnerie sous cisaillement, la compréhension approfondie de leur comportement reste un défi. La variabilité des matériaux, l'interaction complexe entre la matrice cimentaire et le renfort textile, ainsi que les mécanismes de rupture nécessitent des analyses avancées pour bien investir leur comportement mécanique. Par conséquent, l'objectif de cette étude est de développer un modèle numérique permettant de simuler le comportement en cisaillement des murs en maçonnerie renforcés par des composites FRCM à base d'une matrice en chaux hydraulique (NHL). Pour cela, les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature sont utilisés afin de calibrer et valider les simulations numériques réalisées avec le logiciel ABAQUS.

Les résultats prédits par les simulations sont validés de manière qualitative et quantitative à travers la comparaison des modes de rupture et les courbes de capacité. Une très bonne corrélation est obtenue entre les essais et les résultats numériques. Enfin, une étude paramétrique est réalisée à l'aide des modèles numériques validés afin de mettre l'accent sur les paramètres qui affectent le comportement des murs en maçonnerie renforcés.

Mots clés : Mur en maçonnerie, Briques, composites FRCM, Simulation numérique, Comportement en cisaillement, Validation expérimentale.

Les structures en maçonnerie, largement répandues dans le patrimoine bâti, représentent une part significative du parc immobilier mondial. Qu'il s'agisse d'ouvrages anciens ou de constructions plus récentes, les murs en maçonnerie sont souvent soumis à des sollicitations mécaniques (charges verticales, séismes, actions latérales) qui peuvent engendrer des dégradations importantes, voire des effondrements (1–4). Face à ces vulnérabilités, le renforcement des structures en maçonnerie constitue un enjeu crucial, tant pour la sécurité des occupants que pour la préservation du patrimoine architectural (5,6).

Depuis plusieurs décennies, les techniques de renforcement ont connu une évolution constante, passant de solutions traditionnelles à des approches innovantes intégrant des matériaux composites, mortiers performants et systèmes hybrides. Parmi ces solutions, l'utilisation de chaux hydraulique naturelle (NHL) combinée à des renforts en fibres (FRCM – Fabric Reinforced Cementitious Matrix) se distingue par sa compatibilité avec les supports anciens et ses performances mécaniques remarquables (7–9). Ces systèmes offrent en effet un bon compromis entre résistance accrue, ductilité améliorée, et respect des matériaux d'origine.

Les murs en maçonnerie sont largement utilisés dans les structures civiles en raison de leur coût modéré et de leur facilité de mise en œuvre. Cependant, ils présentent une faible résistance aux sollicitations en cisaillement, notamment sous l'effet des charges sismiques. Pour améliorer leurs performances mécaniques, le renforcement par des composites à matrice cimentaire (FRCM- Fabric-Reinforced Cementitious Matrix) s'est révélé être une solution prometteuse. Contrairement aux composites à matrice polymère (FRP), les FRCM offrent une meilleure compatibilité avec la maçonnerie existante et une durabilité accrue dans des environnements agressifs. Bien que plusieurs études expérimentales aient démontré l'efficacité des FRCM pour améliorer la résistance et la ductilité des murs en maçonnerie sous cisaillement, la compréhension approfondie de leur comportement reste un défi. La variabilité des matériaux, l'interaction complexe entre la matrice cimentaire et le renfort textile, ainsi que les mécanismes de rupture nécessitent des analyses avancées pour être correctement appréhendés. De plus, les modèles analytiques classiques ne permettent pas toujours de prédire avec précision la réponse mécanique des structures renforcées.

Dans cette optique, le présent travail de recherche s'inscrit dans une démarche expérimentale et numérique visant à étudier l'efficacité de différentes techniques de renforcement appliquées aux murs en briques pleines. L'objectif principal est d'évaluer, à travers des simulations par éléments finis (FEM) et des essais expérimentaux, l'impact du renforcement par mortier NHL seul, puis par FRCM, sur le comportement mécanique en cisaillement des murs en maçonnerie.

L'objectif de cette étude est de développer un modèle numérique permettant de simuler le comportement en cisaillement des murs en maçonnerie renforcés par des composites FRCM. Pour cela, les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature sont utilisés afin de calibrer et valider les simulations numériques réalisées avec le logiciel ABAQUS.

En effet les modèles numériques établies seront capables de :

- Reproduire les mécanismes de rupture observés expérimentalement.
- Prendre en compte l'adhérence et l'interaction entre la maçonnerie et le renfort FRCM.
- Prédire la résistance ultime et la déformabilité des murs en cisaillement.
- Fournir un outil fiable pour optimiser le dimensionnement des renforcements FRCM.

Ce mémoire se structure autour de plusieurs axes : une revue bibliographique des méthodes de renforcement existantes et de leurs performances, une présentation des matériaux, puis une analyse comparative des résultats expérimentaux et numériques. Les conclusions permettront de mieux orienter les choix techniques en matière de réhabilitation et de renforcement des ouvrages en maçonnerie.

Pour bien mener à terme ces objectifs et répondre à la problématique posée, nous avons scindé le mémoire en deux grandes parties. La première partie est une synthèse bibliographique :

Le **premier chapitre** est une « revue bibliographique » sur les caractéristiques et les comportements des matériaux utilisés dans cette étude, à savoir la brique pleine, les matériaux composites et mortiers ainsi que leur comportement mécanique des murs en maçonnerie et les techniques et procédés de renforcement et réhabilitation.

Le **deuxième chapitre** présente le modèle numérique non-linéaire en utilisant un code d'analyse par élément fini (ABAQUS), Ce chapitre contient une description détaillée des éléments qui ont été utilisés pour modéliser le mur en brique pleine renforcé par des composites, et support / chargement. Il comprend également une description détaillée des outils numériques qui ont été utilisés pour résoudre les modèles.

Dans le **troisième chapitre**, les résultats des modèles numériques et leurs validations sont présentés. Une interprétation de ces résultats est également incluse, ainsi qu'une partie contenant la validation des résultats numériques par rapport aux résultats expérimentaux.

Dans le **quatrième chapitre**, les résultats de l'étude paramétrique sont présentés. Une interprétation de ces résultats est également incluse afin d'optimiser les paramètres de renforcement des structures en maçonneries sous cisaillement.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale où sont rappelés les principaux résultats obtenus dans cette étude et quelques perspectives en guise de travaux d'enrichissement futurs.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter une revue sur les différents matériaux nécessaires (brique, mortier, composites fibreux) à ce travail à travers une synthèse détaillée sur leurs caractéristiques mécaniques et physiques ainsi que leurs lois et modèles de comportement, afin d'aborder avec succès la modélisation du comportement jusqu'à fissurations des murs renforcés avec des composites et déterminer leurs capacités de charge.

Une revue de littérature est également présentée à la fin du chapitre pour mettre en avant les dernières avancées et travaux publiés dans la thématique du renforcement des murs en brique de terre avec les matériaux composites.

I.2 Aperçu sur la brique de maçonnerie

La brique pleine est l'un des matériaux de construction les plus anciens utilisés par l'humanité (10,11). Son origine remonte à plusieurs millénaires, notamment dans les civilisations de la Mésopotamie, de l'Égypte ancienne et de la vallée de l'Indus, où l'on fabriquait déjà des briques crues ou cuites au soleil pour ériger habitations, temples et infrastructures. Avec le temps, la technique de cuisson au four s'est développée, donnant naissance à la brique pleine cuite, plus résistante et durable. Durant l'Empire romain, son usage s'est largement répandu grâce à sa solidité et à sa régularité de forme, facilitant ainsi la construction de bâtiments publics, de routes et d'aqueducs (12–14).

Au fil des siècles, la brique pleine est restée un matériau privilégié, notamment en Europe, où elle a été massivement utilisée pendant la période médiévale et la révolution industrielle. Sa résistance à la compression, sa capacité thermique et sa facilité de mise en œuvre en ont fait un choix incontournable pour la maçonnerie porteuse. Encore aujourd'hui, malgré l'apparition de matériaux modernes, la brique pleine reste utilisée pour ses qualités esthétiques, mécaniques et patrimoniales dans de nombreux projets de construction et de rénovation. La figure I.1 montre un exemple de construction avec de la brique de maçonnerie.

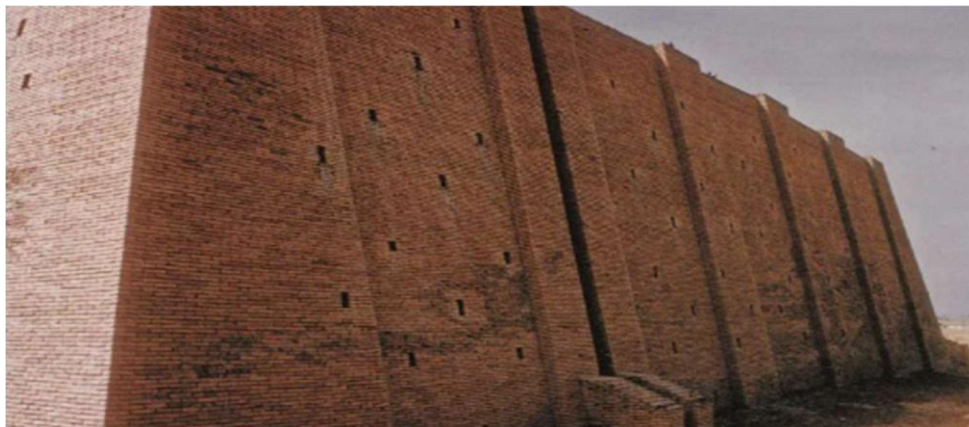


Figure I.1. La construction royale en Mésopotamie. *Source* : archeorient.hypotheses.org

I.2.1 Définition

La brique généralement en forme de parallélépipède rectangle est un élément de maçonnerie fabriqué à partir d'argile naturelle, moulée puis cuite à haute température dans un four. Elle se

caractérise par l'absence ou la très faible proportion de vides internes (moins de 25 % de sa section), ce qui lui confère une masse volumique élevée et une bonne résistance mécanique. De forme parallélépipédique, la brique pleine est utilisée principalement pour la construction de murs porteurs, de cloisons, de voûtes ou d'éléments architecturaux décoratifs. Elle présente une excellente résistance à la compression, une inertie thermique intéressante, ainsi qu'une bonne durabilité dans le temps. Grâce à sa compacité, elle offre également une bonne isolation acoustique et une résistance au feu. La brique pleine est encore largement utilisée dans les projets de restauration du patrimoine et dans certaines constructions modernes pour ses qualités esthétiques et structurelles.

La brique disponible sous plusieurs formes comme montrée sur la Figure 1.2 est un matériau de construction traditionnel couramment utilisé dans la maçonnerie. Elle est constituée d'un mélange d'argile et d'autres additifs, moulé et cuit à haute température. Sa composition et ses propriétés dépendent de la nature des matières premières utilisées, du processus de fabrication et des conditions de cuisson.

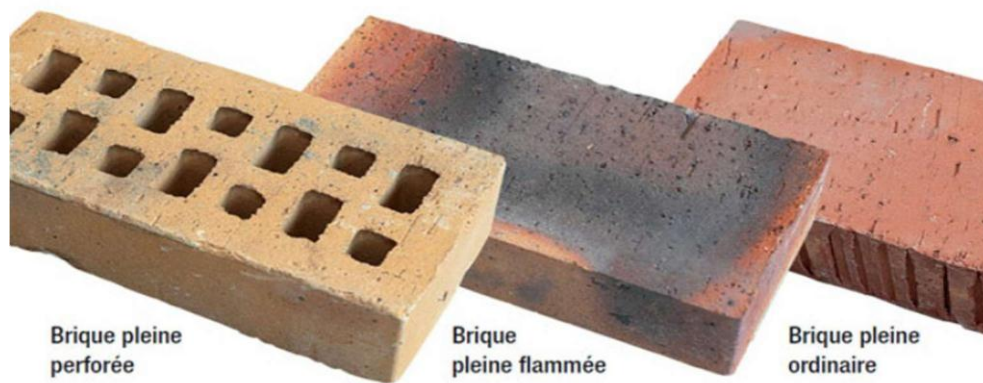


Figure I.2. Différentes briques. Source systemed.fr

I.2.2 Composition physico-chimique

La brique de maçonnerie est principalement constituée d'argile, un matériau naturel riche en silice (SiO_2), alumine (Al_2O_3), oxydes de fer (Fe_2O_3), chaux (CaO), magnésie (MgO), et alcalis (Na_2O , K_2O). La teneur en silice et en alumine détermine en grande partie les propriétés mécaniques, thermiques et de durabilité de la brique. La silice contribue à la résistance à haute température, tandis que l'alumine favorise la formation de phases vitrifiées lors de la cuisson, améliorant ainsi la cohésion du matériau. Les oxydes de fer confèrent à la brique sa teinte rouge caractéristique et influencent également le processus de vitrification. La composition chimique varie selon les gisements d'argile et les techniques de fabrication, ce qui peut engendrer des différences significatives dans les performances des briques.

Selon Waeytens, et al (15) une proportion adéquate d'alumine (autour de 15-25%) et de silice (jusqu'à 60%) est essentielle pour garantir une bonne résistance mécanique. D'autres études, comme celle de Cultrone et al.(16), montrent que la présence de minéraux accessoires (quartz, feldspaths, carbonates) peut également affecter la porosité et la durabilité de la brique. Ainsi, la caractérisation physico-chimique est une étape fondamentale pour évaluer la qualité et la performance des briques de maçonnerie dans les constructions.

La composition chimique de la brique pleine cuite est dominée par les oxydes donnés que le tableau I.1 (15,17):

Tableau I.1 – Principaux composants chimiques des briques en terre cuite et leurs rôles

Composant principal	Formule chimique	Teneur typique (% en masse)	Rôle dans la brique
Dioxyde de silicium	SiO ₂	50 – 70 %	Phase vitreuse ; confère la dureté et la stabilité thermique
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	10 – 25 %	Participe à la formation de la mullite ; augmente la cohésion
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	5 – 10 %	Donne la coloration rouge ; améliore la solidité
Oxyde de calcium	CaO	1 – 5 %	Peut favoriser la vitrification mais trop → fragilisation
Oxyde de magnésium	MgO	0.5 – 3 %	Influence la fusion partielle et la résistance thermique
Oxydes alcalins (K ₂ O, Na ₂ O)	—	0.5 – 3 %	Abaisse la température de fusion (flux fondants)
Pertes au feu	—	5 – 10 %	Indique les matières volatiles et carbonates perdus à la cuisson

En plus de leur composition chimique, les briques de maçonnerie se caractérisent par des propriétés physiques essentielles qui influencent leur comportement en service. La **masse volumique** apparente des briques cuites se situe généralement entre 1600 et 1900 kg/m³, en fonction de la densité de l'argile et du degré de cuisson. La **porosité** ouverte, qui peut atteindre 20 à 30 %, joue un rôle crucial dans la régulation thermique et la capacité d'absorption d'eau. Une porosité trop élevée peut cependant compromettre la résistance mécanique et la durabilité face aux cycles gel/dégel. L'**absorption d'eau** est un indicateur clé de la qualité de la brique : selon la norme EN 772-11 (18), une absorption supérieure à 20 % peut indiquer une faible compacité du matériau. Par ailleurs, la **perméabilité à la vapeur d'eau** et la **capacité thermique** sont également influencées par la structure poreuse. Comme le soulignent Hall et Hoff (2002) (19), ces propriétés déterminent non seulement les performances mécaniques, mais aussi le confort hygrothermique des bâtiments. Le Tableau I.2 résume les principales caractéristiques physiques de la brique.

Tableau I.2. Principales caractéristiques physiques de la brique

PROPRIETE	VALEUR TYPIQUE
DENSITE SECHE APPARENTE	1600 – 2000 kg/m ³
COEFFICIENT DE POISSON	0.15 – 0.25
POROSITE OUVERTE	10 – 30 %
ABSORPTION D'EAU	8 – 20 % (en masse)
CONDUCTIVITE THERMIQUE	0.4 – 0.8 W/m·K

I.2.3 Comportement mécanique de la brique

Le comportement mécanique de la brique pleine dépend principalement de sa composition (type d'argile, teneur en eau), de son mode de fabrication (cuisson, densité) et de ses dimensions. D'un point de vue mécanique, la brique pleine est un matériau rigide, fragile et peu ductile, c'est-à-dire qu'elle peut résister à des charges importantes jusqu'à un certain seuil, au-delà duquel elle se fissure et se casse sans déformation plastique notable.

- **Résistance à la compression** : La brique pleine présente une bonne résistance à la compression, généralement comprise entre 10 et 40 MPa selon sa qualité. Cela en fait un matériau adapté à la construction de murs porteurs.
- **Comportement en traction** : Comme la plupart des matériaux céramiques, la brique pleine a une **faible résistance à la traction**, ce qui la rend vulnérable aux fissures sous des sollicitations de flexion ou de traction.
- **Module d'élasticité** : Elle possède un module d'élasticité modéré (de l'ordre de 5 000 à 15 000 MPa), ce qui signifie qu'elle se déforme peu sous contrainte, mais peut se rompre brutalement sans signes précurseurs.
- **Résistance au cisaillement** : Sa résistance au cisaillement est relativement faible, notamment lorsqu'elle est utilisée dans des maçonneries soumises à des efforts latéraux (comme lors de séismes), d'où la nécessité de renforcer les structures ou d'intégrer des éléments de chaînage ou de renforcement.
- **Comportement à long terme** : La brique pleine montre une bonne stabilité dimensionnelle et une bonne durabilité dans le temps, résistant bien aux cycles gel/dégel et aux agents atmosphériques, à condition qu'elle soit bien protégée contre l'humidité.

I.2.3.1. Comportement sous compression axiale

La **résistance à la compression** est l'une des propriétés mécaniques fondamentales des briques de maçonnerie, car elle conditionne directement la capacité portante des murs. Cette résistance dépend de plusieurs facteurs, notamment de la composition minéralogique, du degré de cuisson, de la densité, de la porosité, et de la présence éventuelle d'additifs ou de dégraissants. En général, la résistance des briques en terre cuite varie entre 5 et 20 MPa pour les briques ordinaires, et peut atteindre plus de 40 MPa pour des briques pressées ou industrialisées (20). La cuisson à haute température (>950 °C) permet d'augmenter cette résistance en réduisant la porosité et en favorisant la vitrification de la matrice. Toutefois, un excès de cuisson peut entraîner la formation de fissures internes et donc fragiliser la brique. Par ailleurs, l'ajout de fibres végétales ou de résidus industriels dans l'argile crue peut modifier les performances mécaniques, parfois de manière significative (21).

D'autres recherches ont montré que la forme et la taille des grains d'argile, ainsi que leur répartition granulométrique, influencent fortement la cohésion interne et donc la résistance à la compression (22). Enfin, l'humidité joue un rôle critique : des essais ont démontré que l'eau absorbée peut réduire la résistance de plus de 30 % par rapport à l'état sec (23). Une caractérisation rigoureuse des briques est donc indispensable avant leur mise en œuvre dans les structures porteuses.

La figure I.3 montre la courbe force-déplacement typique représentant le comportement d'une brique pleine soumise à un chargement en compression avec déplacement imposé. On distingue trois différentes parties :

- La première partie est linéaire (phase élastique),
- La phase non linéaire, fissuration (raideur diminue progressivement),
- La phase de ruine, la force chute brutalement au moment de la rupture fragile.

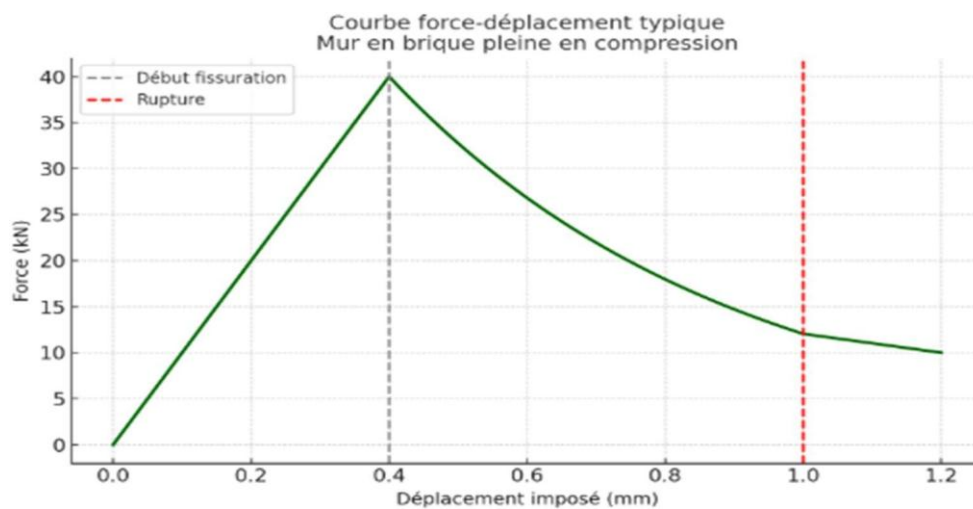


Figure I.3. Courbe force-déplacement typique représentant le comportement d'une brique soumise à un chargement compression (23)

Pour de faibles déplacements imposés, la réponse du mur est globalement linéaire. La relation force-déplacement s'écrit :

$$F = K \cdot \Delta \quad (I.1)$$

- **F** est la force totale appliquée sur le mur,
- **Δ** est le déplacement imposé (généralement la déformation verticale ou horizontale selon le chargement),
- **K** est la raideur globale du mur, dépendant de la géométrie, des propriétés mécaniques des briques et du mortier, et de la qualité de l'assemblage.

Cette raideur **K** est généralement inférieure à la somme des raideurs des briques seules, car les joints de mortier, les défauts et les fissures influencent la rigidité globale. Avec l'augmentation du déplacement, des fissures apparaissent d'abord dans le mortier, puis dans les briques sous l'effet des contraintes de cisaillement et de traction résiduelles. Cette phase non linéaire entraîne une réduction progressive de la raideur :

$$F = f(\Delta), \text{ avec } \frac{dF}{d\Delta} \text{ décroissant} \quad (I.2)$$

La courbe force-déplacement présente alors un palier ou une pente décroissante. Lorsque la force atteint la capacité maximale F_{\max} (liée à la résistance en compression du mur et à sa géométrie), une rupture locale ou globale survient, souvent sous la forme :

- De fissures verticales ou obliques,
- D'effondrement partiel des briques. La force chute alors rapidement, traduisant la perte de capacité portante.

I.2.3.2. Comportement sous traction

La brique cuite est un **matériau fragile** au sens mécanique du terme, c'est-à-dire qu'elle **ne présente pas de phase plastique significative** avant la rupture. Lorsque soumise à une traction, elle se fissure brutalement sans signe avant-coureur. Cette rupture est généralement **instantanée**, une fois la contrainte de traction maximale atteinte.

De plus, la brique est **anisotrope** du fait de sa fabrication par extrusion ou moulage : ses propriétés peuvent varier selon la direction de la traction (longitudinale, transversale ou perpendiculaire au lit des joints).

La figure I.4 montre la courbe la courbe force–déplacement typique d'une brique soumise à un chargement en traction. On distingue les phases de comportement suivantes :

- La première partie est linéaire (comportement élastique),
- Le pic représente la résistance maximale en traction σ_{tmax}
- Suit une chute brutale de la force : rupture fragile, sans phase post-pic.

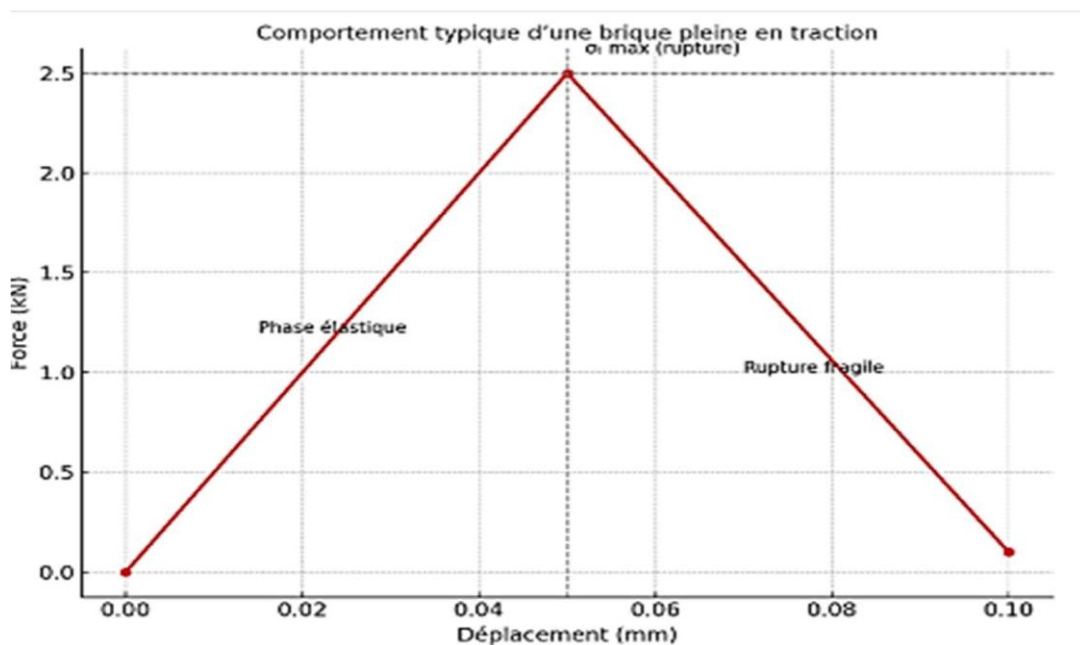


Figure I.4. Courbe force-déplacement typique représentant le comportement d'une brique soumise à un chargement de traction (24–26)

En traction, la brique présente initialement un comportement élastique linéaire, régi par la loi de Hooke :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (I.3)$$

Où :

- σ est la contrainte de traction (MPa),
- ε est la déformation longitudinale (sans unité),
- E est le module de Young (5 000 à 20 000 MPa pour la brique pleine).

Cette phase reste valide tant que la contrainte n'excède pas la résistance à la traction directe, généralement située entre 1 à 3 MPa, selon la nature et la porosité de la brique.

Dès que la contrainte atteint la limite de traction σ_{tmax} , une fissure brutale apparaît, entraînant une perte instantanée de rigidité et une chute rapide de la capacité portante. Contrairement aux matériaux ductiles, la brique ne présente aucune phase d'écrouissage ni de déformation plastique notable. La rupture est franche et localisée, souvent dans la zone de moindre cohésion ou d'irrégularité (pores, microfissures, inclusions). Les facteurs influençant le comportement en traction de la brique sont récapitulés sur le tableau I.3 :

Tableau I.3 – facteurs influant du comportement en traction

Facteur	Effet attendu
Teneur en eau	Affaiblit la résistance en traction
Porosité et microfissures	Diminue la résistance et favorise la rupture précoce
Température de cuisson	Influence la densité, la porosité et la cohésion
Orientation par rapport au lit	Rend le comportement anisotrope
Âge et conditions de stockage	Peuvent affecter la rigidité et la cohésion interne

La ductilité de la brique est sa capacité à se déformer plastiquement de manière significative avant de se rompre. C'est une propriété mécanique essentielle pour les matériaux utilisés dans des structures soumises à des charges variables, des chocs ou des sollicitations sismiques. Elle est souvent mesurée par :

- La déformation post-limite élastique (zone plastique),
- Ou le facteur de ductilité :

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (I.5)$$

Où Δu est le déplacement à la rupture, et Δy celui à la fin du comportement élastique.

La brique pleine est un matériau céramique fragile. Sa structure est rigide, poreuse et granuleuse. Elle présente donc :

- Une grande résistance à la compression,
- Une faible résistance à la traction,
- Très peu ou pas de déformation plastique avant la rupture,
- Une rupture brutale, souvent instantanée après l'apparition de fissures.

Cela signifie que la ductilité de la brique pleine est extrêmement faible, voire nulle. Le facteur de ductilité est souvent proche de 1 :

À titre de comparaison, le tableau I.4 illustre clairement que la brique pleine possède un facteur de ductilité extrêmement faible, proche de 1. Cela signifie qu'elle ne développe pratiquement aucune déformation plastique après sa limite élastique, ce qui en fait un matériau très fragile.

Tableau I.4. Comparaison des facteurs de ductilité pour différents matériaux

Matériau	Facteur de ductilité typique (μ)
Acier	10 – 20
Béton armé	3 – 6
Brique pleine	1 – 1.2 (<i>très faible – matériau fragile</i>)

I.3 Mortiers à base de liants minéraux

Les **mortiers à base de liants minéraux** constituent des matériaux essentiels dans les travaux de maçonnerie, de rejointoiement et de restauration des ouvrages en briques ou en pierres (25,27). Ils sont principalement formulés à partir de liants d'origine minérale tels que la chaux aérienne (CL), la chaux hydraulique naturelle (NHL), le ciment Portland ou les pouzzolanes, mélangés à des granulats fins (sables) et de l'eau. La nature du liant influence fortement les propriétés mécaniques, la perméabilité, l'adhérence ainsi que la compatibilité avec les supports anciens.

Les mortiers à base de **chaux** sont notamment appréciés pour leur **souplesse**, leur **perméabilité à la vapeur d'eau**, et leur **compatibilité chimique** avec les matériaux historiques, ce qui les rend particulièrement adaptés à la restauration du patrimoine. En revanche, les mortiers de **ciment** (7,28–30) offrent une résistance mécanique plus élevée, mais présentent une rigidité accrue et une faible capacité à absorber les déformations, ce qui peut engendrer des pathologies dans les maçonneries anciennes (8).

