

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès

Faculté de la Technologie

Département de Génie Civil & travaux publics



Laboratoire des Structures et Matériaux Avancés dans le Génie Civil Et Travaux Publics

THÈSE

Présentée pour l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT LMD 3^{ème} Cycle

Filière : travaux publics

Option : voies et ouvrages d'art

Soutenu par :

Sarra ATAILIA

Sujet de thèse :

Etude de la réponse dynamique des murs en maçonnerie compte tenu de l'interface brique mortier

Soutenue publiquement le 06 Juillet 2021 Devant le jury composé de :

•	BACHIR BOUIADJRA Mohamed	Professeur	UDL SBA	Président
•	MEFTAH Sid Ahmed	Professeur	UDL SBA	Directeur de la thèse
•	YOUZRA Hadj	MCA	U. Mascara	Examineur
•	SAOULA Abdelkader	MCA	U. Tiaret	Examineur
•	ZIANE Noureddine	MCA	UDL SBA	Examineur
•	BOUSAHLA Abdelmoumen Anis	MCA	UDL SBA	Examineur

Année Universitaire 2020/2021



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Dédicace

Je dédie ce travail

A mon père, à ma mère, pour leur affection, leur soutien et pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mes côtés afin d'assurer notre éducation.

A mon frère et ma famille, à mes proches, pour avoir toujours été à mes côtés. Je vous porte tous dans mon cœur,

A tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation,

A tous ceux qui m'ont aidé et encouragé,

A tous mes amis et les collègues.



REMERCIEMENTS

Je remercie, en premier lieu, notre Dieu le plus Puissant Qui a bien voulu nous donner la force et le courage Pour effectuer le présent travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse **Pr. MAFTAH SID AHMED** pour leurs compétences scientifiques, leurs orientations pour son soutien, son aide précieuse et sa disponibilité durant toute ma thèse.

Les travaux de recherches de ma thèse ont été effectués dans Laboratoire des structures et matériaux avancé en génie civil et travaux publics **LSMAGCTP**, je tiens à adresser mes remerciements à ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier aussi mon collègue le doctorant Mr LAIB Salaheddine Et Dr YOUZRA hadj Maître de Conférences à l'université de Mascara pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Un grand merci à tous mes amis et les thésards présents avant et pendant la thèse pour leurs amabilités et leurs sympathies

Enfin je voudrais remercier toute ma famille pour m'avoir toujours Soutenue et encouragée.

*Je remercie les membres de jury qui m'ont
fait l'honneur de présider et d'examiner
Ce modeste Travail.*

Table des matières

ملخص

Résumé

Abstract

Principales notations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale

Introduction Générale.....1

Objectif et cadre de la thèse.....2

1 Chapitre I : Généralité sur les structures en maçonnerie

I.1.Introduction :..... 4

I.2. Historique de la maçonnerie : 4

I.3.Domaine d'application : 9

I.4. Les différentes types de la maçonnerie : 9

 I.4.1. Maçonnerie de pierre naturelle : 10

 I.4.2. Maçonnerie en agglomérés de béton : 10

 I.4.3. Maçonneries en briques silico-calcaire : 11

 I.4.4. Maçonnerie en briques d'argile cuite : 11

I.5.Caractéristiques des constituants de la maçonnerie : 12

 I.5.1. Les briques : 12

 I.5.1.1. Briques pleines : 12

 I.5.1.2. Les briques perforées : 12

 I.5.1.3. Les briques creuses : 13

 I.5.2. Les joints de mortier : 13

I.6. les défauts et Pathologies de la maçonnerie : 15

I.7. Propriétés mécaniques de la maçonnerie : 17

 I.7.1. Comportement sous sollicitation de compression uni-axiale : 17

 I.7.2. Comportement sous sollicitation de traction uni-axiale : 19

I.7.3. Comportement biaxial :.....	20
I.7.4. Comportement au cisaillement :.....	23
I.7.4.1. Modes de rupture dus au cisaillement dans le plan du mur :	23
I.8. Conclusion :	25

2 Chapitre II : la Modélisation des structures en maçonnerie

II.1 Introduction :	27
II.2. Approche globale :.....	29
II.2.1. Définition :.....	29
II.2.2. Méthodes de calcul :	30
II.2.2.1. La méthode des éléments finis MEF :.....	31
II.2.2.2. La méthode des éléments discrets :.....	32
II.2.2.3. La méthode mixte :	34
II.3. Approche par l'homogénéisation :.....	34
II.3.1. Principes de la méthode d'homogénéisation :	35
II.4. Modélisation du comportement des interfaces dans les structures maçonnées :	35
II.4.1. Rupture fragile :.....	36
II.5. Modélisation par logiciel : Introduction à la C.A.O à l'aide du logiciel Abaqus :	36
II.5.1. Introduction :	36
II.5.2. Description du logiciel Abaqus :	36
II.5.3. Les caractéristiques du logiciel ABAQUS :	37
II.5.4. Présentation du logiciel ABAQUS :	38
II.5.4.1. Les modules :	38
II.5.4.2. Méthodologie d'application d'Abaqus :	39
II.6. Conclusion :	40

3 Chapitre III : Élaboration d'un modèle homogène en maçonnerie

III.1 Introduction :	41
III.2 Etude Analytique : Modélisation mathématique des structures en maçonnerie :	41
III.2.1 Procédure d'homogénéisation dynamique :	41
III.2.1.1 Cellule soumise à une contrainte normale dans la direction x et y	43
III.2.1.2. Cellule soumise à une contrainte de cisaillement :	47
III.3 Études numériques : Homogénéisation numérique par éléments finis (Logiciel Abaqus) :	51
III.3.1 Modélisation de la cellule unitaire en maçonnerie (Homogénéisation micro-modèle) :	51
III.4 Résultats et la discussion de l'homogénéisation :	54
III.5 Conclusion :	55

4 Chapitre IV : Analyse des vibrations linéaires dans le plan et hors plan des structures de murs en maçonnerie

IV.1 Introduction :	56
IV.2 Formulation analytique dans l'analyse des vibrations libres des panneaux de maçonnerie :	57
IV.2.1 Cinématique liée au problème de vibration dans le plan :	57
IV.2.2 Cinématique liée au problème de vibration hors plan	59
IV.3 Études numériques :	63
IV.3.1 Vérification de la procédure d'homogénéisation dynamique proposée :	63
IV.3.2 Exemple 1 : Vibration libre dans le plan des murs de maçonnerie rectangulaires	69
IV.3.3 Exemple 2: vibration libre dans le plan des porte-à-faux rectangulaires de maçonnerie.	74
IV.3.4 Exemple 3 : vibration libre hors plan de murs de maçonnerie rectangulaires à bord fixe.	78
IV.3.5 Exemple 4 : murs de maçonnerie vibrants avec bords libres serrés dans les directions x y	81
IV.4 Conclusion :	85

Conclusion Générale

Conclusion Générale	86
---------------------	----

المخلص

تم اقتراح نموذج تكويني لزج مطاطي لهياكل البناء الدورية, يؤدي استخدام نهج التجانس الديناميكي للنموذج المستمر والمنفصل إلى تحديد خصائص المواد متباينة الخواص عن طريق تعيين إجهاد وسلالات متخيلة لوحدة بناء الخلية المتجانسة, يتم تعريف هذه الخصائص على أنها وحدات معقدة والتي تتكون من أجزاء حقيقية تمثل صلابة مرنة وأجزاء مميزة النموذج المقترح في أنه يمكن بسهولة تقييم خصائص التخميد المرتبطة بأنماط وهمية تشير إلى تبديد الطاقة, تتمثل الاهتزازات المختلفة يتم إجراء التحقيقات العددية والبارامترية التي تكشف عن قدرات النموذج على التنبؤ الدقيق بالخصائص الديناميكية لجدران البناء بشكل أساسي تحت كل من الاهتزازات داخل المستوى وخارجه.

الكلمات المفتاحية:

تأثير التخميد، الاهتزازات الحرة، نظريات القص، تجانس البناء، هياكل البناء، طريقة ريتز.

RESUME :

Un modèle viscoélastique constitutif pour les structures de maçonnerie périodiques est proposé. L'utilisation d'une approche d'homogénéisation dynamique du modèle continu et discret conduit à la détermination des propriétés du matériau anisotrope en attribuant la contrainte et les déformations fictives de l'unité de maçonnerie cellulaire homogène. Ces propriétés sont définies comme des modules complexes, constitués de parties réelles représentant la rigidité élastique et de parties imaginaires faisant référence aux dissipations d'énergie. L'avantage du modèle proposé est que les propriétés d'amortissement associées aux différents modes de vibrations peuvent être facilement évaluées. Des études numériques et paramétriques sont menées qui révèlent les capacités du modèle à une prédiction précise des propriétés dynamiques des murs de maçonnerie principalement sous des vibrations dans le plan et hors du plan.

MOTS CLÉS :

Effet d'amortissement, vibration libre, théories de cisaillement d'ordre élevé, homogénéisation de la maçonnerie, structures de maçonnerie, méthode de Ritz.

ABSTRACT:

A constitutive viscoelastic model for periodic masonry structures is proposed. Using a dynamic homogenization approach of the continuous and discrete-based model leads to the determination of the anisotropic material properties by assigning the fictitious stress and strains of the homogeneous cell masonry unit. These properties are defined as complex moduli, which consist of real parts representing elastic stiffness and imaginary ones referring to energy dissipations. The advantage of the proposed model is that the damping properties associated to different modes of vibrations can be easily evaluated. Numerical and parametric investigations are conducted that reveal the capabilities of the model to an accurate prediction of the dynamic properties of the masonry walls mainly under both in-plane and out-of-plane vibrations.

KEYWORDS

Damping effect, free vibration, height shear beam theories, masonry homogenization, masonry structures, Ritz's method.

Principales notations

- f_m0 : résistance à la compression du mortier
- σ_{x-l}^i : la contrainte normale
- u_{x-l}^i : le déplacement axial
- ρ_i : la masse volumique
- E^{*i} : le module de Young
- E^m : le module d'élasticité du mortier
- ExG : module axial dans la direction x
- EyG : module axial dans la direction y
- η^i : le facteur de perte
- η^{hm} : le facteur de perte mortier horizontal
- η^{vm} : le facteur de perte mortier vertical
- η^{br} : le facteur de perte brique
- ρ^G : la masse volumique homogène
- G_{yx}^{*i} : le module complexe de cisaillement
- $G_{yx}G$: module de cisaillement dans le plan yx
- $G_{xy}G$: module de cisaillement dans le plan xy
- $v(y, x, t)$: le déplacement longitudinal
- $v0(y, t)$: le déplacement axial du plan médian du mur de maçonnerie,
- $u(y, t)$: le déplacement transversal commun dans la direction x
- w : le déplacement transversal dans la direction z
- w_b et w_s : représentent respectivement les parties de flexion et de cisaillement
- $\beta_z(y, t)$: la rotation supplémentaire de la normale au plan médian autour de z.
- β_x : la rotation autour de l'axe x
- β_y : la rotation autour de l'axe y

- $f(x)$: la fonction de cisaillement
- δP_{acc} : le résultat des travaux virtuels mis dans le système comme accélération.
- δP_{int} : le travail virtuel interne
- ω : la fréquence circulaire associée au mode de vibration.
- $\delta u_0, \delta w$ et $\delta \beta$: fonction des déplacements virtuels
- ε : déformation axiale
- γ : déformation de cisaillement
- U : les énergies de déformation
- T : les énergies de cinétique
- $\{f\}$: un résidu général qui régit le problème de vibration
- D : le vecteur qui formé par les coefficients de Ritz
- $[K]$: la matrice de rigidité
- $[M]$: la matrice de masse
- η_ω : le facteur de perte
- $\eta_x G$: facteur de perte dans la direction x
- $\eta_y G$: facteur de perte dans la direction y
- $\eta_{yx} G$: facteur de perte de cisaillement dans le plan yx
- $\eta_{xy} G$: facteur de perte de cisaillement dans le plan xy
- ω : fréquence naturelle.
- H : la hauteur d'un Mur en maçonnerie
- B : la largeur d'un Mur en maçonnerie
- L : la longueur d'un élément de maçonnerie en porte-à-faux
- l_{br} ; l_{hm} ; l_{vm} ; h_{br} ; h_{hm} et h_{vm} : les dimensions de la cellule unitaire en maçonnerie (la longueur du brique, mortier horizontal, mortier vertical ; la hauteur du brique, mortier horizontal, mortier vertical).

LISTE DE FIGURES

- Figure I.1 :** Exemple sur des cabanes en pierre sèche. (P.5)
- Figure I.2 :** Les pyramides d'Égypte. (P.5)
- Figure I.3 :** L'architecture romaine. (P.5)
- Figure I.4 :** Les constructions maçonnées en l'Asie. (P.6)
- Figure I.5 :** Architecture moderne de la maçonnerie. (P.7)
- Figure I.6 :** La production des briques. (P.8)
- Figure I.7 :** Mur en pierre naturelle. (P.9)
- Figure I.8:** Les différents types de parpaing. (P.10)
- Figure I.9 :** Brique silico-calcaire. (P.10)
- Figure I.10 :** Processus de fabrication des briques en terre cuite creuses. (P.11)
- Figure I.11:** Briques pleines. (P.12)
- Figure I.12:** Mur en briques perforées. (P.12)
- Figure I.13:** Briques creuses de différents formats. (P.12)
- Figure I.14 :** Constituants d'un mortier. (P.13)
- Figure I.15 :** briques maintenus ensemble par un mortier. (P.13)
- Figure I.16 :** Défauts causés par le Mouvement des dalles. (P.15)
- Figure I.17 :** Mouvements de dilatation thermique. (P.15)
- Figure I.18 :** Fissure le long des ouvertures. (P.15)
- Figure I.19 :** Pathologies de la maçonnerie. (P.16)
- Figure I.20 :** Comportement de la maçonnerie sous l'effet d'un effort normal aux joints horizontaux. (P.17)
- Figure I.21 :** Diagramme contrainte - déformation d'un essai compression. (P.18)
- Figure I.22.** L'installation de l'essai de résistance à la traction pour la maçonnerie avec un chargement parallèle aux joints de mortier. (P.19)
- Figure I.23 :** diagramme typique contraintes-déplacements pour l'essai de résistance à la traction dans une maçonnerie avec un chargement parallèle aux joints de mortier. (P.19)

Figure I.24 : Comportements biaxial des maçonneries. (P.20)

Figure I.25 : Essai biaxial sur des panneaux de maçonnerie. (P.21)

Figure I.26 : Différentes modes de rupture d'une maçonnerie soumise à un chargement biaxial. (P.22)

Figure I.27 : Modes de rupture d'un mur en maçonnerie soumis un chargement biaxial. (P.24)

Figure I.28 : Modes de ruptures pour un mur en maçonnerie sous l'effet d'un effort de cisaillement. (P.25)

Figure II.1 : Stratégies de modélisation d'une maçonnerie. (P.28)

Figure II.2 : Mécanismes de rupture d'une maçonnerie. (P.29)

Figure II.3 : Modélisation par l'approche globale. (P.30)

Figure II.4 : modélisation d'Escalier Ridolfi. (P.33)

Figure II.5: modélisation de la Coupole de Junas. (P.33)

Figure II.6 : modélisation du Pont Julien. (P.34)

Figure III.1 : Mur en maçonnerie et la cellule répétitive de maçonnerie dérivée unissent les détails. (P.42)

Figure III.2: Cellule de maçonnerie unitaire soumise à l'excitation axiale, (a) Champ de déplacement. (b) conditions d'équilibre aux côtés droit et gauche. (P.43)

Figure III.3 : Cellule de maçonnerie unitaire soumise à des forces de cisaillement, (a) Champ de déplacement;(b) conditions d'équilibre sur les côtés supérieur et inférieur. (P.47)

Figure III.4: Tailles des cellules unitaires de maçonnerie considérées dans l'étude numérique. (P.52)

Figure III.5: Modélisation de la structure de la cellule unitaire par le logiciel Abaqus. (P.52)

Figure III.6: schéma de sollicitation de la cellule unitaire. (P.53)

Figure IV.1: Déformations des murs de maçonnerie,

a) Mur de maçonnerie déformé dans le plan; (b) Mur de maçonnerie déformé hors plan (P.57)

Figure IV.2: Variation des caractéristiques mécaniques homogènes avec la fréquence,

- (a): module axial dans la direction x E_xG
- (b): module axial dans la direction y E_yG
- (c): module de cisaillement dans le plan yx $G_{yx}G$
- (d): module de cisaillement dans le plan xy $G_{xy}G$ (P.64)

Figure IV.3: Variation des facteurs de perte homogènes avec la fréquence,

- (a): facteur de perte dans la direction x η_xG
- (b): facteur de perte dans la direction y η_yG
- (c): facteur de perte de cisaillement dans le plan yx $\eta_{yx}G$
- (d): facteur de perte de cisaillement dans le plan xy $\eta_{xy}G$ (P.66)

Figure IV.4: Dimensions des murs en maçonnerie de l'exemple 1:

- (a) Mur de maçonnerie avec un rapport hauteur / largeur $H / B = 2.093$
- (b) Mur de maçonnerie carré avec rapport hauteur / largeur $H / B = 1.046$ (P.69)

Figure IV.5: Détails du maillage par FEM avec le logiciel Abaqus. (P.70)

Figure IV.6: Variation du facteur de perte de vibration dans le plan pour les murs de maçonnerie carrés et rectangulaires. (P.73)

Figure IV.7 : Élément de maçonnerie en porte-à-faux avec longueur L et largeur B. (P.74)

Figure IV.8: Variation du facteur de perte des poutres de maçonnerie en porte-à-faux (Sous vibration dans le plan). (P.77)

Figure IV.9 : Variation du facteur de perte de l'exemple 3 (a) : Mur carré- (b) : mur rectangulaire. (P.80)

Figure IV.10: Variation du facteur de perte de l'exemple 4 (a), paroi carrée- (b): paroi rectangulaire. (P.84)

LISTE DE TABLEAUX

Tableau I.1 : Propriétés mécaniques des briques. (P.13)

Tableau I.2 : Propriétés mécaniques des mortiers suivant leur composition. (P.14)

Tableau III-1 : Comparaison des modules d'Young ; de cisaillement avec MEF. (P.54)

Tableau IV.1-a : Comparaison des modules de cisaillement et d'Young avec la MEF. (P.63)

Tableau IV.2: variations du facteur de perte de la cellule de maçonnerie homogénéisée en fonction de η^b avec $\eta^m = 0,1$. (P.67)

Tableau IV.3: Variation des facteurs de perte de la maçonnerie homogénéisée en fonction de η_m avec $\eta_b = 0,1$. (P.68)

Tableau IV.4: Résultats des fréquences de vibration dans le plan (Hz) pour un mur de maçonnerie avec un rapport hauteur / largeur de $H/B = 2.093$. (P.71)

Tableau IV.5: Résultats des fréquences de vibration dans le plan (Hz) pour un mur de maçonnerie avec un rapport hauteur / largeur de $H / B = 1,04$. (P.72)

Tableau IV.6: Résultats des fréquences de vibration dans le plan pour la poutre en porte-à-faux de maçonnerie (Hz) avec un rapport hauteur / largeur de $B / L = 0,24$ avec $L = 1,54\text{m}$ et $B = 0,372\text{m}$. (P.75)

Tableau IV.7: Résultats des fréquences de vibration dans le plan pour la poutre en porte-à-faux de maçonnerie (Hz) avec un rapport hauteur / largeur de $B / L = 0,48$ avec $L = 1,54\text{m}$ et $B = 0,744\text{m}$. (P.76)

Tableau IV.8 : Résultats des fréquences de vibration hors plan pour les panneaux de maçonnerie (hrz) avec un rapport hauteur / largeur de $H / B = 1,2$ ($B = 3,08\text{m}$ $H = 3,72\text{m}$). (P.78)

Tableau IV.9 : Résultats des fréquences de vibration hors plan pour les panneaux de maçonnerie (hrz) avec un rapport hauteur / largeur de $H / B = 0,6$ ($B = 3,08\text{m}$ $H = 1,86\text{m}$). (P.79)

Tableau IV.10-a : Résultats de fréquences pour le panneau de maçonnerie de l'exemple 4 (hrz) avec rapport d'aspect ($H/ B = 1,2$ ($B = 3,08\text{m}$ $H = 3,72\text{m}$)). (P.82)

Tableau IV.10-b : Résultats de fréquences pour le panneau de maçonnerie de l'exemple 4 (Hz) avec un rapport hauteur / largeur $H / B = 0,6$ ($B = 3,08\text{m}$ $H = 1,86\text{m}$). (P.83)

Introduction Générale

Introduction générale.

Dans de nombreux pays du monde, le recours à la maçonnerie est une pratique souvent proposée dans la conception de structure du bâtiment. Dans des anciennes époques elle est réalisée principalement en murs porteuses.

Notre pays a connu des séismes catastrophiques tels que, ceux qui se sont produits à Ain Temouchent en 1999, et Boumerdes en 2003 ils témoignent de la nécessité de règlementer la construction en maçonnerie, qui est réalisée généralement sans contrôle.

En général, les structures maçonnées sont soumises à plusieurs facteurs extérieurs et intérieurs qui les rendent vulnérables. Le temps, l'espace et les matériaux de construction sont parmi les facteurs déterminant la survie de ces structures.

La maçonnerie est un matériau anisotrope, composé de brique et de mortier. Les structures en maçonneries présentent un certain nombre d'avantages :

- La protection contre l'incendie et les intempéries, l'isolation thermique et phonique.
- La durabilité contre les conditions climatiques.

Par ailleurs, il est indispensable de connaître et déterminer le comportement mécanique de la maçonnerie. Afin de prédire leur tenue et leur avenir. Plusieurs chercheurs se sont penché leurs expériences sur cette question dans le but de comprendre le comportement de ces structures sous les diverses sollicitations auxquelles elles sont soumises régulièrement :

- la compression uniaxiale
- la traction uniaxiale
- le chargement biaxial
- le cisaillement

Toutes ces sollicitations ont des conséquences considérables sur la résistance des maçonneries. Il est donc nécessaire de procéder à la réhabilitation de ces constructions conformément aux exigences de la réglementation sismique en l'occurrence le RPA (Règlement parasismique Algérien). Afin de parvenir à cet objectif, il est important en premier lieu de maîtriser les techniques d'homogénéisation des structures en murs de maçonnerie. En effet ce genre de structure, est définie comme des structures répétitives par leur géométrie. Il convient donc de localiser une cellule représentative de la structure afin de procéder à une homogénéisation statique et dynamique. Ceci va permettre de déterminer son comportement mécanique sous les sollicitations d'origine sismique, que ce soit en analyse spectral modale ou bien sous un accélérogramme sismique à la base.

La résistance des murs en maçonnerie dépend de la configuration architecturale et des propriétés mécaniques de leurs constituants tels que les blocs (briques ; pierre) et le joint de mortier. D'une part ces particularités constructives des structures de bâtiment en maçonnerie sont les principales responsables des dommages sismiques et de l'effondrement que ce soit sous les excitations sismiques dans le plan et hors du plan.

D'autre part, à mesure que les intérêts de conception écologique des bâtiments dans les régions méditerranéennes et subsahariennes augmentent, il devient de plus en plus important de fournir aux structures des bâtiments une empreinte carbone améliorée lorsque la maçonnerie est réalisée avec des matériaux naturels tels que la terre ou des pierres. De ce fait, les structures de maçonnerie sont considérées comme de bons candidats pour se substituer aux concepts de construction standard, utilisant des éléments en acier et en béton. Tous les éléments structurels actuels constituant les contreventements, les dalles et les murs de soutènement sont concernés par cette opportunité. Dans ce contexte de structures de maçonnerie nouvelles et anciennes, de nombreux travaux de recherche se sont concentrés sur les essais expérimentaux et la modélisation par éléments finis (FE) des structures de maçonnerie. Tous ces travaux ont contribué à une compréhension fiable de l'état limite des murs de maçonnerie sous charge sismique.