Par ailleurs, l'introduction de liants pouzzolaniques ou de mélanges chaux-ciment permet d'ajuster les performances du mortier selon les exigences du chantier (7,8,31). Une bonne formulation repose ainsi sur un compromis entre **résistance**, **durabilité**, **ouvrabilité** et **compatibilité avec le support**.

Le mortier est un mélange homogène de liant, granulats fins (sable) et eau, utilisé en maçonnerie pour lier les éléments de construction tels que les briques, les pierres ou les blocs. Il joue un rôle essentiel à la fois mécanique et fonctionnel dans l'ouvrage. Le Tableau I.5 récapitule les types de mortier associés aux briques de maçonnerie.

Tableau I.5 – Types de mortier : composition, usages et caractéristiques principales

Type de mortier	Composition	Utilisation principale	Caractéristiques
Mortier au ciment	Ciment + sable + eau	Maçonnerie neuve, éléments porteurs, zones humides	Très résistant, prise rapide, rigide, peu respirant
Mortier à la chaux (NHL)	Chaux hydraulique naturelle (NHL) + sable + eau	Maçonnerie traditionnelle, réhabilitation,	Souple, respirant, bonne adhérence, compatible
Mortier bâtard	Ciment + chaux + sable + eau	Maçonnerie générale, compromis entre rigidité et souplesse	Assez résistant, meilleure ouvrabilité que le ciment seul

I.3.1 Mortiers à base de Chaux Hydraulique Naturelle (NHL)

La chaux hydraulique naturelle (Figure I.5), abrégée NHL (Natural Hydraulic Lime), est un liant minéral obtenu par la cuisson de calcaire contenant naturellement de l'argile (silicates, aluminates). Après cuisson entre 800 et 1200 °C, elle est éteinte et moulue pour donner une poudre prête à être mélangée à l'eau.

Elle se distingue par sa capacité à faire prise à la fois par réaction avec l'eau (hydraulique) et par carbonatation avec le CO₂ de l'air (aérienne).



Figure I.5. Sac commercialisé de chaux hydraulique naturelle (32)

La NHL est obtenue par la **cuisson de calcaire argileux** contenant naturellement de la silice, de l'alumine et d'autres minéraux. Sa composition chimique donnée dans le tableau I.6 dépend du gisement, mais reste dans des plages bien définies.

Tableau I.6. Constituants principaux de la chaux NHL (% en masse) (32–34)

Composant	Formule chimique	Teneur typique (%)	Rôle
Oxyde de calcium	CaO	55 – 70 %	Composant principal de la chaux (liant)
Dioxyde de silicium	SiO ₂	15 – 25 %	Réagit pour former des silicates hydrauliques
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	3 – 8 %	Forme des aluminates hydrauliques
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	1 – 5 %	Influence la couleur et l'activité hydraulique
Oxyde de magnésium	MgO	1 – 3 %	Présent naturellement dans les calcaires
Dioxyde de carbone (résiduel)	CO ₂	2 – 5 % (selon éteinte)	Restant après cuisson ou carbonatation
Pertes au feu	—	35 – 45 % (matière organique + CO ₂)	Indique le niveau de décarbonatation

La résistance à la compression est l'un des principaux critères pour évaluer la capacité mécanique d'un mortier à base de chaux hydraulique naturelle. Cette résistance dépend principalement du :

- Type de NHL (Tableau I.7)
- Rapport eau/liant,
- Dosage de granulats,
- Conditions de cure (humidité, durée, température).

Tableau I.7 – Valeurs typiques de résistance à la compression (selon EN 459-1)

Type de chaux	Résistance à la compression (à 28 jours)	Utilisation recommandée
NHL 2	≥ 2 MPa	Enduits, maçonnerie légère, zones non porteuses
NHL 3.5	3.5 – 7 MPa	Maçonnerie traditionnelle, rénovation, murs porteurs légers
NHL 5	5 – 10 MPa	Maçonnerie structurale, fondations, zones sollicités

Les Figures I.5 et I.6 présentent les lois de comportement expérimentales en compression et traction obtenues sur chacune des éprouvettes en mortier à base de NHL, ainsi que les courbes moyennes obtenus par Medjmadj el al (32).

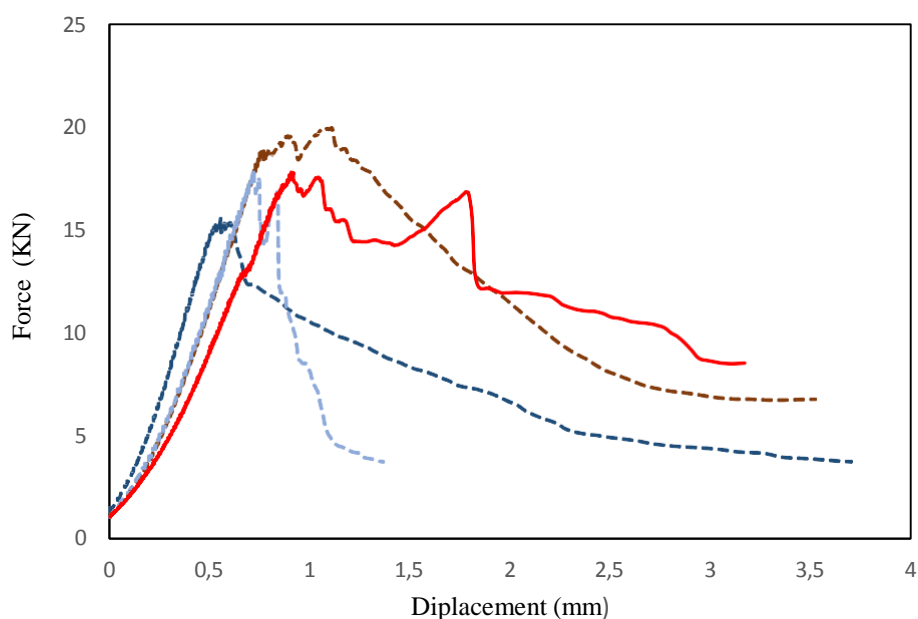


Figure I.6. Courbes Force – déplacement des éprouvettes de mortier NHL sous compression (34)

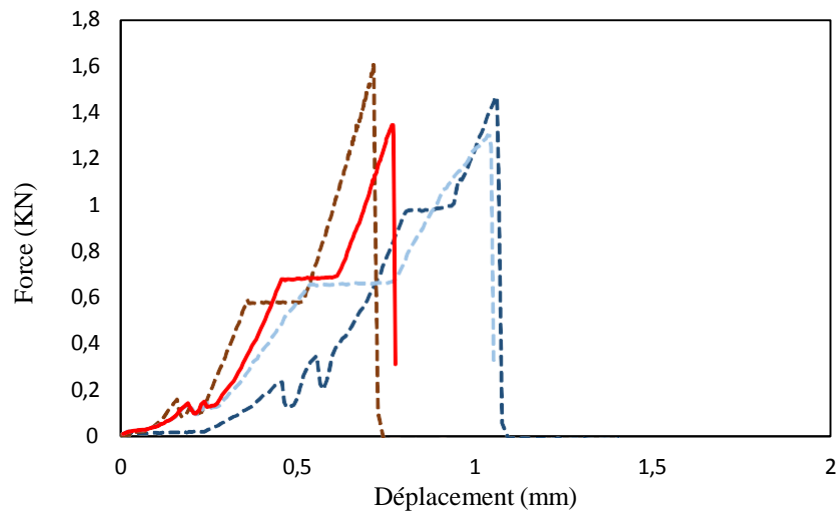


Figure I.7. Courbes Force – déplacement des éprouvettes de mortier NHL sous flexion (34)

I.3.2 Mortiers à base de Ciment Portland

Le ciment Portland (Figure I.7) est un liant hydraulique artificiel, constitué principalement de silicates de calcium (aluminat tricalcique, silicate tricalcique, silicate bicalcique et aluminat ferrique tétracalcique), obtenus par la cuisson à environ 1450 °C d'un mélange finement dosé de calcaire (CaCO_3) et d'argile (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), formant le clinker. Ce clinker est ensuite broyé finement avec une petite quantité de sulfate de calcium (gypse) pour réguler la prise.

Grâce à la réaction d'hydratation, le ciment Portland développe progressivement une résistance mécanique élevée, notamment en compression, et il peut durcir aussi bien à l'air que sous l'eau. Il constitue l'un des composants de base du béton, du mortier, et d'autres matériaux de construction.



Figure I.8. Exemple de la poudre de ciment portland.

Le sable est un matériau granulaire naturel constitué de petites particules de roches et de minéraux, principalement du quartz (silice), dont la taille varie entre 0,063 mm et 2 mm selon la classification granulométrique.



Figure I.9. Exemple d'un sable fin utilisé dans la conception des mortiers.

Le comportement mécanique du mortier de ciment sous sollicitation en compression (Figure I.10.a) met en évidence une nature globalement fragile. Après une phase initiale linéaire traduisant une réponse élastique, le matériau atteint un seuil de résistance au-delà duquel des phénomènes de fissuration et d'endommagement apparaissent. La perte progressive de portance après ce pic indique une absence de ductilité significative. Ce type de comportement est caractéristique des matériaux rigides et peu déformables, dans lesquels la rupture survient par accumulation de microfissures internes, notamment le long des zones de faiblesse dans la matrice cimentaire ou à l'interface granulat-liant.

En traction (Figure I.10.b), la fragilité du mortier est encore plus marquée. La courbe force-déplacement montre une montée rapide de la charge jusqu'à la rupture, sans phase de déformation plastique notable. Cela traduit une faible capacité du matériau à dissiper l'énergie ou à retarder la fissuration, ce qui est typique des mortiers à base de liants hydrauliques purs. L'absence de comportement post-fissuration stable souligne la sensibilité du mortier aux sollicitations de traction, ce qui peut entraîner des ruptures brutales en service. Ce constat justifie, dans la pratique, l'usage de renforcements ou de modifications de formulation (par fibres ou adjuvants souples) afin d'améliorer sa ténacité et sa durabilité dans des contextes structurels exigeants.

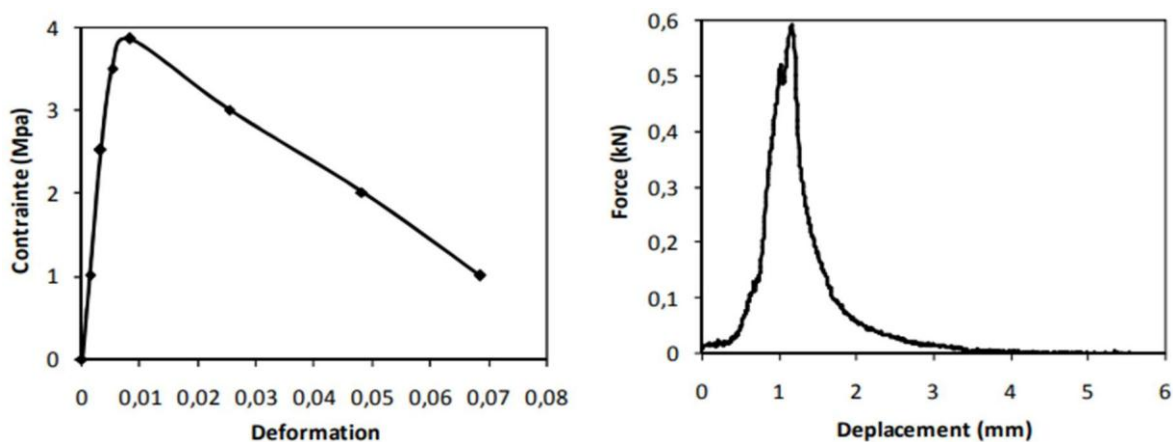


Figure I.10. Courbes de capacité des éprouvettes de mortier sous compression et traction selon Si Salem et al (35)

D'après Tung et al (36), le comportement mécanique des mortiers peut être sensiblement amélioré par l'incorporation de fibres de renforcement. La figure I.11 illustre l'effet de différentes teneurs en fibres sur la courbe contrainte-déformation d'un mortier soumis à une sollicitation mécanique. Trois types de formulations y sont comparés : un mortier témoin (sans fibres), un mortier avec une faible teneur en fibres, et un autre avec une teneur élevée. Ces courbes permettent d'apprécier les bénéfices du renforcement fibreux en termes de capacité portante, de contrôle de la fissuration et de dissipation d'énergie post-fissuration.

Le mortier témoin présente un comportement fragile avec une rupture nette, sans phase significative de déformation après la résistance maximale. En revanche, l'ajout de fibres, même en faible quantité, permet d'améliorer la ductilité du matériau et de prolonger la phase post-pic, traduisant une meilleure résistance à la propagation des fissures. Cette capacité est encore plus marquée dans le cas d'un mortier fortement fibré, où l'on observe un maintien des contraintes sur une plage de déformation plus étendue.

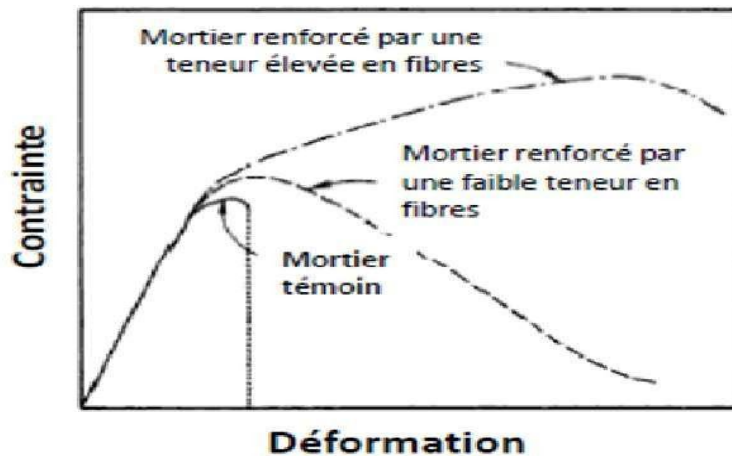


Figure I.11. Les courbes typiques de contrainte-déformation de mortiers renforcés par des fibres (36)

I.4 Confinement des murs de maçonnerie

Le confinement des murs est une technique de renforcement structurel utilisée pour améliorer la résistance et la stabilité des murs, notamment dans les zones sismiques. Il consiste à limiter la déformation latérale des éléments porteurs afin de prévenir les ruptures soudaines et fragiles. La figure I.12 montre les différents appareillages de construction des murs en brique.

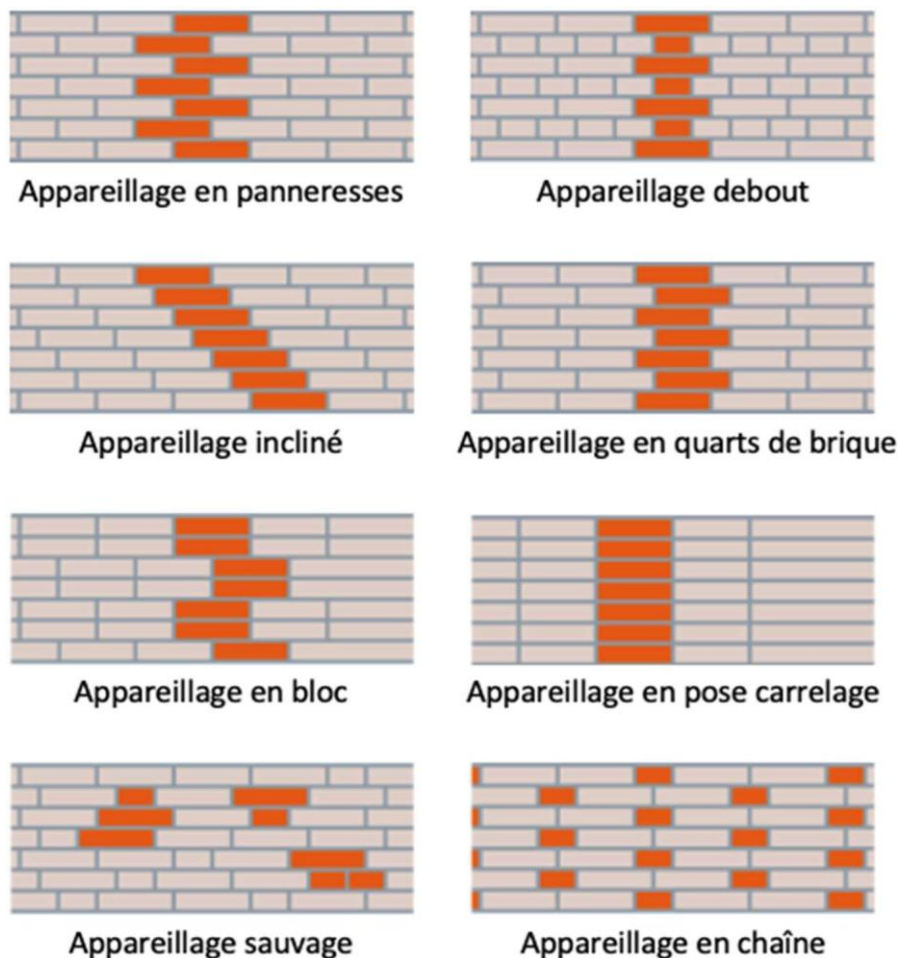


Figure I.12. Les appareillages de construction des murs en maçonnerie. *Source :* <https://www.rijswaard.fr/information/appareillages/>

En renforçant la structure, le confinement permet d'augmenter la capacité portante du mur, de contrôler la fissuration et de rendre le comportement global de l'ouvrage plus ductile. Cette méthode est particulièrement utile pour les bâtiments anciens ou vulnérables, et elle joue un rôle essentiel dans la protection des personnes et la durabilité des constructions face aux sollicitations extrêmes comme les tremblements de terre. La figure I.13 montre quelques mécanismes de rupture de murs en maçonnerie sous cisaillement selon Eymard et al. (37).

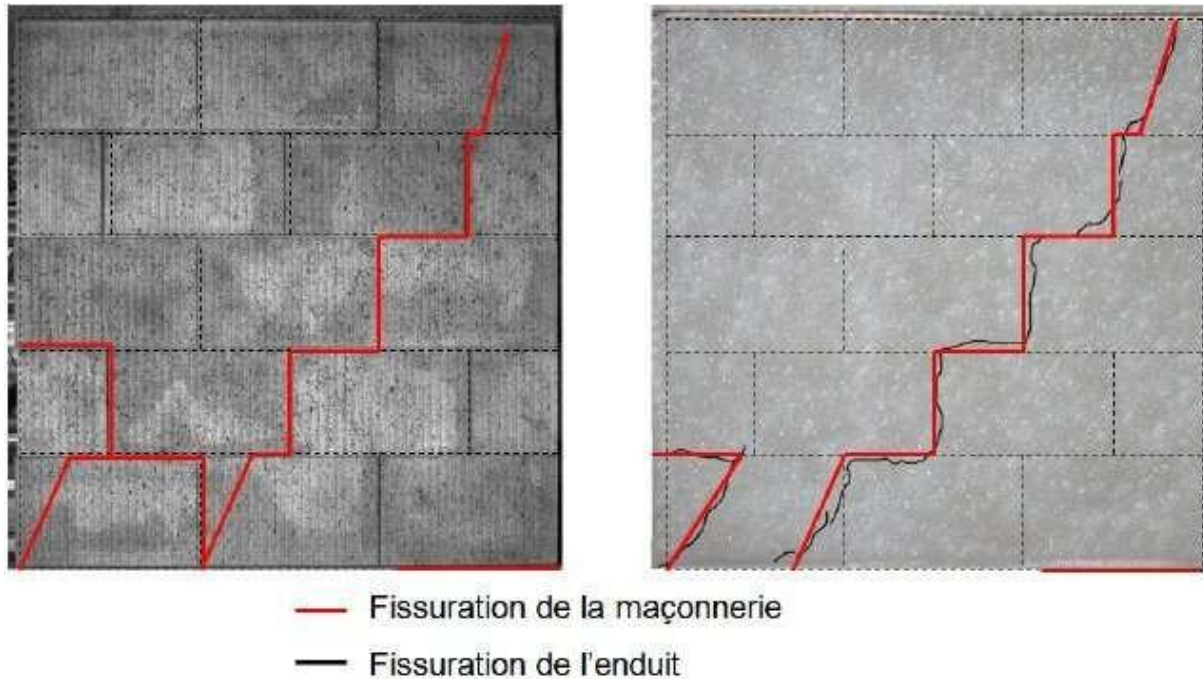


Figure I.13. Mécanisme de rupture de murs en maçonnerie sous cisaillement selon (37)

I.4.1 Nécessité du confinement du mur en brique

Le **confinement** des murs de brique consiste à **renforcer et maintenir latéralement** l'élément de maçonnerie afin d'**améliorer sa résistance mécanique** et sa **capacité à supporter des sollicitations complexes**, notamment en compression, flexion ou lors d'un séisme.

Résister à la fissuration et à l'éclatement

La brique pleine, étant fragile et peu résistante à la traction, a tendance à se fissurer ou éclater sous des charges concentrées ou cycliques. Le confinement permet de limiter l'ouverture des fissures, retarder leur apparition et prolonger la capacité portante.

Augmenter la résistance en compression

Lorsque des éléments en brique sont confinés par des cadres, ceinturages ou matériaux composites, leur résistance en compression peut être significativement augmentée. Le confinement limite les déformations latérales (flambement, gonflement) et crée un état de contrainte triaxial, plus favorable mécaniquement.

Améliorer la ductilité globale

Le confinement permet également de compenser la faible ductilité intrinsèque de la brique pleine. En renforçant l'ensemble du système, on améliore sa capacité d'absorption d'énergie et sa résilience en cas de choc ou séisme.

Sécuriser les structures anciennes ou en zone sismique

Dans la réhabilitation du bâti ancien ou la construction en zone à risque sismique, le confinement des briques par des renforts en béton armé, en acier ou en composites (ex. : AR Glass Fabric) est un levier essentiel de sécurité. Il permet de préserver l'aspect traditionnel tout en renforçant les performances mécaniques.

I.4.2 Méthodes de confinement des murs (Renforcement)

Le confinement des murs en brique pleine est une technique de renforcement visant à améliorer leur comportement mécanique, en particulier leur résistance à la compression, leur ductilité, et leur tenue sismique. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées selon le contexte (réhabilitation, zone sismique, ouvrage neuf) et les contraintes architecturales.

I.4.2.1. Confinement par chaînages en béton armé

Le confinement par chaînages en béton armé consiste à intégrer des éléments horizontaux et verticaux (tels que les potelets et les encadrements) autour ou à l'intérieur des murs en maçonnerie. Cette technique vise à renforcer la structure en empêchant l'éclatement latéral des briques, tout en assurant une meilleure continuité entre les différents éléments porteurs (38–41). Elle permet également une dissipation plus efficace de l'énergie en cas de sollicitations dynamiques, notamment sismiques. Couramment utilisée dans les constructions neuves situées en zones à risque, elle est conforme aux exigences des règlements parasismiques tels que le RPA 2024 (42) ou l'EUROCODE 8 (43). La figure I.14 illustre un exemple d'un confinement par chaînage en béton.



Figure I.14. Confinement par chaînage en béton

I.4.2.2 Confinement par ceinturage métallique

Le confinement par ceinturage métallique consiste à poser des cadres en acier ou des bandes métalliques ancrés autour des murs, afin de renforcer leur stabilité (44–47). Ce procédé permet d'augmenter la résistance au flambement des parois et de mieux contrôler les déformations latérales, en particulier sous l'effet de sollicitations horizontales. Il présente l'avantage d'être une solution réversible et peu intrusive, ce qui le rend particulièrement adapté à la réhabilitation des bâtiments historiques. Toutefois, cette technique peut présenter un inconvénient majeur à long terme : le risque de corrosion des éléments métalliques, notamment en l'absence de protection adéquate contre l'humidité. Des exemples de cette technique de confinement sont illustrés sur les figures I.15 et I.16.



Figure I.15. Confinement par chaînage en béton selon

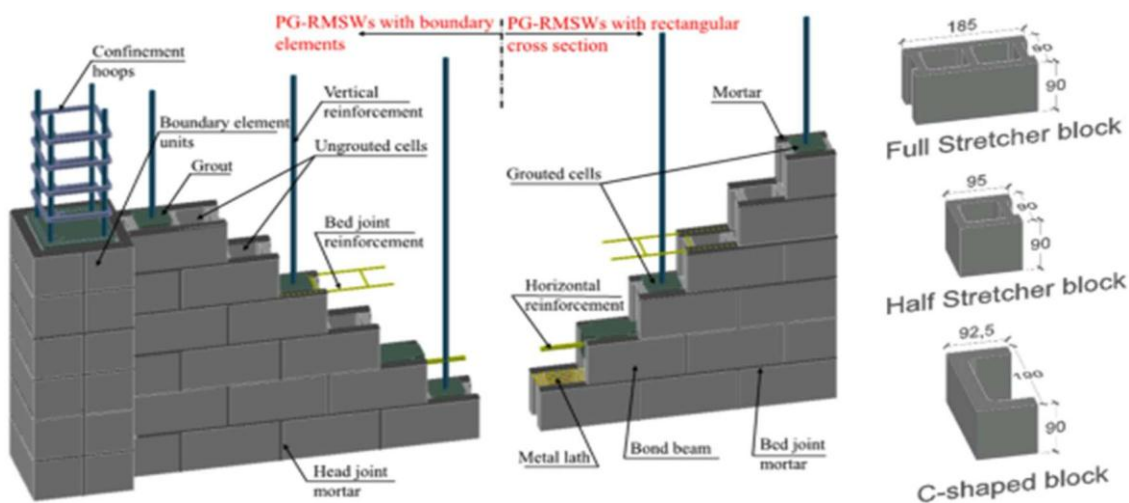


Figure I.16. Confinement par chaînage en acier selon (46)

I.4.2.3 Confinement par composites (FRCM, FRP)

Le confinement par matériaux composites est une méthode de renforcement avancée, utilisée pour améliorer la résistance, la ductilité et la stabilité des murs en maçonnerie. Elle est particulièrement efficace dans les contextes de rénovation, de réhabilitation du patrimoine ou de protection sismique (44,48–50).

Le confinement par composites consiste à appliquer un matériau fibré à haute résistance (ex. : fibre de verre, fibre de carbone, fibre de basalte) sur la surface du mur, couplé à une matrice de liaison. Deux grandes familles de composites sont utilisées :

- **FRP** (*Fibre Reinforced Polymer*) : tissu + résine époxy (rigide et adhésive) ;
- **FRCM** (*Fabric-Reinforced Cementitious Matrix*) : tissu avec matrice minérale (ex. mortier) ;

L'**AR Glass Fabric** (tissu en fibres de verre résistantes aux alcalis) est un renfort textile constitué de fibres de verre spécialement formulées pour résister à l'environnement alcalin des mortiers, bétons et matrices minérales. Il est largement utilisé dans les systèmes de renforcement **FRCM** (*Fabric-Reinforced Cementitious Matrix*) appliqués sur la maçonnerie, le béton ou la pierre.

Le tissu en fibres de verre résistantes aux alcalis (AR Glass) est conçu pour résister à l'attaque chimique des milieux alcalins comme le béton. Utilisé dans les matériaux composites cimentaires ou pour le renforcement de structures, ce matériau est généralement tissé (bidirectionnel ou multiaxial) et possède un comportement orthotrope.



Figure I.17. Exemple de fibre de verre AR (51)

Le comportement du tissu AR Glass est linéaire élastique jusqu'à la rupture dans la direction des fibres :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{I.6})$$

Avec : σ : contrainte ; ε : déformation et E : module de Young.

En modélisation FEM ou analytique, le tissu est souvent assimilé à un matériau orthotrope. Le tissu est composé de fibres de verre contenant du zirconium ($\text{ZrO}_2 \geq 16\%$) pour résister à l'environnement alcalin du béton. Il est généralement présenté sous forme d'un entrelacement de fils orientés dans une ou plusieurs directions (biaxial, triaxial, etc.) et est utilisé pour le renforcement structurel ou de surface des éléments de construction. Le tableau I.8 résume les propriétés des fibres de verre AR.

Tableau I.8 – Propriétés des fibres de verre AR selon (52)

<i>Propriété</i>	<i>Valeur indicative</i>	<i>Commentaire</i>
Module d'élasticité(E)	70-80 GPa	Comparable à l'acier, mais plus faible ;
Résistance à la traction	1000-1700MPa	Très élevée, dépend du taux de zirconium et de la densité du tissu
Allongement à rupture	2-3%	Faible, matériau cassant
Densité	~2.6g/cm ³	Plus léger que l'acier
Résistance aux alcalis	Excellente	Grace au ZrO ₂ , résiste à la dégradation dans le béton

La figure I.18 illustre un exemple de confinement des murs en brique à base de collage externe de matériaux composites.



Figure I.18. Confinement par collage externe de PRF et FRCM selon (2)

I.5 Revue bibliographique

Dans cette section, nous allons mettre l'accent sur l'état de l'art actuel de confinement des murs en maçonnerie par des matériaux composites sous cisaillement :

F. Longo et al (2021) (4) ont proposé un mortier innovant, résistant thermiquement, et utilisé pour des systèmes composites à matrice inorganique destinés à une nouvelle technique de renforcement combinant capacité sismique et énergétique des mur en brique. Le système est capable d'assurer des propriétés mécaniques compétitives par rapport aux matériaux traditionnels à base de chaux et, en même temps, une réduction significative de la conductivité thermique. Un programme expérimental est présenté par les auteurs, portant sur des panneaux en maçonnerie à petite échelle avec un renforcement en double-face (Figure I.19), afin de déterminer à la fois la résistance au cisaillement dans le plan et la résistance thermique.

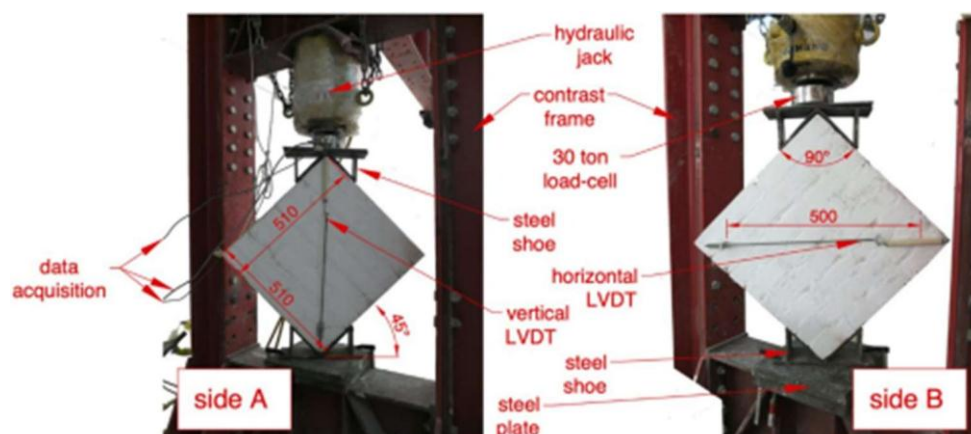


Figure I.19. Système de confinement par FRCM proposé par Longo et al (2021) (4)

Les résultats des auteurs donnés sur la figure I.20 sous forme de confrontation des courbes : Contrainte de cisaillement – Glissement ont démontré l'efficacité de la technique proposée qui améliore significativement les performances des murs en maçonnerie tant du point de vue thermique que mécanique.

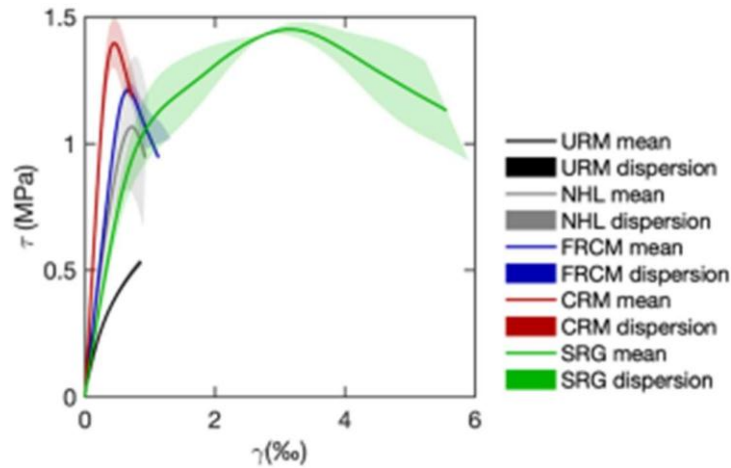


Figure I.20. Courbe de capacité du système de confinement proposé par Longo et al (4)

Wei Zhanga et al (2025) (15) ont proposé d'étudier des murs en maçonnerie de blocs de maçonnerie non armés vulnérables aux séismes en raison de leur faible résistance au cisaillement dans leur plan. Ces murs présentent généralement des ruptures en cisaillement diagonales, cassantes, pouvant entraîner leur effondrement et mettre des vies humaines en danger. Ainsi, pour améliorer le comportement en cisaillement diagonal des murs, les auteurs proposent une analyse des propriétés mécaniques des murs renforcés à l'aide de différentes configurations de surfacage en béton fibré à haute ductilité, soumis à des essais de compression diagonale monotone, telque montré sur la figure I.21.

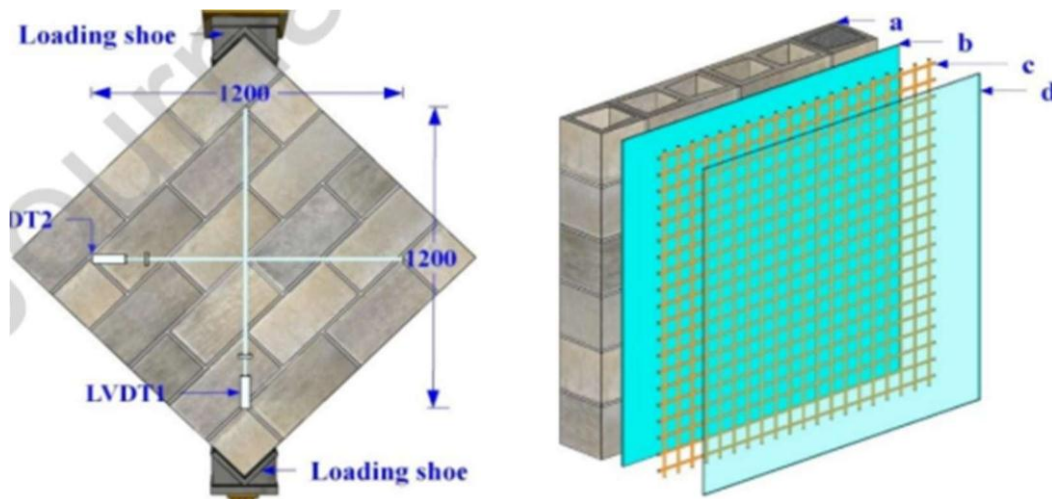


Figure I.21. Système de confinement proposé par Zhanga et al (2025) (15)

Les résultats des essais ont montré que les techniques de renforcement peuvent atténuer le comportement fragile en cisaillement et améliorer la résistance au cisaillement des murs. Toutefois, pour les spécimens renforcés avec des couches de surface double face, la capacité portante et la raideur augmentent, tandis que la capacité de déformation diminue dans une certaine mesure.

En se basant sur le mode de rupture de chaque spécimen donné sur la figure I.22, des formules de calcul ont été proposées par les auteurs pour prédire la capacité portante.

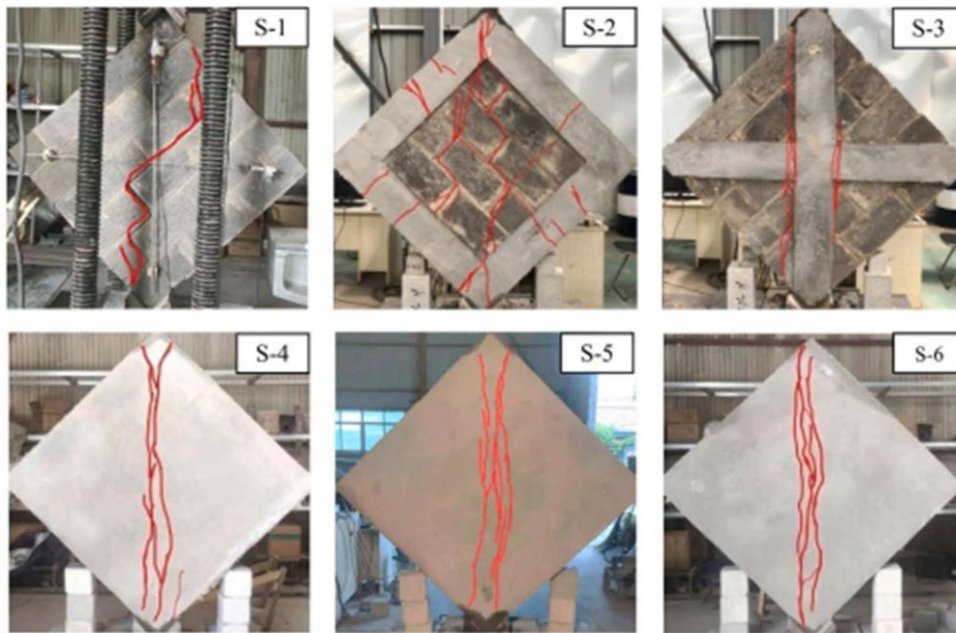


Figure I.22. Mode de rupture des murs confinés proposé par Zhanga et al (2025) (15)

Les résultats analytiques des auteurs correspondent approximativement aux résultats expérimentaux comme montrés sur la figure I.23, ce qui constitue une information utile pour la conception structurale en cisaillement diagonal dans le plan, des murs en blocs renforcés par des fibres à haute ductilité.

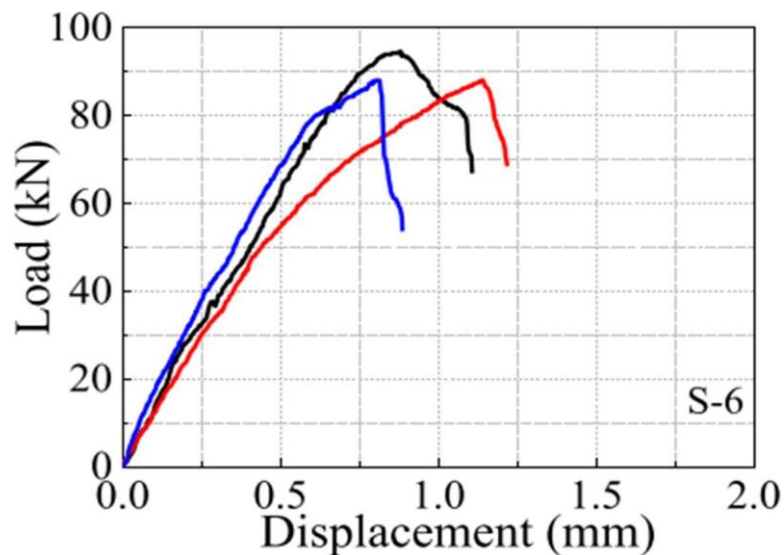


Figure I.23. Résultats expérimentaux et théoriques obtenus Zhanga et al (2025) (15)

Silvia Calo` et al (2025) (1) ont montrés que les structures en maçonnerie peuvent présenter un comportement fragile dans les zones sismiques. En effet, la majorité de la dissipation d'énergie se produit par le biais de fissurations en cisaillement. Par conséquent, un renforcement dans le plan est recommandé par les auteurs, tel que montré sur la figure I.24.

Parmi les différentes techniques disponibles, l'utilisation de systèmes composites à base de mortier inorganique est aujourd'hui étroitement examinée, en raison de leurs avantages notables

en termes de compatibilité mécanique et chimique avec les substrats en maçonnerie existants, et aussi en raison de la possibilité de démonter l'intervention si nécessaire. Dans ce contexte, Silvia Calo` et al (2025) (1) proposent un nouveau jeu d'équations empiriques incluant le tri, la classification, le nettoyage et le traitement des données critiques. L'objectif est d'atteindre une grande précision prédictive à travers des formules simples (Figure I.25), en vue d'une intégration dans des codes de conception destinés aux praticiens.

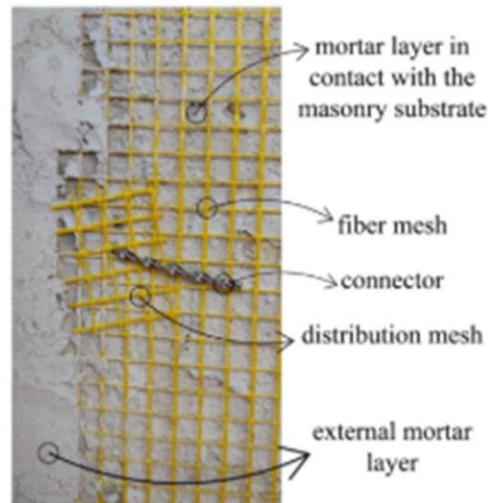


Figure I.24. Système de confinement proposé par Silvia Calo` et al (2025) (1)

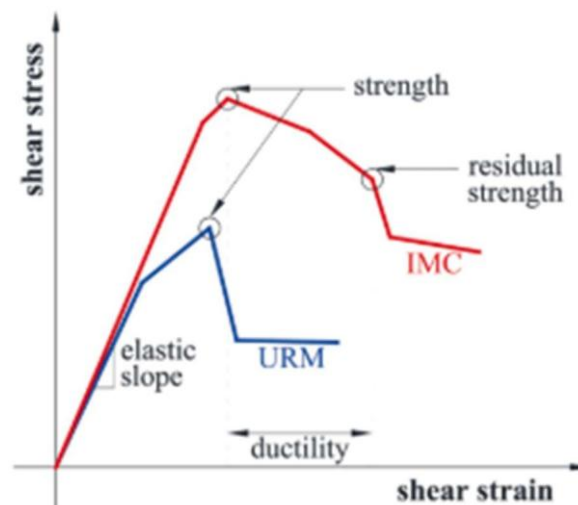


Figure I.25. Modèle de prédiction de système confiné et témoin proposé par Silvia et al (1)

Stefano Belliazzi (2024) et al (53), ont étudié les effets des systèmes FRCM (matrices cimentaires renforcées de fibres) sur la rupture en cisaillement des murs en maçonnerie. Les auteurs sont intéressés principalement à la détermination expérimentale de la capacité des murs en briques d'argile soumis à des efforts de cisaillement par glissement, pour différents niveaux de contrainte normale, à l'aide d'une méthode d'essai standardisée. L'évaluation de la capacité au cisaillement repose sur le critère de rupture de Mohr-Coulomb, qui dépend de la charge axiale externe, de l'angle de frottement interne et de la cohésion dans le cas de la maçonnerie non renforcée.

Les essais expérimentaux ont été réalisés à la fois sur des échantillons non renforcés et renforcés. Les résultats montrent que le FRCM, malgré une longueur d'ancrage réduite dans les essais, permet une amélioration significative des performances structurales des murs en maçonnerie face à la rupture par glissement. La conception de renforcement ainsi que les résultats des auteurs sont donnés respectivement sur les figure I.26 et I.27

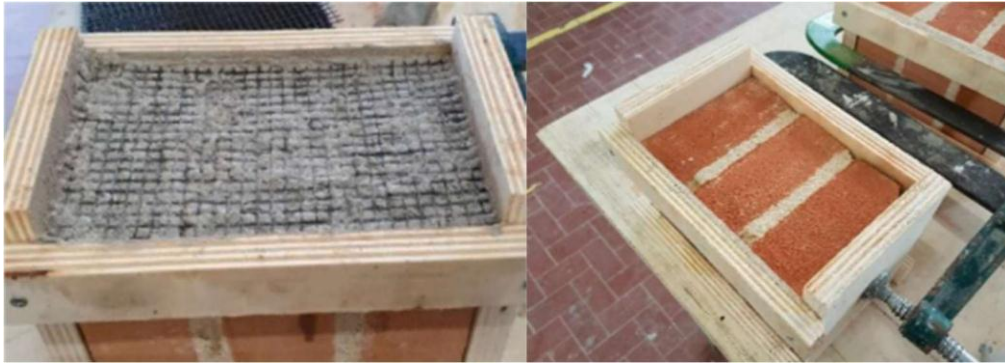


Figure I.26. Système de confinement proposé par Belliazzi (2024) et al (53)

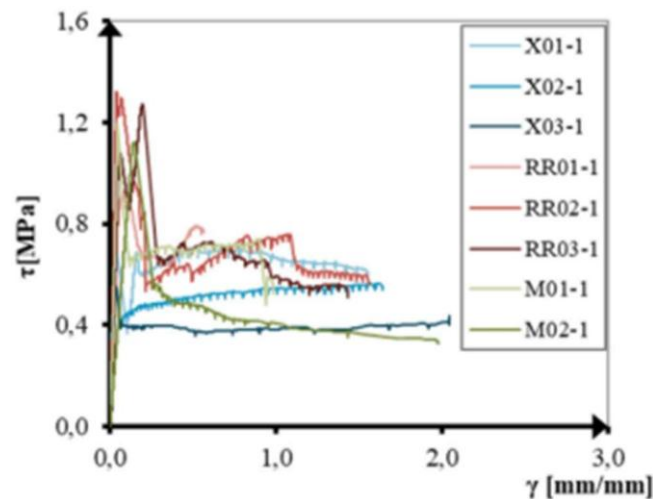


Figure I.27. Résultats obtenu par Belliazzi (2024) et al (53)

I.6 Conclusion

La brique de maçonnerie, bien qu'elle soit un matériau minéral largement utilisé dans la construction traditionnelle, présente des limites mécaniques importantes, notamment en traction et en flexion, en raison de sa fragilité intrinsèque et de sa porosité. Ces caractéristiques, fortement influencées par la qualité des matières premières et le procédé de cuisson, rendent nécessaire le recours à des techniques de renforcement adaptées, en particulier dans les contextes de sollicitations dynamiques ou sismiques.

Dans cette perspective, les composites résistants aux alcalis réactions constitue des matériaux de renforcement innovant, à la fois léger, performant et durable. Intégré dans des systèmes de confinement de type FRCM, il offre une alternative efficace aux armatures métalliques, notamment pour les interventions de réhabilitation, de renforcement discret ou de protection sismique des ouvrages en maçonnerie.

Ainsi nous allons s'intéresser dans le chapitre suivant à la simulation d'un mur qui associé du mortier à base de NHL et de l'AR Glass Fabric pour permettre de conjuguer les avantages d'une approche expérimentale disponible dans la littérature et d'une technologie moderne.

Chapitre II : Modélisation et simulation numérique

II.1. Introduction

La simulation et l'analyse numérique sont devenues quasi nécessaires dans l'étude du comportement des structures de génie civil à l'échelle réelle vu qu'elles ont un impact direct sur la qualité et le temps de réalisation. Elles sont apparues dans le désir de minimiser le coût d'une étude expérimentale avec un nombre d'essais optimisés. Par conséquent, on se propose de développer un modèle numérique pour prédire le comportement des murs en maçonnerie renforcés par des composites. Pour se faire, un modèle expérimental dont les résultats sont publiés dans la littérature sont utilisés pour la validation des modèles.

De ce fait, nous allons présenter d'abord dans ce chapitre le logiciel ABAQUS et son fonctionnement, et ensuite on présentera les différentes étapes menées pour la modélisation d'un mur renforcé par plusieurs matériaux. Le modèle géométrique et le choix des modèles éléments finis pour le maillage sont générés dans un espace tridimensionnel (3D), tout en tenant compte du comportement expérimental des matériaux constitutifs. L'interaction entre les différents éléments ainsi que les étapes d'assemblage et de chargement en déplacement imposé.

II.2. Présentation du modèle expérimentale

Le modèle expérimental étudié par Longo et al (2021) (4) sur des panneaux de mur en brique pleine renforcée par plusieurs type de matériaux a été simulé. Trois mur courts ayant des briques pleines de différentes dimensions assemblées avec des joints de mortier ont été simulés sur ABAQUS, les murs sont de dimensionnes suit :

- La hauteur totale du mur est de 51 cm.
- La largeur est de 51 cm.
- L'épaisseur est de 12cm.
- La semelle du mur est de 12cm.

Les trois murs simulés sont donnés dans la **Figure II.1-3**. Ils sont soumis à un déplacement imposé, d'un déplacement qui varie entre 0.1 jusqu'à 1 mm. Les différents matériaux constitutifs ainsi que leur caractéristique issue des essais de caractérisation sont donnés dans le tableau II.1.

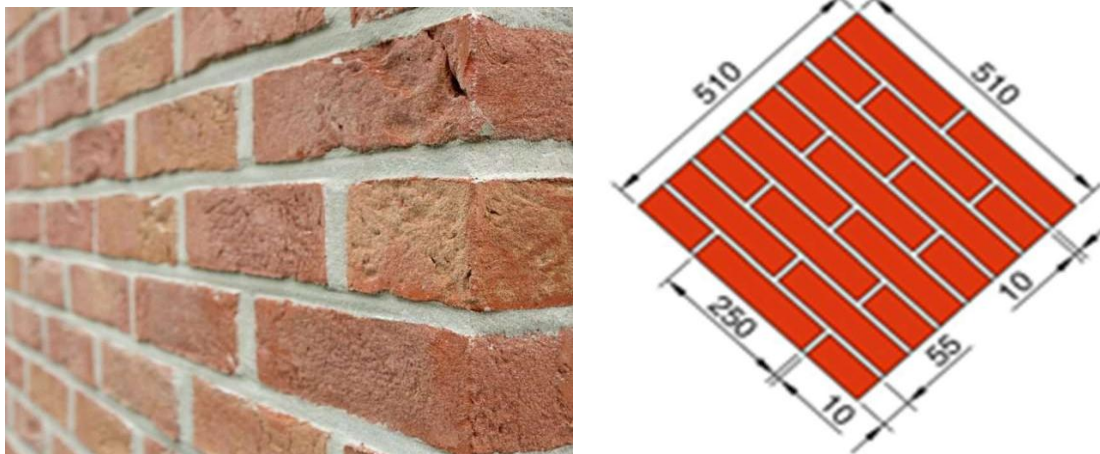


Figure II.1. Dimensions du mur en brique expérimenté par Longo et al (2021) (4)



Figure II.2. Conception du mur en brique renforcé par une matrice NHL expérimenté par Longo et al (2021) (4)



Figure II.3. Conception du mur en brique renforcé par une matrice NHL et un tissu en verre AR expérimenté par Longo et al (2021) (4)

Tableau II.1. Caractéristiques des matière première évaluées par Longo et al (4)

Matériau	Propriété	Moyenne	COV (%)
Brique d'argile	Densité (Kg/mm^3)	$1,8 \cdot 10^{-6}$	-
	Résistance à la compression (MPa)	24,06	14
	Résistance à la traction (MPa)	0,565	-
Mortier de joint à base de ciment	Résistance à la compression (MPa)	8,88	10
	Résistance à la flexion (MPa)	3,25	7
	Densité (Kg/mm^3)	$0,93 \cdot 10^{-6}$	-
Mortier du renfort à base de NHL	Résistance à la compression (MPa)	9,10	3
	Résistance à la flexion (MPa)	3,0	-
	Densité (Kg/mm^3)	$0,83 \cdot 10^{-6}$	-
Tissu verre AR	Résistance à la traction (MPa)	1929	14
	Module d'Young (GPa)	108	16
	Déformation ultime (%)	1,8	12

II.3. Simulation avec ABAQUS

Avant d'utiliser le code de calcul de manière opérationnelle, il est essentiel d'explorer ses capacités et surtout ses limites à travers des tutoriaux qui sont à sa disposition. ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes mécaniques, il est développé dans le but de simuler des phénomènes physiques. La modélisation de ces phénomènes permet de simuler correctement le comportement expérimental des matériaux et de varier certains paramètres (géométriques, rhéologiques...) afin d'en optimiser leur conception.

II.3.1. Présentation du logiciel

ABAQUS est un code de calcul basé sur la méthode des éléments finis (MEF), créée en 1978, il a été développé par Hibbit, Karlson & Sorensen (HKS) (54). Il est particulièrement réputé pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Il offre ainsi, les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicite et dynamiques. Ce logiciel est une solution de simulation évolutive et composé de solution d'analyse unifiée, il peut simuler n'importe quelle géométrie telles que : poutres, plaques, coques et éléments spéciaux (ressorts, masses...) en deux dimensions ou en trois dimensions. ABAQUS ne gère pas les unités ; c'est à l'utilisateur d'utiliser un système d'unités cohérent, tel que montré sur le **Tableau II.2**.

Tableau II.2 – Tableau des unités correspondant à ABAQUS

Grandeur	Masse	Longueur	Temps	Force	Pression	Énergie
Unité SI	Kilogramme	Mètre	Seconde	Newton	Pascal	Joule
Unité courante	Gramme	Millimètre	Milliseconde	Newton	MPa	Millijoule
Unité lourde	Tonne	Millimètre	Seconde	Newton	MPa	Millijoule
Symbole	kg	m	s	N	Pa	J
Dimension	M	L	T	$M.L.T^{-2}$	$M.L^{-1}.T^{-2}$	$M.L^2.T^{-2}$

ABAQUS se divise en trois grands codes :

ABAQUS/Standard : résoudre par un algorithme statique implicite.

ABAQUS/Explicit : résolution par un algorithme explicite.

ABAQUS/cae : fournit un environnement complet de modélisation et de visualisation pour des produits d'analyse d'ABAQUS.

ABAQUS/Standard : Nous permet de réaliser des études statiques en contraintes/déplacements, dynamiques linéaires ou non linéaires. Généralement, c'est la méthode de Newton qui est utilisée pour résoudre les problèmes non linéaires.

La base du formalisme de cette méthode est la suivante. Considérons qu'après i itérations sur l'incrément de temps, l'approximation de la solution est $u(i)$. La différence entre la solution exacte et la solution après i itérations est notée $c(i+1)$. La solution exacte est donnée par :

$$u = u(i) + c(i+1) \quad (\text{II.1})$$

En écrivant symboliquement le principe des travaux virtuels par une équation implicite, $F(u) = 0$. Cela signifie l'équilibre par rapport à la variable nodale considérée. Cette équation implicite peut être développée en série de Taylor en $u(i)$, ce qui donne :

$$F[u(i)] + \frac{dF[u(i)]}{du(i)} \Delta u + \frac{1}{2} \frac{d^2F[u(i)]}{du(i)^2} (\Delta u)^2 + \dots = 0 \quad (\text{II.2})$$

Si l'approximation est proche de la solution $u(i)$, alors $c(i+1)$ est petit et l'équation (1) peut être réduite à ces deux premiers termes donnant ainsi :

$$\frac{dF[u(i)]}{du(i)} \Delta u + \frac{1}{2} \frac{d^2F[u(i)]}{du(i)^2} (\Delta u)^2 = 0 \quad (\text{II.3})$$

Cette équation (2) permet de déterminer $c(i+1)$ pour calculer l'approximation suivante $u(i+1)$.

ABAQUS/Explicit : La version explicite est entièrement vectorisée afin d'utiliser les supercalculateurs multiprocesseurs. Bien que l'analyse soit dynamique, elle peut être utilisée moyennant quelques précautions pour accomplir des analyses quasi-statiques. Le schéma explicite implanté au sein d'Abaqus conduit à des temps de calcul plus faibles comparativement au schéma implicite nommé **ABAQUS/Standard**. L'algorithme explicite assure une certaine robustesse, il est plus efficace pour aboutir à un calcul complet que Abaqus/Standard. Ce code présente une bonne résolution des contacts ce qui est un autre intérêt vis-à-vis de la simulation du procédé. **ABAQUS/Explicit** met en œuvre un schéma d'intégration par différences centrales exprimé par les équations (II.4) et (II.5).

$$\frac{du(i+1/2)}{dt} = \frac{du(i-1/2)}{dt} + \frac{(F(i) + F(i+1))}{2M} \Delta t \quad (\text{II.4})$$

$$U(i+1) = u(i) + \Delta t(i+1) \frac{du(i+1/2)}{dt} \quad (\text{II.5})$$

Où du/dt est la vitesse et d^2u/dt^2 est l'accélération. L'exposant (i) indique le numéro de l'incrément. Une telle forme permet un calcul rapide de l'inverse de cette matrice notamment utilisée pour la détermination de l'accélération de l'équation (II.6).

$$d^2u(i)/dt^2 = M^{-1} * (F(i) - I(i)) \quad (\text{II.6})$$

Où M est la matrice de masse diagonale, F est le vecteur des charges appliquées et I est le vecteur des forces internes. Ainsi, la procédure explicite ne requiert ni itération ni matrice tangente de rigidité. La procédure explicite intègre par rapport au temps en utilisant beaucoup de petits incréments de temps. Or, l'opérateur de différences centrales est conditionnellement stable. La limite de cette stabilité pour cet opérateur est donnée en terme de plus grande valeur propre du système par :

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (\text{II.7})$$

Le CAE (Complete ABAQUS Environment) est l'interface graphique interactive idéale pour la modélisation, la gestion et le post traitement des modèles Abaqus. Le CAE permet d'effectuer la totalité de la mise en donnée, de la création ou l'import de pièce, du maillage jusqu'à l'exploitation avancée des résultats. Le schéma de résolution d'un problème mécanique sous ABAQUS est donné sur l'organigramme de la figure II.4.

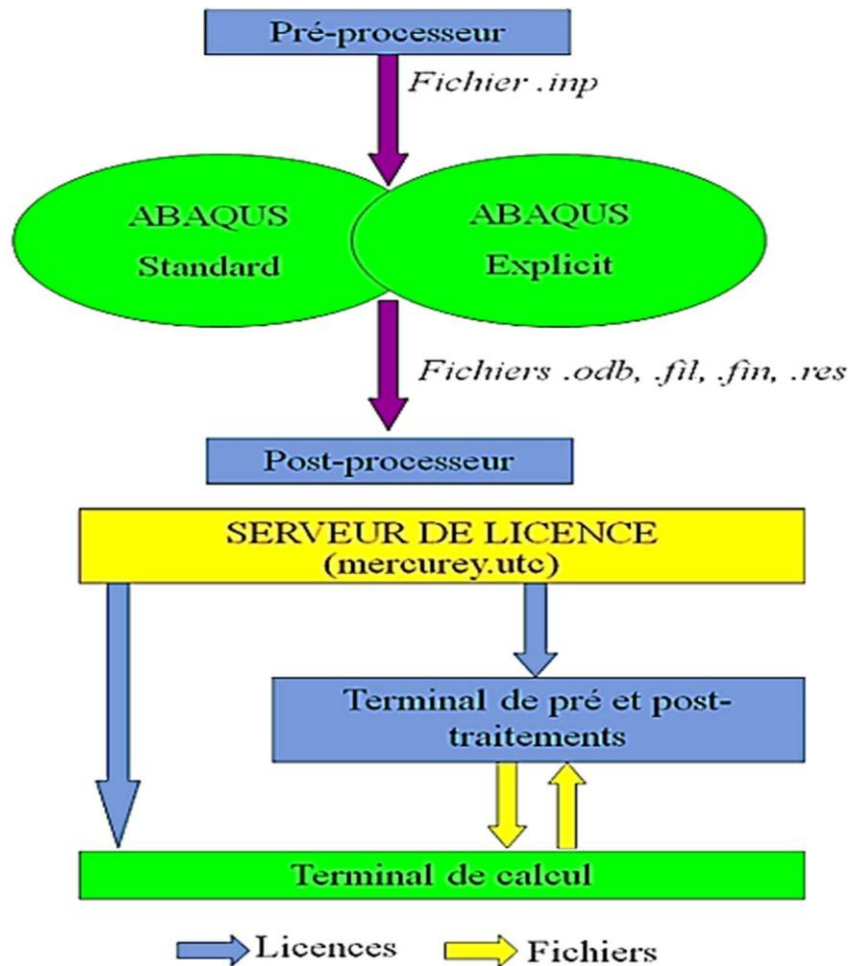


Figure II.4. Schéma de résolution d'un problème mécanique sous ABAQUS

II.3.2. Étapes de simulation

ABAQUS dans laquelle l'utilisateur peut effectuer la totalité de la mise en donnée, de la création ou l'import de pièce, du maillage jusqu'à l'exploitation avancée des résultats (géométrie des différentes pièces, propriétés mécaniques, choix des éléments, choix de l'intégration de la matrice de rigidité, choix du mode de résolution), tel que montrer sur la Figure II.5.