Nous allons consacrer la présente étude à ce point délicat qui est l'étude de la réponse dynamique des murs en maçonnerie compte tenu de l'interface brique-mortier. Pour notre étude nous avons traité deux volets. Le premier a été consacré à l'étude analytique dans le but d'identifier les lois de comportement pour la maçonnerie. Le second a été dédié à la modélisation numérique du modèle que nous avons traité.

Objectifs de la recherche :

Les murs en maçonnerie ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans le but de comprendre leur comportement mécanique lorsqu'ils sont sollicités en plan ou bien hors plan. Compte tenu de son hétérogénéité due à ses constituants, formés par assemblage de brique et des joints de mortier (horizontal et vertical), selon un arrangement régulier, la maçonnerie peut être considérée comme un matériau à comportement anisotrope. Le but principal de cette investigation c'est de déterminer les propriétés anisotropies des murs en maçonnerie à motif régulier. Pour ce faire, on commence par définir une cellule répétitive selon un arrangement périodique. Cette dernière est soumise aux différentes sollicitations axiales et de cisaillement dans les différentes directions afin de déduire ces propriétés mécaniques. Sur la base de ces résultats d'homogénéisation, on va étudier la réponse dynamique des murs en maçonnerie et mettre à la disposition des intervenants dans le calcul des structures des méthodes de calcul simplifié pour la conception des structures en murs de maçonnerie.

Le manuscrit sera structuré en quatre parties de la manière suivante :

1. Une introduction générale rappelant le contenu général de la problématique ainsi que les objectifs à atteindre.
2. chapitre 01 : Généralité sur les structures en maçonnerie qui est consacré à l'étude bibliographique, nous allons présenter une synthèse de l'état de l'art de la maçonnerie d'un point de vue générale. Ensuite nous abordons les aspects liés à leurs propriétés mécaniques.
3. chapitre 02 : la Modélisation des structures en maçonnerie qui vise à la modélisation du comportement des maçonneries et de leurs interfaces, dont nous pouvons distinguer clairement deux approches différentes pour aborder ce sujet. Nous allons les nommer dans la suite du manuscrit "approche globale" et "approche par l'homogénéisation ". Dans la première, on considère la structure maçonnée comme un matériau hétérogène ce qui implique de prendre en considération la géométrie et la constitution des matériaux. Dans la seconde, on considère que la maçonnerie est un matériau homogène.
4. chapitre 03 : Élaboration d'un modèle homogène en maçonnerie : proposition d'une cellule unitaire en maçonnerie du micro-modèle est formée par assemblage d'un brick en bloc très rigide et de deux joints de mortier, l'un est disposé horizontalement et l'autre est vertical pour définir les propriétés anisotropie de la cellule ainsi retenue. A partir de la cellule unitaire et par le biais d'une modélisation numérique par éléments finis (Abaqus), il sera possible d'établir les propriétés anisotropies de la cellule homogénéisée fictive qui remplacera la cellule réelle. Les résultats des propriétés des matériaux fournis par la présente théorie de l'homogénéisation sont comparés à ceux calculés par la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel Abaqus.
5. Chapitre 04 : Analyse des vibrations linéaires dans le plan et hors plan des structures de murs en maçonnerie : l'approche d'homogénéisation dynamique proposée permet la détermination des constantes élastiques et de leurs facteurs de perte correspondants. Cela conduit au traitement simplifié de la maçonnerie dans l'analyse des vibrations libres sous un comportement vibratoire dans le plan et hors plan. Il a été constaté à travers les panneaux étudiés de maçonnerie.

CHAPITRE I

Généralité sur les structures en maçonnerie

I.1.Introduction :

En maçonnerie, les murs constituent le type de structure le plus souvent employé depuis l'antiquité dans les bâtiments et infrastructures tels que les ponts, barrages, murs de soutènement et remparts. Ce type de structures réalisées en maçonnerie représente en grande partie un héritage architectural et culturel qu'il faut préserver contre les effets dévastateurs, à savoir le vieillissement, les tremblements de terre ...etc. La maçonnerie est considérée comme la technique de construction la plus ancienne et la plus répandue. Par définition la maçonnerie est l'art qui consiste à ranger des pierres avec du mortier ou avec une autre liaison. Elle est également définie comme étant une construction dans laquelle on emploie de la pierre, de la brique, du mortier... [13]. Les structures murales en maçonnerie constituées d'un agencement régulier de briques et de joints de mortier ont été utilisées dans un large éventail de bâtiments historiques et modernes dans le monde entier. Dans le nord de l'Algérie, de nombreux bâtiments et châteaux élégants sont construits pendant la période coloniale française, en utilisant un système de caissons qui se compose uniquement de murs en maçonnerie avec des ouvertures et des dalles. Malgré leur vulnérabilité structurelle aux excitations dynamiques, résultant des actions du vent ou des tremblements de terre, les structures en maçonnerie sont le système de construction le plus répandu, en particulier pour les unités d'habitation préfabriquée dans certains pays sujets aux tremblements de terre. Dans ce chapitre, nous allons présenter une recherche bibliographique, dont nous résoudrons les points suivants :

- l'historique de la maçonnerie ;
- Domaine d'application ;
- les différents types de la maçonnerie ;
- les caractéristiques des constituants de la maçonnerie ;
- les défauts et les pathologies des structures en maçonnerie ;
- les propriétés mécaniques de la maçonnerie ;

I.2. Historique de la maçonnerie :

La maçonnerie est le matériau le plus ancien utilisé dans la construction et malgré l'utilisation intensive de matériaux de construction comme le béton ou l'acier, elle a toujours sa place dans l'architecture industrielle moderne. Des améliorations importantes ont été apportées à ce matériau, mais la technique d'empilement des briques ou des pierres est restée pratiquement inchangeable. Ceci lui donne une caractéristique simple et très particulière et offre beaucoup d'avantages dans la construction tels que : l'esthétique, la solidité, la durabilité, la bonne isolation phonique et thermique, la protection contre le feu... elle peut également jouer un rôle dans les murs porteurs de la structure, en raison de sa bonne résistance aux forces horizontales, notamment aux forces sismiques. [13]

L'art de la maçonnerie a commencé lorsque les premiers hommes complétaient ses grottes naturelles précieuses mais rares par des grottes artificielles faites de piles de pierres. Des cabanes circulaires en pierre, en partie creusées dans le sol, datant de la préhistoire, ont été trouvées dans les îles Aran, en Irlande.



Figure I.1 Exemple sur des cabanes en pierre sèche

De nombreuses constructions maçonnées en pierre ont survécu jusqu'à ce jour, et témoignent de la puissance des cultures anciennes et médiévales. Citons l'architecture égyptienne avec les pyramides des pharaons (environ 2800-2000 avant Jésus-Christ), l'architecture romaine (environ 0-1200 après Jésus-Christ) avec les temples, les palais, les arches, les colonnes, les barrages et les aqueducs...

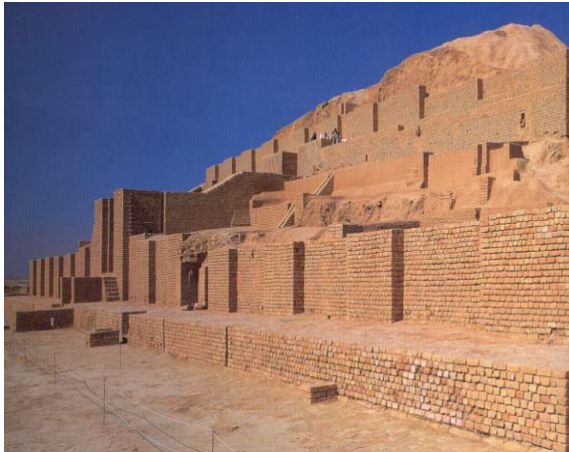


Figure.I.2 Les pyramides d'Égypte

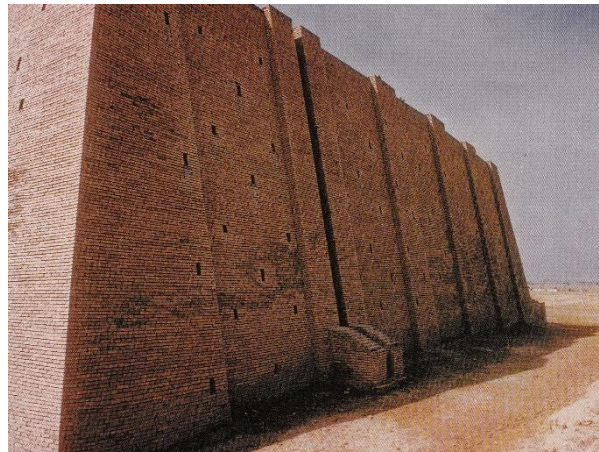


Figure I.3 L'architecture romaine

Le choix des matériaux de maçonnerie a toujours été influencé par les formations géologiques et les conditions prévalant dans une région donnée. Les temples égyptiens, étaient construits par exemple, en calcaire, grès, albâtre, granit, basalte et porphyre extraits des collines situées le long du Nil. Un autre ancien centre de civilisation, la région de l'Asie occidentale située entre le Tigre et l'Euphrate, manquait d'affleurements de pierre mais était riche en dépôts d'argile. En conséquence, les structures de maçonnerie des empires assyrien et perse ont été construites en briques séchées au soleil et placées sous des unités brûlées au four, parfois vernissées.



a- Ziggourat 1226-1235 av J.C



b- la construction royale en Mésopotamie



c- la grande Muraille de Chine

Figure I.4 Les constructions maçonnées en l'Asie

A présent, la pierre reçoit un nouveau rôle dans la construction industrielle du fait de ses difficultés d'extraction, de transport et de mise en œuvre. Elle est devenue un matériau excessivement cher et d'autres matériaux ont pris le dessus dans les applications structurales. La maçonnerie est principalement devenue un matériau à usage esthétique.



Figure.I.5 Architecture moderne de la maçonnerie

En plus de la pierre, la brique séchée au soleil était aussi un matériau de construction très utilisée notamment par les habitants des contrées très peuplées au Moyen-Orient. Les habitants se retrouvaient d'une part face à des problèmes de manque de bois pour la construction, des difficultés d'approvisionnement en pierre et surtout à une forte demande de construction.

D'autre part, ces endroits sont caractérisés par un climat très rude connu par de hautes températures mais possédaient une forte abondance d'argile. Par conséquent, ces raisons ont favorisé le développement et augmenté la fabrication de la brique sèche. Celle-ci est devenue un matériau léger, facile à mouler, permettant de donner des formes diverses aux murs et qui possède également des propriétés de résistance et de durabilité.

Des milliers d'années avant notre ère, on trouve déjà, au Moyen-Orient, des briques fabriquées exclusivement à base d'argiles naturelles. D'abord utilisées crues (environ 10 000 ans av. J.C.), elles sont ensuite cuites pour obtenir une meilleure résistance le matériau essentiel pour la construction était la brique séchée au soleil. L'utilisation de la brique cuite a commencé probablement avec l'observation des briques séchées au soleil, qui devenaient très rigides et durables au contact de la chaleur, notamment pour les briques qui constituaient les murs des fours de cuisson. C'est sous l'Empire Romain que l'utilisation de la brique cuite a pu s'élargir et gagner du terrain surtout avec l'introduction d'autres types d'additifs qui sont rentrés dans la composition des briques. Ceci a permis une homogénéisation de l'architecture et une prépondérance de la brique dans les constructions. Les briques prennent alors des formes beaucoup plus "standards" et régulières. Elles peuvent prendre aussi des formes spécifiques en fonction de leur utilisation ; par exemple les éléments décoratifs.

Ce sont les romains qui l'ont introduite dans nos contrées et, même si son utilisation a ensuite disparu durant quelques siècles, elle connaît, depuis le 12ème siècle, un succès qui ne s'est plus démenti jusqu'à nos jours...

Dans le 19^{ème} siècle l'histoire de la maçonnerie est liée aussi à la Révolution Industrielle ; l'activité industrielle va remplacer les procédures manuelles. Le point de départ de la fabrication industrielle des briques a commencé avec l'introduction du four d'Hoffman Kiln en 1858 dans lequel se font toutes les procédures de fabrication à partir de la phase de

préparation jusqu'à la cuisson. Depuis de nombreuses recherches ont été faites pour améliorer la production des briques.



Figure.I.6 La production des briques.

A présent, dans la structure industrielle, de nombreux changements ont été apportés à la maçonnerie d'une manière générale, en particulier la technique de fabrication des constituants et à leurs compositions. L'ancien et le nouveau coexistent et dans la plupart des cas sont indissociables. Le mélange du traditionnel et du moderne est présent dans presque toutes les constructions. De nouvelles techniques sont dédiées à la sauvegarde et à la réhabilitation des monuments historiques comme par exemple la technique de renforcement par matériaux composites qui a déjà fait ses preuves. Cependant, dans les pays développés, la maçonnerie semble avoir perdu sa fonction structurale porteuse à cause de l'utilisation du béton et de l'acier qui deviennent de plus en plus compétitifs. En Europe occidentale et dans les pays d'Amérique du Nord, la maçonnerie est utilisée actuellement comme étant un matériau secondaire pour les remplissages des murs.

Notamment, de nombreux chercheurs s'intéressent au comportement des structures en maçonnerie, en particulier les chercheurs italiens, car ils ont des intérêts culturels, sociaux et économiques pour restaurer et protéger leur patrimoine architectural. Les résultats obtenus indiquent que la destruction de ces structures est affectée par un comportement discontinu, tel que l'interface brique-béton. Au niveau de ces interfaces, tous les phénomènes non linéaires (endommagement, fissuration, rupture ...) vont se développer. Ces raisons ont conduit pour nous faire une étude de la réponse dynamique des murs en maçonnerie compte tenu de l'interface brique-mortier c'est l'intérêt et l'objectif de notre thème de recherche.

I.3.Domaine d'application :

Les fonctions assurées par les murs (ici en maçonnerie, mais cela reste valable pour tous les types de murs) concernent principalement :

- La stabilité mécanique sous sollicitations normales.
- L'étanchéité à la pluie pour les parois extérieures (les murs de façade).
- La satisfaction aux exigences thermiques et acoustiques.

- La tenue au feu de la paroi.
- Assemblage facile, dimensions et poids permettant un travail aisé.

Les ouvrages courants de maçonnerie traditionnelle peuvent être classés suivant leur rôle dans l'ouvrage :

- Maçonneries porteuses.
- Maçonneries de remplissage.
- Maçonneries de façade non porteuse ou en doublage
- Maçonneries de cloison.

I.4. Les différents types de la maçonnerie :

La résistance caractéristique ainsi que le mode de fabrication de la maçonnerie, peuvent être classés en quatre catégories :

- Maçonnerie de pierre naturelle.
- Maçonnerie en agglomérés de béton.
- Maçonnerie en briques d'argile cuite.
- Maçonnerie en briques silice-calcaire.

I.4.1. Maçonnerie de pierre naturelle :

La construction en pierre naturelle reste la base de la maçonnerie d'une façon générale. La pierre offre un matériau résistant présentant certains avantages économiques lorsque le lieu d'utilisation est proche du lieu d'extraction [42] (Figure I.7).



Figure I.7 : Mur en pierre naturelle

I.4.2. Maçonnerie en agglomérés de béton :

Les agglomérés sont constitués d'agrégats dont la cohésion est assurée par un liant hydraulique (voir Figure I.8).

Les agglomérés doivent satisfaire à certaines conditions et obéir à certaines exigences :

- Une bonne résistance mécanique.
- Une bonne résistance au gel.
- Une bonne isolation thermique et phonique.
- Assemblage facile dimensions et poids permettant un travail aisé.







Usages	Blocs (CE)	
Tout type de mur	Bloc creux	
Sous-sol enterré, refend, piscine	Bloc plein ou perforé	
Mur de soutènement, piscine	Bloc à bancher	
Jambages, chaînages verticaux, angles	Bloc poteau, feuillures	
About de planchers, cloison séparative	Planelles	
Linteaux, chaînages horizontaux	Bloc chaînages	

Figure I.8: Les différents types de parpaing [3]

I.4.3. Maçonneries en briques silico-calcaire :

La brique silico-calcaire (Figure I.9) est composée d'un mélange de chaux (8 – 10%), sable siliceux (90 – 92%) et d'eau, sans adjuvant chimique, presse et durci. Lors de la fabrication des briques, la température de durcissement s'élève à 160 - 200° C [41]



Figure I.9 : Brique silico-calcaire

I.4.4. Maçonnerie en briques d'argile cuite :

Les briques sont obtenues par cuisson de certaines argiles à une température d'environ 1000°C. Par combinaison chimique à partir de 700° C, l'argile en perdant son eau, se transforme en terre cuite. L'oxyde de fer des argiles donne la coloration aux briques

En général, la fabrication des briques suit les opérations indiquées sur la figure I.10.

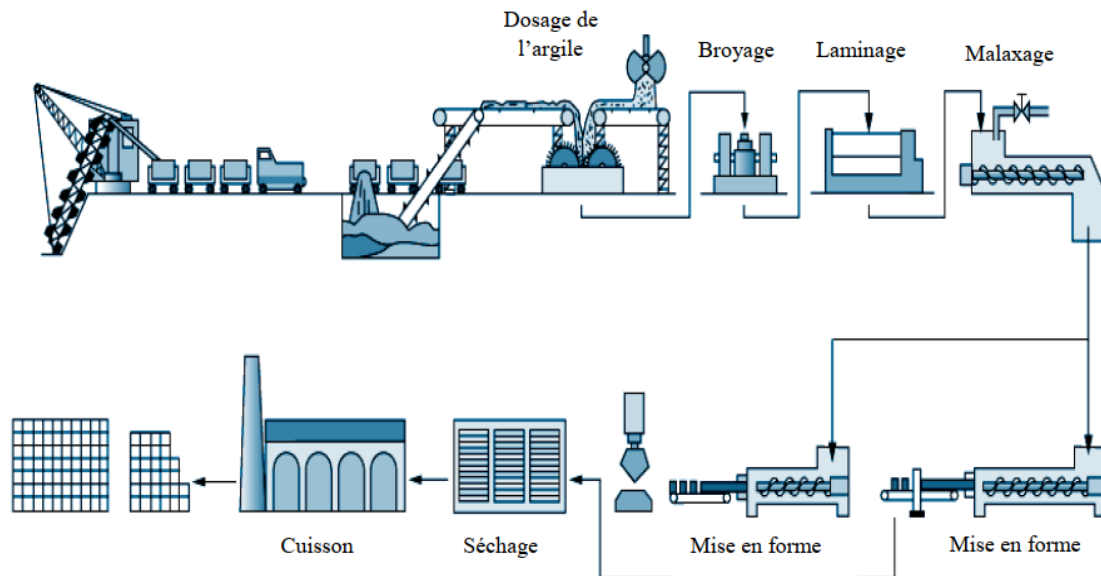


Figure I.10 : Processus de fabrication des briques en terre cuite creuses [49]

I.5. Caractéristiques des constituants de la maçonnerie :

I.5.1. Les briques :

Briques, produits structuraux en terre cuite, fabriqués comme des unités standard, utilisés dans la construction de bâtiments. La brique, fabriquée pour la première fois sous une forme séchée au soleil il y a au moins 6 000 ans et précurseur d'une vaste gamme de produits structuraux en terre cuite utilisés aujourd'hui, est une petite unité de construction sous la forme d'un bloc rectangulaire composé d'argile, de schiste ou de mélanges et brûlé (cuit) dans un four ou un four pour produire résistance, dureté et résistance à la chaleur. Le concept original des anciens fabricants de briques était que l'unité ne devait pas être plus grande que ce qu'un homme pouvait facilement manipuler ; Aujourd'hui, la taille des briques varie d'un pays à l'autre et l'industrie de la fabrication de briques de chaque pays produit une gamme de tailles pouvant atteindre des centaines de tonnes. Comme on a déjà dit on peut les trouver dans une grande variété de tailles, de textures, de couleurs et de formes. Elles peuvent être pleines, perforées ou creuses.

I.5.1.1. Briques pleines :

Les briques pleines ordinaires constituent d'excellents éléments pour les murs porteurs, spécialement fabriquées pour l'exécution des façades et des parements (Figure I.11).

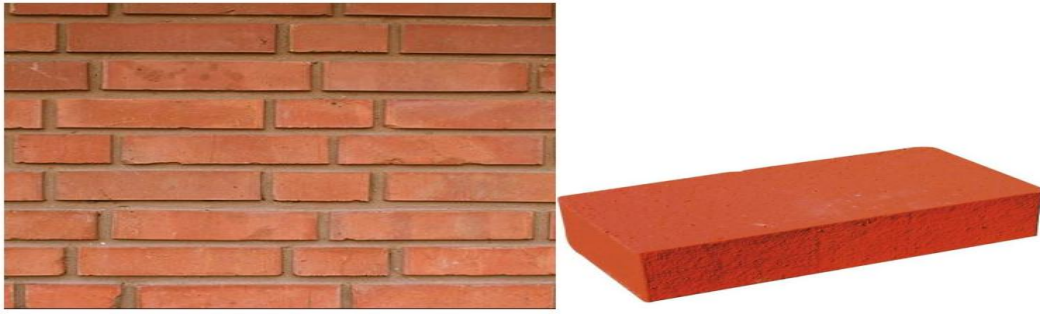


Figure I.11: Briques pleines

I.5.1.2. Les briques perforées :

Les briques perforées sont des briques où la perforation, apparaît sur les grandes faces. De Plus, leur format permet une mise en œuvre rapide (Figure I.12).



Figure I.12: Mur en briques perforées

I.5.1.3. Les briques creuses :

Les briques creuses (Figure I.13) sont beaucoup plus légères, et de plus grandes dimensions ; elles permettent la réalisation de murs spécialement isolants. En revanche leur résistance à la compression est faible.



Figure I.13: Briques creuses de différents formats

D'une manière générale, leurs propriétés varient avec le mode de fabrication, elles sont caractérisées par leur résistance à la compression et à la traction comme indiqué dans le tableau :

Texture	Masse volumique	Module élastique	Coefficient de poisson	Resistance compression	Resistance traction
Briques perforées	2000	40000	0.3	12.5-40	4
Brique creuse	3000	5000	0.3	20	8
Brique plein	3000	15000	0.2	40	4

TAB. I.1 – Propriétés mécaniques des briques. D'après [22]

I.5.2. Les joints de mortier :

Le mortier est le mélange à consistance de pâte ou de boue, d'un liant et d'agrégats avec de l'eau. Il est utilisé en maçonnerie comme élément de liaison ou comme enduit. Techniquement parlant, c'est une colle.