La simulation, qui est généralement exécuté en tâche de fond, est le stade dans lequel ABAQUS résout le problème numérique définies dans le modèle, la résolution de ce modèle se faire en dix grandes étapes dans **ABAQUS** :

- **MODULE PART** : Génération des modèles géométriques
- **MODULE PROPERTY** : Modélisation et paramétrage et matériaux
- **MODULE ASSEMBLY** : Assemblage modèles géométriques

- MODULE STEP : Gestion de la méthode et du temps de calcul
- MODULE INTERACTION : Modélisation des interfaces
- MODULE LOAD : Chargement et acquisition
- MODULE MESH : Maillage et éléments finis
- MODULE JOB : Gestion et stockage des résultats
- MODULE DE VISUALISATION : Observation des résultats.

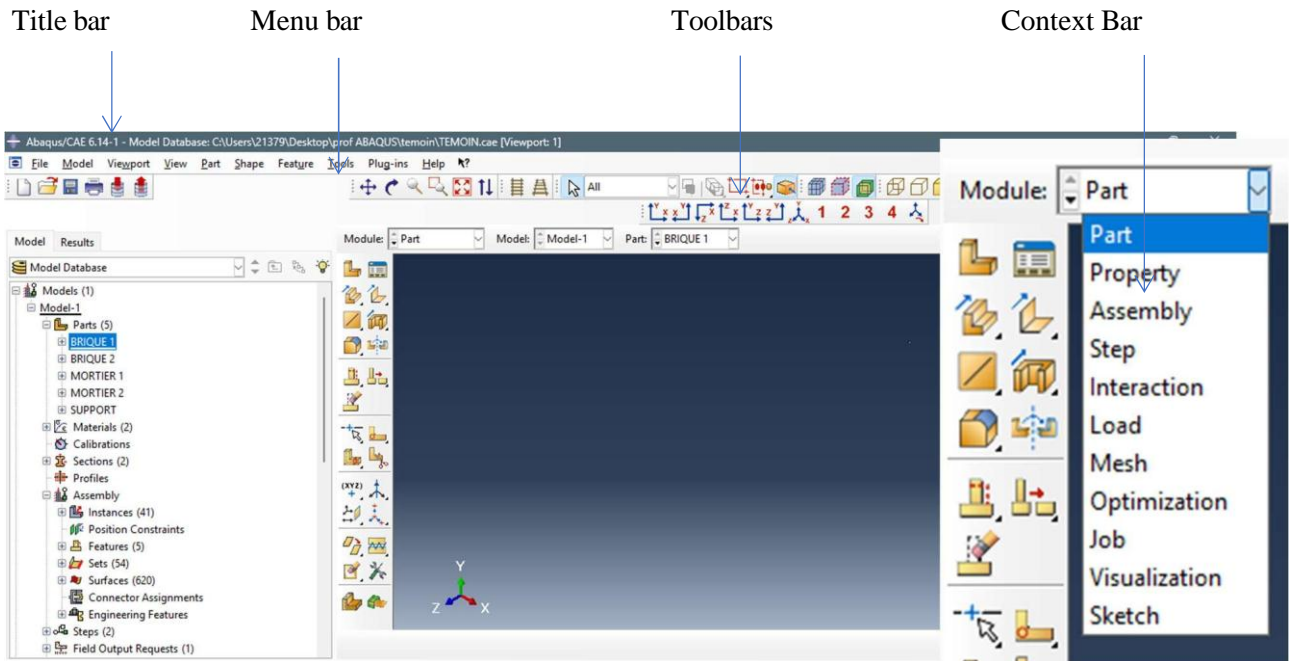


Figure II.5. Les étapes de simulation d'ABAQUS

MODULE PART

Ce module permet de créer des pièces individuelles soit en esquissant leur géométrie directement dans **Abaqus/CAE**, soit en important des modèles depuis d'autres logiciels de conception géométrique. Chaque pièce est générée à l'aide de l'outil **Create Part**.

Lors de la création, plusieurs caractéristiques essentielles doivent être spécifiées. Tout d'abord, la **dimension de l'espace de travail** :

- **3D** pour des modèles tridimensionnels,
- **2D** pour des modèles plans,
- **Axisymétrique** pour les cas où une représentation simplifiée par symétrie axiale.

Ces choix permettent de simplifier le problème et, par conséquent, de réduire le temps de calcul. Il faut ensuite définir le **type de pièce** :

- **Deformable** (déformable),
- **Discrete Rigid** ou **Analytical Rigid** (indéformables).

Tous les croquis sont créés en deux dimensions Figure II.6, mais il est possible de leur donner une forme en 3D en utilisant des fonctions telles que Révolution, Extrusion, qui permettent de générer une épaisseur.

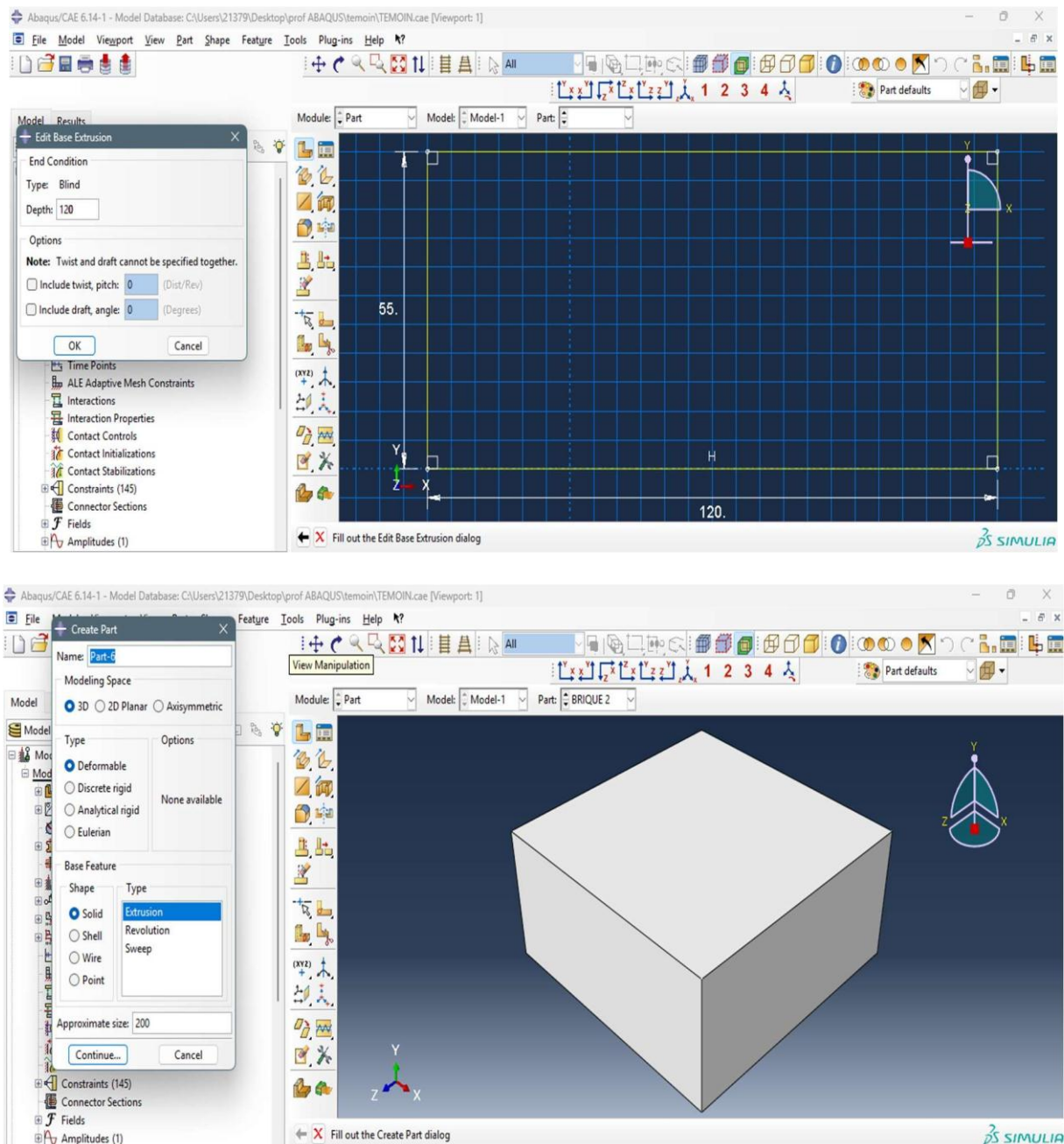


Figure II.6. Création des modèles géométriques le module part

MODULE PROPERTY

Ce module joue un rôle essentiel dans la modélisation numérique d'un phénomène physique. Il permet de définir le matériau en y intégrant l'ensemble de ses propriétés, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou acoustiques.

Dans la section **Material Manager**, il est possible d'entrer différentes valeurs numériques ainsi que des lois physiques (Figure II.7). Étant donné qu'ABAQUS ne gère pas les unités automatiquement, il est fortement recommandé de les définir dès le départ et de les conserver cohérentes tout au long du processus de calcul, tel que le tableau II.1.

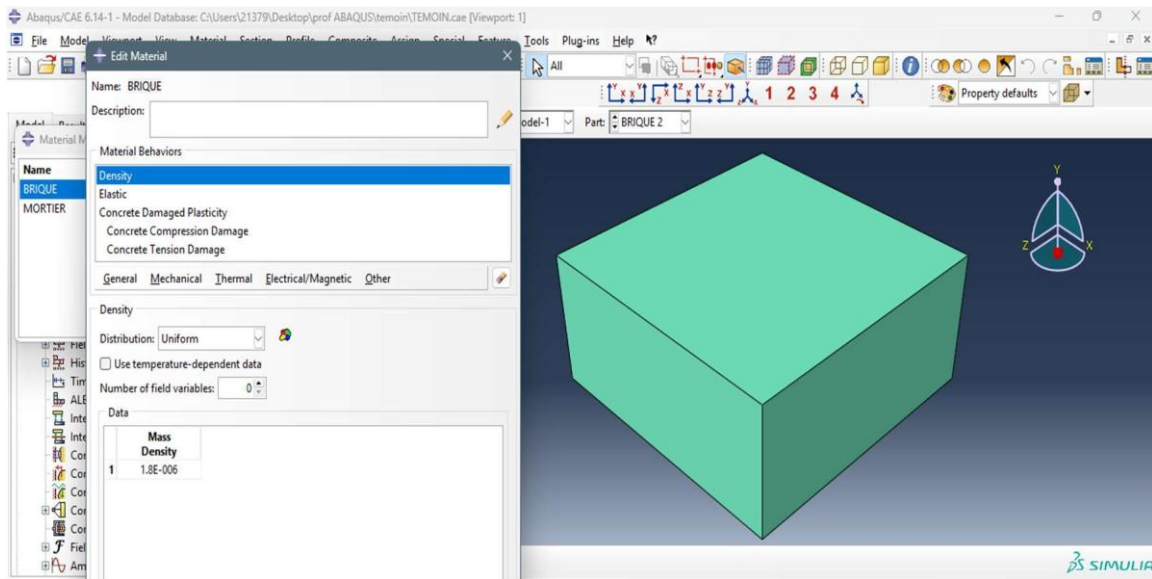


Figure II.7. Création des lois de comportement des matériaux dans le module Property.

MODULE ASSEMBLY

Lors de la création d'une pièce **Figure II.8**, celle-ci est définie dans son propre système de coordonnées, indépendant de celui des autres composants du modèle. L'utilisateur regroupe ensuite l'ensemble des pièces à l'aide de la fonction **Create Instance**, afin de reconstituer le modèle global du phénomène physique à simuler.

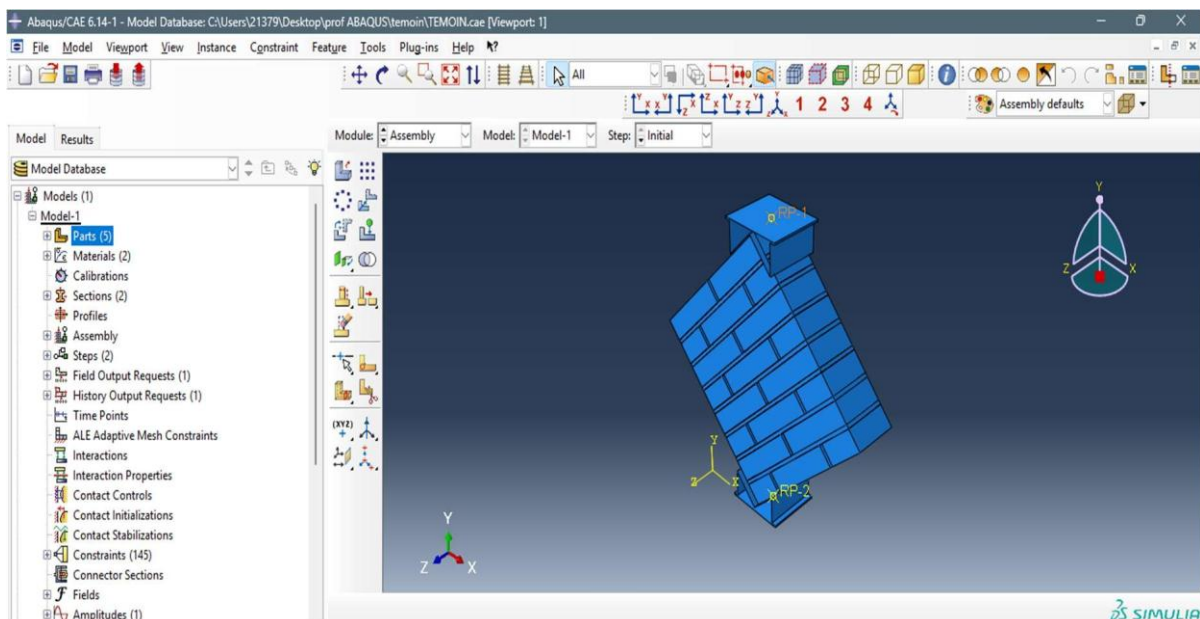


Figure II.8. Assemblage des éléments de la structure dans le module Assembly.

MODULE STEP

Dans le module **Step**, l'utilisateur définit l'ensemble des paramètres de calcul utilisés par ABAQUS. Il spécifie notamment l'incrémentation, c'est-à-dire la valeur du pas de temps, ainsi que la durée totale de la simulation, exprimée en temps « virtuel », sans unité propre.

Le temps réel, ou physique, dépend des unités choisies précédemment (voir tableau dans **Material Manager**). Il est également nécessaire de définir les variables de sortie pertinentes qui seront exploitées ultérieurement dans le module de **Visualisation**.

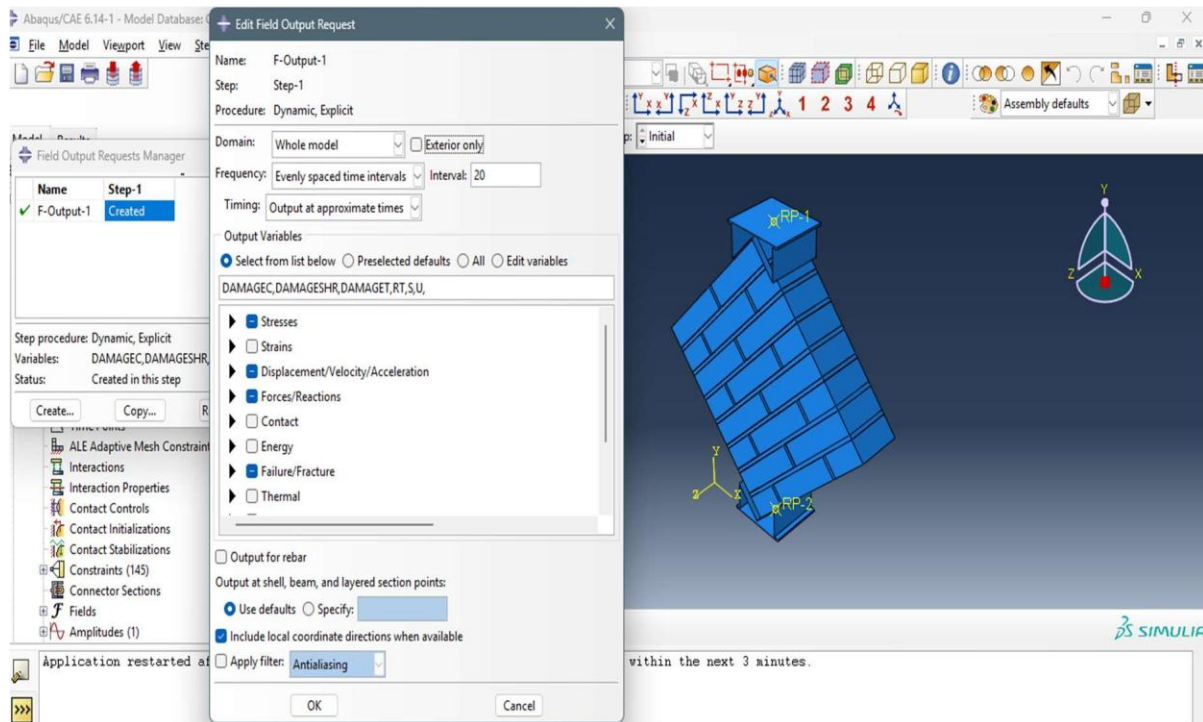


Figure II.9. Gestion des résultats et temps de calcul dans le *module Step*.

MODULE INTERACTION

Il permet de définir les interactions entre les différentes pièces et d'introduire les premières hypothèses relatives aux contacts, aux contraintes mécaniques et aux éventuelles connexions entre les composants tel dans la **Figure II.10**.

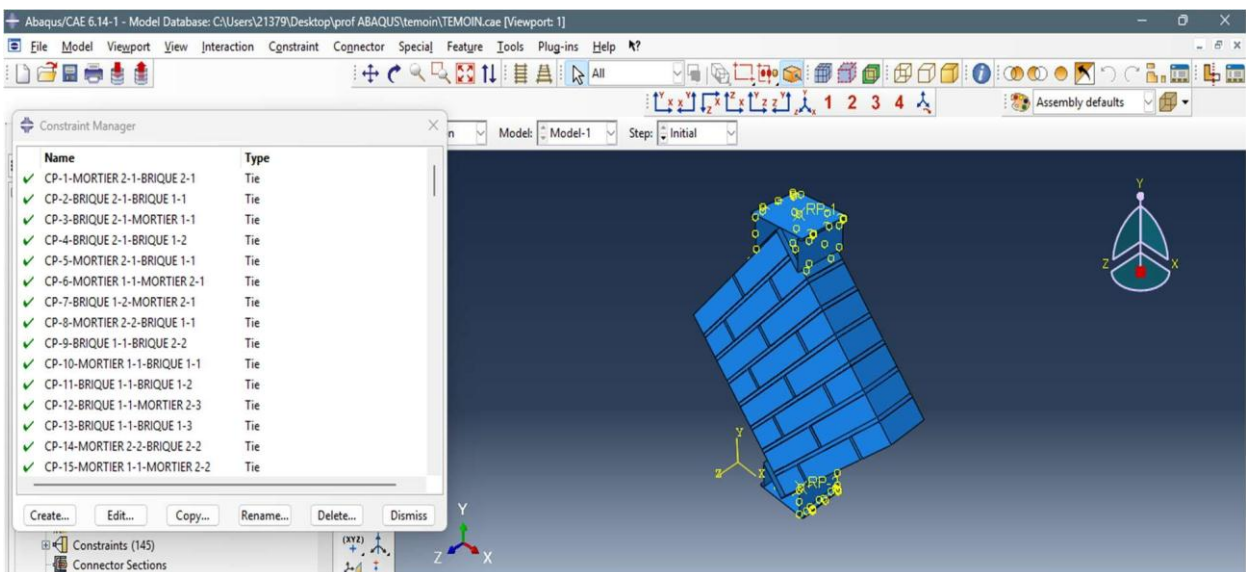


Figure II.10. Gestion des interfaces et contacts dans le *module Interaction*.

MODULE LOAD

L'utilisateur configure le système en utilisant les fonctions **Create Boundary Condition** et **Create Load** : La section **BC** (Boundary Condition) permet de définir l'ensemble des mouvements possibles, ainsi que les degrés de liberté associés à chaque pièce.

La section **Load** quant à elle, regroupe toute les forces appliquées au système et les conditions aux limites (Figure II.11 et II.12)

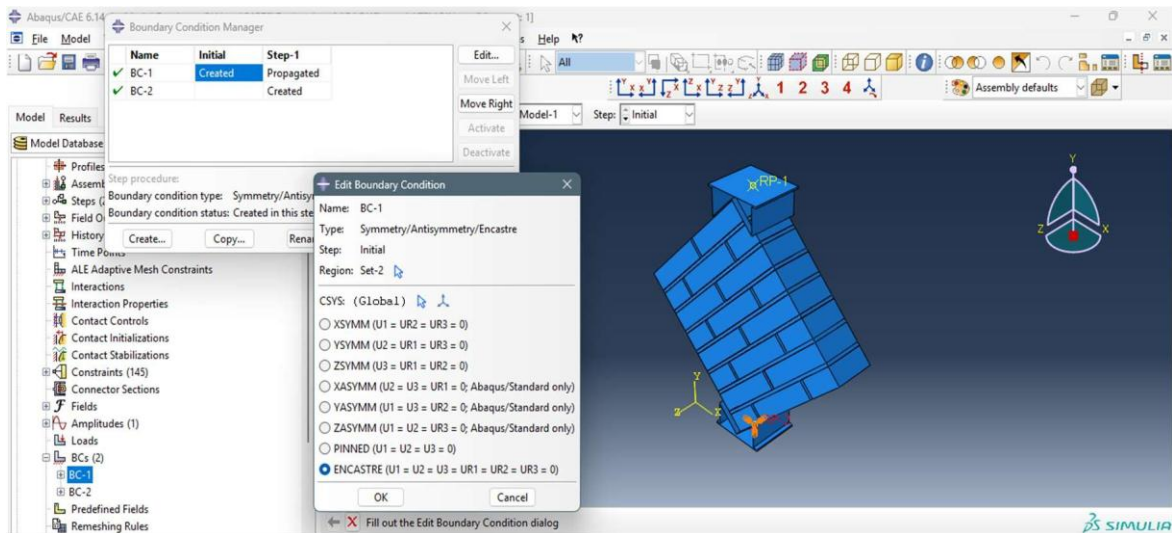


Figure II.11. Gestion des conditions aux limites dans le module *Load*.

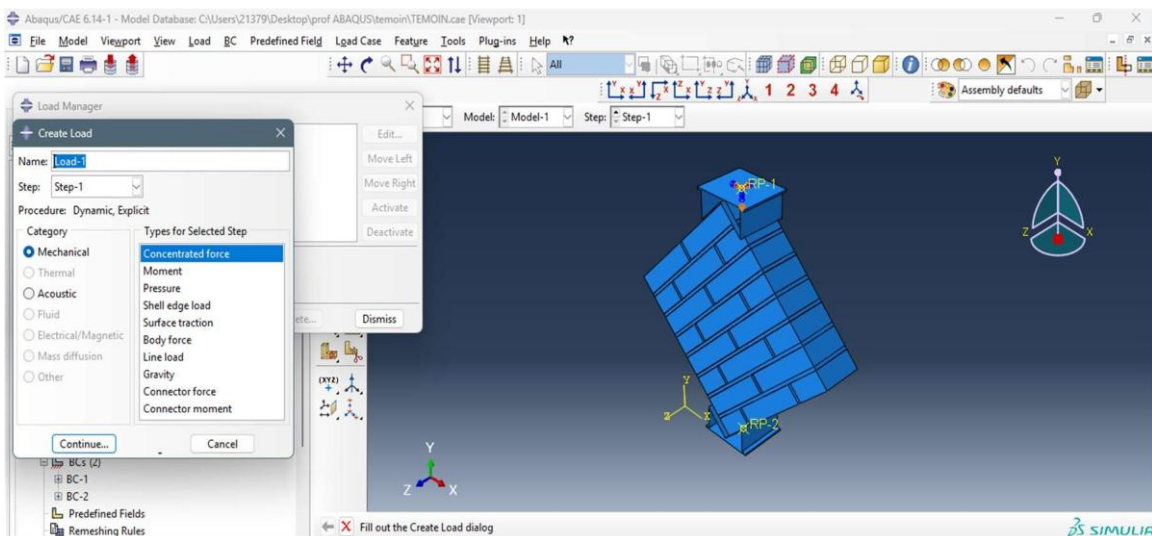


Figure II.12. Gestion du chargement en déplacement imposé dans le module *Load*.

MODULE MESH

Le module Mesh tel que présenter dans la **Figure II.13**, contient des outils qui nous permettent de générer un maillage d'éléments finis sur un assemblage crée dans ABAQUS / CAE. Ce module contient plusieurs éléments finis utilisés pour le calcul exemple : hexaédriques, cubiques.

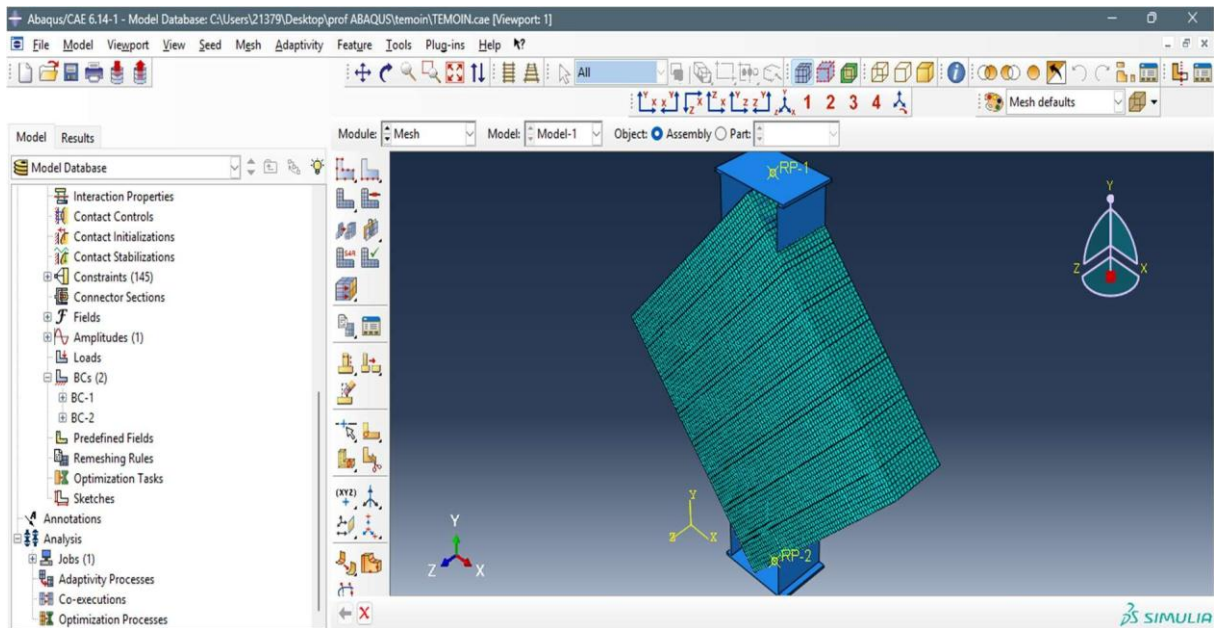


Figure II.13. Maillage en éléments finis dans le module *Mesh*.

MODULE JOB

Une fois que, tout le modèle à simuler est défini (géométrie, matériaux, lois de comportements, les chargements...), on lance le calcul à l'aide de module Job, qui reprend les caractéristiques de ce calcul à partir du module Step, **Figure II.14**.

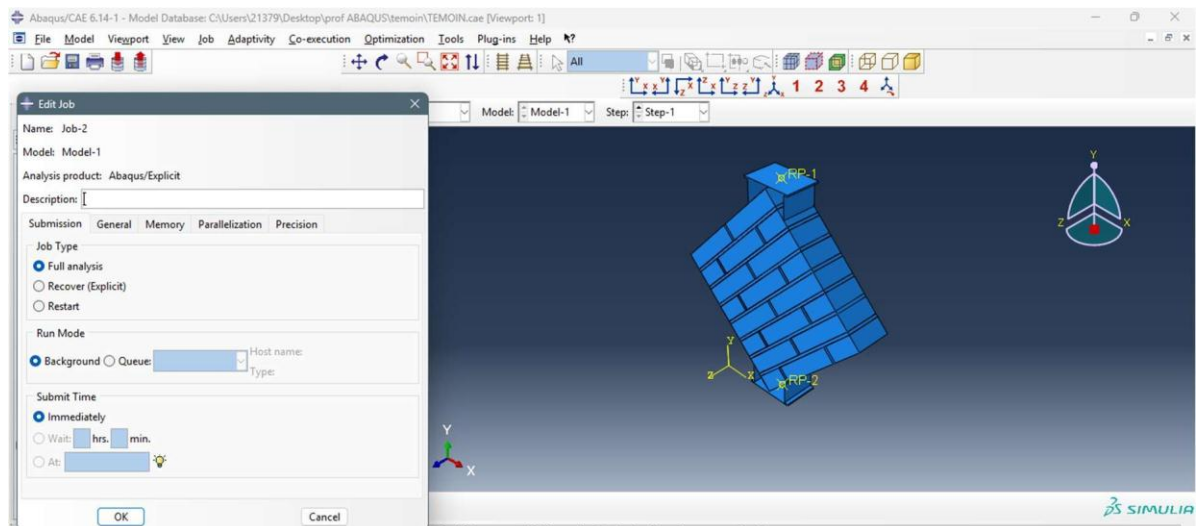


Figure II.14. Création du fichier de gestion des résultats dans le module *Job*.

MODULE VISUALISATION

Le module de visualisation permet d'afficher graphiquement ou numériquement les résultats de l'analyse. L'utilisateur peut consulter ces résultats dans la section « Result », soit sous forme de visualisations des déformations dans « Field Output » (par exemple : déformations, contraintes, vitesses ou forces nodales), soit sous forme de courbes dans « History Output » (comme l'énergie cinétique, l'énergie totale du modèle, l'énergie dissipée ou les déformations).

II.4. Loi de comportement des matériaux

La loi de comportement d'un matériau, comme dans le cadre de notre étude : la brique pleine, le mortier de joint et de renfort et AR glass décrit comment le matériau réagit sous l'effet des sollicitations mécaniques (contraintes et déformations).

La théorie de la plasticité permet de modéliser le comportement irréversible des déformations plastiques (ε_{pl}). Elle repose sur la décomposition de la déformation totale (ε) en deux composantes distinctes : une partie élastique (ε_{el}) et une partie plastique (ε_{pl}). Les déformations élastiques sont associées à une énergie réversible, entièrement récupérable lors du déchargement. En revanche, les déformations plastiques entraînent une dissipation d'énergie irréversible, caractéristique des matériaux soumis à des efforts au-delà de leur limite élastique. Par conséquent, le modèle concrete damage plasticity est utilisé pour décrire le comportement expérimental des éléments fragiles de la structure, comme utilisé par (9,26,32,52,55–58). Par ailleurs, les matériaux composites sont modélisés suivant un modèle élastique, conformément aux essais expérimentaux.

II.4.1. Modèles pour la brique et les mortiers

Pour une brique, qui est un matériau céramique traditionnel, sa loi de comportement doit prendre en compte ses caractéristiques spécifiques : forte résistance à la compression, faible résistance à la traction, comportement fragile, et potentiel endommagement. Dans le modèle CDP, la loi de comportement est généralement basée sur une approche de plasticité associée à un endommagement.

Les mortiers à base de chaux hydraulique naturelle (NHL) et de ciment ont des comportements similaires aux bétons, ils se caractérisent par une résistance modérée à la compression, une très faible résistance à la traction, un comportement globalement fragile, et une sensibilité marquée à l'endommagement, notamment en traction.

La théorie de la plasticité est utilisée pour décrire le caractère irréversible des déformations ε_{pl} . La partition de la déformation totale ε est effectuée en une partie élastique et une partie plastique. Les déformations élastiques ε_{el} mettent en œuvre une énergie dite élastique réversible qui est donc restituée lors de toute décharge, tandis que les déformations plastiques ε_{pl} conduisent à la dissipation d'une énergie irréversible.

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (\text{II.8})$$

Dans le cadre de l’hypothèse des petites déformations, le tenseur des déformations ϵ_{ij} est défini à partir du gradient du champ de déplacement $\{u\} = (u_x, u_y, u_z)$. Il s’exprime comme la partie symétrique du gradient de déplacement, selon la relation suivante :

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{ij} + u_{ji}) \tag{III.9}$$

La relation contrainte-déformation est définie par :

$$\sigma = (1+d)\mathbb{D}_0^{el} : (\mathcal{E} - \mathcal{E}^{pl}) = \mathbb{D}^{el} : (\mathcal{E} - \mathcal{E}^{pl}) \tag{II.10}$$

Ainsi, \mathbb{D}_0^{el} représente la matrice de rigidité initiale (c’est-à-dire celle du matériau non endommagé), tandis que \mathbb{D}^{el} désigne la matrice de rigidité élastique du matériau endommagé. Le paramètre d correspond au taux d’endommagement, variant de 0 (matériau intact) à 1 (matériau totalement endommagé), selon la relation suivante :

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c \times E_c^{-1}}{\epsilon_c^{pl} \times (1/b_c - 1) + \sigma_c \times E_c^{-1}} \tag{II.11}$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t \times E_c^{-1}}{\epsilon_t^{pl} \times (1/b_t - 1) + \sigma_t \times E_c^{-1}} \tag{II.12}$$

Conformément aux principes de la mécanique des milieux endommagés en régime continu, la contrainte effective est définie comme suit :

$$\sigma = \mathbb{D}_0^{el} : (\mathcal{E} - \mathcal{E}^{pl}) \tag{II.13}$$

Les différentes lois utilisées pour ce modèle sont représentées dans le tableau II.3 suivant :

Tableau II.3 – Lois régissant le modèle CDP (59)

Dénominations	Équations
Contraintes effectives en traction	$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0 (\epsilon_t - \epsilon_t^{pl})$
Contraintes effectives en compression	$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0 (\epsilon_c - \epsilon_c^{pl})$
Dommages en compression	$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\epsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}}$
Dommages en traction	$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\epsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}}$

Les principaux paramètres à définir avec rigueur sont liés à la loi contrainte-déformation, puisqu’elle permet notamment de déterminer les valeurs d’écrouissage. Cette loi est basée sur le modèle expérimental proposé par Longo et al (2021) (4) et les valeurs reportées dans le tableau II.2.

Les paramètres identifiés et utilisés dans le modèle numérique de la brique et des mortiers dans le cadre de cette étude sont présentés dans le tableau II.4. De même, les lois de comportement locales de chaque matériau en termes de contrainte et d'endommagement sont confrontés sur les Figures II.16-19.

Tableau II.4 – Paramètres utilisés pour définir le comportement des matériaux

Notations	Paramètres			Dénotation
	Béton	NHL	Mortier	
σ_c (MPa)	24.06	9.1	8.88	Contrainte en compression
$\sigma_{c0} = 0.3\sigma_c$ (MPa)	7.218	2.73	2.664	Contrainte élastique en compression
s_{c1} (%)	1.1	0.6	0.8	Déformation au pic en compression
$\sigma_{t0} = 0.6 + 0.06\sigma_c$ (MPa)	1.618	0.995	0.983	Contrainte maximale en traction
s_{tm} (%)	2.2	1.6	1.8	Déformation correspondante à σ_{t0}
$E = 11000(\sigma_c)^{1/3}$ (MPa)	18000	12000	11000	Module de Young instantané
ν	0.2	0.2	0.2	Coefficient de poisson

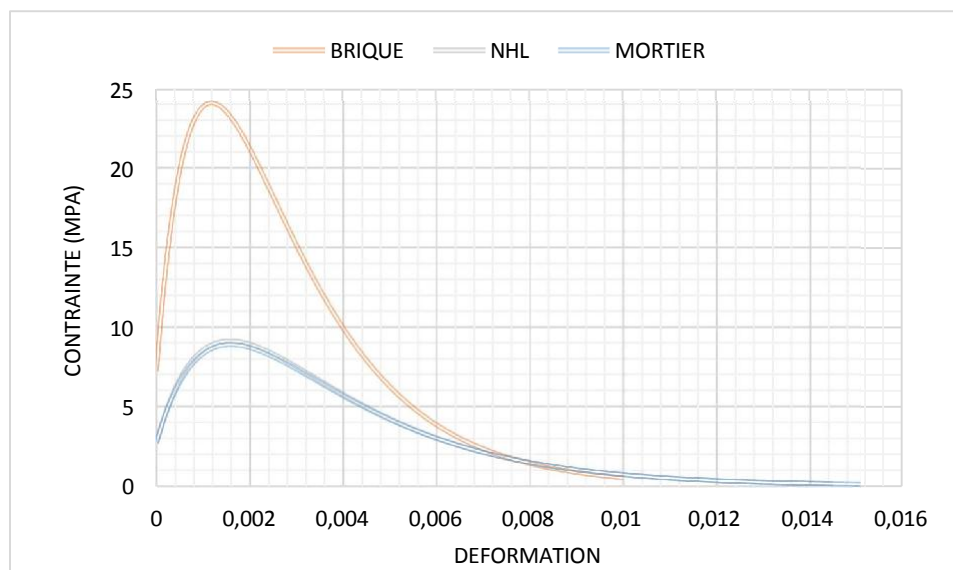


Figure II.15. Loi de comportement en compression du CDP.

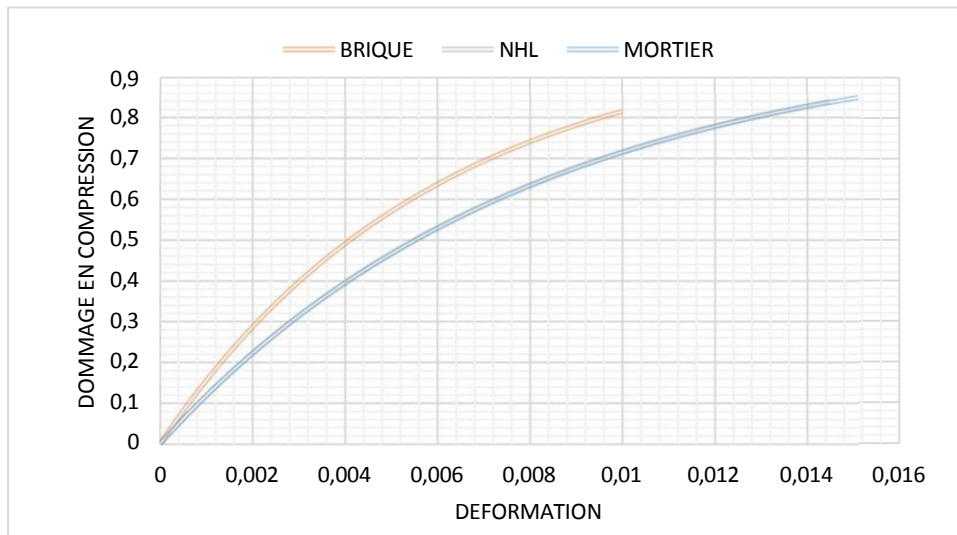


Figure II.16. Evolution des endommagements en compression du CDP.

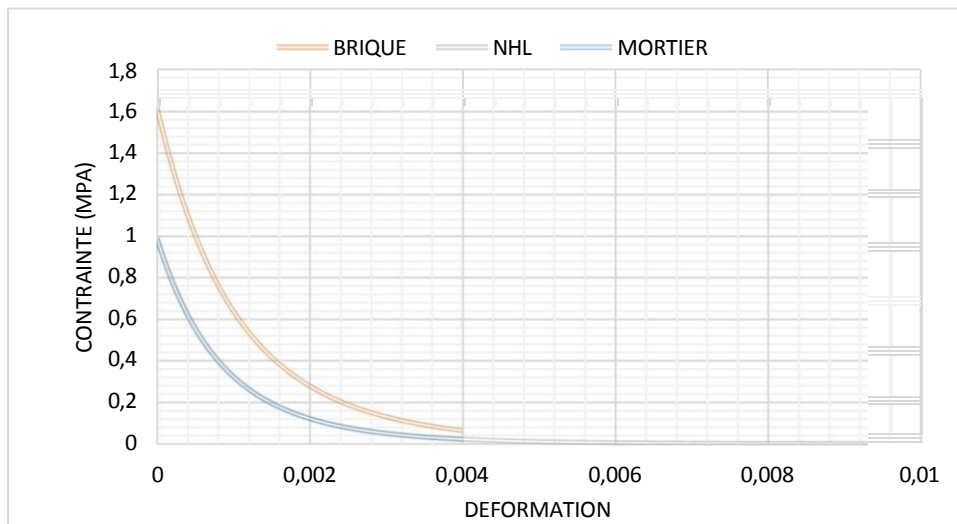


Figure II.17. Loi de comportement en traction du CDP.

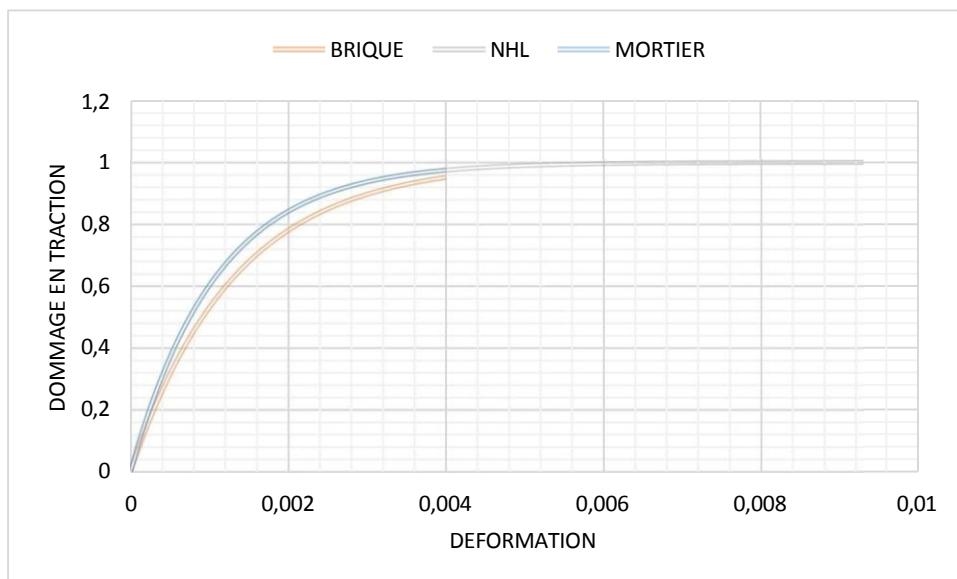


Figure II.18. Evolution des endommagements en traction du CDP.

II.4.2. Modélisation des composites AR

Les matériaux composites ont un comportement particulier, ceci est dû essentiellement à deux facteurs : le premier résulte de son comportement anisotrope dans les couches élémentaires et le deuxième facteur dérive de la stratification qui consiste en l'empilement de plusieurs couches. Le but de cette section est de présenter le comportement élastique des matériaux orthotropes utilisés.

Les équations constitutives peuvent être formulées selon (60) comme suit:

$$\begin{aligned}
 \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} &= [T] \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (II.8)
 \end{aligned}$$

Où : {σ} est le vecteur des contraintes dans les directions effectives, [T] est la matrice de transformation, [Q] est la matrice de rigidité affinée et calculée en fonction des caractéristiques mécaniques de la lamina unidirectionnelle. Alors que {ε} est le vecteur des déformations.

Tableau II.5 – Paramètres utilisés pour définir le comportement des matériaux (4)

	Module de Young	Densité (kg /m ³)	Coefficient de poisson	Epaisseur (mm)
AR Glass	108000	7.6 * 10 ⁶	0.33	0.055

II.5. Stabilité de maillage

Des simulations non linéaires utilisant l'élément fini ABAQUS (54), exploitant spécifiquement le solveur explicite, ont été utilisées pour modéliser le comportement en cisaillement des mur en maçonnerie renforcées.

La brique et les mortiers ont été maillée à l'aide d'éléments coquilles continus à 8 nœuds avec intégration réduite et contrôle du fléchissement, désignés **SC8R**. Le verre AR a été simulée à l'aide d'éléments solides 3D à 8 nœuds (**C3D8R**), connus pour leurs excellentes capacités de contrôle du fléchissement et d'intégration réduite.

Afin de réduire l'effort de calcul, la modélisation a été simplifiée en utilisant des éléments rigides à quatre nœuds, étiquetés **R3D4**, pour mailler les supports rigides de chargement.

Le choix de la taille de maillage appropriée est crucial dans une simulation par éléments finis car il impacte à la fois la fiabilité des résultats et l'efficacité du calcul du modèle. Utiliser une variété de tailles d'éléments permet au modèle de capturer des informations de modélisation affinées tout en représentant efficacement le comportement global.

Pour plus de clarté, la **figure II.20** montre les modèles numériques de taille moyenne des éléments et les détails de l'âme modélisée selon la direction des fibres.

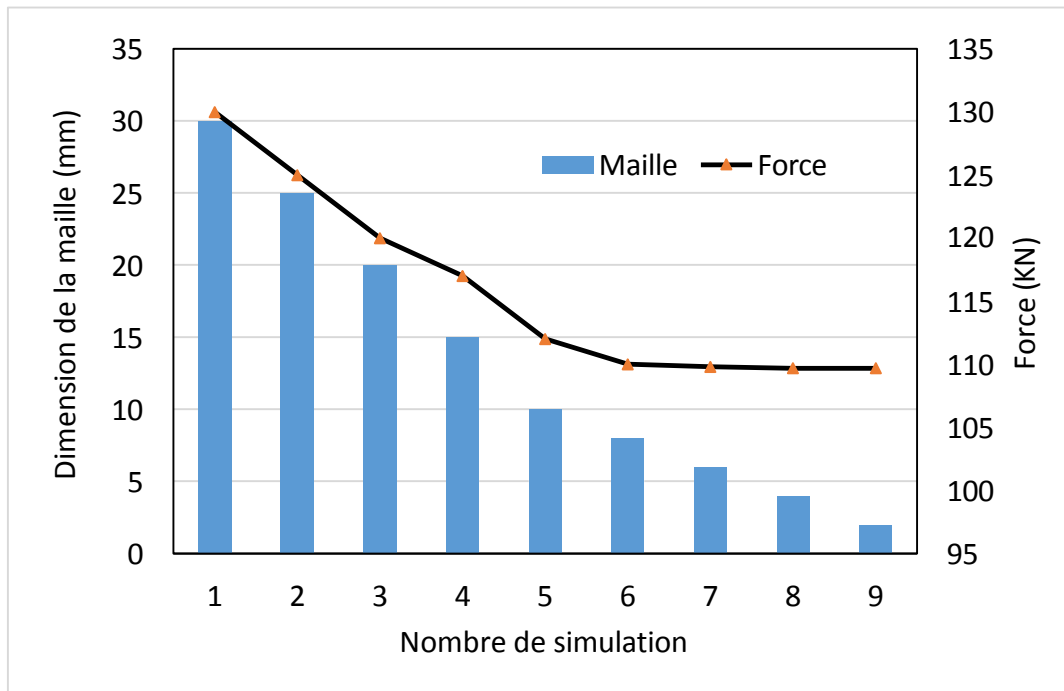


Figure II.19. Courbes de convergence du maillage des murs simulés.

II.6. Présentation des modèles

Les trois configurations considérées dans la présente étude sont données dans cette section. Le premier modèle donné dans la **Figure II.20** est assimilé avec deux différentes dimensions de brique pleine liée par des joints de mortier :

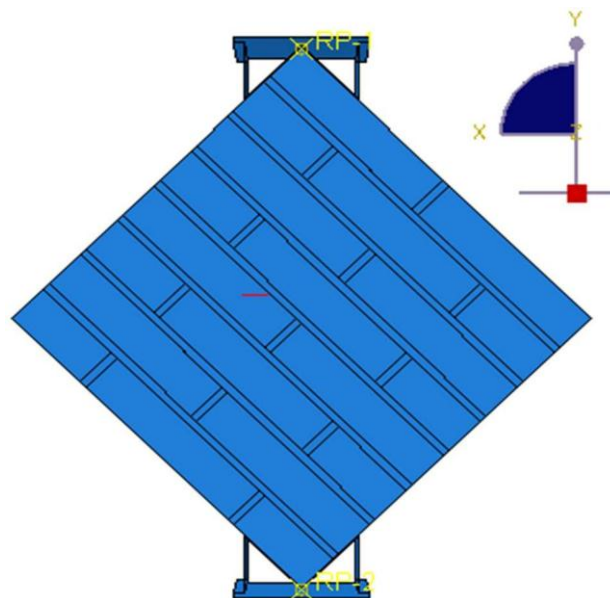


Figure II.20. Modèle simulé du mur témoin, noté : URM.

Le deuxième modèle **Figure II.21** est assimilé avec deux différentes dimensions de brique pleine liée par des joints de mortier avec le composant NHL sur la surface du mur.

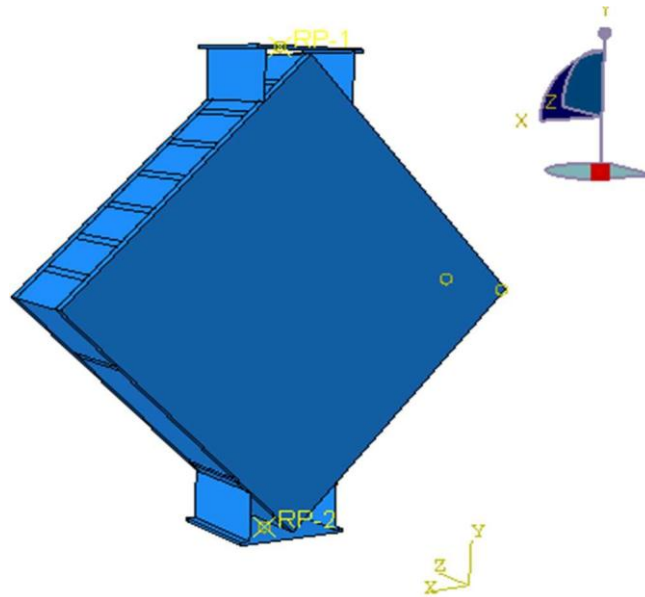


Figure II.21. Modèle simulé du mur renforcé par un mortier NHL, noté : NHL.

Le troisième modèle de la **Figure II.22** est assimilé avec deux différentes dimensions de brique pleine liée par des joints de mortier avec le composant NHL sur la surface du mur renforcé par un tissu AR glass.

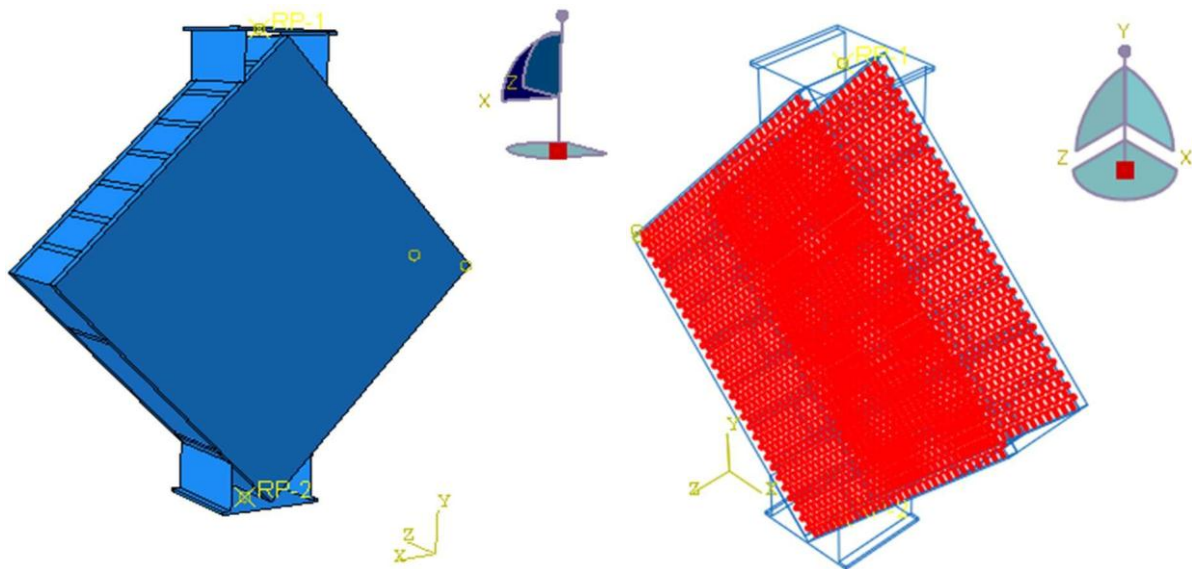


Figure II.22. Modèle simulé du mur renforcé par un mortier NHL et un tissu de verre AR, noté : FRCM.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la démarche de modélisation numérique d'un mur en brique pleine, assemblé à l'aide d'un mortier à base de chaux hydraulique naturelle (NHL) et renforcé par un tissu en fibres de verre résistant aux alcalis réaction (AR Glass Fabric). L'objectif principal était de simuler le comportement mécanique global du système composite sous sollicitations, en reproduisant au plus près la réponse réelle du matériau.

Le logiciel ABAQUS a été utilisé pour mettre en place un modèle éléments finis tridimensionnel, intégrant :

- Un comportement élasto-plastique endommageable pour la matrice NHL et le mortier de joint à l'aide du modèle CDP,
- Une modélisation orthotrope linéaire pour le tissu AR Glass Fabric,
- Une liaison interface entre le tissu et la matrice simulée par une liaison cohésive ou un couplage de type "embedded element",
- Des conditions aux limites et de chargement représentatives des sollicitations expérimentales ou structurelles.

Cette simulation constitue un outil précieux pour la compréhension du comportement global de ces structures renforcées, et pourra être exploitée pour optimiser les choix de matériaux et les configurations de renforcement dans les pratiques de restauration ou de construction à base de matériaux traditionnels. Cette démarche sera exploitée lors de la validation des modèle et la présentation des résultats assigné dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Résultats, analyses et discussions

III.1 Introduction

A travers ce chapitre, nous allons présenter et interpréter les résultats obtenus à l'issue des simulations numériques menées sur le comportement mécanique de murs en brique pleine renforcés par des composites NHL (Chaux Hydraulique Naturelle) et des tissus en fibres de verre alcalino-résistantes (AR Glass fabric).

Une étude numérique, validée par des données issues de la littérature scientifique, a été réalisée à l'aide du logiciel ABAQUS, en intégrant un modèle de comportement adapté aux matériaux de maçonnerie. Les résultats issus de la simulation, en termes de comportement global (force-déplacement) et de réponses locales (fissuration, endommagement), sont présentés sous forme de graphes et de cartographies des champs de dommage.

III.2 Validation des modèles

Étant donné que notre modèle numérique élément finis proposé et le modèle expérimental tirés de la revue littérature ont la même géométrie et sont constitués de matériaux possédant les mêmes propriétés, nous nous permettons de faire une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux.

III.2.1 Validation du modèle URM

Une validation qualitative et quantitative du modèle témoin est réalisée à travers la confrontation des courbes de capacité et des mécanismes de rupture. Les figures III.1 et III.2 illustrent une comparaison des modes de ruptures entre les essais et la simulation.

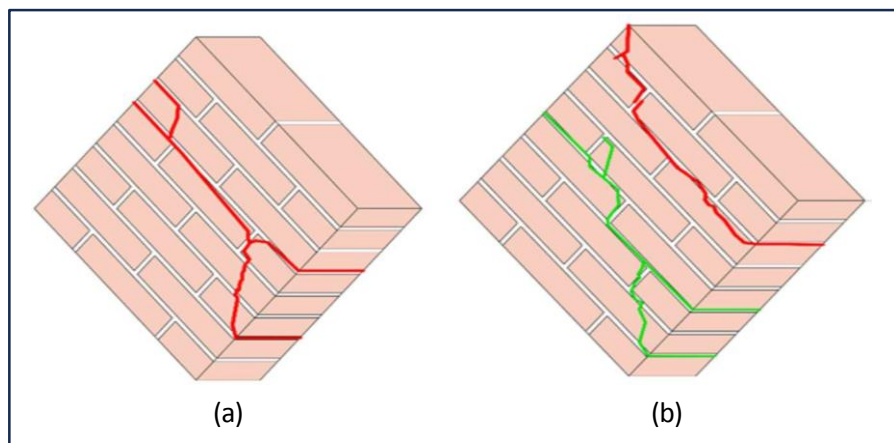


Figure III.1 : Motifs de fissuration expérimentaux des mur témoin URM

La figure illustre la cartographie de l'endommagement en traction (variable *DAMAGE_T*) obtenue par simulation numérique sous ABAQUS. Les zones colorées en rouge indiquent les régions les plus endommagées, avec un indice de dommage proche de 1, ce qui traduit une fissuration complète du matériau à ces endroits. On observe une fissuration diagonale marquée traversant le mur, typique d'un mode de rupture en cisaillement. Les zones vertes et jaunes indiquent des dommages modérés à élevés, tandis que les zones bleues traduisent un matériau encore non endommagé.

Figure III.2 : Progression des dommages en traction dans un mur URM

Une très bonne adéquation entre le modèle numérique et expérimental est observée en termes de lignes de rupture. En effet, la **figure III.3** montre la courbe contrainte-déformation en cisaillement d'un mur en maçonnerie non renforcé (URM), obtenue à la fois par modélisation numérique (FEM) et par essais expérimentaux. On observe une bonne concordance entre les deux approches jusqu'à la phase de pic, ce qui confirme la capacité du modèle numérique à reproduire le comportement réel du matériau.