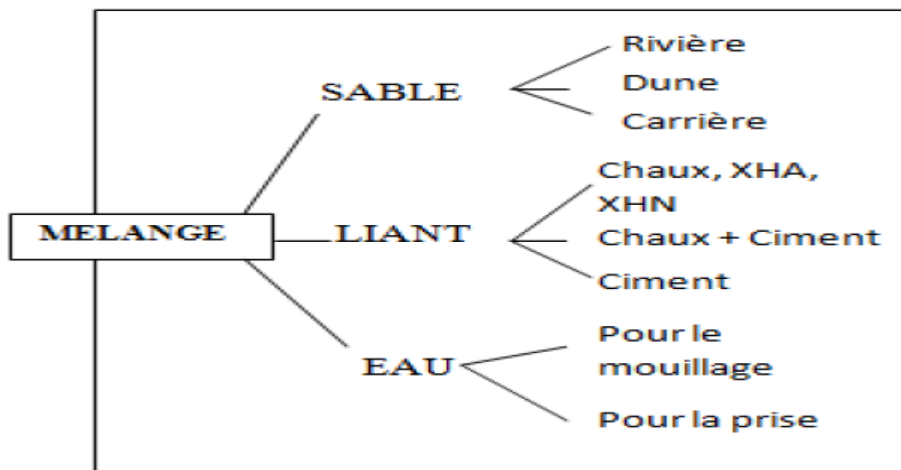


Figure I.14 : Constituants d'un mortier



Figure I.15 : briques maintenus ensemble par un mortier.

L'usage du mortier est donc indispensable dans des maçonneries pour assurer une cohésion et une bonne répartition des charges entre assises. Il assure également un rôle de colle, et lorsqu'il comble chacun des espaces entre les pierres à bâtir, il ferme le joint en retrait, ou à reflux, contribuant à l'esthétique et à l'étanchéité de la façade. Il est aussi utilisé comme enduit.

Les propriétés mécaniques du mortier dépendent principalement de l'étape de préparation (mise en œuvre) et de l'étape finale, c'est-à-dire l'étape après le durcissement. La première étape dépend de l'aptitude au traitement du mortier (temps d'utilisation du mortier, temps de traitement). Cette caractéristique est généralement définie par les maçons. On ne peut pas lui donner une signification précise par manque de norme spécifique le concernant. Il convient de rappeler qu'à cette phase, le mortier doit avoir une certaine viscosité, doit être facilement étalé à la truelle et doit coller à une surface verticale.

Les ingrédients qui peuvent améliorer l'ouvrabilité du mortier sont la taille de l'agrégat et la quantité d'eau utilisée pour le mélange. L'air entraîné est un additif qui crée de minuscules bulles dans le mélange. Ces bulles aideront les ingrédients du mortier à se déplacer plus librement. De plus, elles vont réduire la résistance du matériau puisque la densité et la surface de liaison entre les unités de maçonnerie vont être naturellement affaiblies.

L'hétérogénéité des composants du mortier, les phénomènes de prise, de durcissement, de retrait et de fluage donnent à ce matériau une certaine spécificité qui est souvent difficile à prendre en compte dans les calculs. Ces paramètres du mortier sont contrôlés par le choix des granulats et des liants et par leurs pourcentages respectifs dans le mélange. Le sable est généralement le granulat employé. Il est inerte dans la réaction chimique d'hydratation, mais participe à la compacité du mortier durci. Dans les constructions modernes, il doit répondre à des exigences de granulométrie pour conférer plus au moins au mortier son homogénéité. Les liants sont de nature variée ce qui leur donne des caractéristiques mécaniques différentes. Ils sont donc très différents suivant leur conception et leur utilisateur.

La résistance à la compression du mortier est parfois considérée comme critère principal pour choisir le type de mortier, puisqu'elle est relativement facile à mesurer. Elle se relie généralement à quelques autres propriétés, comme la résistance à la traction et le pouvoir de rétention d'eau du mortier. La résistance à la compression du mortier dépend en grande partie du contenu du ciment (la chaux et le sable) utilisé et du rapport (E/C) eau-ciment. Par exemple, le rapport E/C est égal à 0,5 pour un mortier normal de type (EN 196-1).

Le tableau (I.2) ci-dessus donne un aperçu des propriétés mécaniques des mortiers.

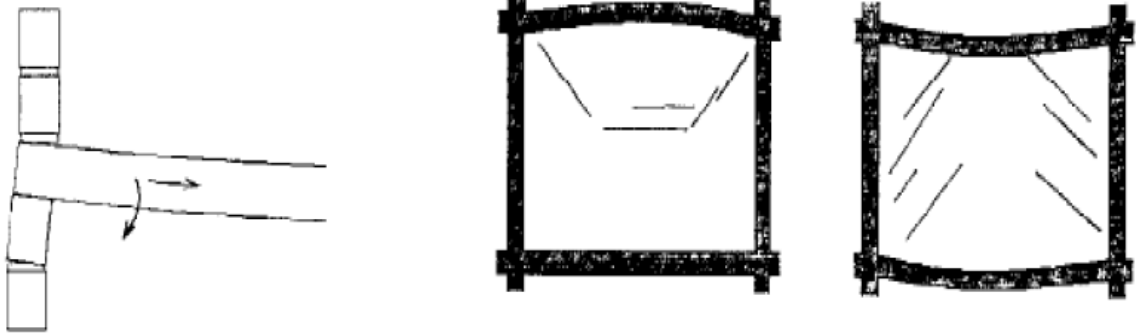
Type de mortier			Résistance en compression (MPa)	
Ciment/chaux/sable	Ciment de maçonnerie/sable	Ciment/sable+adjuvant	Test laboratoire	Test in-situ
1/0.25/3	-	-	16	11
1/0.5/4-4.5	1/ 2.5-3.5	1/3-4	6.5	4.5
1/1/5-6	1/ 4-5	1/5-6	3.6	2.5
1/2/8-9	1/ 5.5-6.5	1/7-8	1.5	1.0

Tab. I.2 – Propriétés mécaniques des mortiers suivant leur composition. D'après [22]

I.6. les défauts et Pathologies de la maçonnerie :

Le dimensionnement de la maçonnerie doit assurer sa résistance contre les sollicitations sous charge et actions indirectes qu'il cause des défauts dans la maçonnerie, parmi ci défauts [MARCEL H.2009] :

a- Mouvement des dalles



Retrait de dalles posées à l'état frais

Fléchissement des dalles

Figure I.16 : Défauts causés par le Mouvement des dalles

b- Mouvements de dilatation thermique

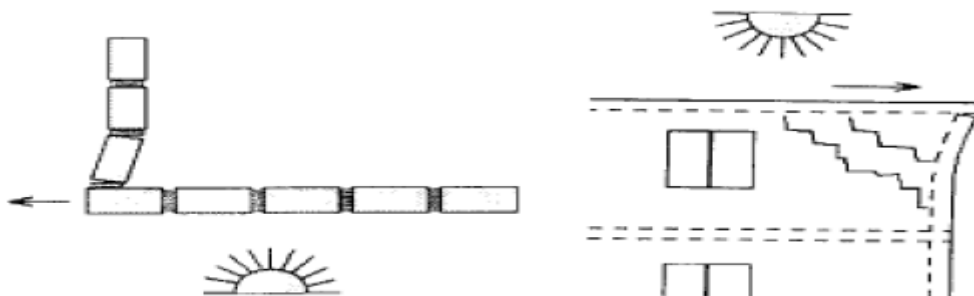
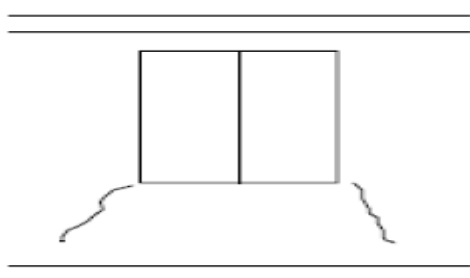
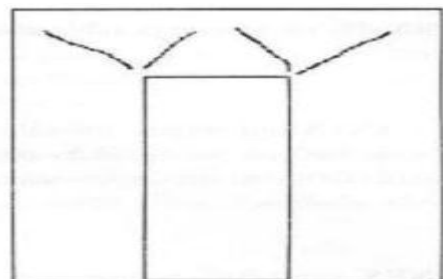


Figure I.17 : Mouvements de dilatation thermique

c- Fissures le long des ouvertures :



Fissuration vertical au niveau du linteau dues à l'internance du moments flichéssants

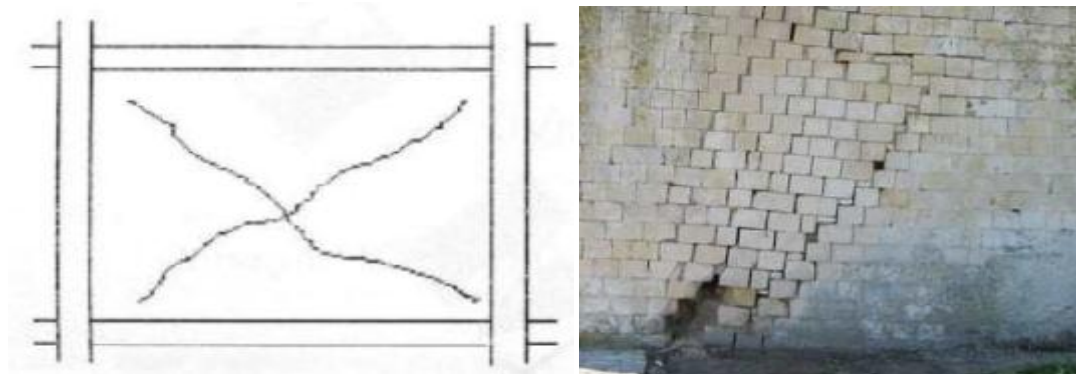


Fissuration incliné au niveau du linteau dues aux efforts tranchants

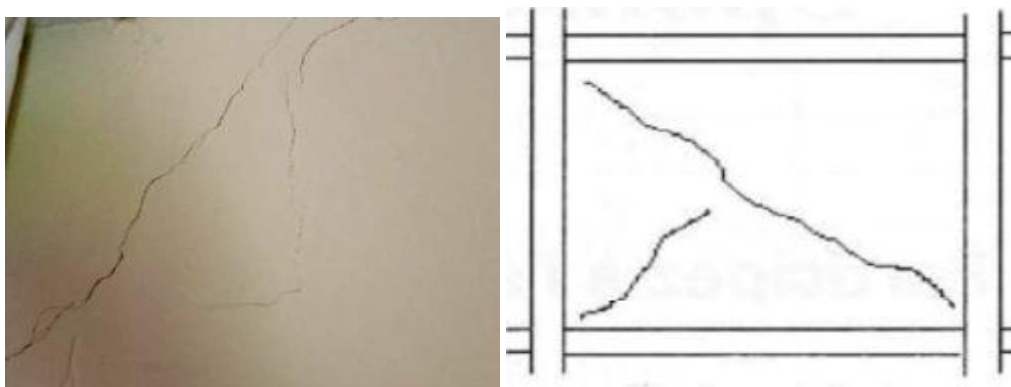
Figure I.18 : Fissure le long des ouvertures

La fonction « paroi » est, elle, victime de fréquents problèmes d'origines diverses :

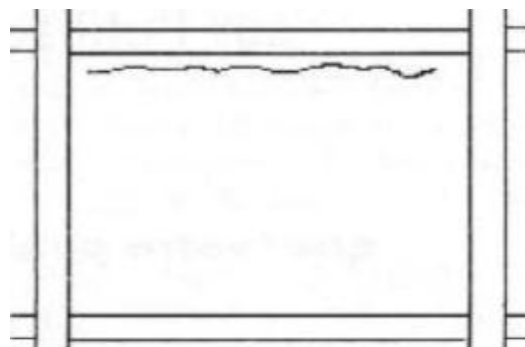
- Des erreurs de conception et de choix des matériaux.
- Mauvaise qualité des matériaux.
- Infiltrations d'eau.
- Des contraintes dues à des tassements différentiels, ou séismes.
- Des poussées horizontales perpendiculaires au plan des murs, causées par les vents.



A- Fissuration inclinée avec ou sans destruction de la maçonnerie



B-Exemple de fissures dues au cisaillement



C-Ecrasement du mur (mauvaise qualité des matériaux)

Figure I.19 : Pathologies de la maçonnerie

Ceci introduit des sollicitations de flexion, compression et cisaillement, qui nécessite l'étude de son comportement suivant les deux directions perpendiculaires et parallèle au joint de mortier.

I.7. Propriétés mécaniques de la maçonnerie :

I.7.1. Comportement sous sollicitation de compression uni-axiale :

Il est généralement considéré que la résistance à la compression de la maçonnerie dans la direction perpendiculaire au joint horizontal est le seul critère, qui peut déterminer la résistance globale de la structure composite. La figure 20 montre un test commun utilisé pour obtenir une résistance à la compression uniaxiale.

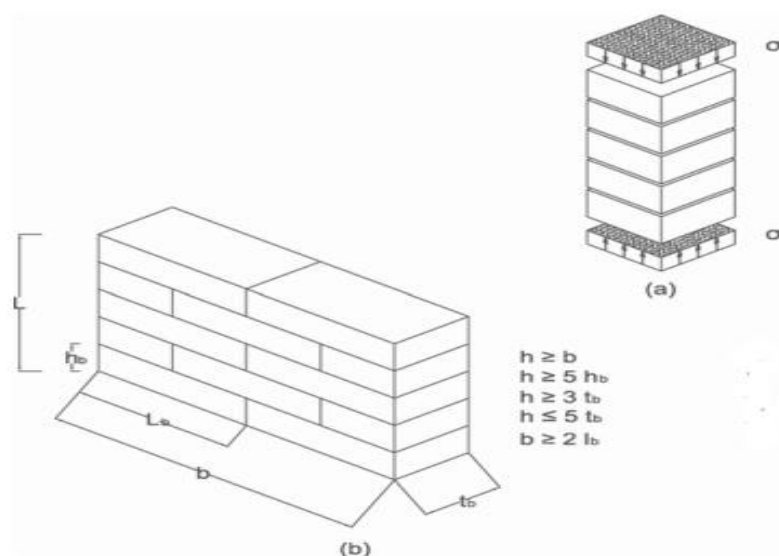


Figure I.20 : Comportement de la maçonnerie sous l'effet d'un effort normal aux joints horizontaux

Le premier cas représenté est un essai sur une pile de brique (figure 20-a) qui reste un essai peu représentatif de la maçonnerie du fait de la résistance de l'échantillon. Le deuxième cas d'essai montré sur la figure 20-b est appelé essai de RILEM. Le spécimen RILEM est assez large et représentatif. Depuis les travaux de Hilsdorf la rupture des structures maçonnées est induite essentiellement par la différence des propriétés mécaniques entre les briques et les joints de mortier.

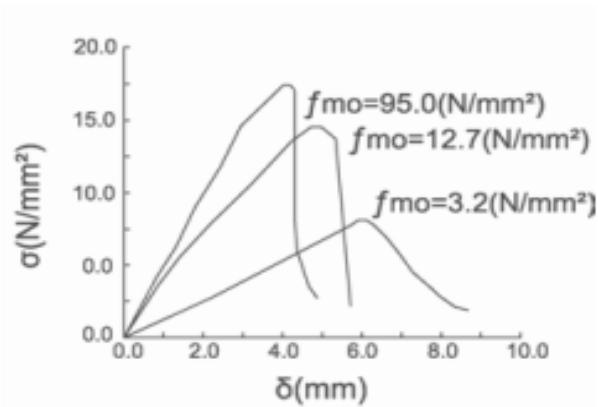


Figure I.21 : Diagramme contrainte - déformation d'un essai compression

f_{m0} : résistance à la compression du mortier.

On remarque que l'augmentation de la vitesse de chargement mène à une rupture de plus en plus fragile.

La maçonnerie représente un matériau anisotrope et la résistance à l'effort de compression appliqué suivant les joints horizontaux peut avoir une influence sur la force ultime de rupture.

I.7.2. Comportement sous sollicitation de traction uni-axiale :

Pour les structures de maçonnerie qui sont soumises à des charges de traction dans une direction perpendiculaire au joint horizontal, la fissuration est généralement causée par la séparation entre la brique et le mortier. Le comportement à la traction est caractérisé par la résistance à l'adhérence entre la brique et le joint de mortier, par conséquent, il est caractérisé par la résistance à la traction de l'interface élément / mortier. Il est à noter que le mécanisme d'adhésion entre briques et mortier est peu connu.

Cependant, il semble que ce mécanisme est dû à un processus physico-chimique dans le quelle porosité des deux composants joue un rôle essentiel. Par conséquent, les sables fins dans le mortier diminuent l'adhérence. Par ailleurs, cette adhérence entre le mortier et les briques ne se produit pas sur toute la surface de contact. On peut estimer que la surface nette d'adhérence apparaît à l'intérieur de la surface de contact et en représente approximativement 59% dans le cas d'un mur simple [14] [27].

Backes [2] a effectué des tests pour étudier le comportement de la maçonnerie sous des charges de traction parallèles aux joints horizontaux. Le spécimen est réalisé sur une structure métallique, comme le montre la figure 1.22-a. Les deux profils métalliques utilisés doivent être à angle droit pour obtenir la précision souhaitée. Le chargement est effectué par la plaque d'acier fixée à l'échantillon au moyen d'une colle très résistante à la traction (figure 1.22-b).

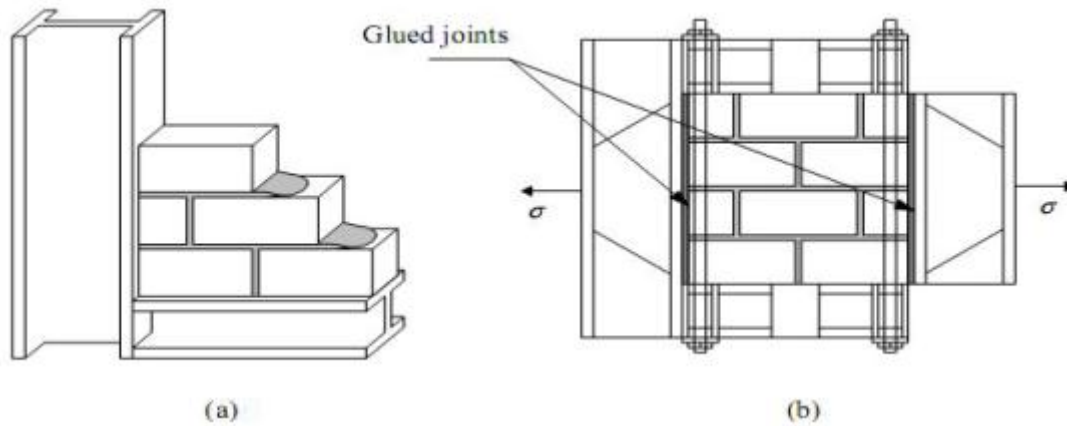


Figure I.22. L'installation de l'essai de résistance à la traction pour la maçonnerie avec un chargement parallèle aux joints de mortier. (a) Phase de construction (b) Dispositif de l'essai de traction.

Deux différents types de fissurations sont possibles, elles dépendent de la résistance relative des joints de mortier et des briques (figure I.23.). Le premier type de fissuration prend une forme d'escaliers suivant les joints verticaux et horizontaux. Le deuxième type de fissuration se produit presque verticalement par rapport aux briques et aux joints de mortier horizontaux.

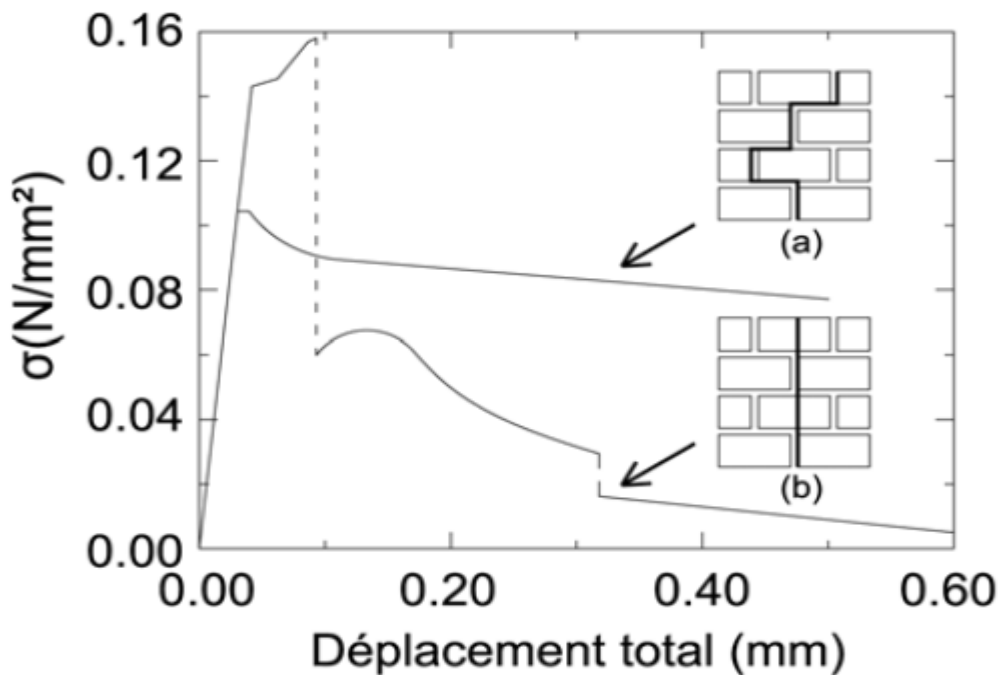


Figure I.23 : diagramme typique contraintes-déplacements pour l'essai de résistance à la traction dans une maçonnerie avec un chargement parallèle aux joints de mortier, a) Rupture induite par le glissement dans les joints horizontaux et une perte d'adhérence dans les joints verticaux b) Rupture totale des joints et des briques. D'après [2].

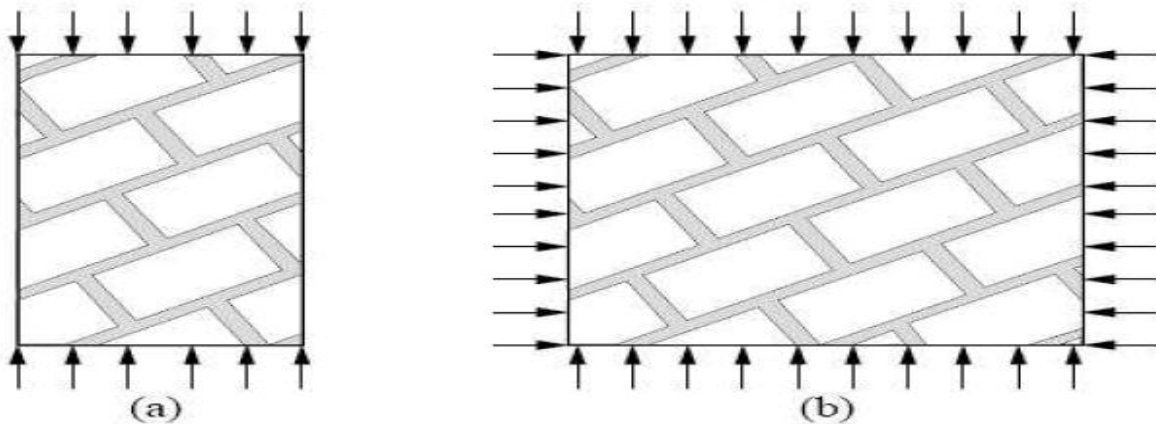
Les diagrammes contrainte - déplacement sont présentés sur la figure 1.23 (a - b). Les résultats ont montré que :

-La rupture est produite le plus souvent par un glissement dans les joints horizontaux et une perte d'adhérence dans les joints verticaux.

– Lorsque la résistance à la traction des briques est plus faible que l'adhérence entre ces dernières et le mortier (dans le cas d'un mortier résistant par rapport aux briques perforées ou creuses), la rupture peut se produire par le dépassement de la résistance à la traction des briques. Ceci peut influencer la résistance à la traction globale de la maçonnerie qui est finalement dominée par la résistance à la traction des briques.

I.7.3. Comportement biaxial :

Le comportement biaxial des maçonneries ne peut pas être décrit seulement à partir du comportement uniaxial. La maçonnerie étant un matériau anisotrope, les contraintes ne peuvent pas se réduire à une contrainte principale mais à un ensemble de contraintes. Ces contraintes que l'on peut visualiser sur la figure font un angle θ avec les plans d'essais de la maçonnerie. Deux tests sont effectués l'un avec une pression uniaxiale [21] et l'autre avec un état de pression biaxiale [47]



La figure I.24. Comportements biaxiaux des maçonneries (a) chargement uniaxial (b) chargement biaxial

La plupart des cas étudiés expérimentalement sur des maçonneries soumises à un chargement biaxial sont montrés par la figure I.24 [35] [36]. Ces tests ont été effectués sur des prismes représentatifs en briques à base d'argile. L'orientation des contraintes principales par rapport aux axes du matériau et le rapport des contraintes principales influent considérablement sur le mode de rupture et bien évidemment sur la résistance ; les différents modes de ruptures sont illustrés par la figure I.25.

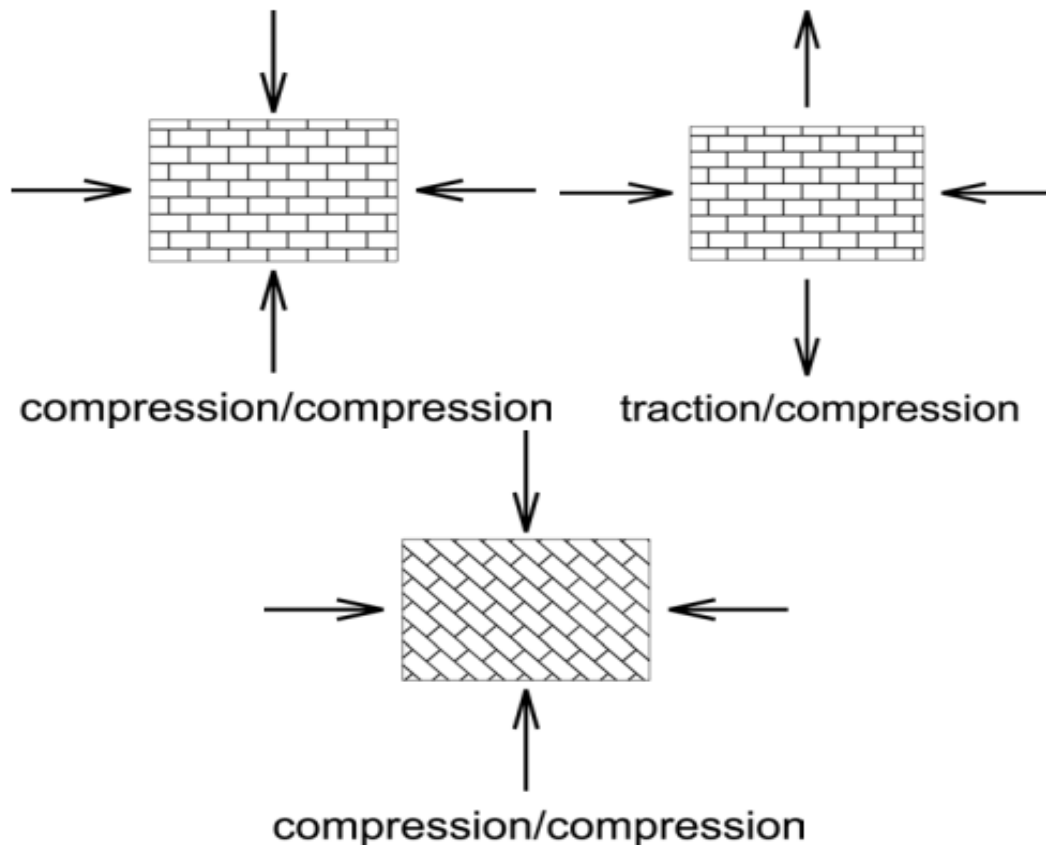


Fig. I.25 – Essai biaxial sur des panneaux de maçonnerie. D'après [35] [36].

Pour la traction uniaxiale, la fissuration est causée par des fissures et le glissement des joints verticaux et horizontaux. La contrainte de compression transversale réduit la résistance à la traction, ce qui peut s'expliquer par les dommages causés par le glissement de l'interstice et les microfissures dans la brique. Dans le cas de charges de traction - compression, la fissuration est causée par le glissement ou, dans certains cas, la fissuration du joint qui est combinée avec la fissuration de la brique. Pour la compression uniaxiale, une situation de fissuration similaire a été notée. Le plan de rupture est toujours perpendiculaire au plan du panneau.

Pour le rapport des contraintes principales, l'orientation joue un rôle significatif et la fissuration s'est produite dans un mécanisme combiné impliquant la fissuration des joints de mortier communs et une rupture latérale. L'augmentation de la résistance à la compression sous compression biaxiale peut être expliquée par le frottement dans les joints et le frottement interne dans les briques et le mortier.

Voici les différents modes de rupture de la maçonnerie (voir la figure I.26) donnés par Dhanasekar [14].

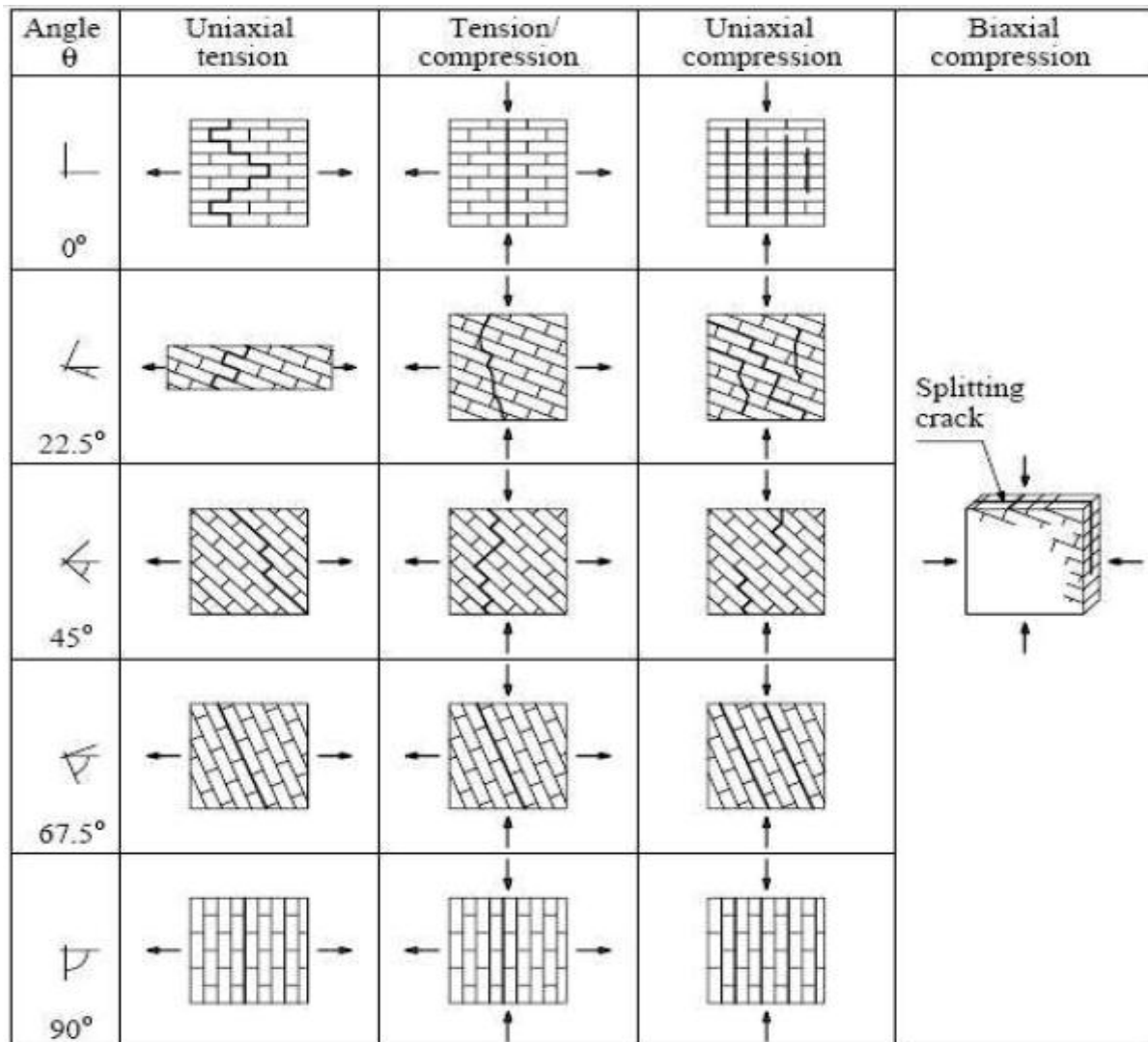


Fig. I.26 : Différentes modes de rupture d'une maçonnerie soumise à un chargement biaxial.

Ces modes de ruptures sont fonction de l'angle d'orientation des joints :

- pour $\alpha < 30^\circ$: rupture par fissuration verticale le long des blocs et des mortiers.
- pour $30^\circ < \alpha < 45^\circ$: rupture par fissuration verticale le long des blocs et des mortiers mais aussi rupture au niveau de l'interface bloc/ mortier.
- pour $45^\circ < \alpha < 70^\circ$: rupture au niveau de l'interface bloc/ mortier.
- Au-delà de 80° ($\alpha > 80^\circ$) la rupture au lieu de long des blocs et des mortiers par fissuration verticales mais aussi au niveau de l'interface bloc/ mortier.

I.7.4. Comportement au cisaillement :

Pour les murs de maçonnerie soumis aux séismes et au vent, la résistance au cisaillement doit être évaluée afin de prévoir et estimer la stabilité et la fiabilité de la structure. Les actions horizontales sont généralement combinées avec les actions gravitaires du poids propre ou des surcharges normales aux joints de mortier.

La connaissance des paramètres qui gouvernent le comportement au cisaillement de la maçonnerie qui est considérée comme un matériau composite constitué de briques et de joints de mortier, est très importante.

L'évaluation des paramètres qui influent sur le comportement global de la maçonnerie n'est pas simple, c'est pour cela la maçonnerie est toujours supposée être un matériau élastique isotrope selon Eurocode6 AFNOR ; 1996.

Les murs en maçonnerie dans les structures soumises aux actions horizontales présentent généralement deux modes de rupture :

- rupture par cisaillement : lorsque les fissures apparaissent le long du joint de mortier horizontal.
- rupture par tension diagonale : qui est généralement caractérisée par une fissuration par tension diagonale.

I.7.4.1. Modes de rupture dus au cisaillement dans le plan du mur :

Dans ce cas, le mur est soumis à des efforts horizontaux, en plus d'un chargement vertical dans le plan du mur. Ce chargement biaxial est simplifié par le schéma proposé par la figure 1.27, le mur est soumis à un chargement vertical uniforme le long de la partie supérieure qui vient s'ajouter une charge horizontale concentrée.

Les différents modes de ruptures obtenus sont :

1. Rupture due au frottement et au cisaillement horizontal au niveau des joints horizontaux,
2. Rupture en traction dans les joints inférieurs du mur causée par le moment d'encastrement,
3. Rupture en compression de la maçonnerie à la base du mur induite par la force de traction transversale dans les unités et enfin rupture due au cisaillement.

Dans ce dernier cas, la combinaison des efforts de compression et de traction conduit à une rupture diagonale du mur. Ce mode de rupture peut être décomposé en une rupture des joints horizontaux et une rupture en traction des briques.

Pour un effort vertical et une force de cisaillement faibles, la rupture diagonale se produit le long des joints verticaux et horizontaux et prend une forme d'escalier.

Pour le cas d'un effort vertical de forte intensité et une faible force de traction dans les briques, la rupture diagonale passe à travers les briques et le long des joints verticaux. Ce dernier mode est appelé aussi rupture fragile ou effondrement. Il est généralement causé par la

dégradation de la rigidité de la maçonnerie D'autre part, la rupture des joints est considérée comme étant une rupture ductile parce que même après l'apparition de fissures en forme d'escalier, des forces horizontales peuvent encore induire du frottement. [18]

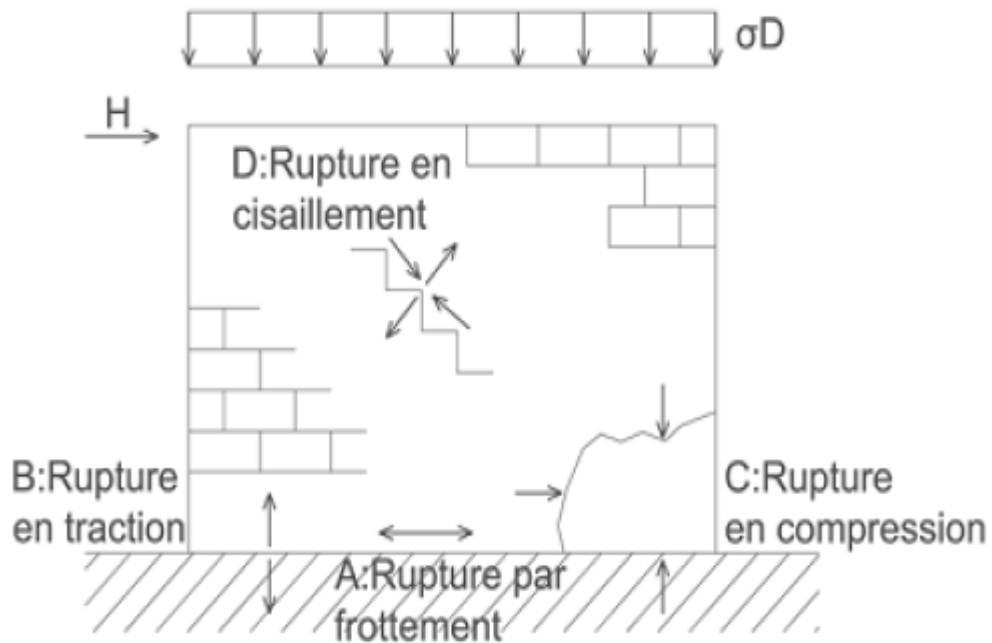


Figure I.27 : Modes de rupture d'un mur en maçonnerie soumis un chargement biaxial.

Pour une maçonnerie chargée dans le plan du mur, Les quatre modes de rupture associés sont les suivants :

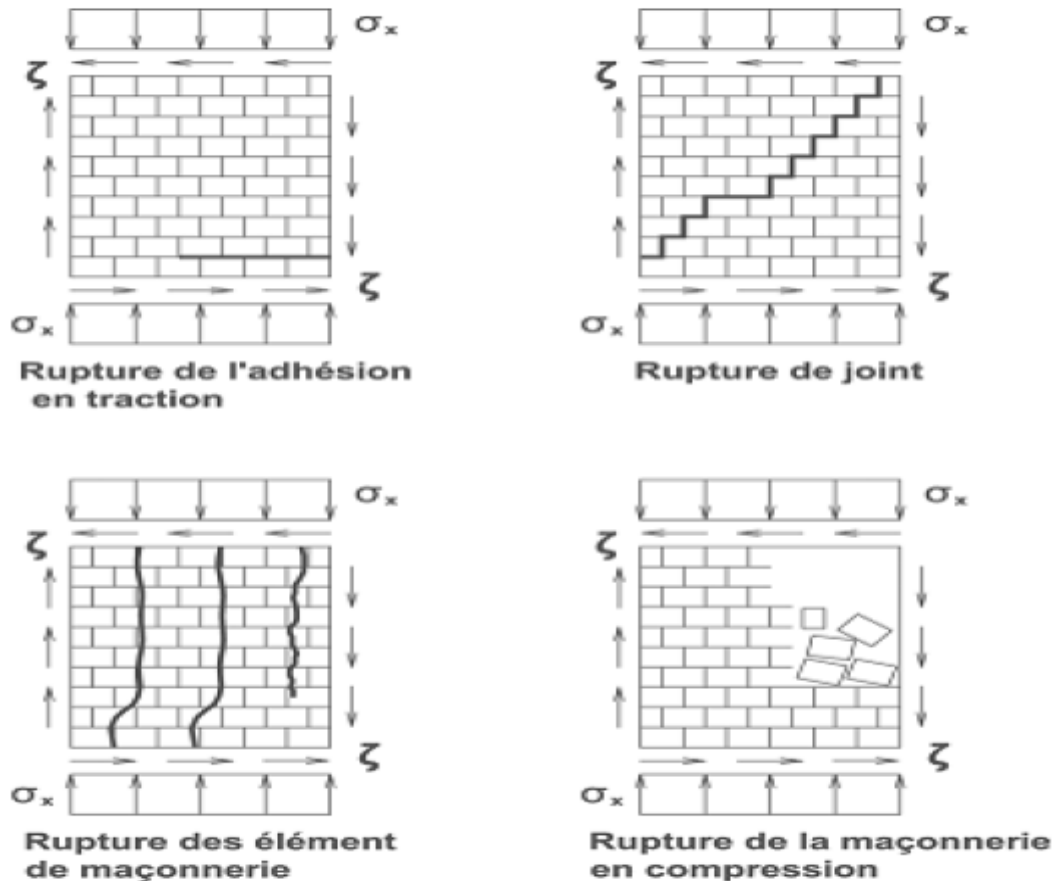


Figure I.28 : Modes de ruptures pour un mur en maçonnerie sous l'effet d'un effort de cisaillement.

En conséquence, la résistance au cisaillement de la maçonnerie dépend surtout de :

- L'intensité du chargement vertical
- La résistance au cisaillement qui peut être assumée par les joints horizontaux
- La résistance à la traction des briques
- La résistance à la compression de la maçonnerie

I.8. Conclusion :

Au début de ce chapitre, nous avons établi l'histoire de la maçonnerie. Plus important encore, l'art de l'architecture remonte à la civilisation la plus ancienne et la pierre est le matériau de construction le plus ancien. La maçonnerie en pierre marque toutes les civilisations anciennes avec de magnifiques chefs-d'œuvre qui existent encore aujourd'hui. Ce monopole d'utilisation a été préservé pendant longtemps, et il a été complètement changé avec le développement de l'industrie et de l'économie, ce qui a conduit à l'invention du tailleur de pierre. Nouveaux matériaux de construction tels que l'acier et le béton. Les performances de ces matériaux sont excellentes d'un point de vue mécanique, ils sont donc rapidement devenus un avantage dans

toutes les industries de la construction du génie civil. Ils peuvent également répondre aux attentes et aux exigences des fabricants et des ingénieurs.

Désormais, ceci rend l'usage des anciens matériaux limité à des fonctionnalités secondaires, d'esthétique ... Néanmoins, dans le domaine scientifique la curiosité de nombreux chercheurs sont toujours concentrée sur l'étude des comportements des structures maçonnées.

Dans la suite du chapitre, nous avons abordé les différents aspects qui influencent le comportement mécanique des structures en maçonnerie. A savoir, les différentes sollicitations auxquelles ces structures sont régulièrement soumises. Ces chargements sont principalement leurs poids propres et parfois les surcharges extérieures verticale ou horizontale, en fonction de leurs rôles dans la construction. Ceci peut engendrer des phénomènes de compression et/ou de traction et du cisaillement.

CHAPITRE II

Modélisation des structures en maçonnerie

II.1. Introduction :

Pour modéliser la maçonnerie, il faut tenir compte du fait que l'on est en face d'un matériau ni homogène ni isotrope, ce qui nous mène à une situation complexe pour le choix du critère du comportement.

La difficulté qui se trouve pour la modélisation de la maçonnerie est due à :

- L'hétérogénéité du matériau (brique + mortier).
- Les différentes sollicitations donnent des lois de comportement différentes.

Ce comportement aléatoire de la maçonnerie nous conduit à utilisation des lois probabilistes pour décrire son fonctionnement, mais on s'aperçoit que jusqu'aujourd'hui seuls des modèles élastiques linéaires isotropes sont utilisés, or ces modèles posent certains problèmes :

- La non prise en compte de l'hétérogénéité du matériau.
- La dispersion des résultats car la définition d'un critère de résistance n'est pas suffisante.

L'analyse des structures maçonnées anciennes est une tâche difficile. En premier lieu on est limité dans l'étude du comportement mécanique qui demande des essais in situ. En second lieu, et ceci est encore plus important, il est difficile d'utiliser les informations existantes sur la maçonnerie telles que :

- La perte de données sur la géométrie réelle
- La perte des informations sur la structure interne des éléments
- Le coût important pour la caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux utilisés
- La grande variation des propriétés mécaniques due à l'utilisation des matériaux naturels
- Les changements produits au niveau de la composition des éléments de structure au cours du temps
- Le manque de données sur les endommagements existants dans la structure
- La difficulté d'application de la réglementation et des codes.

Selon le niveau de précision et de simplification souhaitée, il est possible d'utiliser les stratégies de modélisation par deux types d'approches proposés par Lourenco. P.B (2006) :

- Une approche par macro-modélisation.
- Une approche par micro-modélisation.