—

Figure III.3 : Courbes de contrainte de cisaillement - déformation d'un mur URM :
Modélisation FEM et résultats expérimentaux**III.2.2 Validation du modèle NHL**

La **figure III.4 et III.5** présentent la localisation des fissures de cisaillement et la cartographie de l'endommagement en traction (*DAMAGET*) dans un mur en brique pleine renforcé à l'aide de mortier à base de chaux hydraulique naturelle (NHL) respectivement. Les zones en rouge foncé indiquent les régions présentant un endommagement quasi-total (valeur proche de 1),

correspondant à une fissuration majeure. Cette fissuration principale suit une trajectoire diagonale typique des mécanismes de rupture en cisaillement, mais comparée à un mur témoin non renforcé, elle semble plus confinée et mieux contrôlée.

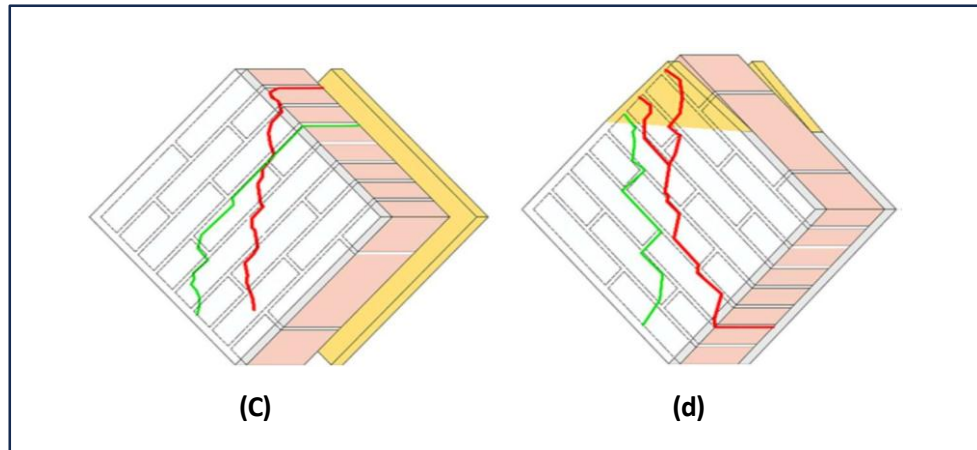


Figure III.4 : Motifs fissuration expérimentaux des murs NHL.

Figure III.5 : Progression des dommages dans le mur NHL.

La **figure III.6** ci-dessus représente la courbe contrainte-déformation en cisaillement d'un mur en brique pleine renforcé par un mortier à base de chaux hydraulique naturelle (NHL). Les résultats issus de la simulation numérique (*NHL FEM*) sont comparés aux données expérimentales (*NHL EXP*), accompagnées d'une courbe moyenne.

La comparaison montre une bonne cohérence entre les résultats numériques et expérimentaux, notamment jusqu'au point de contrainte maximale, ce qui valide le comportement modélisé. La contrainte de cisaillement atteint un maximum d'environ 1,2 MPa pour une déformation d'environ 1,0 %, soit une amélioration significative par rapport à la maçonnerie non renforcée.

Figure III.6 : Courbes de contrainte de cisaillement - déformation d'un mur NHL :
Modélisation FEM et résultats expérimentaux

III.2.3 Validation du modèle FRCM

Suivant la même démarche, le modèle FRCM a été validé par illustration des cartographies de dommage sur la figure III.8 et l'état de fissuration dans un mur en brique pleine renforcé par un composite FRCM, combinant un mortier NHL et un tissu en fibres de verre (AR Glass Fabric) sur la figure III.7. Les dommages sont concentrés principalement le long de diagonales internes, indique les régions fortement sollicitées en traction où la fissuration s'est développée de manière significative, atteignant un niveau de dommage proche de 97%.

En revanche, les zones qui témoignent d'un endommagement modéré à faible, tandis que les zones en bleu foncé (valeurs proches de 0) représentent les parties encore intactes, non affectées par les efforts de cisaillement.

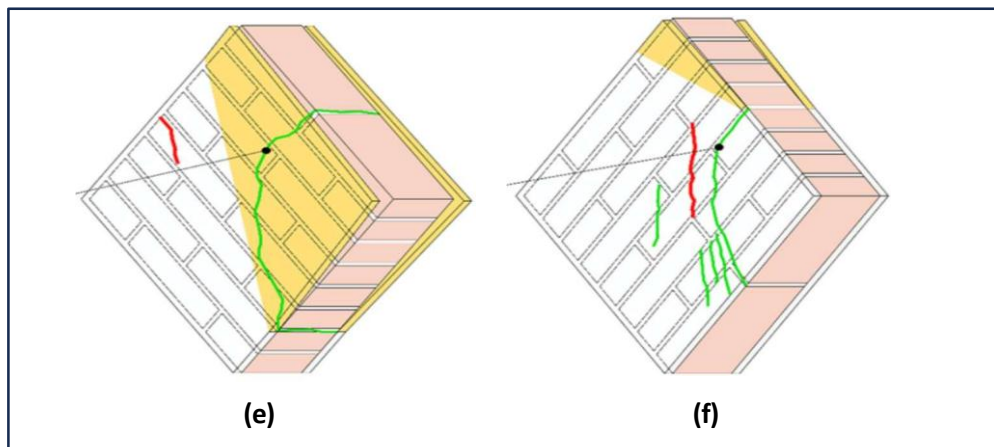


Figure III.7 : Motifs fissuration expérimentaux des mur FRCM

Figure III.8 : Progression des dommages dans le mur FRCM.

Cette distribution des dommages montre une répartition plus contrôlée et retardée des fissures par rapport au mur non renforcé (URM), ce qui témoigne de l'efficacité du système de renforcement FRCM. Le tissu AR Glass, bien ancré dans la matrice NHL, assure une meilleure dissipation des contraintes et un contrôle de la propagation des fissures, ce qui améliore la ductilité et la résistance résiduelle du mur même après endommagement.

La **figure III.9** ci-dessus représente la courbe contrainte-déformation en cisaillement d'un mur en brique pleine renforcé par un système FRCM, composé d'un mortier à base de chaux hydraulique naturelle (NHL) et d'un tissu en fibre de verre AR Glass. Les résultats issus de la simulation numérique (FRCM FEM) sont comparés aux données expérimentales (FRCM EXP), illustrant une cohérence remarquable entre les deux approches.

Shear stress (Mpa)

Figure III.9 : Courbes de contrainte de cisaillement - déformation du mur FRCM :
Modélisation FEM et résultats expérimentaux

La comparaison montre une correspondance étroite jusqu'à la contrainte maximale, située autour de 1,3 MPa pour une déformation avoisinant 1,1 ‰. Cette performance traduit une amélioration significative de la résistance au cisaillement par rapport à la maçonnerie non renforcée, et même supérieure à celle obtenue par le renforcement avec mortier seul.

La courbe présente une phase post-pic relativement stable, avec une capacité résiduelle non négligeable, ce qui indique un comportement plus ductile et mieux maîtrisé face à la fissuration. La présence du tissu AR Glass permet une meilleure tenue des fissures et contribue à la redistribution des efforts même après l'atteinte de la contrainte maximale.

En résumé, cette courbe met en évidence :

- Une augmentation marquée de la capacité en cisaillement grâce à l'assemblage NHL + AR Glass,
- Une très bonne adéquation entre simulation numérique et essai expérimental,
- Une amélioration de la ductilité et de la stabilité post-rupture, soulignant l'efficacité du système FRCM.

La **figure III.10** présente l'évolution des modes de fissuration observés sur un spécimen de panneau en maçonnerie soumis à un essai de compression diagonale, et les modes de rupture prédits par les simulations.



Figure III.10 : Distribution des dommages et des fissures dans les éléments modélisés

La comparaison illustre la cohérence satisfaisante entre le mode de rupture observé expérimentalement et les prédictions des simulations numériques. Comme le montrent les images, la localisation des dommages, le développement des fissures et le schéma global de rupture obtenus via le modèle numérique correspondent fidèlement à ceux constatés lors des essais expérimentaux. Cette concordance confirme la capacité du modèle à reproduire avec précision le comportement non linéaire du matériau et les mécanismes de défaillance, validant ainsi son utilisation pour des analyses.

Le tableau III.1 résume les différents résultats obtenus afin de mettre en valeur la validation des modèles proposés.

Tableau III.1 – Récapitulatif des résultats de validation des modèles

Wall designation	Exp. peak load (KN)	FEM peak load (KN)	Exp. strain (‰)	FEM. strain (‰)	Exp. shear strength (MPa)	FEM. shear strength (MPa)
URM	47.96	49.39	0.91	0.88	0.533	0.570
	44.41					
NHL	70.81	97.06	0.96	1.1	1.081	1.121
	116.25					
FRCM	107.25	110.77	1.21	1.23	1.22	1.256
	103.88					

III.3 Discussion des résultats de la simulation

Un complément de résultats numérique est présenté dans cette section afin de mieux comprendre le comportement des structures étudiées. En effet, l'évolution des contraintes, déplacement et des endommagements de compression et traction sont discutés.

III.3.1 Mur témoin URM

À travers la **Figure III.11**, l'évolution des déplacements au cours du chargement (U, Magnitude) sur un mur en maçonnerie non armée sous une charge progressive est présentée. Les observations suivantes sont formulées :

Incrément de Temps = 0.25 : Les analyses des déplacements révèlent une intensité modérée et localisée, principalement concentrée dans la région supérieure. Ce phénomène s'accompagne d'une propagation progressive des déplacements vers les zones inférieure droite et centrale. En revanche, la section

Incrément de Temps = 0.5: Dans le cadre de l'analyse des déplacements au sein des structures, il est observé que les déplacements maximaux connaissent une augmentation significative, passant de $9,491 \times 10^{-3}$ à $5,008 \times 10^{-2}$.

De surcroît, une plus grande partie de la surface du mur manifeste des mouvements importants, en particulier dans la région supérieure.

Incrément de Temps = 0.75: Les déplacements observés dans l'étude atteignent une magnitude de $8,96 \times 10^{-2}$, approximativement égale à 0,1 unité. Par ailleurs, il convient de noter que l'étendue de la zone

Incrément de Temps = 1.0 : L'analyse du mur révèle une dégradation avancée ainsi qu'un risque accru de rupture. Des bandes de mouvements considérables sont observées, témoignant de la présence de fissures.

<i>5eme FRAME</i>	<i>10eme FRAME</i>
<i>15eme FRAME</i>	<i>20eme FRAME</i>

Figure III.11 : Evolution des déplacements dans les éléments du mur URM

Les figures montrent clairement comment le mur en maçonnerie non armée se déforme en deux phases :

- **Phase Initiale (0.25 - 0.75) :** Des mouvements progressifs, surtout au point de charge, avec une déformation encore diffuse.
- **Phase de Rupture (1.0) :** Sous une forte charge, le mur ne peut plus supporter et commence à se fissurer, indiquant des mouvements très importants entre les sections.

À travers les cartographies de la **Figure III.12**, qui représentent la distribution des contraintes de Von Mises ($S, Mises$) dans un mur témoin en maçonnerie non armée (URM) sous une charge progressive, voici une interprétation de la propagation des contraintes :

<i>A5 : 5eme FRAME</i>	<i>A6 : 10eme FRAME</i>
<i>A7 : 15eme FRAME</i>	<i>A8 : 20eme FRAME</i>

Figure III.12 : Propagation des contraintes dans le Mur témoin

Les contraintes exercées atteignent des niveaux particulièrement élevés. De plus, leur distribution se concentre le long de lignes spécifiques, indiquant les zones susceptibles de présenter des fissures au sein de la structure du mur.

- Des fissures apparaissent le long d'une diagonale, ce qui est typique dans les murs en maçonnerie lorsque les contraintes dépassent la résistance du matériau.
- À plusieurs endroits, les contraintes sont plus faibles, car elles ne soutiennent plus le mur à cause des fissures
- Au début, les contraintes sont réparties, mais au fur et à mesure qu'elles augmentent, elles se concentrent là où le mur pourrait se casser.
- Cela montre que la maçonnerie non armée devient fragile et se fissure lorsque les contraintes dépassent sa résistance.

A travers ces **Figure III.13** représentent l'évolution des dommages de traction dans le mur en maçonnerie URM. Le paramètre "DAMAGET" mesure l'endommagement, allant de 0 (pas de dommage, en bleu) à des valeurs plus élevées (en rouge, indiquant un gros dommage).



Figure III.13 : Propagation des dommages en traction dans le mur témoin URM

Les dommages observés sont considérables, avec des zones dégradées étendues. Le mur présente des fissures significatives, indiquant une incapacité à supporter les charges auxquelles il est soumis. Le mur en maçonnerie sans renfort reste intact jusqu'à un certain point, puis subit rapidement des dommages qui mènent à sa rupture.

À travers ces **figure III.14**, qui représentent le paramètre "DAMAGEC" dans le mur témoin en maçonnerie non armée (URM) sous une charge progressive, voici une interprétation de la propagation de l'endommagement en compression :



Figure III.14 : Propagation des dommages en compression dans le mur témoin URM

Les valeurs de dommages observées sont particulièrement élevées, ce qui témoigne d'un niveau d'endommagement significatif, frôlant même la rupture dans certaines zones spécifiques. Par ailleurs, des zones étendues, identifiées par des nuances de rouge et d'orange, mettent en évidence des régions où le matériau a subi un écrasement. Il est également à noter que la propagation des dommages manifeste une orientation diagonale. L'analyse montre que les dommages en compression et en traction interagissent, contribuant à la défaillance finale du mur URM.

III.3.2 Mur confiné avec NHL

À travers les **Figure III.15**, qui montrent la distribution des déplacements (U, Magnitude) sur "Mur NHL" (un mortier de chaux hydraulique naturelle), voici une interprétation de la propagation des déplacements.

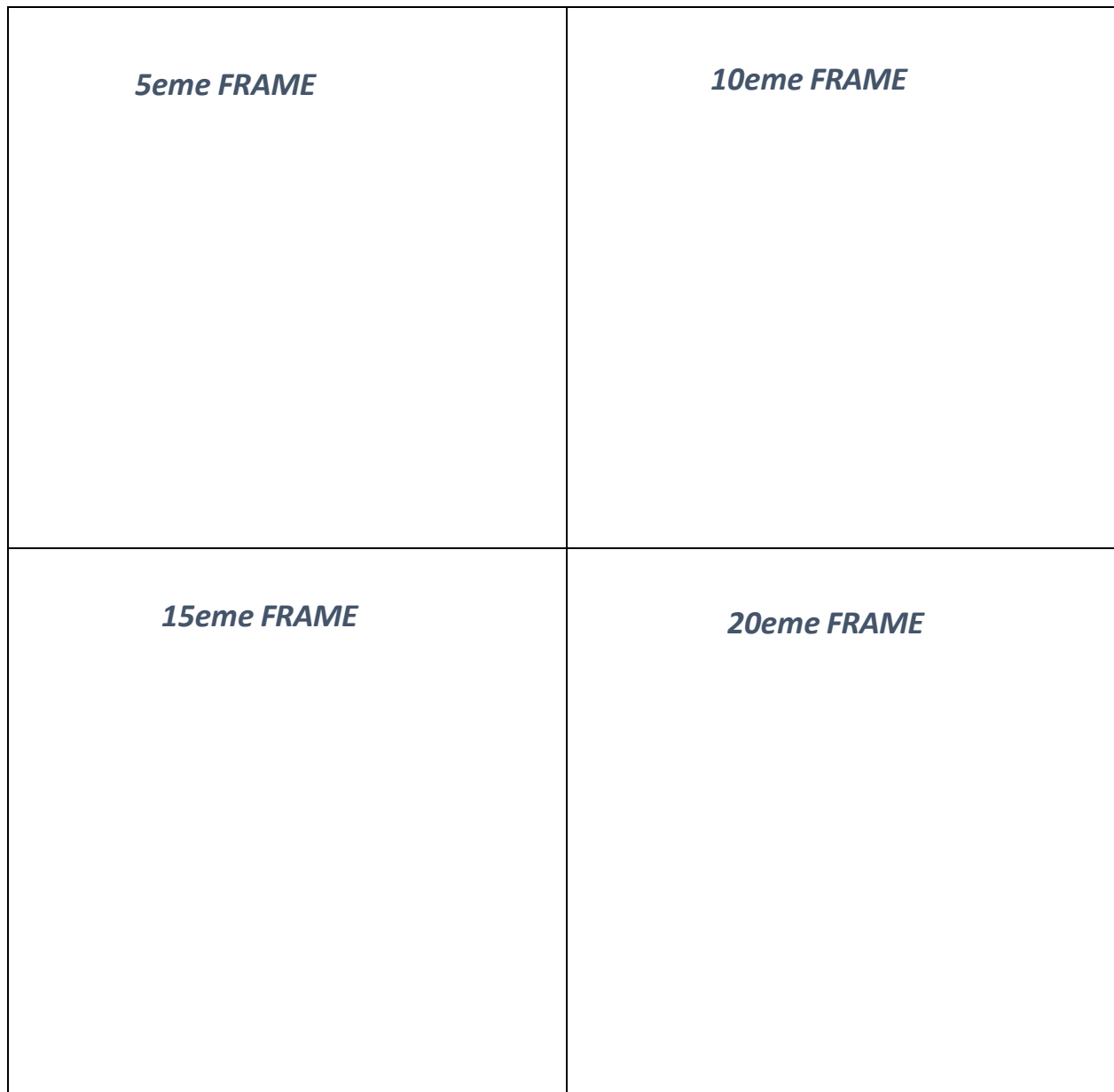


Figure III.15 : Propagation des déplacements dans le Mur NHL

Les déplacements observés dans la structure sont caractérisés par leur faiblesse et leur confinement spatial. La zone de déplacement maximal, se situe en effet dans le coin supérieur gauche du mur, précisément à l'emplacement où la charge est appliquée. Il est à noter que les déplacements se propagent de manière relativement diffuse et graduelle, s'étendant vers le bas ainsi que vers la droite du mur, avec une transition des couleurs indiquant une réduction des déplacements. Il est important de souligner que la majorité du mur demeure avec déplacements très minimes à ce stade préliminaire de l'analyse.

Les déplacements maximaux ont enregistré une augmentation significative de leur magnitude, avec une variation allant de $5,178 \times 10^{-2}$ à $2,50 \times 10^{-1}$ mm. Par ailleurs, la surface impactée par des déplacements notables, a connu une extension marquée, notamment à partir du coin supérieur gauche, entraînant une couverture plus étendue de la paroi. De plus, une propagation continue de la déformation, sans signes évidents de rupture localisée à ce stade de l'analyse.

L'amplitude des déplacements observés continue de croître, atteignant une valeur de $4,67 \times 10^{-1}$ mm. Par ailleurs, il est à noter que le mur présente une déformation d'une ampleur plus généralisée, caractérisée par des déplacements significatifs sur une majorité de sa surface, bien que les valeurs maximales demeurent concentrées dans la région soumise à une charge.

- ❖ **Phase Élastique/Initiale (0.25 - 0.75) :** Les déplacements sont d'abord localisés au point d'application de la charge, puis se propagent progressivement et de manière relativement modérée à travers le mur. Le mur absorbe les déformations de manière globalement continue.
- ❖ **Phase de Déformation Avancée (1.0) :** À des niveaux de charge plus élevés, les déplacements sont très importants au point d'application et se propagent. La particularité du mortier NHL est qu'il est souvent plus flexible et moins rigide que les mortiers à base de ciment.

La **Figure III.116** représente la distribution des contraintes de Von Mises ($S, Mises$) dans un mur en maçonnerie avec mortier NHL (Chaux Hydraulique Naturelle) sous une charge progressive), voici une interprétation de la propagation des contraintes :

5eme FRAME	10eme FRAME
15eme FRAME	20eme FRAME

Figure III.16 : Propagation des contraintes dans le Mur NHL

Les valeurs maximales de contrainte, se concentrent de manière significative dans le coin supérieur gauche du mur, à l'emplacement précis où la charge est appliquée. À mesure que l'on s'éloigne de ce point critique, une diminution rapide des contraintes est observée. La majorité de la surface du mur apparaît en bleu, ce qui témoigne de niveaux de contraintes considérablement faibles à ce stade initial de l'analyse.

Les résultats indiquent une augmentation significative des contraintes maximales, dont la valeur maximale affichée sur la légende a évolué de 1,027 à 2,52 Mpa. Par ailleurs, l'analyse des distributions de contraintes révèle l'émergence de voies de contraintes d'une magnitude supérieure, qui se propagent de manière plus distincte en diagonale, s'étendant depuis le coin supérieur gauche jusqu'au centre et au coin inférieur droit du mur.

Les contraintes maximales observées s'élèvent à 2,54 Mpa, bien que la valeur mesurée soit légèrement inférieure à celle enregistrée lors de l'incrément 0,75. Ce phénomène peut être attribué à un réarrangement des contraintes intervenue suite à l'initiation de la fissuration. Par ailleurs, l'analyse du mur en matériau NHL met en évidence des zones très prononcées et localisées de contraintes élevées. Ces zones structurées en bandes illustrent les chemins de contrainte où le matériau approche de l'état de rupture.

- ❖ La propagation des contraintes dans le mur NHL montre des similitudes avec le mur URM classique, mais avec des nuances importantes liées aux propriétés du mortier NHL
- ❖ **Phase Élastique/Initiale** : Les contraintes se développent de manière progressive, se concentrant le long de trajectoires diagonales et près des points d'application et des coins. Le mortier NHL, étant plus souple, permet une certaine redistribution des contraintes.
- ❖ **Phase de Rupture** : À la fin du chargement, les contraintes se localisent le long de bandes diagonales, indiquant la formation de mécanismes de rupture (fissures) similaires à ceux observés dans l'URM.

La **Figure III.17** représente le paramètre "DAMAGET" (lié à l'endommagement en traction) dans un mur en maçonnerie avec mortier NHL sous une charge progressive, voici une interprétation de la propagation de l'endommagement :

Au fur et à mesure de l'analyse, des zones endommagées commencent à se manifester. L'endommagement observé se concentre principalement le long de bandes diagonales, ce qui laisse supposer l'émergence des premières microfissures de traction.

Les valeurs du paramètre "DAMAGET" connaissent une augmentation significative, atteignant 0,975. En conséquence, les zones touchées par l'endommagement se révèlent non seulement plus étendues mais également de plus en plus intenses. Par ailleurs, les bandes diagonales d'endommagement apparaissent désormais de manière nette et continue, témoignant de l'évolution de fissures macroscopiques au sein de la structure murale.

Les résultats obtenus pour l'indice "DAMAGET" sont particulièrement alarmants, atteignant la valeur de 0,991. Ce constat indique que les zones ont subi une rupture quasi complète. Par ailleurs, il est observé que le réseau de fissures diagonales est non seulement complètement développé, mais qu'il s'étend également sur une large portion du mur, témoignant ainsi d'une dégradation structurelle significative.

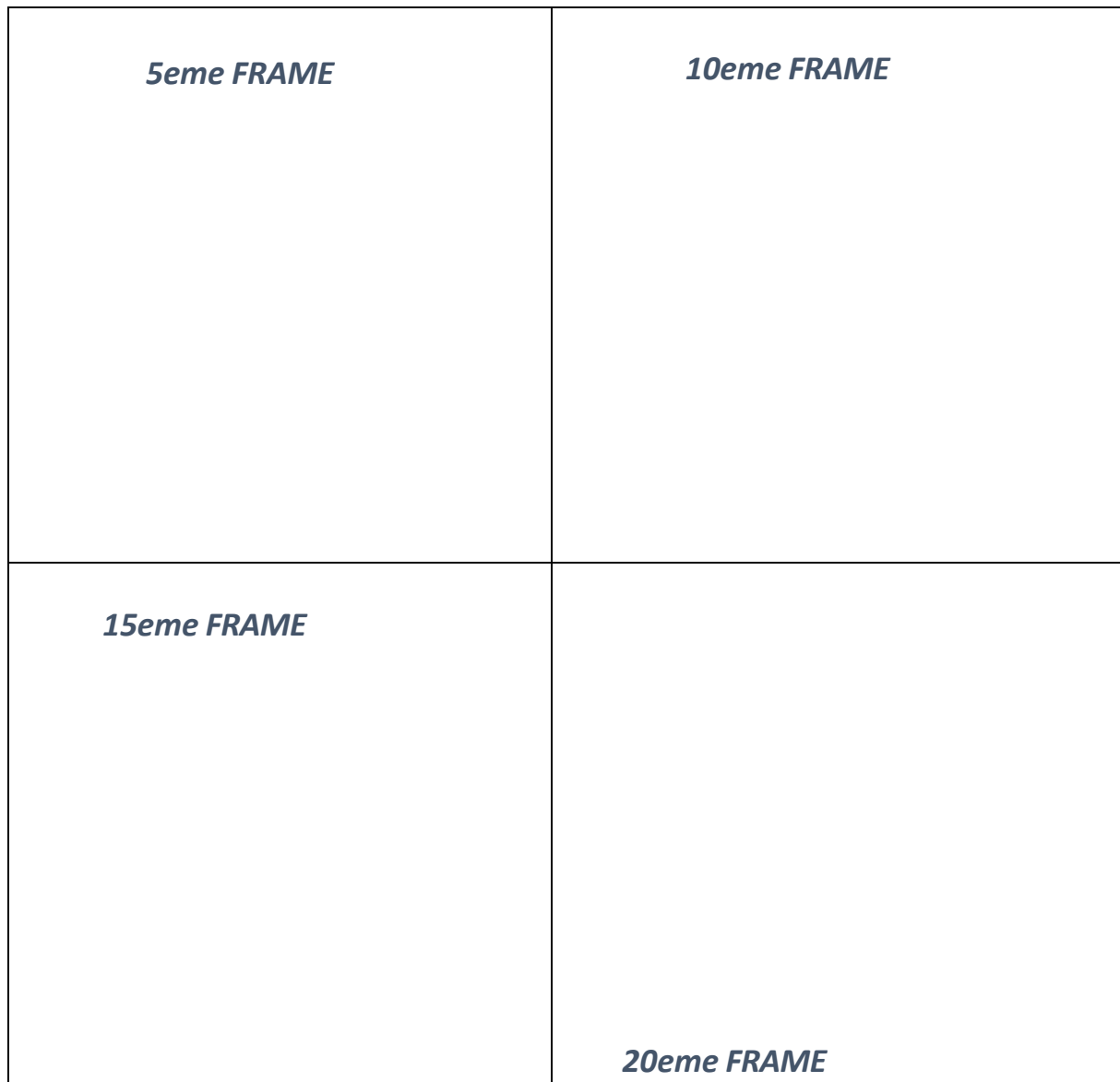


Figure III.17 : Propagation des dommages dans le Mur NHL

À travers les **Figure III.18**, qui représentent le paramètre "DAMAGEC" (endommagement en compression) dans un mur en maçonnerie avec mortier NHL sous une charge progressive, voici une interprétation de la propagation de l'endommagement en compression :

- ❖ La visualisation du paramètre "DAMAGEC" pour le mur NHL révèle la progression des mécanismes de défaillance par compression.
- ❖ **Phase Initiale** : Le mur est dans un état non endommagé en compression.
- ❖ **Phase d'Initiation de l'Endommagement** : Les premières zones d'endommagement en compression apparaissent sous forme de bandes diagonales, indiquant que les contraintes de compression atteignent localement la limite de résistance du matériau.
- ❖ **Phase de Propagation et de Rupture** : L'endommagement en compression se propage et s'intensifie, entraînant l'écrasement du matériau le long de ces bandes diagonales. Les zones rouges et oranges représentent des zones de broyage ou d'écrasement qui contribuent directement à la défaillance de la capacité portante du mur.