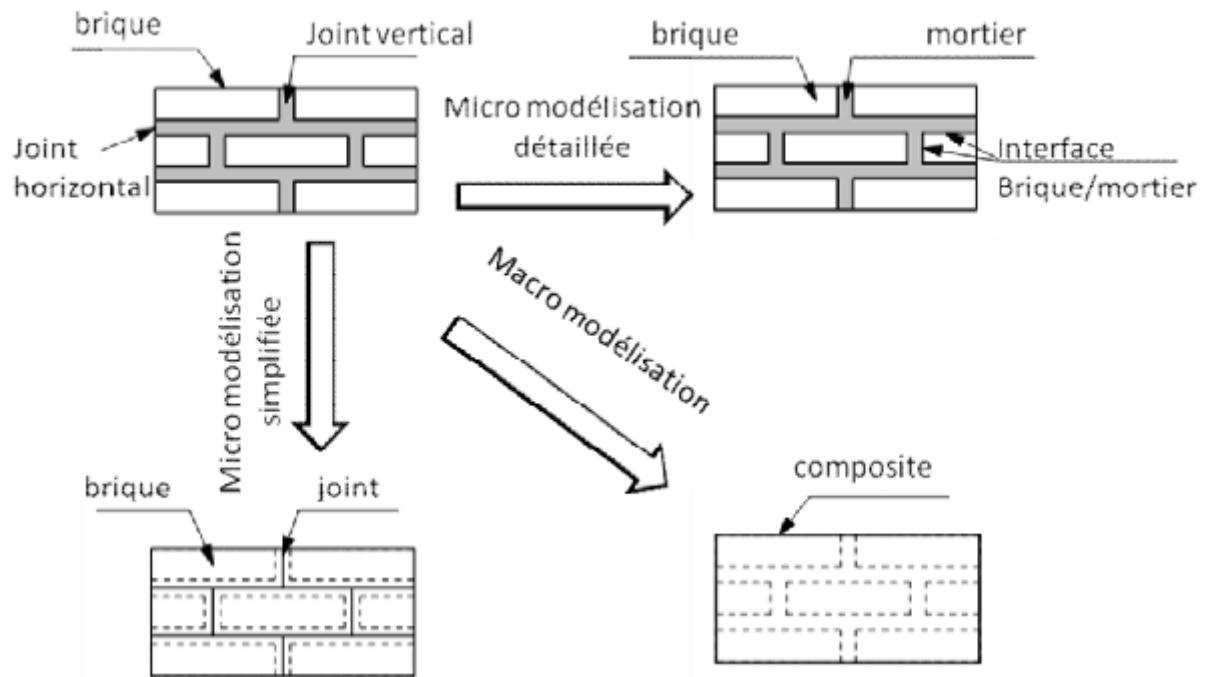


Figure II.1 : Stratégies de modélisation d'une maçonnerie [26]

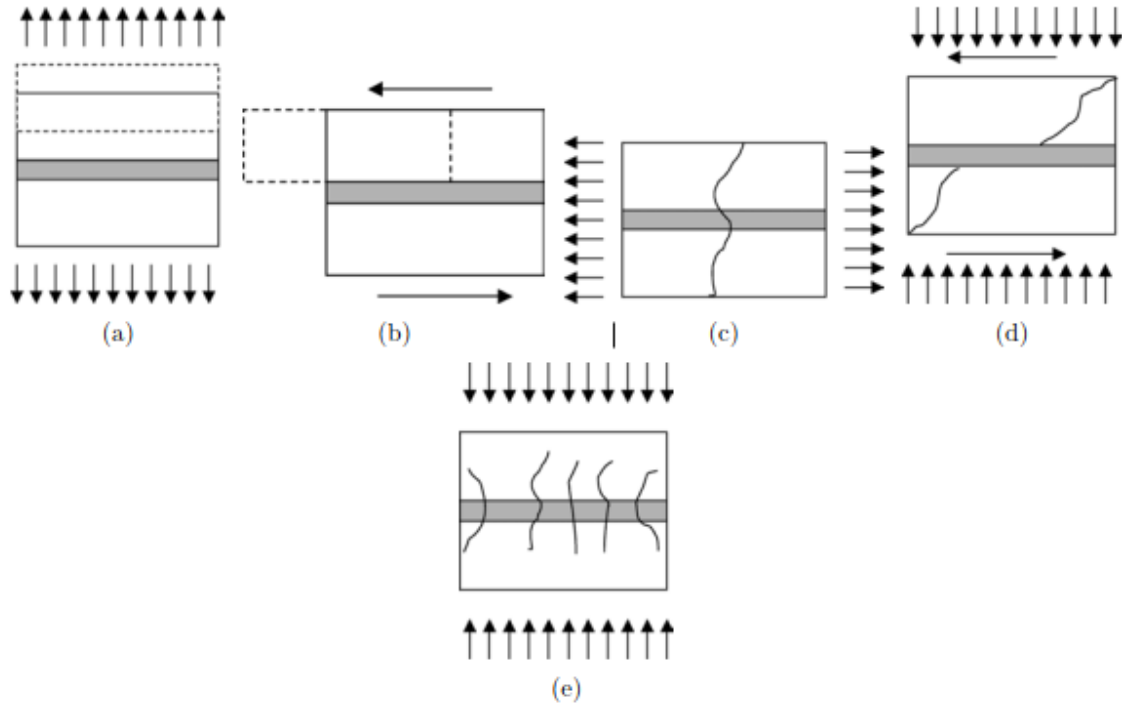
Pour décrire le comportement mécanique de la maçonnerie nous avons deux approches :

- ✚ **Approche structure** : consiste à considérer la maçonnerie comme étant une structure hétérogène, cette approche nécessite de prendre en compte les différents constituants (brique, mortier) d'un point de vue matériel et géométrique → **Approche globale ou micro-modélisation.**
- ✚ **Approche matériau** : consiste à considérer la maçonnerie comme étant une structure homogène, cette approche nécessite d'abord une étape d'homogénéisation du matériau maçonnerie → **Approche par homogénéisation ou macro-modélisation.**

D'après Lourenço [26], une modélisation précise de la maçonnerie doit inclure cinq types de mécanismes de ruine (figure II.2) :

- a) Fissuration du joint en traction.
- b) Glissement le long d'un joint pour des faibles valeurs de contraintes normales.
- c) Fissuration l'élément de maçonnerie par traction directe.
- d) Fissuration diagonale de l'élément de maçonnerie due à des valeurs suffisantes qui développent du frottement dans les joints.

e) Scission de la maçonnerie en traction due à la dilatation de mortier pour de grandes valeurs de contraintes normales.



Sur la figure les phénomènes (a) et (b) sont des mécanismes du joint, (c) et (d) sont des mécanismes de la pierre ou de la brique et enfin (e) sont des mécanismes combinés impliquant la pierre et le joint.

Figure II.2 : Mécanismes de rupture d'une maçonnerie [26]

II.2. Approche globale :

II.2.1. Définition :

Dans cette approche, l'étude de la maçonnerie peut être effectuée par la schématisation des blocs (briques) comme étant des corps déformables ou rigides connectés par des joints de mortier. Elle nécessite la modélisation du comportement local de chaque constituant : bloc, mortier, interface

Les ouvrages anciens en maçonnerie, les blocs sont généralement très rigides, elles sont assimilées à des solides rigides et les joints de mortier sont caractérisés par une faible épaisseur et une faible rigidité, ces joints sont assimilés à des interfaces.

Dans des maçonneries plus récentes, les unités (briques le plus souvent) ne possèdent pas une grande différence de rigidité par rapport à celle des joints de mortier. Elles sont souvent

considérées comme étant déformables. Les joints, avec une épaisseur suffisamment faible, sont alors assimilés à des interfaces ; sinon ils sont considérés eux aussi comme étant déformables.

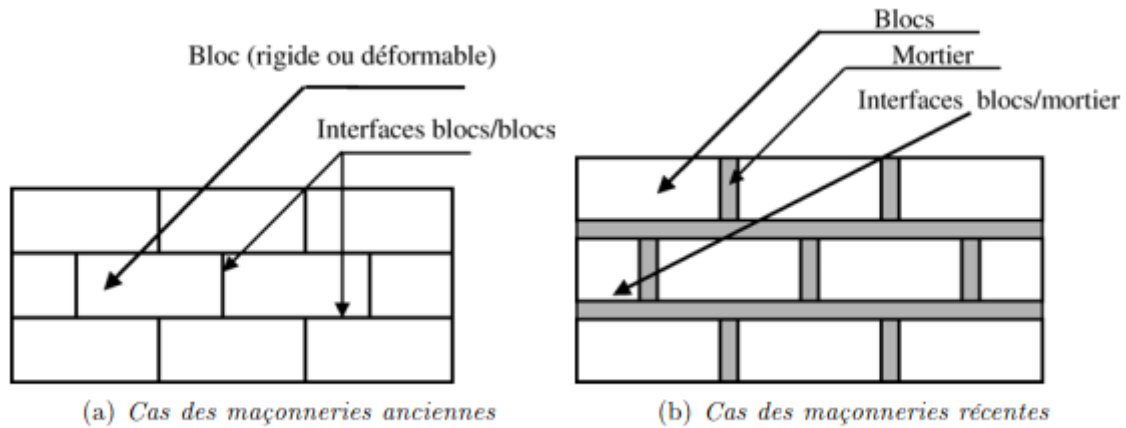


Fig. II.3 – Modélisation par l'approche globale

L'interface dans les deux cas est gouvernée par une loi d'interaction et elle peut être modélisée par des éléments joints.

La modélisation par cette approche nécessite :

- Une connaissance détaillée des différents constituants de la maçonnerie, ceci exige une identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de chaque constituant.
- La prise en compte de tous les phénomènes anélastiques (endommagement, fissuration...) qui peuvent se développer au niveau de :
 - Interface qui possède un comportement non linéaire
 - Joint de mortier qui est aussi gouvernés par un comportement non linéaire
 - Des unités (briques ou blocs).

L'approche globale peut donner des résultats très satisfaisants et peut bien comprendre le comportement local de la maçonnerie. Le problème se pose lorsque le nombre d'éléments augmente et que la géométrie de la structure à traiter devient compliquée alors cette technique peut difficilement être utilisée pour une analyse complète du bâtiment.

II.2.2. Méthodes de calcul :

Des grands efforts sur le plan numérique ont été consentis afin de rendre la modélisation de la maçonnerie possible, actuellement les outils informatiques plus performants permettent l'utilisation de maillage plus compliqué.

Du fait que la texture de la maçonnerie qui est assez complexe, le calcul numérique d'une structure de grandes dimensions nécessite souvent l'homogénéisation de matériau composite (la maçonnerie), ceci lorsqu'on veut connaître le comportement à l'échelle globale.

Dans le cas contraire, lorsqu'on veut étudier un cas simple, un seul élément de structure, il est impératif de prendre en compte une distribution plus fine des briques et des joints de mortier.

Plusieurs méthodes sont proposées et semblent être efficace pour traiter ce type de problème :

*La méthode des éléments finis MEF.

*La méthode des éléments discrets MED.

*La méthode mixte.

Habituellement, les structures maçonnées sont étudiées comment des milieux continus. La méthode des éléments finis non linéaire n'est pas toujours capable de décrire tous les phénomènes pouvant se produire dans ce type de structure, par exemple les maçonneries en grandes masses ou la discontinuité physique est évidente de plus les modèles continus présentent une grande faiblesse face à la description de la dynamique des structures maçonnées en raison du comportement discontinu des joints entre les briques.

Ces structures en grandes masses peuvent être considérées comme une collection de corps rigides ou déformables entre lesquels des relations d'interaction de contact avec frottement sont susceptibles de s'établir ou de se rompre. La méthode des éléments discrets est basée sur le traitement à l'échelle locale des contacts et à l'échelle globale des lois de la dynamique.

II.2.2.1. La méthode des éléments finis MEF :

C'est la méthode la plus répandue de toutes les méthodes numériques utilisées pour étudier les structures en maçonnerie, elle permet de résoudre d'une manière approchée, des problèmes de physique ou plus généralement des équations aux dérivées partielles avec des conditions aux limites. La géométrie du problème à traiter est schématisée par un assemblage continu d'éléments de dimensions finies (maillage), les inconnues du problème sont en général les déplacements. Dans cette méthode, les briques sont modélisées par l'utilisation des éléments conventionnelles déformables par contre les joints de mortier peuvent être simulés par des éléments d'interfaces.

L'introduction de joints est facile à implémenter dans un code de calcul puisque les inconnues nodales sont les mêmes pour les éléments joints que pour les éléments volumiques.

Pour ces éléments joints, le vecteur des efforts doit être exprimé en fonction des déplacements nodaux et non pas en fonction des composantes des déformations.

Deux soucis majeurs apparaissent à cause de simplicité de cette approche :

- Les maillages des briques et des joints doivent être connectés, cette connexion est difficile à gérer lorsque les briques sont déposées d'une manière complexe notamment dans le cas 3D.
- Les éléments joints sont capable de modéliser le contact principalement dans le cas d'hypothèse des petites déformations, dans le cas de grandes déformations, il est difficile de remailler dans le but de réactualiser les contacts existants ou bien de générer de nouveaux contacts.

Il existe de nombreux logiciels d'éléments finis (ANSYS, ABAQUS, DIANA, CASTEM), ces logiciels peuvent traiter de nombreux problèmes physiques, cependant jusqu'à présent ces logiciels d'éléments finis n'ont pas eu la puissance de modéliser une structure en maçonnerie en détail.

II.2.2.2. La méthode des éléments discrets (MED) :

La méthode des éléments discrets est façonnée pour les problèmes dans lesquels intervient un nombre important de discontinuités. Dans cette méthode en général on considère la maçonnerie comme étant un assemblage de blocs rigides ou déformables reliés par des éléments joints.

La MED est basée sur une formulation en grand et petits déplacements le long des discontinuités (souvent au niveau des joints), elle est capable des simuler les mécanismes de ruine dus aux glissements, aux rotations et aux impacts. Chaque bloc est défini suivant sa géométrie. L'historique de chaque bloc est déterminé par une résolution des équations différentielles du mouvement

Le point fort dans cette approche réside dans la possibilité de suivre les déplacements et de déterminer les mécanismes de ruine de la structure.

La MED a été appliquée pour l'analyse du comportement dynamique des maçonneries, elle a montré une grande efficacité, car elle exige peu de degré de liberté par rapport à la MEF.

Pour approximer d'une manière très satisfaisante les modes fondamentaux de vibration, cette méthode a été aussi utilisée pour déterminer les caractéristiques mécaniques moyennes d'un matériau hétérogène par la technique d'homogénéisation.

Perales R (2007) a présenté une modélisation du comportement mécanique par éléments discrets de trois structures réelles modélisées avec le code de calcul LMGC90. Les blocs sont considérés comme rigides [40]. La modélisation de ces trois structures sont illustrées dans les figures II.4, II.5 et II.6

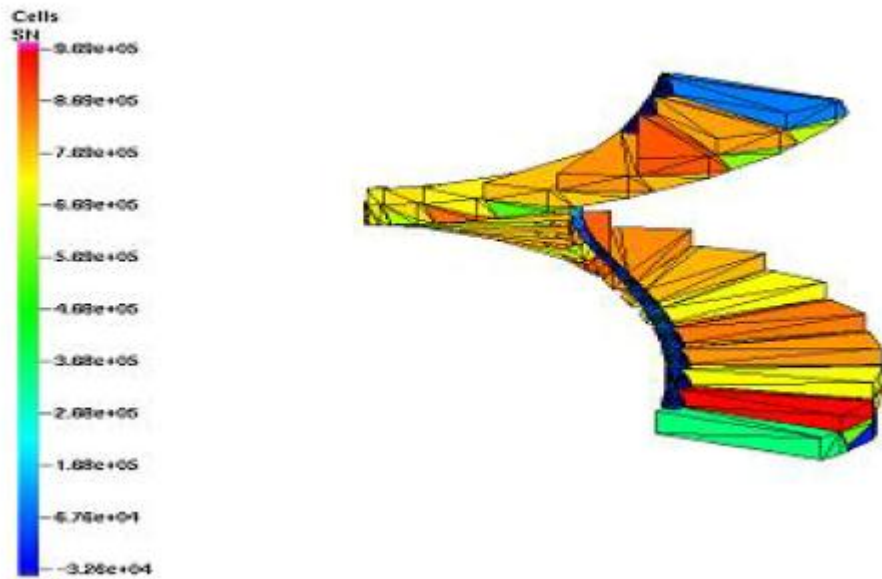


Figure II.4 : modélisation des Escalier Ridolfi [40]

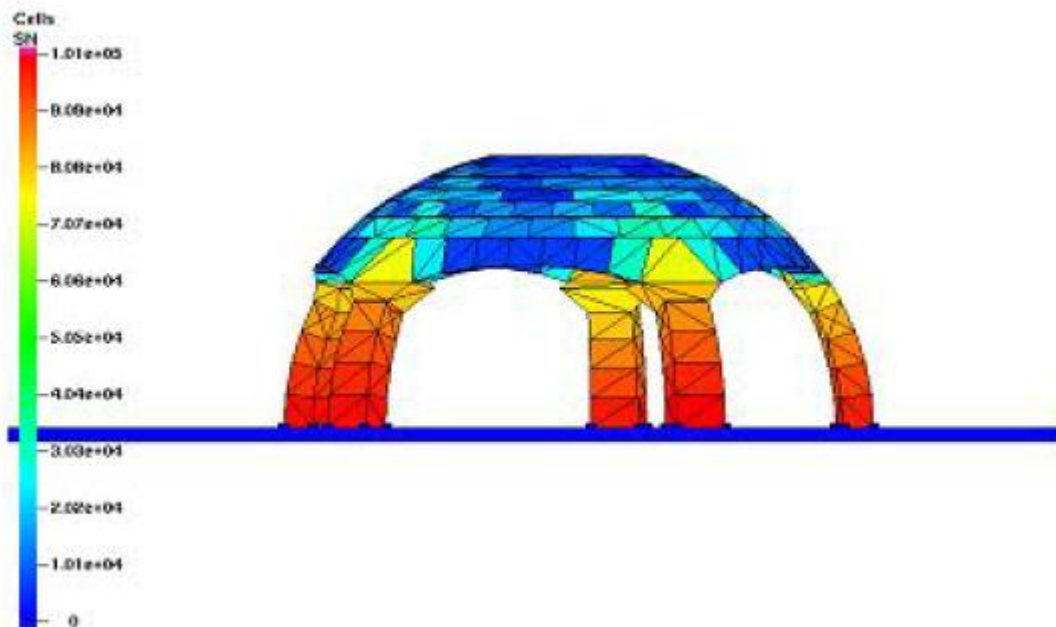


Figure II.5: modélisation de la Coupôle de Junas [40]

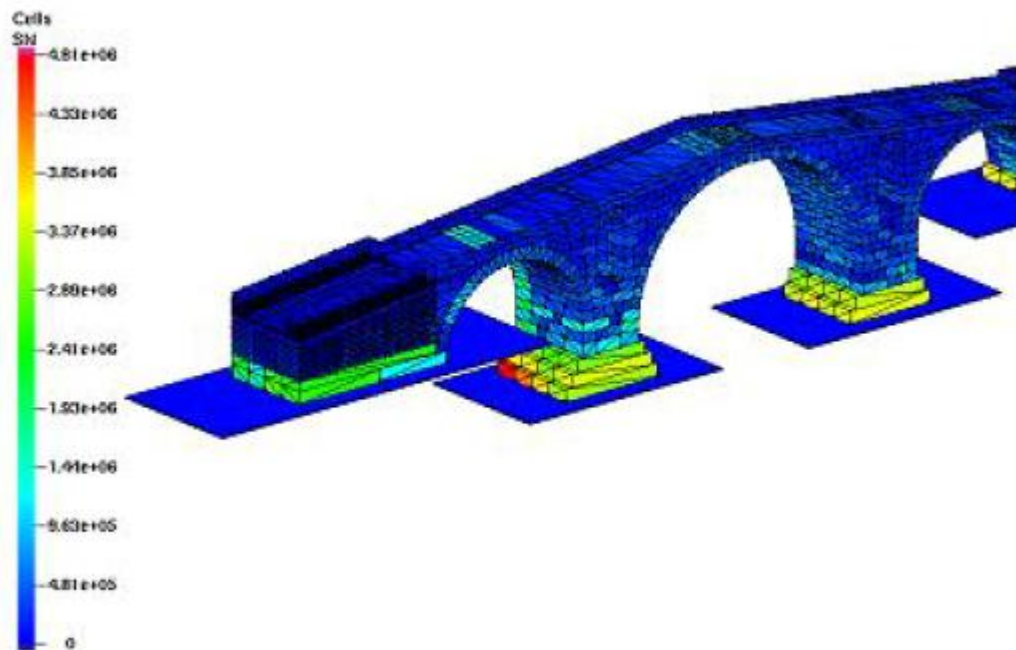


Figure II.6 : modélisation du Pont Julien [40]

II.2.2.3. La méthode mixte :

On peut également rencontrer une combinaison entre les deux méthodes précédentes, on est confronté à cette situation lorsqu'on traite un problème où l'on doit attribuer un caractère rigide et déformable pour les unités (briques) et les joints de mortier respectivement, ceci quand les unités possèdent une rigidité supérieure à celle des joints de mortier.

II.3. Approche par l'homogénéisation :

L'inconvénient majeur de l'approche globale est lié à la prise en compte des géométries réelles des blocs et des joints de mortier qui vont influencer la solution numérique lorsqu'on traite un problème à une grande échelle. Par exemple, les monuments historiques ne peuvent pas être modélisés facilement par des éléments de structures (poteaux, poutres, plaques . . .) qui demandent l'utilisation des éléments finis 2D ou 3D. La technique d'homogénéisation est conçue pour étudier les matériaux composites, en effet, cette méthode permet d'établir les lois de comportement en fonction des contraintes et des déformations moyennes à partir de la géométrie et des propriétés mécaniques de chaque constituant. Dans le cas de la maçonnerie elle consiste à substituer les différents matériaux par un seul matériau homogène équivalent, elle est sensée à reproduire un comportement moyen, ceci modifie les caractéristiques physiques réelles du problème. Les modèles du matériau équivalent sont capables de décrire certains aspects du comportement global sans avoir de nombreux paramètres à prendre en compte et sans fournir un grand effort de calcul requis dans l'approche globale.

Afin d'étudier le comportement quasi statique des maçonneries et pour l'analyse du comportement dynamique hors plan et dans le plan de la maçonnerie cette méthode est très efficace pour traiter les problèmes linéaires. Mais certaines difficultés apparaissent pendant son application :

- Problème de localisation qui est dû essentiellement aux concentrations des contraintes dans certains endroits de la structure.
- La prise en compte des phénomènes de non linéarité qui se développe au niveau des matériaux et à l'interface brique-mortier (endommagement, rupture, fissuration ...) la recherche est assez avancée pour lever ce genre de difficultés en particulier dans le domaine des matériaux composites mais malheureusement ce n'est pas encore le cas dans le domaine de la maçonnerie.
- La différence de la rigidité entre les différents constituants de la maçonnerie ; En effet des recherches ont montrés que l'utilisation de cette technique d'homogénéisation donne des résultats complètement erronés lorsque le rapport de rigidité entre la brique et le mortier est supérieurs à 10, du fait qu'une interaction complexe se produit entre les deux composants pendant la déformation de la maçonnerie. Cette différence induite des distributions non uniformes dans les briques et le mortier par rapport à la déformation moyenne de la maçonnerie.

II.3.1. Principes de la méthode d'homogénéisation :

Le but de cette méthode est de prédire l'endommagement dans les maçonneries en couplant le calcul des structures et les méthodes d'homogénéisation. Pour des maçonneries constituées de briques et de mortier, on fait l'hypothèse de l'existence d'un troisième matériau qui est un mélange des deux autres constituants et qui est située entre eux. On suppose de plus que ce nouveau matériau est de faible épaisseur et de faible rigidité du fait de la présence de fissures.

II.4. Modélisation du comportement des interfaces dans les structures maçonnées :

Comme mentionné ci-dessus, le comportement mécanique des structures en maçonnerie dépend fortement de la nature de leurs constituants (fabriqués à base de matériaux naturels ou artificiels) et de leur assemblage. Cela a conduit à plusieurs modes de rupture des briques, du joint de mortier et de l'interface brique-mortier tels que le glissement, l'ouverture, la fermeture des fissures et leur dilatation...

Pour mieux comprendre ces phénomènes et expliquer leur influence sur le comportement mécanique global de la maçonnerie, les recherches dans ce domaine se sont concentrées sur la modélisation et la formulation de lois d'interface. De nombreux modèles sont proposés que l'on peut répartir en deux groupes. Dans le premier groupe on trouve des modèles qui

définissent la maçonnerie par un comportement de rupture fragile. Tandis que dans le second, la maçonnerie est définie par un comportement de rupture quasi-fragile.

Dans les deux situations, les éléments (blocs, briques, ...) sont considérés comme étant rigides ou déformables. Les phénomènes inélastiques se produisent essentiellement au niveau des discontinuités suivantes :

1. L'interface qui est définie par une faible épaisseur. Elle peut être de type :

– Interface brique/brique ; dans ce cas le joint du mortier représente cette interphase

– Interface mortier/brique ; dans ce cas l'interphase fait intervenir une faible épaisseur de la brique et du mortier.

2. L'interface qui est définie par une épaisseur négligeable, elle est assimilée à une ligne de liaison qui est localisée entre la brique et le joint du mortier.

II.4.1. Rupture fragile :

La méthode des éléments finis est utilisée afin de caractériser le comportement en compression des maçonneries. Il avait supposé que la brique soit caractérisée par un comportement élastique linéaire. Les joints sont modélisés par l'intermédiaire d'éléments d'interfaces simulant le comportement non-linéaire. Les lois de comportement pour les joints de mortier sont des lois élasto-plastiques, déterminées à partir de données expérimentales.

II.5. Modélisation par logiciel : Introduction à la C.A.O à l'aide du logiciel Abaqus :

II.5.1. Introduction :

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

II.5.2. Description du logiciel Abaqus :

ABAQUS est un progiciel de calcul d'éléments finis ; Il se compose de trois variante à savoir : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

- *ABAQUS/Standard* est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- Le solveur *ABAQUS/Explicit* emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi statiques non linéaires.

- *ABAQUS/CAE* constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour lesdits solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications.

Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages C++, Fortran pour les parties calcul et Python pour les scripts et les paramétrisations. La gestion de l'interface graphique est assurée par FOX Toolkit.

ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues.

II.5.3. Les caractéristiques du logiciel ABAQUS :

Abaqus a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) (devenue Abaqus Inc) depuis trente ans et le début de la théorie des éléments finis et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de l'entreprise, jusqu'à ce que l'entreprise ait été rachetée par Dassault industries en Octobre 2005.

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

Le cœur du logiciel Abaqus est donc ce qu'on pourrait appeler son « moteur de calcul ». A partir de fichiers de données (caractérisé par le suffixe. inp), qui décrit l'ensemble du problème à étudier, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier. odb.

Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier. Odb (ou post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc..., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le prétraitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. Abaqus propose le module ABAQUS CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

- La génération de fichiers de données
- Le lancement du calcul proprement dit

- L'exploitation des résultats

II.5.4. Présentation du logiciel ABAQUS :

II.5.4.1. Les modules :

Abaqus CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées « Modules ». Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

- Le module « PART » :

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

- Le module « PROPERTY » :

Le module property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

- Le module « ASSEMBLY » :

Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle Abaqus contient un seul assemblage.

- Le module « STEP » :

Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est-à-dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à la limite, il est aussi possible de créer des forces et des conditions aux limites qui s'activent à des moments donnés.

- Le module « INTERACTION » :

Grâce à ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

- Le module « LOAD » :

Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1, mais inactive au step 2.

- Le module « MESH » :

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

- Le module « JOB » :

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module job pour analyser ce modèle. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer les résultats.

- Le module « VISUALISATION » :

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

- Le module « SKETCH » :

Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associées à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

II.5.4.2. Méthodologie d'application d'Abaqus :

Les actions à effectuer pour créer un modèle Abaqus sont les suivantes :

1- Dessiner le modèle

- a. Dessiner le profil 2D de la forme voulue
- b. Rajouter des détails manquants

2- Affecter les propriétés à l'objet

- a. Créer le matériau
- b. Créer les sections sur lesquelles appliquer les matériaux
- c. Affecter les matériaux aux sections correspondantes

3- Assembler le modèle

- a. Créer les instances
- b. Les positionner dans le repère général

4- Définir le pas de l'analyse

5- Créer les interactions entre les instances

- a. Créer les surfaces
- b. Définir les types de contacts

c. Associer des surfaces avec des types de contact

6- Appliquer les conditions limites et les chargements

a. Définir les pas d'application

b. Définir les types de conditions limites et les chargements

7- Mailler le modèle

a. Partitionner le modèle

b. Choisir les techniques de maillage

c. Choisir le type de maillage

d. Discrétiser le modèle

e. Mailler le modèle

8- Créer et soumettre le travail

9- Visualiser les résultats

II.6. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation du comportement des maçonneries et de leurs interfaces. Les principales conclusions qui peuvent être tirées est que la maçonnerie est généralement traitée de deux façons :

– La première, "l'approche globale", considère la maçonnerie comme étant un matériau hétérogène. Elle permet de donner une compréhension à l'échelle locale de la structure.

Le problème se pose lorsqu'on souhaite considérer une structure de grandes dimensions et ayant des géométries complexes,

– La seconde, "l'approche par l'homogénéisation", considère la maçonnerie comme un matériau homogène. Elle permet de remédier au problème posé par l'application de la première technique. Mais son application reste toujours délicate à cause des difficultés que l'on peut rencontrer notamment pour le choix de la cellule de base et aussi pour la prise en compte des problèmes de non linéarité de comportement.

Dans la dernière étape on a introduit une petite description sur la modélisation par logiciel Abaqus.

CHAPITRE III

Elaboration d'un modèle homogène

III.1. Introduction :

Concernant la pratique, l'analyse des structures des murs de maçonnerie par l'ingénieur de bureau peut être réalisée par le modèle de type discret [12]. Celui-ci consiste en un assemblage de blocs (briques) à géométrie explicitement définie et de joints (mortier) [26], au moyen de la méthode des éléments finis (MEF). Cette approche nécessite beaucoup de temps et une mémorisation considérable. Néanmoins, le modèle discret offre une description physique plus fiable des structures de maçonnerie. Afin de surmonter ces difficultés, une technique d'homogénéisation prometteuse est proposée. Celle-ci est basée sur les modèles d'élasticité appliqués aux cellules périodiques en maçonnerie. Pour ce but, on utilise le principe de la micro-modélisation pour obtenir les propriétés élastiques anisotropes des composites de maçonnerie sous sollicitation normale et de cisaillement [48]. La principale raison de l'utilisation de la technique d'homogénéisation est que l'analyse de la structure de maçonnerie peut être réalisée avec un certain degré d'abstraction et permet de mettre à l'échelle les caractéristiques micromécaniques de la macro-échelle de l'ensemble de la structure de maçonnerie [33] [45]. Une quantité considérable d'articles a traité le comportement de la maçonnerie en utilisant le modèle de continu existant. Dans le domaine du comportement élastique de la brique et du mortier, des propriétés efficaces de la maçonnerie peuvent être fournies en analysant une cellule unitaire régulière [46] [25].

La cellule unitaire en maçonnerie du micro-modèle est formée par assemblage d'une brique très rigide et de deux joints de mortier l'un est disposé horizontalement et l'autre est disposé verticalement. L'objectif de cette étude est la définition des propriétés anisotropes de la cellule ainsi retenue. A partir de la cellule unitaire et par le biais d'une modélisation numérique par éléments finis (Abaqus), il sera possible d'établir les propriétés anisotropes de la cellule homogénéisée fictive qui remplacera la cellule réelle.

III.2. Etude Analytique : Modélisation mathématique des structures en maçonnerie :

III.2.1. Procédure d'homogénéisation dynamique :

La cellule unitaire périodique est identifiée par la localisation du motif répétitif dans la structure de mur de maçonnerie comme le montre la Figure III.1.

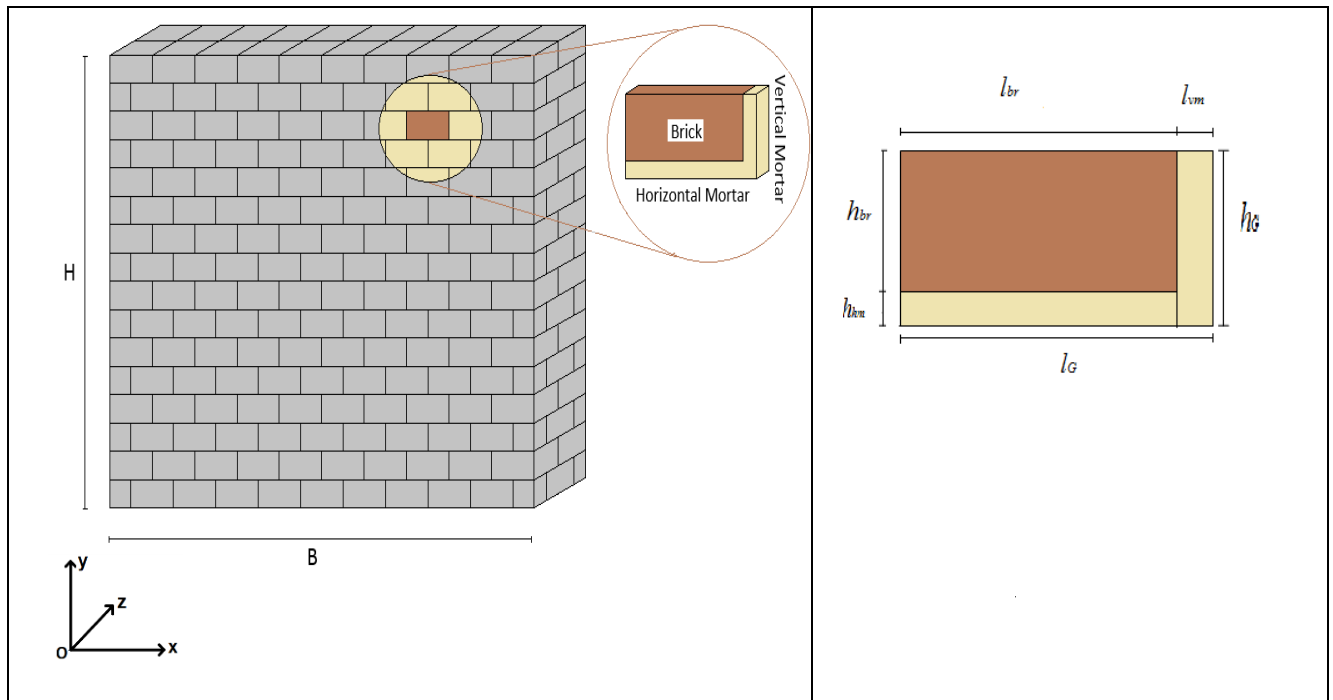


Figure III.1 : Mur en maçonnerie et la cellule répétitive de maçonnerie dérivée unissent les détails.

Le modèle analytique pour l'analyse dynamique de la cellule unitaire périodique de maçonnerie est basé sur la discrétisation cinétique de la structure de la cellule de maçonnerie. Dans la 1^{ère} étape, l'équilibre pour chaque partie de cellule est considéré séparément dans le domaine dynamique. Ceci conduit à exprimer les déplacements comme solution des équations différentielles d'équilibre. Dans la deuxième étape, l'équilibre global de la cellule élémentaire de maçonnerie est considéré séparément sous la contrainte normale et de cisaillement. Le modèle proposé repose sur les hypothèses suivantes :

- 1- L'application de la contrainte normale ne conduit qu'à des déformations normales et de même, l'application de la contrainte de cisaillement globale ne conduit qu'à des déformations de cisaillement globales.
- 2- Des contacts parfaits entre les joints de mortier horizontaux et verticaux et le bloque de briques sont supposés.
- 3- Comportement élastique linéaire isotrope pour les joints de brique et de mortier.
- 4- Les propriétés mécaniques de chaque partie de la cellule (mortier et bloque de briques) sont décrites en terme de nombres complexes, dans lesquels les parties réelles représentent la rigidité élastique et les parties imaginaires décrivent la dissipation.

III.2.1.1. Cellule soumise à une contrainte normale dans la direction x et y :

La cellule élémentaire de maçonnerie soumise à une contrainte normale dans la direction x est représentée sur la figure III.2. Celle-ci est formée par des contacts parfaits entre la brique de bloque et les joints de mortier horizontaux et verticaux.

L'équation d'équilibre pour chaque composant de cellule unitaire s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial \sigma_x^i}{\partial x} + \rho^i \frac{\partial^2 u_x^i}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

Où σ_{x-l}^i , u_{x-l}^i et ρ_i désignent la contrainte normale, le déplacement axial et la masse volumique de la brique ($i = br$), le joint de mortier horizontal ($i = hm$) et le joint de mortier vertical ($i = vm$). i : exposant déterminant l'élément brique mortier. i : partie imaginaire.

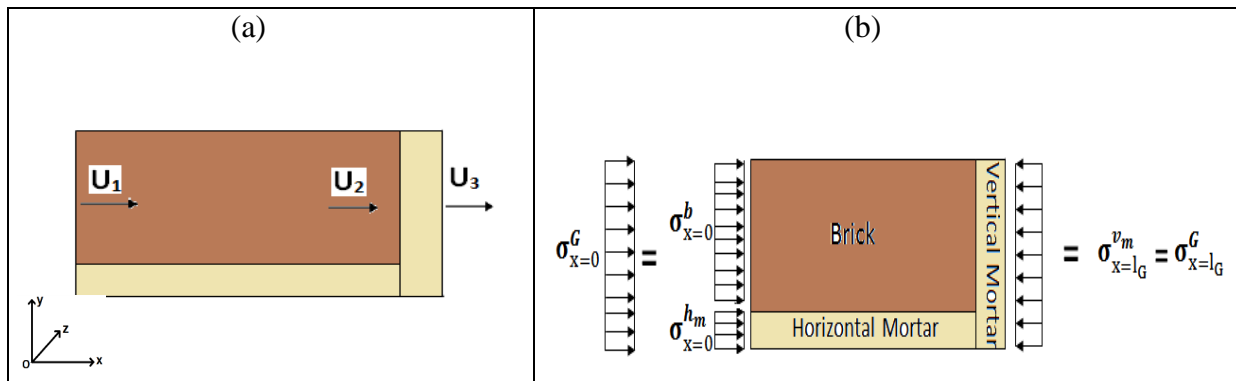


Figure III.2: Cellule de maçonnerie unitaire soumise à l'excitation axiale, (a) Champ de déplacement. (b) conditions d'équilibre aux côtés droit et gauche

La loi de comportement de chaque constituant :

$$\sigma_x^i = E^{*i} \varepsilon^i = E^{*i} \frac{\partial u_x^i}{\partial x} \tag{2}$$

Dans le cas de l'analyse dynamique, lorsqu'on considère l'effet d'amortissement, le module de Young E^{*i} peut s'écrire sous la forme d'un nombre complexe exprimé par :

$$E^{*i} = E^i (1 + \eta^i) \tag{3}$$

η^i est le facteur de perte et E^i désigne la propriété élastique bien connue de chaque partie cuboïde de la cellule élémentaire de maçonnerie.

En tenant compte de la loi de comportement donnée par l'Eq (2) dans l'équation d'équilibre, et en supposant la vibration harmonique, quand $u_x^i = \bar{u}_x^i e^{i\omega t}$, on obtient pour chaque élément constitutif de cellule de maçonnerie, l'équation différentielle suivante:

$$E_x^{*i} \frac{\partial^2 \bar{u}_x^i}{\partial x^2} - \rho^i \omega^2 \bar{u}_x^i = 0 \tag{4}$$

Ou sous une forme plus compacte :

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_x^i}{\partial x^2} - \lambda_x^i \bar{u}_x^i = 0 \quad (5)$$

Dans lequel :

$$\lambda_x^i = \frac{\rho^i}{E^* i} \omega^2 \quad (6)$$

La solution générale de l'équation ci-dessus est exprimée comme suit :

$$\bar{u}_x^i = A^i \cosh(\sqrt{\lambda_x^i} x) + B^i \sinh(\sqrt{\lambda_x^i} x) \quad (7)$$

Les constantes A^i et B^i sont déterminées en tenant compte des conditions aux limites pour chaque partie de cellule de maçonnerie comme mentionné dans la Figure III.2-a :

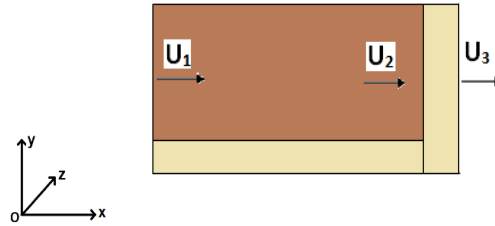


Figure III.2-a : Cellule de maçonnerie unitaire soumise à l'excitation axiale, Champ de déplacement

Pour le bloqe de briques ($i = br$) on obtient :

$$\begin{aligned} A^{br} &= u_1 \\ B^{br} &= \frac{u_2 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_x^{br}} l_{br})}{\sinh(\sqrt{\lambda_x^{br}} l_{br})} \end{aligned} \quad (8-a-b)$$

En insérant ces constantes dans l'Eq 7, le déplacement axial général devient.

$$\bar{u}_x^{br} = u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_x^{br}} x) + \frac{u_2 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_x^{br}} l_{br})}{\sinh(\sqrt{\lambda_x^{br}} l_{br})} \sinh(\sqrt{\lambda_x^{br}} x) \quad 0 \leq x \leq l_{br} \quad (9)$$

Pour assurer la condition de compatibilité entre le bloque brique et le joint de mortier horizontal, on suppose :

$$\overline{u}^{hm}_x = \overline{u}^{br}_x \quad 0 \leq x \leq l_{hm} = l_{br} \tag{10}$$

Le déplacement axial du joint de mortier vertical (i = vm) est donné par :

$$\overline{u}^{vm}_x = u_2 \cosh(\sqrt{\lambda^{vm}_x} x) + \frac{u_3 - u_2 \cosh(\sqrt{\lambda^{vm}_x} l_{vm})}{\sinh(\sqrt{\lambda^{vm}_x} l_{vm})} \sinh(\sqrt{\lambda^{vm}_x} x) \quad \text{avec } 0 \leq x \leq l_{vm} \tag{11}$$

Où

$$\lambda^{hm}_x = \lambda^{vm}_x = \frac{\rho^{hm}}{E^{*hm}} \omega^2 = \frac{\rho^{vm}}{E^{*vm}} \omega^2 \tag{12}$$

La condition d'équilibre des contraintes normales pour la cellule élémentaire de maçonnerie homogénéisée et discrète du côté gauche (x = 0) (Fig3.2-b), est exprimée comme suit :

$$\sigma^{br}_{x=0} h_{br} + \sigma^{hm}_{x=0} h_{hm} = \sigma^G_{x=0} h_G \tag{13}$$

Dans l'expression ci-dessus, σ^G_x représente la contrainte normale agissante dans l'élément homogénéisé fictif (FigIII.2-b).

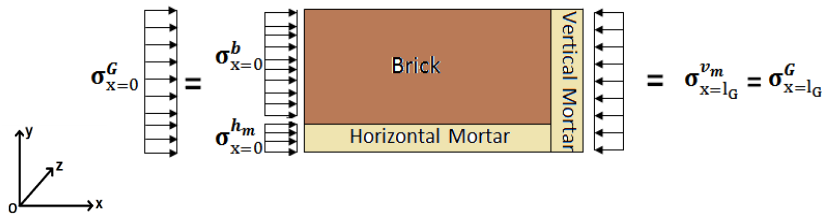


Figure III.2-b. Cellule de maçonnerie unitaire soumise à l'excitation axiale, conditions d'équilibre aux côtés droit et gauche

Au niveau de l'approche présenté, la contrainte normale homogène est associée à la déformation normale de manière analogue à un comportement de matériau homogène. Dans le cadre du comportement viscoélastique de la cellule élémentaire de maçonnerie, on écrit :

$$\sigma_x^G = E_x^{*G} \varepsilon_x^G = E_x^{*G} \frac{\partial \bar{u}_x^G}{\partial x} \quad (14)$$

Dans lequel

$$\bar{u}_x^G = u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_x^G} x) + \frac{u_3 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_x^G} l_G)}{\sinh(\sqrt{\lambda_x^G} l_G)} \sinh(\sqrt{\lambda_x^G} x) \quad \text{avec } 0 \leq x \leq l_G = l_{br} + l_{vm} \quad (15)$$

Où

$$\lambda_x^G = \frac{\rho^G}{E_x^{*G}} \omega^2 \quad (16)$$

ρ^G est la masse volumique homogène donnée par :

$$\rho^G = \frac{\rho^{br} h_{br} l_{br} + \rho^{hm} h_{hm} l_{br} + \rho^{vm} h_G l_{vm}}{h_G l_G} \quad (17)$$

De plus, l'équation d'équilibre de contrainte normale de la maille élémentaire du côté droit ($x=l_G$) est donnée par :

$$\sigma_{x=l_G}^{vm} h_G = \sigma_{x=l_G}^G h_G \quad (18)$$

En considérant les expressions du déplacement axial Eqs (9 et 15), après différentiation par rapport à la direction x et en tenant compte des lois de comportement données par les Eqs (2 et 14), on obtient les équations d'équilibre suivantes :

$$E_x^{*G} \sqrt{\lambda_x^G} \left[u_1 \sin(\sqrt{\lambda_x^G} l_G) + \frac{u_3 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_x^G} l_G)}{\sinh(\sqrt{\lambda_x^G} l_G)} \cosh(\sqrt{\lambda_x^G} l_G) \right] = E_{vm}^* \sqrt{\lambda_x^{vm}} \left[u_1 \sinh(\sqrt{\lambda_x^{vm}} l_2) + \frac{u_3 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_x^{vm}} l_2)}{\sinh(\sqrt{\lambda_x^{vm}} l_2)} \cosh(\sqrt{\lambda_x^{vm}} l_2) \right] \quad (19)$$

Et

$$E_x^{*G} \lambda_x^G h_G \left[\frac{u_3 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_x^G} l_G)}{\sinh(\sqrt{\lambda_x^G} l_G)} \right] = (E_{hm}^* h_{hm} + E_{br}^* h_{br}) \sqrt{\lambda_x^{br}} \left[\frac{u_2 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_x^{br}} l_{br})}{\sinh(\sqrt{\lambda_x^{br}} l_{br})} \right] \quad (20)$$

La résolution des équations ci-dessus (19 et 20), permet d'exprimer les déplacements u_2 et u_3 en fonction de u_1 . Ensuite, ceux-ci sont insérés dans l'équation spécifique qui considère la condition de compatibilité de déplacement donnée par :

$$\int_0^{l_1} \varepsilon_x^{br} dx + \int_0^{l_2} \varepsilon_x^{vm} dx = \int_0^{l_G} \varepsilon_x^G dx \tag{21}$$

Enfin, on obtient l'équation caractéristique qui fournit le module d'Young dans la direction x E_x^{*G} .

Par la suite, l'expression du module E_x^{*G} telle que fondée ci-dessus permet de déduire facilement le module axial correspondant à une traction-compression dans la direction y. De ce fait, le module d'élasticité homogène E_y^{*G} est obtenu en travaillant de la même manière, que pour le développement d' E_x^{*G} , en remplaçant mutuellement les l_{br} ; l_{hm} et l_{vm} par h_{br} ; h_{hm} et h_{vm} , respectivement.