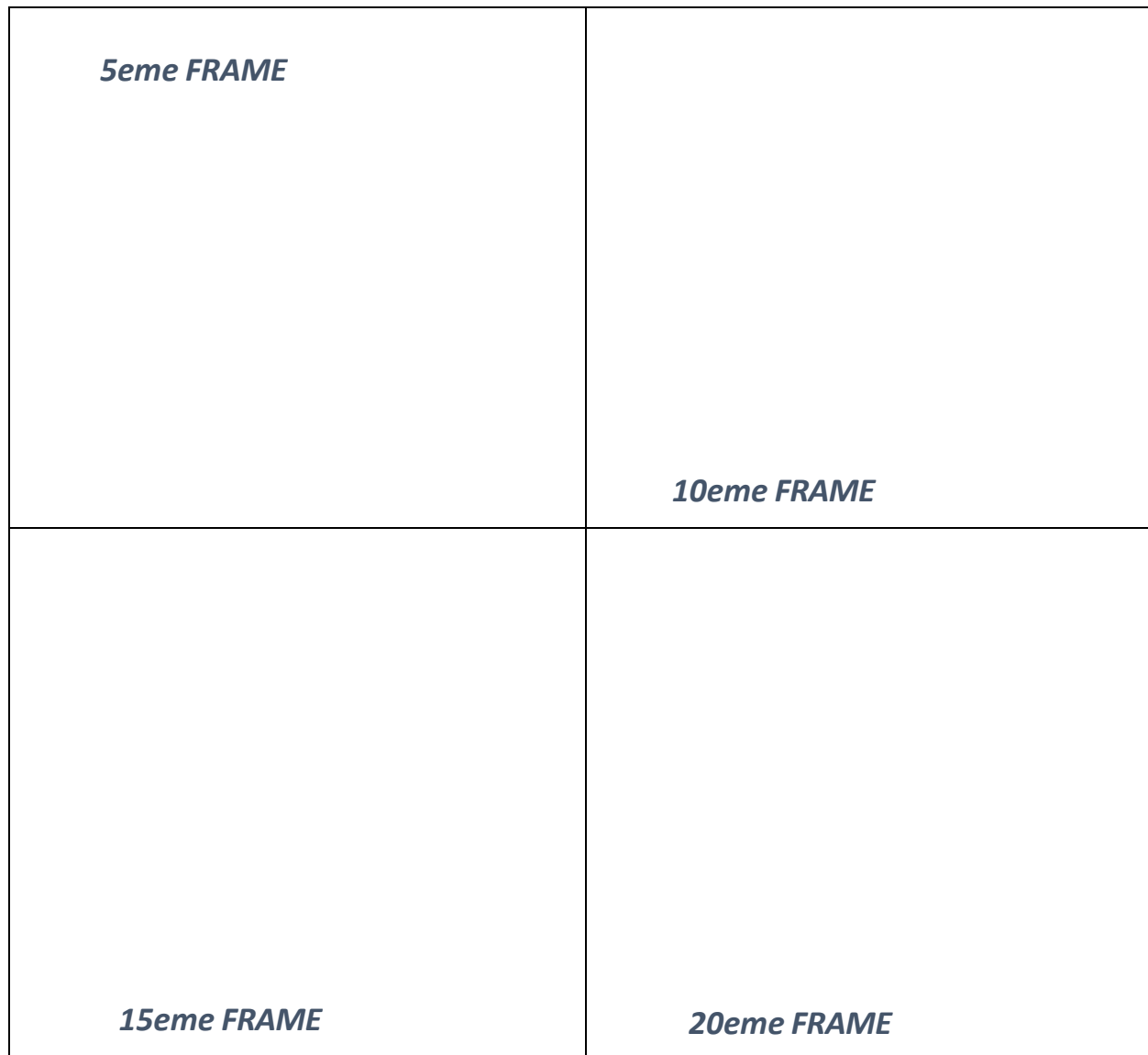


Figure III.18 : Propagation des dommages de compression dans le Mur NHL

III.3.3 Mur confiné FRCM

La **Figure III.19** montre la distribution des déplacements (U, Magnitude) sur le mur confiné FRCM. La propagation des déplacements dans le mur NHL+AR GLASS suit la progression classique de la déformation d'un élément structural sous charge, mais avec des caractéristiques potentiellement améliorées par le renforcement AR Glass :

- ❖ **Phase Initiale** : Les déplacements sont d'abord localisés au point de charge et se propagent de manière diffuse, indiquant une réponse principalement élastique du système. L'amplitude des déplacements est déjà notable à 0.5, suggérant que le mur est soumis à une charge importante.
- ❖ **Phase de Déformation Avancée et Rupture** : À mesure que la charge augmente, les déplacements deviennent très importants et se localisent clairement le long de lignes spécifiques, indiquant la formation de fissures et la rupture du matériau. Les valeurs de déplacement à l'incrément final sont très élevées, montrant que le mur a atteint son état limite de déformation.

- ❖ **Mode de Localisation des Déplacements** : Pour le mur NHL+AR GLASS, les bandes de forte déformation à l'incrément 1.000 sont très claires et prononcées, similaires à celles observées pour l'URM traditionnel dans les premières analyses. Cela suggère que même si le renforcement améliore la capacité de déformation, le mécanisme de rupture final reste un cisaillement diagonal avec des fissures bien définies.

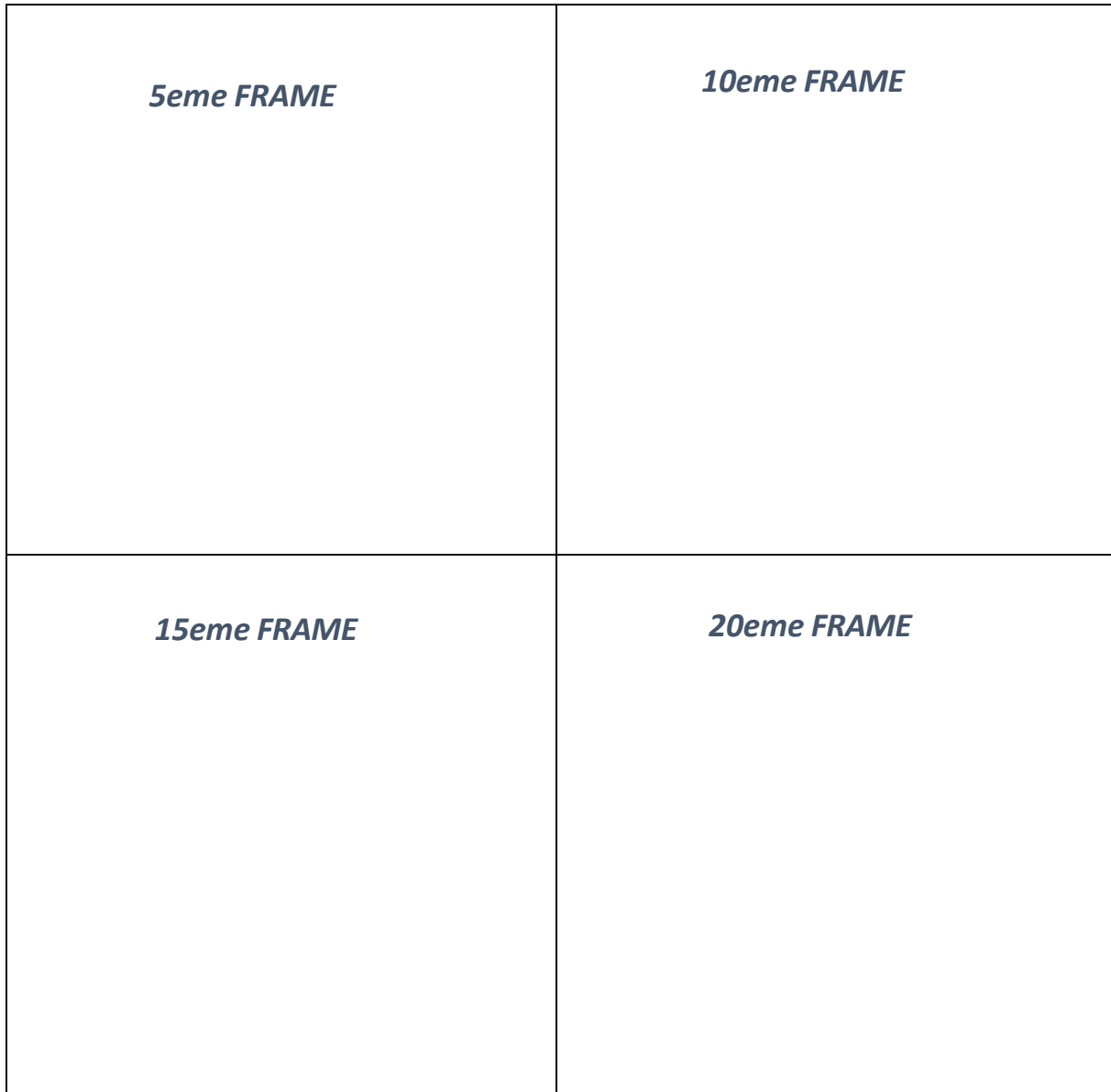


Figure III.19 : Propagation des déplacements dans le Mur FRCM

La **Figure III.20 et III.21** représentent la distribution des contraintes de Von Mises (S, Mises) et endommagement de traction (Damage T) dans un mur en maçonnerie FRCM.

Les figures illustrent un processus de dégradation progressive par traction dans le mur NHL+AR GLASS, caractérisé par la formation et la propagation de fissures diagonales. Ce mode de défaillance est typique des murs en maçonnerie soumis à des efforts de cisaillement. L'incorporation de fibres de verre résistantes aux alcalis (AR Glass) dans le mortier NHL a pour objectif d'améliorer la ductilité du mur et de contrôler l'ouverture des fissures.

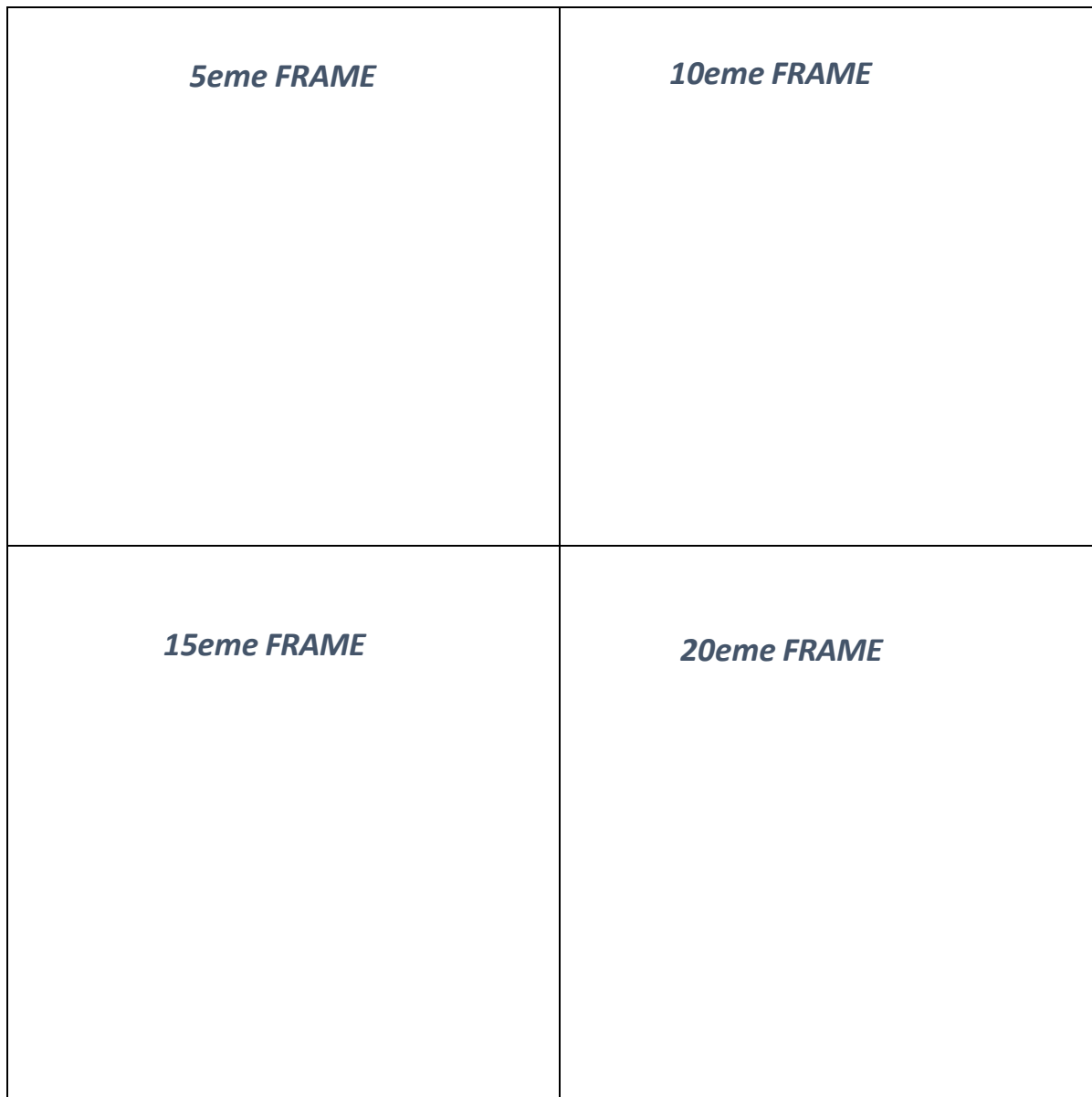


Figure III.20 : Propagation des contraintes dans le Mur FRCM

Même si les figures montrent clairement l'apparition et l'extension des fissures, la présence des fibres aide à maintenir la cohésion du matériau, permettant au mur de supporter des déformations plus importantes avant une défaillance complète et de conserver une certaine capacité résiduelle, ce qui est crucial pour la sécurité structurale.

L'analyse des dommages révèle une intensification significative et une expansion considérable le long des bandes diagonales, lesquelles présentent une augmentation de leur largeur, de leur continuité et de leur intensité, se traduisant par des colorations allant du jaune à l'orange, puis au rouge. Le taux de dommage maximal observé s'élève à 0.951, se rapprochant de manière alarmante de la valeur de 1,0. Cela indique que les zones identifiées ont subi une rupture quasi complète sous l'effet des contraintes de traction, entraînant la formation de fissures macroscopiques bien définies.



Figure III.21 : Propagation des dommages dans le Mur NHL+AR GLASS

La **Figure III.22** représente le paramètre "DAMAGEC" (endommagement en compression) dans un mur en maçonnerie avec FRCM sous une charge progressive.

L'incorporation de fibres de verre AR dans le mortier NHL semble avoir un impact positif sur la capacité du mur à supporter des déformations importantes. Le fait que le mur FRCM puisse atteindre des déplacements d'une magnitude supérieure à celle du mur NHL seul avant la rupture indique une ductilité améliorée. Le renforcement en fibres de verre aide à tenir le matériau ensemble et à distribuer les contraintes sur une plus grande zone, permettant ainsi au mur de se déformer davantage avant la défaillance totale et la formation de fissures macroscopiques. Cependant, le mode de rupture reste dominé par des mécanismes de cisaillement diagonal, typiques des murs en maçonnerie.



Figure III.22 : Propagation des dommages de compression dans le Mur FRCM

Comparé au mortier de ciment, le mortier NHL est moins rigide et plus ductile donc plus flexible. Cela conduit à :

- **Déplacements plus importants avant la rupture :** Le mur NHL pourrait tolérer des déformations plus importantes avant d'atteindre une rupture catastrophique.
- **Moins de fissuration "brutale" :** Au lieu de former des fissures larges et nettes, la déformation pourrait être plus répartie, avec un endommagement diffus ou des micro-fissures multiples plutôt qu'une seule macro-fissure dominante. Cependant, la visualisation "U, Magnitude" ne montre pas directement les fissures.
- **Une progression des contraintes plus faible :** Le processus de concentration des contraintes pourrait être moins brutal, permettant au mur de dissiper l'énergie sur une plus grande surface avant une rupture complète.

- **Moins de contraintes de traction transversales :** La faible rigidité du mortier NHL peut également réduire les contraintes de traction qui se développent perpendiculairement aux contraintes de compression dans les zones de concentration, ce qui est souvent une cause de fissuration.
- **Progression des dommages potentiellement plus graduelle :** Le mortier NHL étant plus souple, il peut permettre une meilleure redistribution des contraintes avant d'atteindre le seuil de rupture des briques ou du mortier lui-même. Cela pourrait se traduire par une initiation des dommages légèrement retardée ou une propagation plus diffuse avant de se concentrer.
- **Motifs de fissuration similaires :** Bien que le comportement puisse être plus ductile, les modes de rupture en cisaillement diagonal restent prédominants sous ce type de chargement. Les images confirment que des fissures diagonales se forment clairement.

La **figure III.23** montre une confrontation entre les trois modèles étudiés en terme de capacité portante. En comparant le comportement du mur FRCM avec celui du mur NHL nous pouvons observer quelques différences potentielles qui pourraient être attribuées au renforcement FRCM

Shear stress (Mpa)

Figure III.23 : Confrontation des courbes de contrainte de cisaillement - déformation des murs simulés

- **Amplitude des Déplacements :** Le mur FRCM semble atteindre des amplitudes de déplacement finales qui sont plus élevées que celles observées pour le mur NHL. Cette observation est cruciale : si un mur renforcé peut atteindre des déplacements plus élevés avant la défaillance finale, cela signifie qu'il a une meilleure ductilité.
- **Mode de Localisation des Déplacements :** Pour le mur FRCM, les bandes de forte déformation à l'incrément 1.000 sont très claires et prononcées, similaires à celles observées pour le mur NHL dans les premières analyses. Cela suggère que même si le renforcement améliore la capacité de déformation, le mécanisme de rupture final reste un cisaillement diagonal avec des fissures bien définies

III.5 Conclusion

Les simulations numériques et les données expérimentales ont permis d'évaluer avec précision le comportement mécanique de murs en brique pleine soumis à des sollicitations en cisaillement, selon trois configurations : mur non renforcé (URM), mur renforcé par mortier de chaux hydraulique naturelle (NHL), et mur renforcé par système FRCM (NHL + tissu AR Glass).

Les résultats obtenus ont montré une nette amélioration des performances mécaniques avec l'ajout de renforcements. Le mur URM, comme attendu, présente une faible résistance avec une rupture fragile et une fissuration localisée et instable. L'introduction du mortier NHL améliore significativement la capacité portante, en retardant l'apparition des fissures et en assurant une meilleure répartition des contraintes, tout en conservant un comportement relativement ductile.

Le système FRCM s'est révélé le plus performant. Il permet non seulement d'augmenter la résistance maximale, mais aussi d'assurer un comportement post-fissuration plus stable grâce à la capacité du tissu à reprendre les efforts en traction. Les cartographies d'endommagement illustrent clairement l'évolution du processus de fissuration selon les configurations, mettant en évidence la réduction de l'endommagement critique dans les murs renforcés.

Une très bonne adéquation entre le modèle numérique et expérimental est observée en termes de lignes de rupture. Aussi, une bonne concordance entre les deux approches jusqu'à la phase de pic, ce qui confirme la capacité du modèle numérique à reproduire le comportement réel des murs confinés.

Chapitre IV : Etude paramétrique

IV.1 Introduction

Après avoir validé les modèles numériques, l'optimisation des paramètres du confinement des murs en maçonnerie s'avère importante, de ce fait une étude paramétrique basée sur la méthode des éléments finis est essentielle.

A travers ce chapitre, nous allons présenter et interpréter les résultats obtenus à l'issue des simulations numériques menées sur les effets des caractéristiques géométriques des matériaux constitutifs afin d'évaluer la combinaison qui maximise la capacité des murs en maçonnerie sous chargement, à savoir l'épaisseur de la matrice mortier NHL, la dimension de la maille et l'épaisseur du tissu de verre AR. Par conséquent, les résultats de l'analyse paramétrique sous forme de courbes de comportement et de cartographies sont présentés et analysés dans ce chapitre.

VI.2 Effet de l'épaisseur de la matrice NHL

Le même modèle validé de la section précédente est pris en considération avec les mêmes caractéristiques géométriques et mécaniques. Cependant l'épaisseur de la matrice mortier NHL est variée comme suit : 10 mm, 15 mm et 20 mm. A cet effet, nous allons modéliser différentes variantes de l'épaisseur du mortier NHL. Dans les trois cas de **Figure VI.1**, les dommages sont principalement concentrés le long d'une bande diagonale traversant le mur.

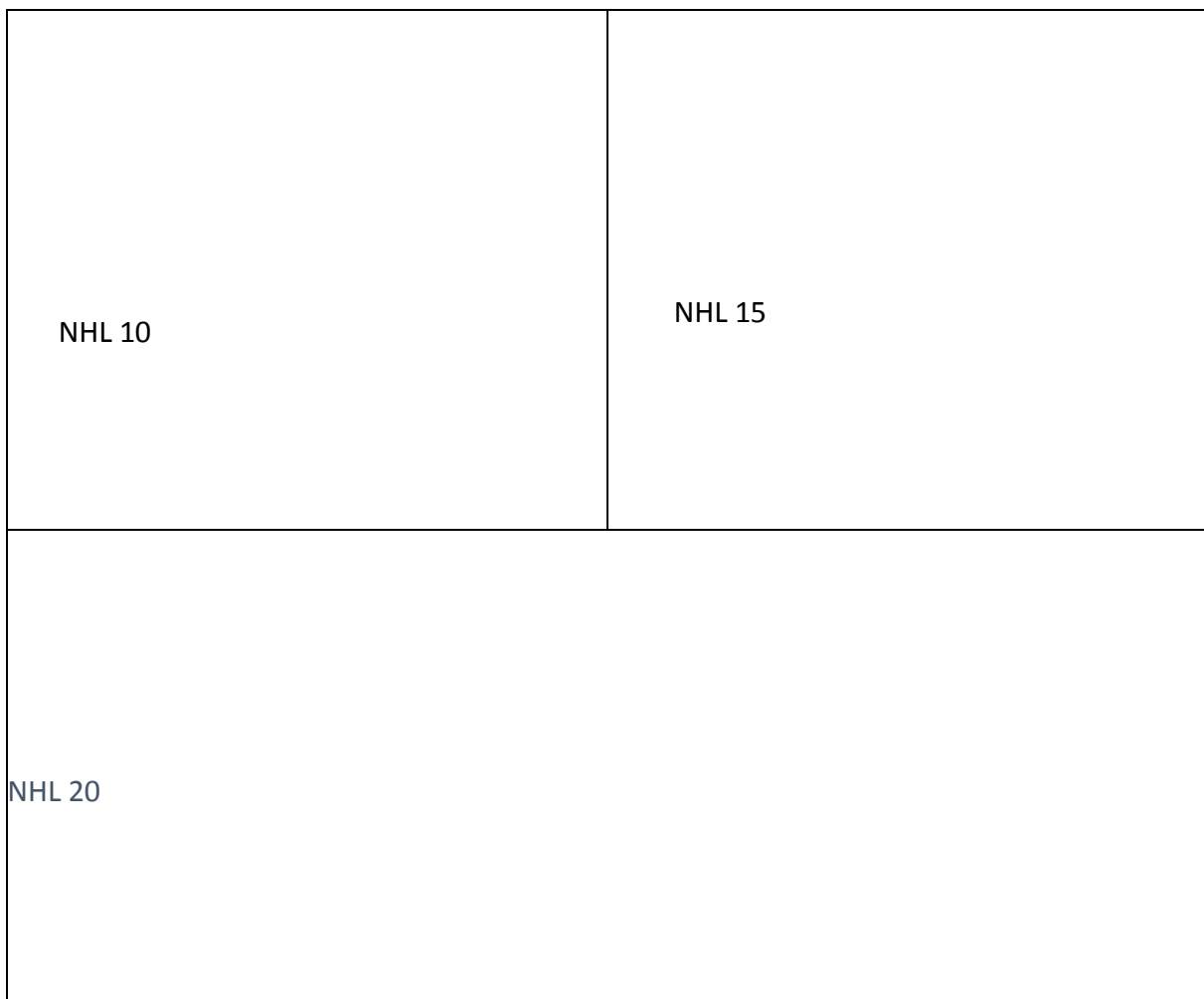


Figure IV.1 : Effet de l'épaisseur NHL sur la distribution des dommages

L'observation des trois images de la permet de dégager des conclusions quant à l'effet de l'épaisseur du mortier NHL sur la répartition des dommages.

- **NHL 10mm** : Les dommages sont clairement visibles le long de la diagonale principale. Il semble y avoir quelques zones de dommages secondaires plus petites se ramifiant ou parallèles à la diagonale principale.
- **NHL 15mm** : La distribution des dommages est très similaire à celle du NHL 10mm, avec la même bande diagonale prédominante.
- **NHL 20mm** : La bande diagonale de dommages demeure l'élément caractéristique principal et reste similaires à celle de NHL 15mm et 10mm.

Cependant, l'augmentation de l'épaisseur de NHL n'altère pas fondamentalement le motif de dommage, Il n'y a pas d'indication visuelle claire que l'augmentation de l'épaisseur de NHL modifie de manière significative la forme ou la propagation des dommages. Les zones endommagées secondaires semblent relativement similaires dans les trois cas.

Le tableau IV.1 montre l'évolution de la force appliquée en fonction du temps pour différentes épaisseurs de mortier. Cependant, la Figure IV.2 montre la variation de la force en fonction du Temps pour différents épaisseur NHL.

Tableau IV.1 – Évolution de la force appliquée en fonction du temps pour différentes épaisseurs de mortier NHL (10 mm, 15 mm, 20 mm)

Time (s)	Force (N)		
	NHL10	NHL15	NHL20
0	2,71E-07	2,59E-07	-4,2E-10
0,050026	311,398	539,353	475,254
0,100018	2399,53	4152,35	3671,77
0,150006	7507,9	12978,1	11486
0,200036	16378,7	28235,8	25056,3
0,250025	29268,7	50215,3	44737,8
0,300062	46029,7	77903,6	70223,7
0,350002	66146,6	104219	98909,5
0,400032	86740,8	126827	122203
0,450021	104829	137296	141679
0,50001	120673	86725,3	101100
0,550002	129163	85180,5	93650,1
0,600003	79776,3	86729,6	98714,4
0,650031	70630,4	88036	101421

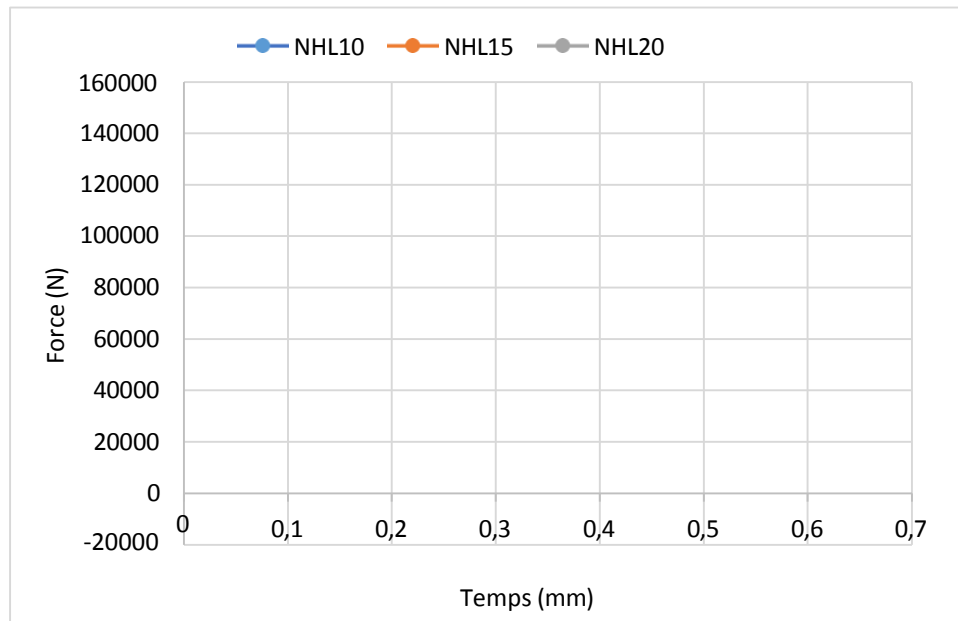


Figure IV.2 : Variation de la Force en fonction du Temps pour différents épaisseur NHL

- Selon les courbes de capacité en fonction du temps, on observe que la variation de l'épaisseur du mortier NHL a un effet notable sur la résistance maximale et le comportement post-fissuration des murs renforcés.
- Les courbes montrent que la configuration NHL20 atteint une force maximale d'environ 140 kN, légèrement supérieure à celle des configurations NHL10 et NHL15. Ce résultat suggère qu'un équilibre optimal entre rigidité et capacité de déformation est obtenu avec une grande épaisseur.
- La configuration NHL15, bien qu'ayant une performance équivalente au pic, présente une meilleure stabilité post-pic, ce qui reflète un meilleur comportement presque similaire à celui du NHL20.
- À l'inverse, la configuration NHL10 montre une résistance plus faible et une chute rapide après la fissuration, traduisant une moindre capacité de transfert des charges.

L'analyse des pentes initiales des courbes révèle une différence notable de rigidité selon l'épaisseur du renforcement. Le mur renforcé avec (NHL20) présente la pente la plus raide dans la phase élastique, traduisant une rigidité initiale plus élevée par rapport aux configurations NHL15 et NHL10. Physiquement, cela s'explique par le fait qu'une épaisseur accrue de la matrice renforce le confinement de la maçonnerie, augmente la surface de contact entre le mortier et les blocs, et améliore la répartition des contraintes de cisaillement dans l'ensemble du mur. À l'inverse, une faible épaisseur (NHL10) offre une rigidité réduite, ce qui se traduit par une déformation plus marquée sous les mêmes charges.

En conclusion, l'épaisseur du mortier NHL influence légèrement sur l'efficacité du système FRCM, tant en termes de résistance que de ductilité. Une épaisseur trop faible limite l'adhérence et la distribution des contraintes, tandis qu'une épaisseur excessive peut engendrer une rigidité accrue mais au prix d'une certaine perte de souplesse. L'épaisseur optimale semble se situer autour de 15 mm pour un bon compromis entre performance mécanique et comportement dissipatif. L'épaisseur du renforcement joue un rôle déterminant dans la rigidité globale du système mur-matrice.

VI.3 Effet de dimension de la maille du tissu AR

Le même modèle validé de la section précédente avec une maille du tissu de verre AR de 12x12 mm est pris en considération avec les mêmes caractéristiques géométriques et mécaniques. Cependant l'épaisseur de la dimension de la maille est variée comme suit : 6x6 mm et 18x18. Une confrontation des modèles simulés entre de cartographies des dommages en traction est donnée dans la Figure IV.3.



Figure IV.3 : effet maillage AR Glass sur la distribution des dommages

L'analyse comparative des différentes configurations de la maille du tissu de verre AR met en évidence l'impact de cette variable sur le comportement mécanique des murs renforcés. Les résultats montrent que, bien que toutes les configurations améliorent la résistance globale par rapport au mur non renforcé.

AR Glass 6x6 : Les dommages sont concentrés dans une bande verticale relativement large au centre, le maillage plus serré tend à induire une concentration localisée des contraintes, pouvant accélérer la fissuration.

AR Glass 12x12 : Une maille plus large, bien qu'assurant une meilleure dissipation des contraintes, présente une légère baisse de performance en termes de charge maximale.

AR Glass 18x18 : offre un meilleur équilibre entre résistance maximale et comportement post-fissuration.

Le **Tableau IV.2** montre l'évolution de la force appliquée en fonction du temps pour différentes mailles du tissu AR. Cependant, la **Figure IV.4** montre la variation de la force en fonction du Temps pour différentes mailles considérées.

Tableau IV.2 – Évolution de la force appliquée en fonction du temps pour différentes maillages de AR Glass Fabric (6x6, 12x12 et 18x18)

Time (s)	Force (N)		
	AR 6 x 6 mm	AR 12 x 12 mm	AR 18 x 18 mm
0	1,006E-10	-8,8858E-10	-7,1342E-10
0,0500261	557,784	556,511	333,693
0,100027	4314,78	4303,43	2580,63
0,150028	13509,8	13483,4	8079,19
0,200029	29459	29392,2	17616,4
0,25003	52688,5	52575,3	31507,2
0,300009	82717,8	82596,2	49638,4
0,350009	112250	115083	71577,4
0,400032	146526	146202	95192,4
0,450022	163962	160434	118682
0,500012	128178	120448	139957
0,550024	133686	127956	155768
0,600033	107625	129524	141637
0,650031	94885,8	73033,5	118101
0,700027	90042,3	87626,8	115515
1	89751,9	61251,7	96135,5

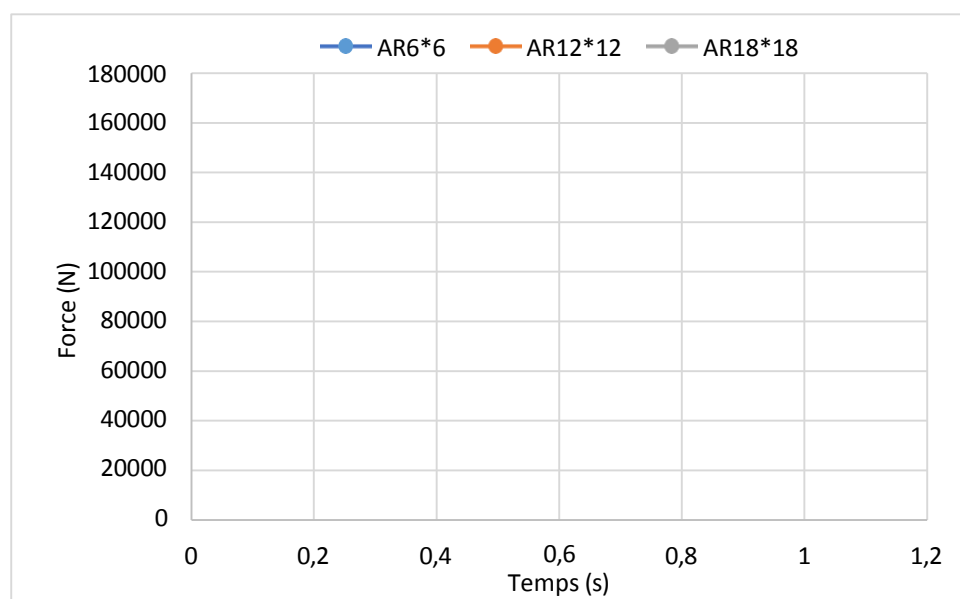


Figure IV.4 : Variation de la Force en fonction du Temps pour différentes mailles du tissu AR

Selon les courbes de capacité obtenues en fonction du temps de calcul, on observe que la variation de la dimension de la maille du tissu AR Glass utilisé dans le renforcement FRCM influe de manière mesurée sur la capacité portante globale des murs en maçonnerie soumis à des sollicitations latérales.

- Les trois configurations étudiées (AR6x6, AR12x12 et AR18x18) présentent des comportements similaires en termes de forme de courbe, avec une montée progressive de la charge jusqu'à un pic suivi d'un palier ou d'une chute. Toutefois, la configuration avec le maillage le plus large (AR18x18) montre une meilleure performance en post-pic, avec une charge résiduelle plus stable, traduisant une bonne dissipation de l'énergie et un comportement pseudo-ductile.
- En termes de résistance maximale, la configuration (AR12x12) atteint une charge d'environ 160 KN, similaire au maillage serré (AR6x6) et légèrement supérieure à celle de l'autre maillage large (AR18x18).

Ces résultats indiquent que le maillage du tissu influence le transfert de charge et la fissuration du mortier :

- Un maillage trop serré peut concentrer les contraintes et limiter la redistribution,
- Tandis qu'un maillage trop large peut réduire le confinement. La configuration (AR12*12) représente ainsi un compromis optimal entre rigidité et comportement post-fissuration.

VI.4 Effet de L'épaisseur de AR Glass Fabric

Le même modèle validé de la section précédente avec une épaisseur du tissu de verre AR de 0.055 mm est pris en considération avec les mêmes caractéristiques géométriques et mécaniques. Cependant l'épaisseur du tissu est variée comme suit : 0.1 mm, 0.5 mm et 1 mm. Une confrontation des modèles simulés entre de cartographies des dommages en traction est donnée dans la Figure IV.5. L'analyse comparative des quatre figures permet d'évaluer l'effet de l'épaisseur du renforcement en tissu AR sur le comportement en endommagement du mur.

AR 0.05 mm & AR 0.1 mm : Les dommages sont fortement concentrés le long d'une bande diagonale continue, typique d'un mode de rupture fragile en cisaillement, la zone de fissuration est localisée et intense, indiquant des dommages importants dans une zone restreinte, Ces faibles épaisseurs de tissu n'apportent qu'un renforcement partiel, limitant leur capacité à redistribuer les contraintes et les dommages.

AR 0.5 mm : la distribution des dommages devient plus diffuse et étendue, avec une dispersion des zones rouges sur une plus grande surface, cela reflète une meilleure répartition des contraintes et une réduction de la concentration des fissures, cette configuration semble offrir un bon compromis entre rigidité et dissipation d'énergie.

AR 1 mm : les dommages apparaissent encore plus largement répartis sur l'ensemble du mur, l'épaisseur plus importante permet une amélioration significative de la capacité d'absorption d'énergie, et retarde la propagation des fissures, cependant, on peut observer une tendance à une fissuration plus diffuse, traduisant un comportement plus ductile mais avec un risque de fissuration généralisée si l'adhérence n'est pas bien maîtrisée.

AR 0.05 mm	AR 0.1 mm
AR 0.5 mm	AR 1 mm

Figure IV.5 : effet épaisseur AR Glass sur la distribution des dommages

Le **Tableau IV.3** montre l'évolution de la force appliquée en fonction du temps pour différentes épaisseurs du tissu AR. Cependant, la **Figure IV.6** montre la variation de la force en fonction du Temps pour différentes variantes considérées.

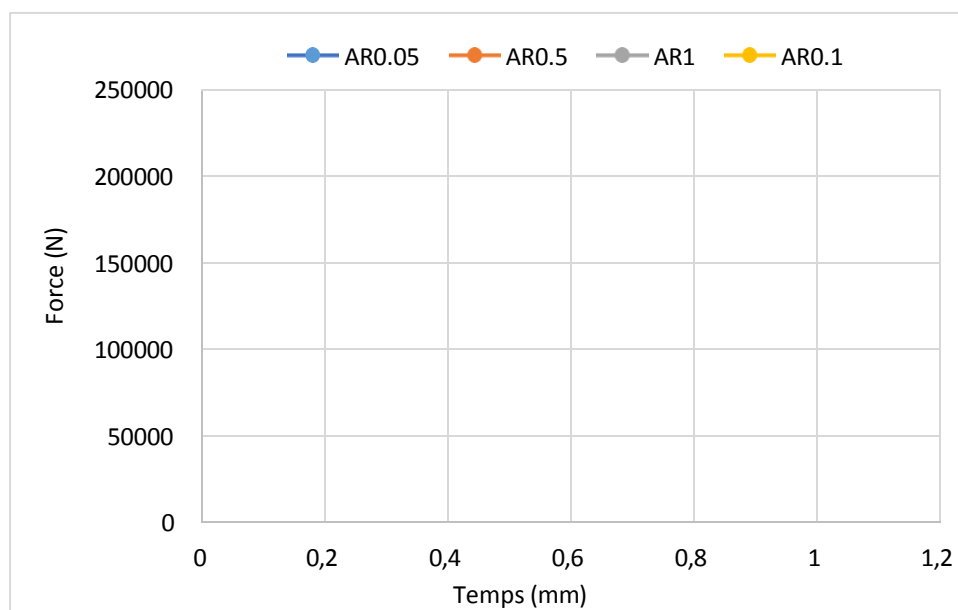


Figure IV.6 : Variation de la Force - Temps pour différentes épaisseurs du tissu AR

Tableau IV.3 – Évolution de la force appliquée en fonction du temps pour différentes épaisseurs du tissu AR (0.055mm, 0.1mm, 0.5mm et 1mm)

Time (s)	Force (N)			
	AR 0.055	AR 0.5	AR 1	AR 0.1
0	3,0593E-07	3,0594E-07	3,0595E-07	3,0593E-07
0,0500011	941,865	972,154	999,896	945,261
0,1	7323,92	7550,68	7759,72	7349,27
0,150003	22925,7	23635,1	24287,4	23005,3
0,200003	49832,5	51363,7	52757,3	49999,1
0,250028	86933,6	89521,2	91614,9	87235,5
0,300023	156685	129201	132160	125719
0,350026	125243	163456	167679	157801
0,400021	153897	183497	190501	167378
0,450018	126866	179732	195039	144421
0,500026	127833	198701	202609	146097
0,550033	116026	201080	222454	149732
0,60002	134762	205115	225195	137557
0,650029	125265	201023	225987	130391
0,700027	122467	191428	218250	127899
0,750029	117294	201379	219107	125538
0,800014	114809	193081	190542	121576
0,850009	110214	193604	192434	170915
0,900014	106220	186563	189024	114005
0,950034	100705	181063	180568	100066
1	96142,3	176046	180039	104591

Selon les courbes de capacité en fonction du temps de calcul, on observe que la variation de l'épaisseur du tissu AR Glass a un impact significatif sur la résistance maximale et le comportement post-fissuration des murs renforcés soumis à des charges latérales.

Les résultats montrent que la meilleure configuration en termes de résistance maximale est obtenue avec l'épaisseur AR1, qui atteint une valeur de force supérieure à 230 KN, suivie de près par AR0.5, avec une résistance d'environ 210 KN. Ces deux configurations présentent également une meilleure stabilité post-pic, traduisant une meilleure capacité à dissiper l'énergie après fissuration.

En revanche, les configurations AR0.1 et AR0.05, correspondant aux plus faibles épaisseurs de tissu, affichent une réponse plus instable, avec des chutes soudaines de résistance et une capacité portante globalement plus faible, autour de 160 KN à 180 KN.

Ces observations confirment que l'augmentation de l'épaisseur du tissu AR Glass permet un meilleur ancrage et un transfert plus efficace des efforts entre le mortier NHL et le renfort textile. Une épaisseur trop faible limite ce transfert, engendrant une défaillance prématurée ou une efficacité réduite.

Ainsi, l'épaisseur optimale du tissu AR Glass se situe autour de 1 mm, offrant un bon compromis entre rigidité, résistance maximale et comportement ductile, ce qui en fait la configuration la plus performante du point de vue mécanique.

On conclut l'augmentation de l'épaisseur du AR Glass Fabric contribue globalement à :

- Mieux répartir les contraintes internes dans le mur ;
- Réduire l'intensité localisée des dommages ;
- Améliorer la ductilité et la résistance post-fissuration.

Ainsi, une épaisseur autour de 0,5 mm à 1 mm semble optimale pour assurer un renforcement efficace, tout en limitant les concentrations localisées. Cependant, une épaisseur excessive peut nuire à la cohésion entre tissu et matrice, réduisant l'efficacité du renforcement. Ainsi, l'épaisseur 0.5 mm semble représenter un bon équilibre entre résistance, ductilité et performance globale du mur renforcé.

VI.5 Conclusion

Ce chapitre a mené une étude paramétrique approfondie sur l'influence de l'épaisseur du renfort en tissu de verre AR (Alkali-Resistant Glass Fabric), ainsi que de la dimension de la maille de ce tissu, et de l'épaisseur du liant NHL (Chaux Hydraulique Naturelle) sur les performances mécaniques des structures simulées.

En somme, cette étude paramétrique a permis d'identifier les interdépendances complexes entre ces trois paramètres clés. Elle fournit des lignes directrices essentielles pour la conception et l'optimisation des composites à base de tissu de verre AR et de NHL, permettant d'adapter leurs propriétés mécaniques aux applications spécifiques en ajustant judicieusement l'épaisseur du renfort, la nature de son maillage et la quantité de liant. Ces connaissances sont fondamentales pour développer des matériaux composites durables, performants et économiquement viables dans le domaine de la construction et de la réhabilitation, à savoir :

Conclusion générale

Ce mémoire s'est inscrit dans le cadre de l'analyse du comportement mécanique de murs en maçonnerie en briques pleines soumis à des sollicitations axiales, en mettant l'accent sur le renforcement par des matériaux innovants. À travers une modélisation numérique sous ABAQUS, différentes configurations de murs ont été simulées afin d'évaluer l'efficacité de deux types de renforts : la chaux hydraulique naturelle (NHL), utilisée comme matrice, et les tissus en fibres de verre à résistance alcaline (AR Glass Fabric) intégrés dans des systèmes FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix).

La première phase de l'étude a permis de valider les modèles numériques par comparaison avec des résultats expérimentaux, montrant une bonne cohérence en termes de résistance maximale, de comportement post-pic et de modes de fissuration. Les murs renforcés ont révélé une nette amélioration de la résistance au cisaillement, ainsi qu'un gain en ductilité, comparativement aux structures non renforcées.

La seconde phase a porté sur une étude paramétrique, explorant l'effet de l'épaisseur du mortier NHL ainsi que du maillage (ou épaisseur effective) du tissu AR Glass.

Cette étude souligne le potentiel de combinaisons des composites minéraux pour le renforcement durable de la maçonnerie. Elle ouvre des perspectives intéressantes en conservation du patrimoine, en réhabilitation ou en conception de nouvelles structures à faible empreinte environnementale. Enfin, les modèles numériques développés constituent une base fiable pour des simulations futures, intégrant des critères de durabilité, de vieillissement ou de comportement dynamique.

Dans la continuité de ce travail, plusieurs axes peuvent être envisagés pour approfondir l'étude. Tout d'abord, les modèles numériques développés pourraient être enrichis en intégrant un comportement non linéaire plus avancé pour les matériaux, notamment en tenant compte du vieillissement des matériaux, de la variabilité des propriétés mécaniques des briques, ou encore de la dégradation progressive des interfaces entre mortier et renfort.

De plus, des simulations dynamiques pourraient être réalisées afin d'évaluer le comportement des murs renforcés sous sollicitation sismique, ce qui permettrait d'élargir l'application de ces techniques de renforcement à des zones à risques. L'intégration de charges cycliques, thermiques permettrait également de mieux simuler les conditions réelles d'utilisation dans le temps.

Enfin, l'étude pourrait être élargie à d'autres types de renforts minéraux (tels que les tissus en basalte ou en carbone), ou à d'autres types de maçonneries (moellons, pierres taillées, etc.), afin de valider la généralisation des modèles développés et de proposer des recommandations techniques plus larges à destination des professionnels de la réhabilitation.

Références bibliographiques

1. Calò S, Cascardi A, Aiello MA. Unified design-oriented model for the shear strengthening of masonry walls with Inorganic Mortar Composite systems. *Eng Struct.* 2025;336(December 2024).
2. Micelli F, Cascardi A, Aiello MA. A removable use of FRP for the confinement of heritage masonry columns. *Mater Struct Constr.* 2023 Dec 1;56(10).
3. Campolongo F, Cascardi A, Ombres L. Prediction of the additional compressive strength due to PBO-FRCM-confinement of brick-masonry depending on the stiffening effect caused by different discontinuous wrappings: new design-oriented perspective. *Structures.* 2023 Nov 1;57.
4. Longo F, Cascardi A, Lassandro P, Aiello MA. Energy and seismic drawbacks of masonry: a unified retrofitting solution. *J Build Pathol Rehabil [Internet].* 2021;6(1):1–24. Available from: <https://doi.org/10.1007/s41024-021-00121-6>
5. Han W, Wu F, Cheng Y, Wang H, Chu S. Compressive performance of adobe masonry strengthened with glass-fiber reinforced matrix composites. *Mater Struct Constr.* 2023 Apr 1;56(3).
6. Huang W, Song B, Liang J, Niu Q, Zeng G, Shen M, et al. Jo u l P re of. *J Hazard Mater [Internet].* 2020;124187. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124187>
7. Forster AM, Masson LP, Suryanto B, Banfill PFG, Torney C, Valek J. The binder-aggregate interface in NHL mortar with non-calcitic aggregate: Physical properties. *Constr Build Mater [Internet].* 2023 Sep;398:132349. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061823020652>
8. Ruegenberg F, Schidlowski M, Bader T, Diekamp A. NHL-based mortars in restoration: Frost-thaw and salt resistance testing methods towards a field related application. *Case Stud Constr Mater [Internet].* 2021 Jun;14:e00531. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214509521000462>
9. Taleb SA, Salem AS, Tahar KA. Bending and Shear Behavior of a Composite Beam Strengthened and Double-Confined with FRP-Jacket. *Procedia Eng [Internet].* 2015;114:165–72. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.055>
10. Canestri M, Ferretti F, Mazzotti C. Confinement of masonry columns through SRG: experimental results and analytical prediction. In: *Procedia Structural Integrity.* Elsevier B.V.; 2022. p. 2198–205.
11. Lee M, Mata-Falcón J, Kaufmann W. Influence of short glass fibres and spatial features on the mechanical behaviour of weft-knitted textile reinforced concrete elements in bending. *Constr Build Mater.* 2022 Aug 15;344.
12. Sahyoun S, Ge H, Lacasse MA. Freeze-thaw damage assessment of internally insulated historic brick masonry walls under a changing climate. *J Build Eng [Internet].* 2025 May;102:111900. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710225001366>
13. Hussain M, Peng B. Numerical simulation to investigate the performance of existing masonry walls strengthened by ultra high-performance concrete layer. *J Umm Al-Qura Univ Eng Archit [Internet].* 2025 Apr 20; Available from:

- <https://link.springer.com/10.1007/s43995-025-00130-3>
14. Anas SM, Alam M, Umair M. Strengthening of braced unreinforced brick masonry wall with (i) C-FRP wrapping, and (ii) steel angle-strip system under blast loading. *Mater Today Proc* [Internet]. 2022;58:1181–98. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.335>
 15. Waeytens J, Duc M, Ulanowski Y, Ibos L, Colinart T, Nasser H, et al. Dataset of hygrothermal and energy measurements for a raw compressed earth brick house of Sense-City equipment during different seasons. *Data Br* [Internet]. 2025 Apr;59:111405. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352340925001374>
 16. Cultrone G, Sebastián E, de la Torre MJ. Mineralogical and physical behaviour of solid bricks with additives. *Constr Build Mater* [Internet]. 2005 Feb;19(1):39–48. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061804000923>
 17. Bali Y, Kriker A. Enhancing the thermo-physical and mechanical properties of fired earth bricks with date palm wood powder. *Case Stud Therm Eng* [Internet]. 2025 Aug;72:106297. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214157X2500557X>
 18. Standard S. *Sist-En-772-11-2011*. 2011;
 19. Hall C, Hoff WD. *Water Transport in Brick, Stone and Concrete* [Internet]. London: CRC Press; 2021. Available from: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429352744>
 20. Masson JF, Collins P, Lowery M. Temperature control of hot-poured sealants during the sealing of pavement cracks. *Constr Build Mater* [Internet]. 2005 Jul;19(6):423–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061805000061>
 21. Morel JC, Pkila A, Walker P. Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Constr Build Mater* [Internet]. 2007 Feb;21(2):303–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061805002631>
 22. Fernandes FM, Lourenço PB, Castro F. Ancient Clay Bricks: Manufacture and Properties. In: *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures* [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands; 2010. p. 29–48. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-2684-2_3
 23. Walker PJ. Strength and Erosion Characteristics of Earth Blocks and Earth Block Masonry. *J Mater Civ Eng* [Internet]. 2004 Oct;16(5):497–506. Available from: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282004%2916%3A5%28497%29>
 24. Medjmadj S, Ait Taleb S, Si Salem A. Analytical Modeling of the Bending Behavior of Plaster/Cork Functionally Graded Core Sandwich Beams: Analysis and Experimental Validation. *Iran J Sci Technol - Trans Mech Eng* [Internet]. 2023;(0123456789). Available from: <https://doi.org/10.1007/s40997-023-00732-z>
 25. Bouzeboudja F, Salem AS. Experimental investigation on flexural behavior of textile-reinforced concrete : effect of reinforcement type and dune sand addition. 2023;(May).
 26. Djenad S, Ait Taleb S, Si Salem A. Finite element modeling of partially-confined

- concrete and RC columns with embedded hexagonal-FRP strips under axial and horizontal loading. *Structures* [Internet]. 2023;54(May):369–85. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.065>
27. Ali Ahmed C, Si Salem A, Ait Taleb S, Ait Tahar K. Experimental behavior and reliability of predamaged concrete columns externally repaired with FRP spiral strips under axial compression. *World J Eng.* 2022;(July).
 28. Cheah CB, Gong YX, Liew JJ. Utilising quarry fines and GGBS as cement substitutes in mortar for enhanced performance. *Results Eng* [Internet]. 2025 Jun;26:105502. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590123025015725>
 29. Li Q, Fan Y, Pang SD, Zhou X, Shah SP. The fracture performance of cement mortar with fly ash and nano-metakaolin exposed to atmospheric acid deposits. *Constr Build Mater* [Internet]. 2025 Jul;484:141889. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061825020409>
 30. Valdez Madrid DE, De Belie N, Cnudde V. Performance of cement-lime mortars against salt crystallization using experimental accelerated weathering tests. *Cem Concr Compos* [Internet]. 2025 Jun;106196. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946525002781>
 31. Villanueva PB, Barrio MIP, Escamilla AC, García M de las NG, Bouzón AV. Variations in the physical and mechanical behavior of basalt fiber reinforced NHL mortars exposed to different curing conditions. *Case Stud Constr Mater* [Internet]. 2024 Dec;21:e03467. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214509524006181>
 32. Medjmadj Sara. Élaboration et modélisation du comportement des structures sandwichs stratifiées à base de matériaux à gradient fonctionnel FGM. Thèse Dr [Internet]. 2023; Available from: Thèse de doctorat
 33. Medjmadj S, Ait Taleb S, Si Salem A. Analytical Modeling of the Bending Behavior of Plaster/Cork Functionally Graded Core Sandwich Beams: Analysis and Experimental Validation. *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng.* 2024;48(3):1489–507.
 34. Medjmadj S, Si Salem A, Ait Taleb S. Experimental behavior of plaster/cork functionally graded core sandwich panels with polymer skins. *Constr Build Mater.* 2022 Aug 15;344.
 35. Si Salem A, Taouche-Kkheloui F, Ait Tahar K. Experimental investigation on the bending and buckling behavior of bio-based core innovative sandwich panels. *Int J Struct Integr.* 2021;12(2):226–40.
 36. Tung LH, Khadraoui F, Boutouil M, Gomina M. Caractérisation microstructurale et mécanique d'un composite cimentaire renforcé par des fibres de lin. *MATEC Web Conf* [Internet]. 2012 Sep 3;2:01014. Available from: <http://www.matec-conferences.org/10.1051/matecconf/20120201014>
 37. Eymard M, Perrotin P, Plassiard J patrick, Fay S Le, Eymard M, Perrotin P, et al. Comportement mécanique d'un enduit projeté sur son support pour la réhabilitation thermique des bâtiments - expérimentations à l'échelle d'un mur To cite this version : HAL Id : hal-01167734 Comportement mécanique d'un enduit projeté sur son sup-. 2015;(April).

38. Cuadros-Rojas E, Garcia-Ramonda L, Roca P, Pelà L. Out-of-plane bending behaviour of masonry walls with high-strength steel cord mesh bed joint reinforcement. *Constr Build Mater* [Internet]. 2024 Dec;457:139377. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061824045197>
39. Borri A, Corradi M, Castori G, Molinari A. Stainless steel strip – A proposed shear reinforcement for masonry wall panels. *Constr Build Mater* [Internet]. 2019 Jun;211:594–604. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819306877>
40. Sparling A, Palermo D, Hashemian F. Out-of-plane flexural testing and stiffness response of concrete masonry walls with NSM steel reinforcement. *Can J Civ Eng* [Internet]. 2021 Jul;48(7):749–62. Available from: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cjce-2019-0685>
41. Triwiyono A, Nugroho ASB, Firstyadi AD, Ottama F. Flexural Strength and Ductility of Concrete Brick Masonry Wall Strengthened using Steel Reinforcement. *Procedia Eng* [Internet]. 2015;125:940–7. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815034414>
42. Ministère de l’Habitat de l’Urbanisme et de la V. Document Technique Réglementaire D.T.R. - B.C. 2.48 Règles Parasismiques Algériennes RPA 2024. *Αγαη*. 2024;15(1):37–48.
43. AFNOR. Eurocode 8 — Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes et document d’ application nationale. *Auslegung A Grad J Philos*. 2003;33(0).
44. Lyngkhai RB, Warjri T, Marthong C. Out-of-plane flexural behaviour of AAC masonry walls reinforced using steel wire mesh integrated within the masonry bed and bed-head joint. *Structures* [Internet]. 2025 Jun;76:108897. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352012425007118>
45. Zargaran M, Attari NKA, Azadvar N. Relationship between shaking table tests and simultaneous in-plane and out-of-plane cyclic tests in masonry walls strengthened with bed joint reinforcement. *J Build Eng* [Internet]. 2024 Dec;98:111165. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710224027335>
46. AbdAllah A, AbdelRahman B, Galal K. Lateral cyclic performance of flexural-dominated partially grouted reinforced concrete masonry shear walls with bed joint reinforcement. *Eng Struct* [Internet]. 2025 Apr;328:119587. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029624021497>
47. Yang Y, Wu Y, Zhou S, Wu Y, Lv H, Zhang M, et al. Study on the mechanical behavior of the exterior wall of old masonry structures with the integration of reinforcement and insulation. *J Build Eng* [Internet]. 2025 May;102:111902. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235271022500138X>
48. Torunbalcı N, Onar E, Günay H. Structural evaluation of masonry walls with double-sided CFRP reinforcement through diagonal compression tests. *J Build Eng* [Internet]. 2025 Oct;111:113142. Available from:

- <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710225013798>
49. Qu F, Yin S, Liu H. In-plane shear behaviour by diagonal-compression testing of damaged masonry walls strengthened with carbon-glass hybrid textile reinforced concrete. *Eng Struct* [Internet]. 2025 May;331:120009. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029625004006>
 50. Sun X, Shi P, Zhu H, Dong Z, Mu B, Soh CK. Shear performance of brick masonry walls strengthened by deep structural repointing using FRP reinforcement. *J Build Eng* [Internet]. 2025 Oct;111:113187. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235271022501424X>
 51. Meddour M, Si Salem A, Ait Taleb S. On the Recycling of Fiberglass Waste for Building Sandwich Beams: Numerical and Theoretical Investigation. In 2025. p. 141–8. Available from: https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-81288-0_15
 52. Meddour M, Ait Taleb S, Si Salem A, Aghiles NEKMOUCHE. A nonlinear approach for simulating the flexural behavior of GFRP waste core based-sandwich panels with damages analysis. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*. 2025;
 53. Belliazzi S, Fabbrocino F, Lignola GP, Prota A. Advantages of using DIC for capturing mechanical shear sliding behaviour of the FRCM strengthened masonry. *Structures* [Internet]. 2024;68(April):107056. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107056>
 54. Abaqus G. Dassault systemes simulia corporation. Provid Rhode Island, USA. 2014;
 55. SI - SALEM A, ALLALA B, AIT - TALEB S, KHELOUI - TAOUCHE F, FERHAT S. On the Finite Element Modeling of Metal/Ceramic Functionally Graded Beams Subjected to Non-Uniform Static Bending. *Eurasia Proc Sci Technol Eng Math* [Internet]. 2024 Dec 15;30:1–8. Available from: <https://dergipark.org.tr/en/pub/epstem/issue/88346/1593281>
 56. Ait Taleb S, Medjmadj S, Si Salem A. Modeling the nonlinear behavior of predamaged reinforced concrete beams retrofitted with bonded and jacketed frp sheets. *Eurasia Proc Sci Technol Eng Math*. 2022;21:288–94.
 57. Salem AS, Ait Taleb S. Static and dynamic behavior of composite concrete-based beams with embedded Polymer/FRP Components. *Procedia Eng*. 2015;114:173–80.
 58. ALLALA B, SI - SALEM A, AIT - TALEB S, KHELOUI - TAOUCHE F, FERHAT S. A Numerical Approach to Predict the Flexural Response of Simply Supported Nonhomogeneous and Non-Slender Graded Beams. *Eurasia Proc Sci Technol Eng Math* [Internet]. 2024 Dec 30;32:281–7. Available from: <https://dergipark.org.tr/en/pub/epstem/issue/88481/1602773>
 59. Djenad S, Ait S, Si A, Bouzidi MA. ScienceDirect ScienceDirect ICSI 2021 The 4th International Conference on Structural Integrity NLFEA based design optimization of GFRP strips in partially confined concrete. *Procedia Struct Integr* [Internet]. 2022;37(2019):321–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.091>
 60. Kaw AK. *Mechanics of composite materials*. CRC press; 2005.