III.2.1.2. Cellule soumise à une contrainte de cisaillement :

Lorsque la cellule de maçonnerie unitaire est soumise à la contrainte de cisaillement τ_{yx} orientée dans la direction x et agissant dans le plan xz, défini par l'axe normal y, comme illustré sur la figure III.3,

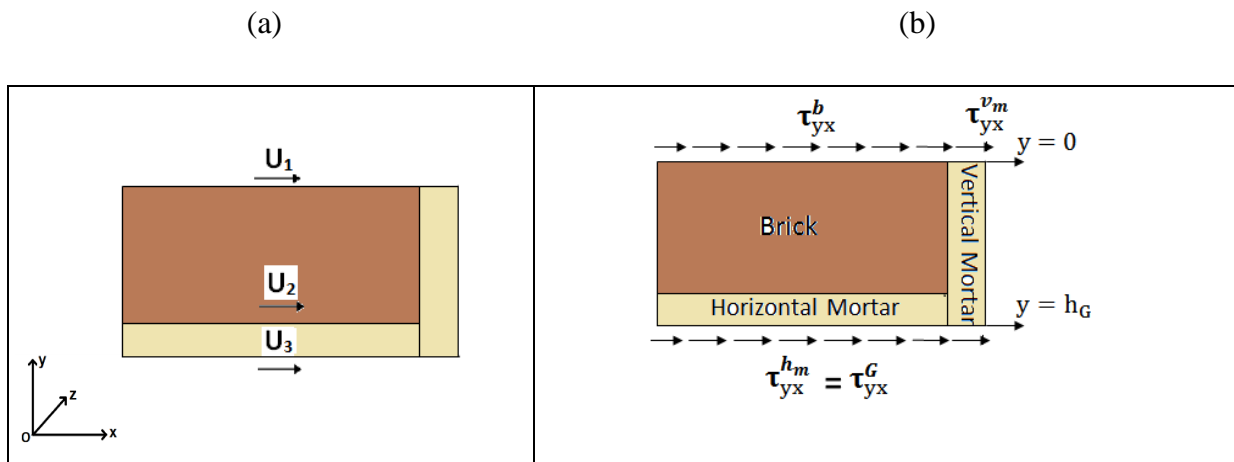


Figure III.3 : Cellule de maçonnerie unitaire soumise à des forces de cisaillement, (a) Champ de déplacement;(b) conditions d'équilibre sur les côtés supérieur et inférieur

L'équation d'équilibre dynamique de chaque composant (couches de joint de brique et de mortier) est donnée par :

$$\frac{\partial \tau^i_{yx}}{\partial x} + \rho^i \frac{\partial^2 u^i_x}{\partial t^2} = 0 \tag{22}$$

Dans lequel la contrainte tangentielle est :

$$\tau^i_{yx} = G^*_{yx} \gamma^i_{yx} = G^*_{yx} \frac{\partial u^i_x}{\partial y} \quad (23)$$

Le module complexe de cisaillement G^*_{yx} est constitué de la partie réelle qui représente les propriétés élastiques et la partie imaginaire est liée à la dissipation, On écrit :

$$G^*_{yx} = G^i_{yx} (1 + \eta^i_{yx} i) \quad (24)$$

Pour les vibrations harmoniques, l'équation d'équilibre (22) est définie dans le domaine fréquentiel comme :

$$G^*_{yx} \frac{\partial \bar{u}^i_x}{\partial y^2} - \rho^i \omega^2 \bar{u}^i_x = 0 \quad (25)$$

Dans lequel

$$u^i_x = \bar{u}^i_x e^{i\omega t} \quad (26)$$

On écrit sous une forme plus compacte :

$$\frac{\partial^2 \bar{u}^i_x}{\partial y^2} - \lambda^i_{yx} \bar{u}^i_x = 0 \quad (27)$$

Où

$$\lambda^i_{yx} = \frac{\rho^i}{G^*_{yx}} \omega^2 \quad (28)$$

La solution générale de l'équation d'équilibre ci-dessus est donnée par :

$$\bar{u}^i_x = A^i \cosh(\sqrt{\lambda^i_{yx}} y) + B^i \sinh(\sqrt{\lambda^i_{yx}} y) \quad (29)$$

En prenant en compte les conditions aux limites de chaque partie de la cellule de maçonnerie unitaire comme indiqué dans (Fig III.3-a),

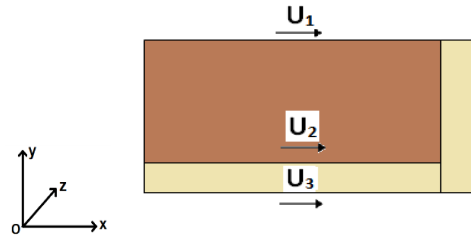


Figure III.3-a : Cellule de maçonnerie unitaire soumise à des forces de cisaillement, (a)
Champ de déplacement

Le champ de déplacement s'écrit comme suit :

Pour la brique de bloc, le déplacement \bar{u}_{yx}^{br} est :

$$\bar{u}_{yx}^{br} = u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^{br}} y) + \frac{u_2 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^{br}} h_{br})}{\sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^{br}} h_{br})} \sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^{br}} y) \quad \text{for } 0 \leq y \leq h_{br} \quad (30-a)$$

Pour assurer la condition de compatibilité entre la brique et le joint de mortier vertical, on suppose

$$\bar{u}_{yx}^{vm} = \bar{u}_{yx}^{br} \quad \text{for } 0 \leq y \leq h_{br} \quad (30-b)$$

Pour le joint de mortier horizontal, le déplacement axial est exprimé comme suit :

$$\bar{u}_{yx}^{hm} = u_2 \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^{hm}} \tilde{y}) + \frac{u_3 - u_2 \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^{hm}} h_2)}{\sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^{hm}} h_2)} \sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^{hm}} \tilde{y}) \quad 0 \leq \tilde{y} \leq h_{hm} \quad (30-c)$$

c)

Le déplacement de la cellule unitaire homogène équivalente comme indiqué sur la figure 3-a est donné par :

$$\bar{u}_{yx}^G = u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^G} y) + \frac{u_3 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^G} h_G)}{\sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^G} h_G)} \sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^G} y) \quad 0 \leq y \leq h_G \quad (31)$$

Où

$$\lambda_{yx}^G = \frac{\rho^G}{G_{yx}^{*G}} \omega^2 \quad (32)$$

Les équations d'équilibre des forces de cisaillement dans les surfaces supérieure et inférieure (Fig III.3-b) de la cellule élémentaire de maçonnerie sont les suivantes :

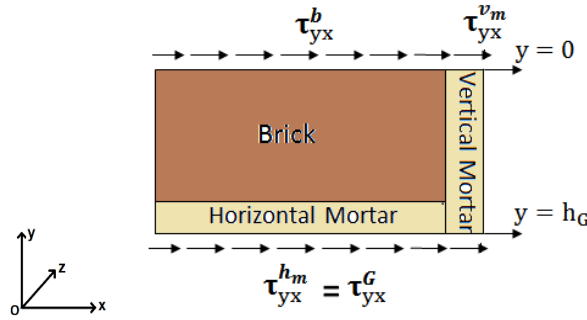


Figure III.3-b : Cellule de maçonnerie unitaire soumise à des forces de cisaillement, conditions d'équilibre sur les côtés supérieur et inférieur

$$\tau_{yx}^{br} l_{br} + \tau_{yx}^{vm} l_{vm} = \tau_{yx}^G l_G \quad \text{à} \quad y=0 \quad (33-a)$$

$$\tau_{yx}^{hm} l_G = \tau_{yx}^G l_G \quad \text{à} \quad y=h_G \quad (33-b)$$

Les équations ci-dessus peuvent être réécrites comme des fonctions du champ de déplacement comme suit :

$$(G_{br}^* l_{br} + G_{hm}^* l_{hm}) \sqrt{\lambda_{yx}^{br}} \frac{u_2 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^{br}} h_{br})}{\sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^{br}} h_{br})} = G_{yx}^* \sqrt{\lambda_{yx}^G} \frac{u_3 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^G} h_G)}{\sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^G} h_G)} \quad (34-a)$$

$$G_{hm}^* \sqrt{\lambda_{yx}^{hm}} \left[u_2 \sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^{hm}} \tilde{y}) + \frac{u_3 - u_2 \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^{hm}} h_2)}{\sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^{hm}} h_2)} \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^{hm}} \tilde{y}) \right] = G_{yx}^* \sqrt{\lambda_{yx}^G} \left[u_1 \sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^G} y) + \frac{u_3 - u_1 \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^G} h_G)}{\sinh(\sqrt{\lambda_{yx}^G} h_G)} \cosh(\sqrt{\lambda_{yx}^G} y) \right] \quad (34-b)$$

Là encore, on considère les conditions de compatibilité des déformations de cisaillement définies par la relation suivante :

$$\int_0^{h_1} \gamma_{yx}^{br} dy + \int_0^{h_2} \gamma_{yx}^{hm} dy = \int_0^{h_G} \gamma_{yx}^G u_x^G dy \quad (35)$$

Après avoir substitué les déplacements d'Eq (30,31) dans les équations d'équilibre (34) et (35), on définit un système algébrique linéaire de trois (03) équations en termes des déplacements u_1 , u_2 et u_3 . Après quelques manipulations, l'équation caractéristique liée au module viscoélastique mécanique est alors obtenue. La résolution de cette équation fournit le module viscoélastique tangentiel homogène G_{yx}^{*G} défini comme un nombre complexe. Les modules de cisaillement G_{yx}^{*G} et G_{yz}^{*G} agissant simultanément dans le même plan xz, il peut être facilement vérifié, en employant le présent modèle analytique, on obtient $G_{yz}^{*G} = G_{yx}^{*G}$.

Concernant le module de cisaillement G_{xy}^{*G} , les équations relatives à la cellule élémentaire de maçonnerie soumise à la contrainte de cisaillement dans le plan yz sont écrites de la même manière que celle de la contrainte de cisaillement agissant dans le plan xz. Pour des raisons de simplifier, on adopte le même développement pour déterminer G_{yx}^{*G} . On agit en remplaçant réciproquement les dimensions de la cellule élémentaire l_{br} ; l_{hm} et l_{vm} par h_{br} ; h_{hm} et h_{vm} , respectivement.

De la même manière que pour la détermination de G_{yx}^{*G} et G_{yz}^{*G} , on peut vérifier que G_{xz}^{*G} est égal à G_{xy}^{*G} .

III.3. Études numériques : Homogénéisation numérique par éléments finis (Logiciel Abaqus) :

Dans cette section on s'intéresse à l'élaboration d'un modèle d'homogénéisation simplifié en s'appuyant sur les moyens de calcul numérique dont dispose le laboratoire LMGCTP à avoir le logiciel Abaqus. La procédure d'homogénéisation s'articule autour du choix de la cellule unitaire de la structure en maçonnerie. En effet, cette dernière est définie de manière qu'elle soit une cellule répétitive selon un motif périodique bien agencé sur toute la structure en maçonnerie. Pour se faire, une cellule unitaire est repérée, celle-ci représente le micro-modèle retenu dans le cadre de cette investigation.

III.3.1. Modélisation de la cellule unitaire en maçonnerie (Homogénéisation micro-modèle) :

L'approche de modélisation numérique par éléments finis est réalisée en employant le logiciel Abaqus. Afin de vérifier la validité du modèle proposé pour prédire les propriétés viscoélastiques de la cellule élémentaire de maçonnerie sous chargement normal et de cisaillement est étudiée une cellule de maçonnerie de la Figure III.4. Il convient de

mentionner que les dimensions indiquées sur la figure III.4 sont retenus par tous les exemples de structure de maçonnerie traités dans cette recherche. On suppose également pour tous les exemples de structures de maçonnerie, la même densité de masse, que ce soit pour les joints de mortier et les briques avec $\rho^{hm} = \rho^{vm} = \rho^{br} = 1800 \text{ Kg/m}^3$.

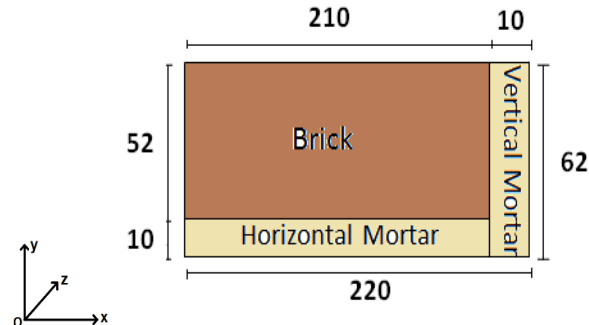


Figure III.4: Tailles des cellules unitaires de maçonnerie considérées dans l'étude numérique.

Pour une analyse plus approfondie le module d'élasticité du mortier a été varié entre 20MPa et 2000MPa afin d'étudier l'influence de ce paramètre sur les valeurs homogénéisées.

Dans le modèle numérique, notre choix s'est porté sur les éléments de type Shell bidimensionnels avec un maillage raffiné, pour obtenir des résultats acceptables, notamment au niveau des interfaces brique-mortier tel qu'illustré par la Figure III.5

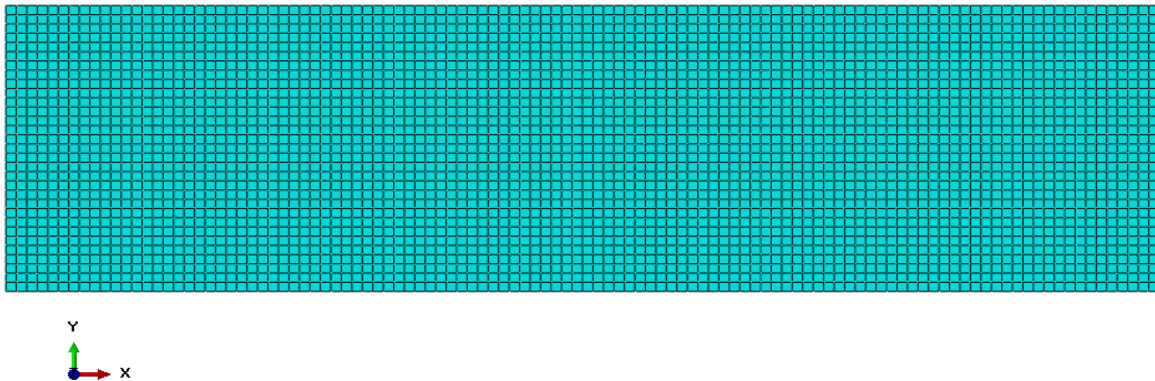


Figure III.5: Modélisation de la structure de la cellule unitaire par le logiciel Abaqus

Sur la lumière des types de chargement définis dans la section 2, la détermination des propriétés homogénéisées repose sur une démarche de sollicitation et de conditions aux limites imposées et bien établies pour chaque paramètre calculé numériquement, cette

démarche est schématisée par la Figure III.6, ainsi on définit les types de chargement suivants :

Chargement1

Pour la détermination du module de Young E_x un déplacement unitaire de 1mm est imposé sur le bord 3 et un encastrement sur le bord 1.

Chargement2

En ce qui concerne le module E_y , on encastre le bord 2 et on sollicite le bord 4 par un déplacement de 1mm.

Chargement3

Concernant le module de cisaillement G_{yx} , le bord 2 est encastéré et un déplacement unitaire de 1mm est imposé sur le bord 4.

Chargement4

Finalement dans la détermination du module de cisaillement G_{xy} , on encastre le bord 1 et on sollicite le bord 3 avec un déplacement de 1mm.

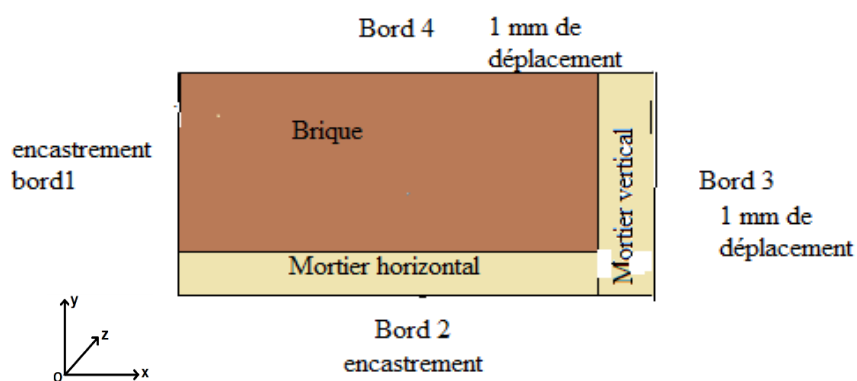


Fig III.6: schéma de sollicitation de la cellule unitaire.

Une fois la structure de la cellule unitaire est modélisée en mode pré-processor, l'analyse élastique linéaire est lancée.

Les résultats obtenus en phase post-processor consistent dans les réactions dans le bord 1 et 2 ; Ces dernières sont définies dans les différents points de ces bords. On retient donc les réactions suivantes

R_{1-x} désigne la réaction suivant x dans le bord 1 due au chargement 1

R_{2-y} désigne la réaction suivant y dans le bord 2 due au chargement 2

R_{2-x} désigne la réaction suivant x dans le bord 2 due au chargement 3

R_{1-y} désigne la réaction suivant y dans le bord 1 due au chargement 4

Une fois les réactions sont déterminées pour chaque type de chargement les paramètres anisotropies sont donnée par les relations suivantes :

$$E_x = \frac{R_{1-x}}{h_G} l_G \quad (36-a)$$

$$E_y = \frac{R_{2-y}}{l_G} h_G \quad (36-b)$$

$$G_{yx} = \frac{R_{2-x}}{l_G} h_G \quad (36-c)$$

$$G_{xy} = \frac{R_{1-y}}{h_G} l_G \quad (36-d)$$

III.4. Résultats et la discussion de l'homogénéisation :

Sur la base de la modélisation décrite précédemment analytiquement et numériquement, les valeurs des propriétés anisotropiques sont déterminées pour les différentes valeurs du module de Young du mortier tel qu'elles sont indiquées dans le tableau III-1 pour les modules de Young et les modules de cisaillement homogénéisés E_x , E_y , G_{xy} et G_{yx} .

On remarque que les valeurs obtenues correspondent parfaitement à celles calculée numériquement par les théories d'homogénéisation avec éléments finis via le logiciel Abaqus comme indiqué dans le tableau III-1.

Tableau III-1 : Comparaison des modules d'Young ; de cisaillement avec MEF (Abaqus)

[Abaqus Standard User's Manual]

E_m (MPa)	E_y (MPa)		G_{yx} (MPa)		E_x (MPa)		G_{xy} (MPa)	
	Present	MEF	Present	MEF	Present	MEF	Present	MEF
20	123,313	126,247	51,379	51.36	429,041	404,108	178,717	174,209
200	1176,11	1204,76	489,996	489,64	3521,438	3344,092	1466,680	1435,32
2000	8045,071	8209,92	3352,119	3346,11	12735,415	12487,73	5306,421	5264,24

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, une méthode de la détermination des propriétés mécaniques anisotropes des structures de maçonnerie est étudiée. Sur la base du processus d'homogénéisation qui inclut les propriétés dynamiques, Le modèle effectue un élément homogène fictif qui inclut intrinsèquement les propriétés géométriques et mécaniques des composants de brique et de mortier. L'élément homogénéisé est capable de conserver à la fois les forces statiques et d'amortissement ainsi que les déformations à travers tout le corps. Selon ces particularités, l'équation d'équilibre dynamique de chaque constituant (joints de brique et de mortier) est considérée comme des forces d'inertie volumétrique. De plus, les joints de brique et de mortier sont considérés comme des matériaux viscoélastiques. En ce fait, leurs propriétés élastiques (modules d'Young et de cisaillement) sont écrites dans le domaine fréquentiel sous forme de nombres complexes, constitués d'une partie réelle représentant la rigidité élastique et de parties imaginaires relatives à la dissipation. Conformément à ces conditions, les solutions de déplacement des équations d'équilibre différentiel sont obtenues et les conditions de compatibilité cinématique dans les interfaces brique-mortier sont vérifiées. En égalant la contrainte totale aux frontières et la déformation globale entre les macro et micro-modèles, on obtient les propriétés anisotropes inhérentes du matériau viscoélastique, pour chaque condition de charge (charges axiales et de cisaillement).

Les résultats des propriétés des matériaux fournis par la présente théorie de l'homogénéisation sont comparés à ceux calculés par la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel Abaqus [Abaqus Standard User's Manual].

CHAPITRE IV

Analyse des vibrations linéaires dans le plan et hors plan des structures de mur en maçonnerie

IV.1. Introduction :

Lorsque l'analyse modale est effectuée pour des structures de maçonnerie, non seulement les fréquences propres efficaces doivent être déterminées, mais également leurs facteurs de perte correspondants, pour des problèmes de vibration dans le plan ainsi que pour des problèmes de vibration hors plan.

Malgré l'importance de l'évaluation des facteurs de perte dans l'évaluation structurale des murs de maçonnerie sous charge sismique, peu de travaux de recherche dans ce domaine ont été trouvés dans la littérature [49].

Une manière plus pratique de prendre en compte les caractéristiques d'amortissement dans l'analyse dynamique des structures de maçonnerie, consiste à introduire cet effet au moyen d'une matrice visqueuse-amortissante constante dans les équations de mouvement, Cette matrice est obtenue sous la forme d'une combinaison linéaire, entre les matrices de masse et de rigidité élastique, selon l'hypothèse de Rayleigh [2]. Elizabeth, V et coll. [25] ont déterminé expérimentalement les fréquences naturelles et les rapports d'amortissement, à partir de la réponse des modèles testés. Le rapport d'amortissement a été calculé en utilisant la méthode de la bande passante. Il était clair que l'évaluation expérimentale des propriétés dynamiques de la structure de maçonnerie est loin d'être pratique dans la conception structurelle.

Comme solution pratique alternative, Fulvio, P et al. Et Marco V et al [30] [44] dans leurs travaux ont supposé un taux d'amortissement conventionnel de 5% de la structure de maçonnerie pour tous les modes de vibration considérés. Par conséquent, la fiabilité de cette hypothèse (selon l'estimation conventionnelle) doit être vérifiée par comparaison avec des modèles analytiques et numériques précis.

Sur la base des résultats des propriétés des matériaux trouvés dans le chapitre III, en tant que source de données sur les matériaux, l'analyse des vibrations libres des panneaux de maçonnerie est effectuée en utilisant la théorie de cisaillement d'ordre élevée (HSDT).

Une étude d'investigation est menée pour étudier les effets des propriétés géométriques et mécaniques du mur de maçonnerie sur les fréquences et les facteurs de perte pour les problèmes de vibration dans le plan et hors du plan. Une attention particulière est accordée à élancement du mur de maçonnerie sur les facteurs de fréquence et de perte. L'effet de la condition aux limites est également étudié.

IV.2. Formulation analytique dans l'analyse des vibrations libres des panneaux de maçonnerie :

IV.2.1. Cinématique liée au problème de vibration dans le plan :

Le comportement dans le plan du mur de maçonnerie et des structures en porte-à-faux (FigIV.1-a) dans le problème des vibrations libres est décrit par la théorie HSDT, souvent considérée pour les poutres épaisses composites [27] [23]. Cette théorie est plus réaliste puisqu'elle vérifie une condition de contrainte de cisaillement transverse nulle sur les deux bords des murs de maçonnerie composite. La HSDT a été largement utilisé dans les analyses de vibrations linéaires et de flambage des poutres épaisses [29].

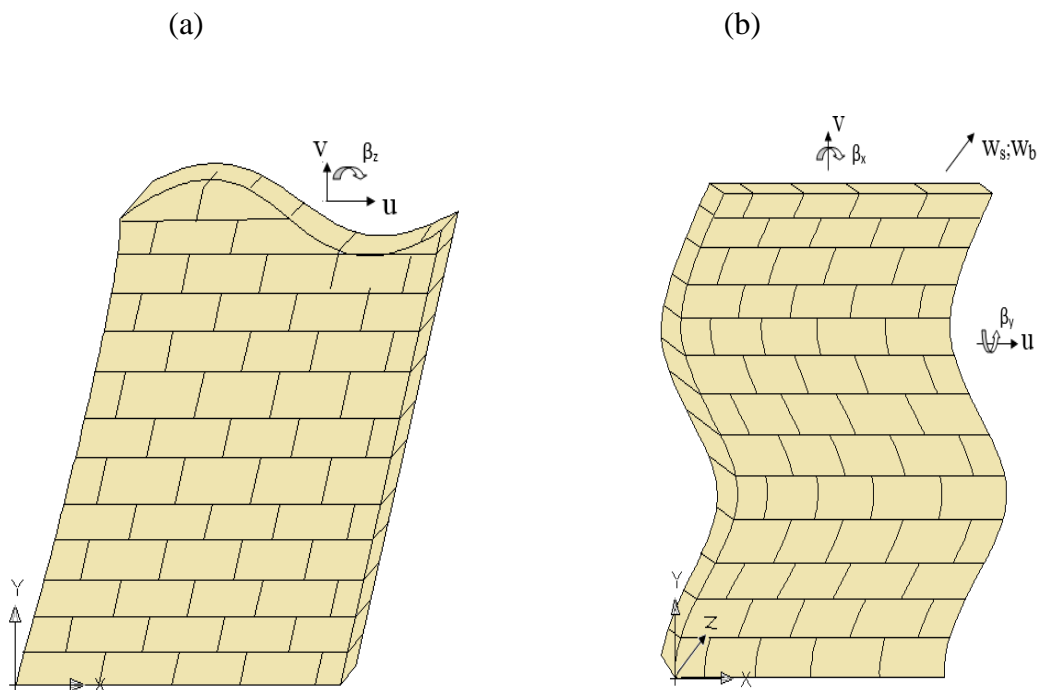


Figure IV.1: Déformations des murs de maçonnerie,

a) Mur de maçonnerie déformé dans le plan; (b) Mur de maçonnerie déformé hors plan

Dans la HSDT, le champ de déplacement est divisé en trois parties afin de bien décrire la variation parabolique de la contrainte de cisaillement le long du mur de maçonnerie, par introduction d'une fonction de cisaillement. La cinématique est donnée par :

$$v(y, x, t) = v_0(y, t) - x \frac{\partial u(y, t)}{\partial y} + f(x) \beta_z(y, t) \quad (01-a)$$

Où $v(y, x, t)$ est le déplacement longitudinal le long de la largeur de la structure, $v_0(y, t)$ est le déplacement axial du plan médian du mur de maçonnerie, $u(y, t)$ est le déplacement transversal dans la direction x et $\beta_z(y, t)$ représente la rotation supplémentaire de la normale au plan médian autour de l'axe z . $f(x)$ est la fonction de cisaillement proposée par JN. Reddy [6] comme :

$$f(x) = x \left(1 - \frac{4x^2}{3B^2} \right) \quad (01-b)$$

Dans le domaine de l'analyse des vibrations linéaires, les déformations du mur de maçonnerie sont :

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v(y, x, t)}{\partial y} \quad (02-a)$$

$$\gamma_{yx} = \frac{\partial v(y, x, t)}{\partial x} + \frac{\partial u(y, t)}{\partial y} \quad (02-b)$$

Après avoir remplacé le déplacement axial de l'Eq (03) dans les relations ci-dessus, on obtient les expressions de déformation suivantes :

$$\varepsilon_{yy}(y, x, t) = \frac{\partial v_0(y, t)}{\partial y} - x \frac{\partial^2 u(y, t)}{\partial y^2} + f(x) \frac{\partial \beta_z(y, t)}{\partial y} \quad (03-a)$$

$$\gamma_{yx} = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \beta_z(y, t) \quad (03-b)$$

Dans le domaine des vibrations forcées, le principe de Hamilton est défini comme suit :

$$\delta P_{int} = \delta P_{acc} \quad (04)$$

δP_{acc} représente la résultante des travaux virtuels introduit sous forme accélération. δP_{int} est le travail virtuel interne définie comme :

$$\delta P_{int} = \int_v (\sigma_{yy} \delta \varepsilon_{yy} + \tau_{yx} \delta \gamma_{yx}) dv \quad (05)$$

En considérant les propriétés viscoélastiques homogènes fournies par la présente procédure d'homogénéisation, le travail virtuel δP_{int} devient :

$$\delta P_{\text{int}} = \int_v (E_y^* \varepsilon_{yy} \delta \varepsilon_{yy} + G_{yx}^* \gamma_{yx} \delta \gamma_{yx}) dv \quad (06)$$

Le travail virtuel dû à l'énergie cinétique du mur de maçonnerie est donné par :

$$\delta P_{\text{acc}} = (\rho^G) \int_{-B/2}^{B/2} \int_0^H \left(\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2} \delta v(y,t) + \frac{\partial^2 u(y,x,t)}{\partial t^2} \delta u(y,x,t) \right) dx dy \quad (07)$$

Pour les vibrations harmoniques, l'énergie cinétique est :

$$\delta P_{\text{acc}} = (\omega^2 \rho^G) \int_{-B/2}^{B/2} \int_0^H (v(y,t) \delta v(y,t) + u(y,x,t) \delta u(y,x,t)) dx dy \quad (08)$$

Dans laquelle ω est la fréquence circulaire associée au mode de vibration. En utilisant les équations (01-08), la variation du potentiel total est alors fonction des déplacements virtuels δu_0 , δw et $\delta \beta$, et de leurs dérivées. À ce stade, la méthode de Ritz est appliquée dans le cas d'un mur de maçonnerie. De ce fait, les fonctions de forme polynomiale qui vérifient les conditions aux limites sont utilisées et approximées avec :

$$v = \sum_{i=1}^n \{v_i\} \left(\frac{x}{L}\right)^{i+1} \quad (09-a)$$

$$\{u_0 \quad \beta_z\} = \sum_{i=1}^n \{u_{0i} \quad \beta_{zi}\} \left(\frac{x}{L}\right)^i \quad (10-b)$$

IV.2.2. Cinématique liée au problème de vibration hors plan :

Concernant les vibrations des murs de maçonnerie hors plan, la structure étudiée est une plaque rectangulaire de hauteur H élevé et largeur B et épaisseur s, comme illustré schématiquement sur la Figure IV.1-b.

Dans la présente étude actuelle, on utilise la théorie d'ordre élevée aux plaques à 4 inconnus. Classiquement, le champ de déplacement de la théorie des plaques compte tenu des déformations de cisaillement est exprimé par :

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) + z\beta_x(x, y) - f(z) \left(\beta_x(x, y) + \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} \right) \quad (11-a)$$

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) + z\beta_y(x, y) - f(z) \left(\beta_y(x, y) + \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} \right) \quad (11-b)$$

$$w(x, y) = w_s(x, y) + w_b(x, y) \quad (11-c)$$

Où $f(z)$ est la fonction de cisaillement proposée par Reddy, 1984 [6]. Dans le cas des vibrations hors plan, la fonction de cisaillement est variée le long de la direction z et exprimée sous la forme :

$$f(z) = z \left(1 - \frac{4z^2}{3s^2} \right) \quad (11-d)$$

Où u , v et w sont respectivement le déplacement dans les directions x, y et z , tandis que u_0 et v_0 et sont les déplacements axiaux du plan médian comme indiqué sur la Fig.IV.1-b. Les angles β_x et β_y , mesurent respectivement les rotations autour des axes x et y . En divisant le déplacement latéral w est décomposée en deux partie une est due en flexion w_b et l'autre w_s fait référence au cisaillement :

$$\beta_x = \frac{\partial w_s}{\partial x} \quad (12-a)$$

$$\beta_y = \frac{\partial w_s}{\partial y} \quad (12-b)$$

La théorie des plaques présentée implique seulement quatre inconnues plutôt que cinq. En raison de ce champ de déplacement raffiné tel que décrit dans les équations 11 et 12, une économie substantielle en temps de calcul et en coût de mémoire est réalisée par leur réduction de la taille des matrices de masse et de rigidité.

Dans le domaine de l'élasticité linéaire, les composantes de déformation axiale et de cisaillement des structures en plaques peuvent être formulées comme suit :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial v(y, x, z, t)}{\partial x} \quad (13-a)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial u(x, y, z, t)}{\partial y} \quad (13-b)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u(x, y, z, t)}{\partial x} + \frac{\partial v(x, y, z, t)}{\partial y} \quad (13-c)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w(x, y, z, t)}{\partial x} + \frac{\partial v(x, y, z, t)}{\partial z} \quad (13-d)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w(x, y, z, t)}{\partial y} + \frac{\partial u(x, y, z, t)}{\partial z} \quad (13-e)$$

La loi de comportement d'un panneau de maçonnerie sont présentées sous forme de matrice comme

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x^{*G} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_y^{*G} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy}^{*G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{xz}^{*G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{yz}^{*G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

En notant respectivement U et T les énergies de déformation et cinétique, le principal de Hamilton s'exprime comme suit :

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U) dt = 0 \quad (15)$$

δ est le symbole variationnel.

Cette étude étant dédiée à la vibration des panneaux de maçonnerie hors plan, l'énergie de déformation s'écrit :

$$U = \frac{1}{2} \int_{-s/2}^{s/2} \int_0^H \int_0^B (\varepsilon_{xx} \sigma_{xx} + \varepsilon_{yy} \sigma_{yy} + \gamma_{xy} \tau_{xy} + \gamma_{xz} \tau_{xz} + \gamma_{yz} \tau_{yz}) dz dy dx \quad (16)$$

L'énergie cinétique est définie comme :

$$T = \frac{\rho^G}{2} \int_{-s/2}^{s/2} \int_0^H \int_0^B \left(\left(\frac{\partial u(x, y, z, t)}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v(x, y, z, t)}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w(x, y, z, t)}{\partial t} \right)^2 \right) dz dy dx \quad (17)$$

Afin d'effectuer une étude numérique des fréquences naturelles et de leurs facteurs de perte correspondants, la méthode de Ritz est choisie comme procédure de résolution. Conformément à cette méthode (de Ritz), la solution de l'équation des valeurs propres pour un système structural continu peut être exprimée en termes de combinaison linéaire des fonctions de forme proposées.

Lors de l'application de la méthode de Ritz, les fonctions de forme sont choisies pour satisfaire uniquement les conditions aux limites et pas nécessairement celles d'équilibre. Pour décrire la vibration des panneaux de maçonnerie hors plan, les formes de fonctions polynomiales suivantes sont utilisées :

➤ **1-Plaque encastrée libre dans la direction y et libre dans la direction x :**

$$\{v_0(x, y, t) \quad u_0(x, y, t) \quad w_b(x, y, t) \quad w_s(x, y, t)\} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^K \{v_{ij} \quad u_{ij} \quad w_{bij} \quad w_{sij}\} \left(\frac{y}{H}\right)^{i+1} \left(\frac{1-x}{2B}\right)^{j-1} \sin(\omega t) \quad (18-a)$$

➤ **2- encastrée libre dans les deux directions x et y :**

$$\{v_0(x, y, t) \quad u_0(x, y, t) \quad w_b(x, y, t) \quad w_s(x, y, t)\} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^K \{v_{ij} \quad u_{ij} \quad w_{bij} \quad w_{sij}\} \left(\frac{y}{H}\right)^{i+1} \left(\frac{x}{B}\right)^{j+1} \sin(\omega t) \quad (18-b)$$

Où v_{ij} u_{ij} w_{bij} et w_{sij} sont les amplitudes de déplacement, i et j représentent les formes de mode des vibrations liées respectivement aux directions y et x . Après avoir substitué les équations (16) et (17) dans (15) et avoir utilisé les équations (11-14 et 18), un ensemble d'équations d'équilibre est obtenu en utilisant l'opérateur gradient comme suit:

$$\{f\} = grad(\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U), \{D\}) = \{0\} \quad (19)$$

$\{f\}$ est un résidu d'équilibre qui régit le problème de vibration et le vecteur D est formé par les coefficients de Ritz donnés par :

$$D = \left\{ \{v_{ij}\}, \{u_{ij}\}, \{w_{bij}\}, \{w_{sij}\} \right\}^T \quad (20)$$

Ces équations d'équilibre s'expriment comme suit :

$$\{f\} = ([K] - \omega^2 [M])\{D\} = \{0\} \quad (21)$$

Où $[K]$ et $[M]$ sont respectivement les matrices de rigidité et de masse. Les fréquences naturelles et les facteurs de perte correspondants peuvent être obtenus en résolvant le problème des valeurs propres standard exprimé comme suit :

$$\det([K] - \omega^2 [M]) = 0 \quad (22)$$

Le problème des valeurs propres ci-dessus a été résolu en utilisant le code Matlab [29]. Les racines de l'Eq (23) sont constituées d'une fréquence propre complexe exprimée comme :

$$\omega^* = \omega(1 + i\eta_\omega) \quad (23)$$

Où η_ω est le facteur de perte et ω est la fréquence naturelle.

IV.3. Études numériques :

IV.3.1. Vérification de la procédure d'homogénéisation dynamique proposée :

Cette étude se concentre sur l'effet du module d'élasticité du mortier sur les fréquences naturelles et les facteurs de perte. Pour cela, le module d'élasticité du mortier est changé de $E^m = 20$ à 20000MPa et les facteurs de perte $\eta^{hm} = \eta^{vm}$ sont fixés à la valeur de 0,1. La brique de bloc est considérée comme ayant un comportement vibratoire conservateur avec une faible propriété d'amortissement avec $\eta^{br} = 0,05$.

Le modèle proposé est formulé sous Matlab [15], développé pour des applications numériques.

Tableau IV.1-a: comparaison des modules de cisaillement et d'Young avec la MEF (Abaqus [43])

E_m (MPa)	E_y (MPa)		G_{yx} (MPa)		E_x (MPa)		G_{xy} (MPa)	
	Present	MEF	Present	MEF	Present	MEF	Present	MEF
20	123,313	126,247	51,379	51.36	429,041	404,108	178,717	174,209
200	1176,11	1204,76	489,996	489,64	3521,438	3344,092	1466,680	1435,32
2000	8045,071	8209,92	3352,119	3346,11	12735,415	12487,73	5306,421	5264,24

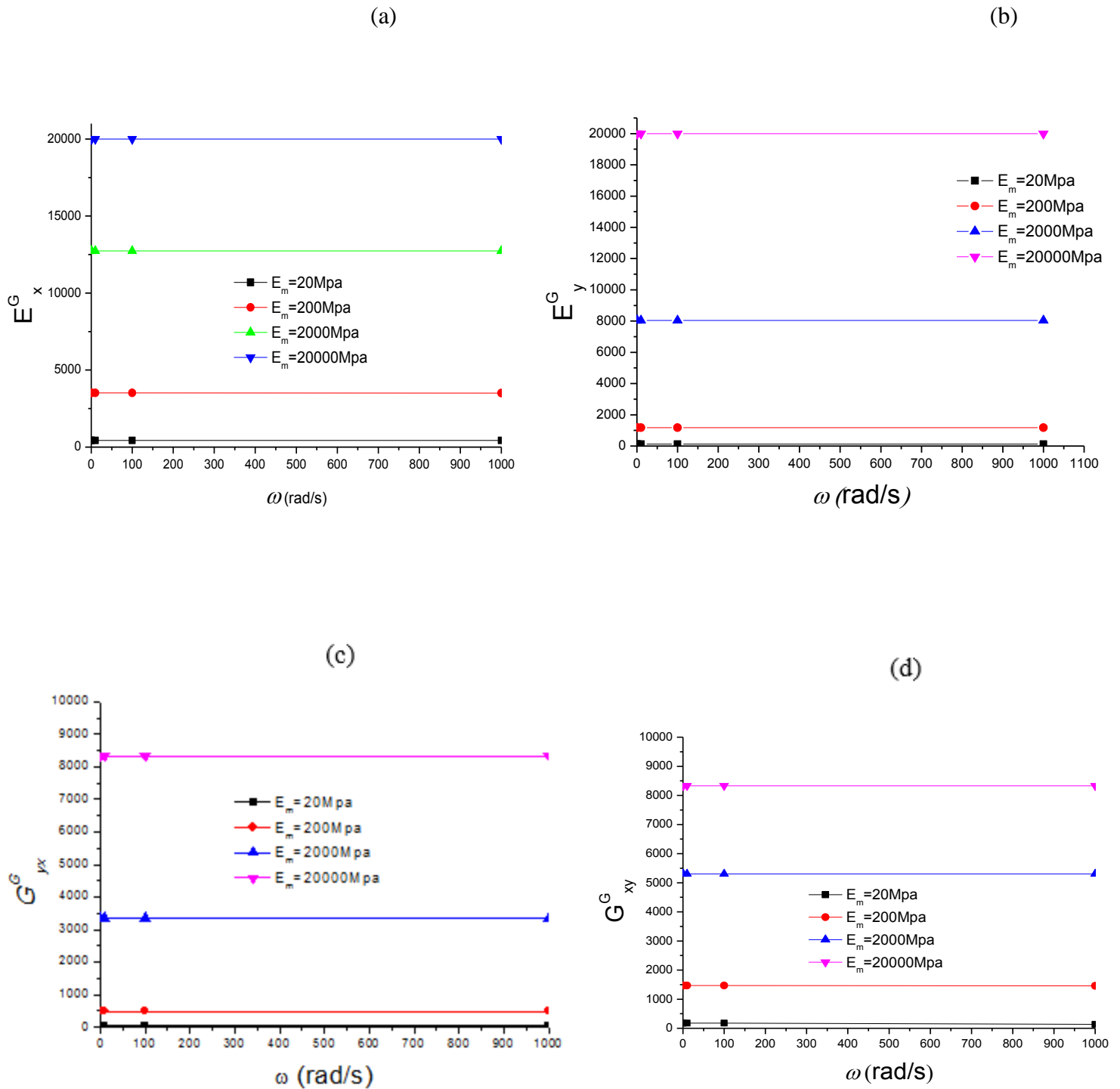


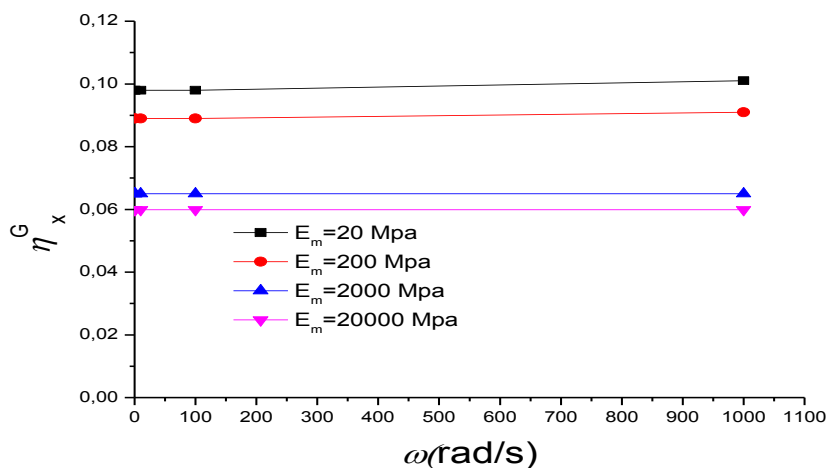
Fig. IV.2: Variation des caractéristiques mécaniques homogènes avec la fréquence,
 (a): module axial dans la direction x E_x^G
 (b): module axial dans la direction y E_y^G
 (c): module de cisaillement dans le plan yx G_{yx}^G
 (d): module de cisaillement dans le plan xy G_{xy}^G

On remarque à partir de ces figures (Fig. IV.2-a-d) que les modules élastiques ne changent pas avec les fréquences d'entrée (variant de 0 à 1000 rad / s) pour tous les cas étudiés, que ce soit pour les mortiers souples ou rigides.

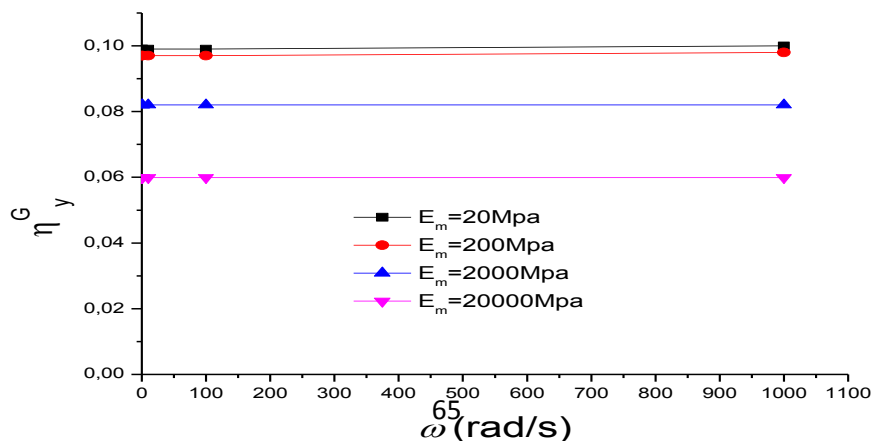
A partir de la figure IV.2, on observe une réduction drastique du module d'Young vertical E_y^G (Fig.IV.2-b) par rapport au module d'Young horizontal E_x^* (Fig.IV.2-a), pour une réduction du module de mortier. Dans ce contexte on obtient les réductions prononcées de 65 fois et 30 fois respectivement dans les directions y et x, en faisant varier E_m de 20 à 2000MPa. Pour les modules de cisaillement, on obtient la même tendance avec une réduction substantielle de G_{yx}^G (Fig.IV.2-c) par rapport à G_{xy}^G (Fig.IV.2-d).

L'inspection des facteurs de perte homogènes, comme le montrent les figures IV.3, révèle que les facteurs de perte calculés ne dépendent pas des fréquences.

(a)



(b)



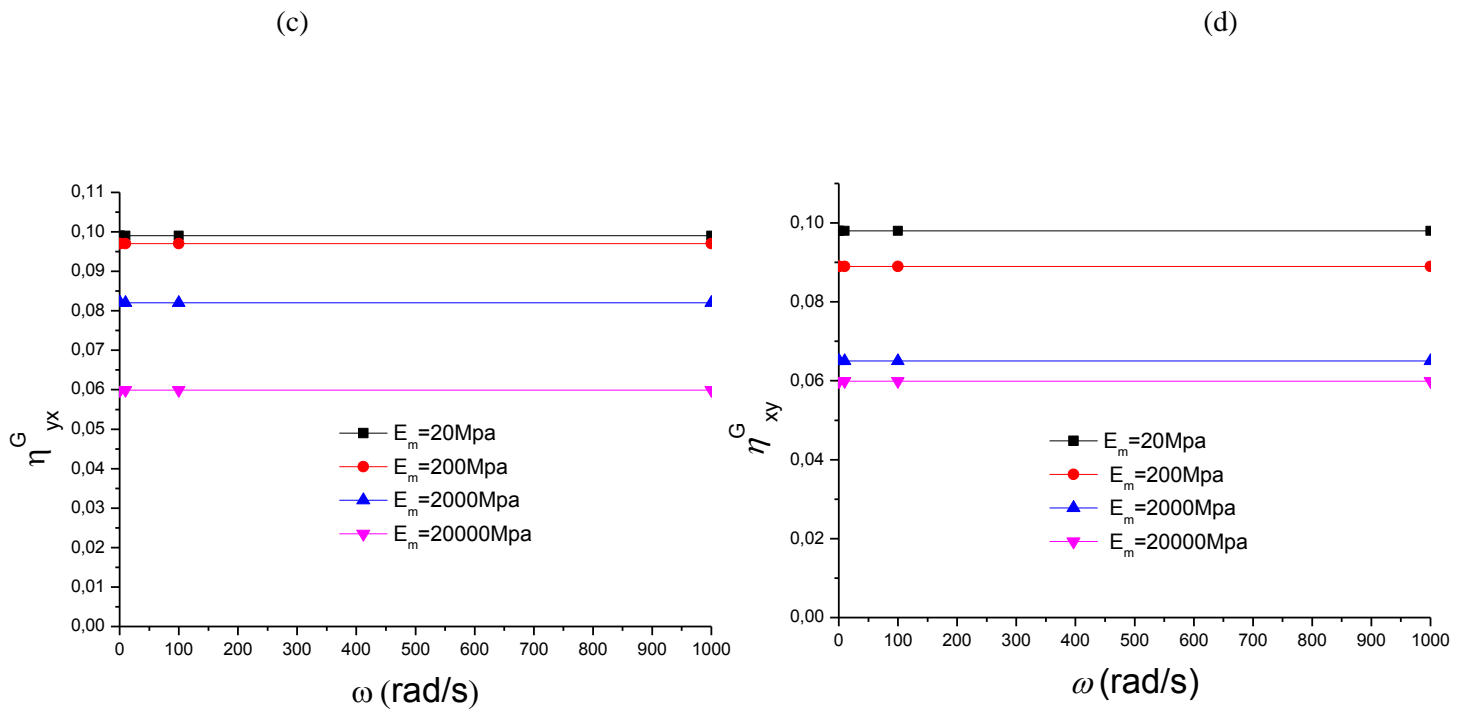


Fig. IV.3: Variation des facteurs de perte homogènes avec la fréquence,

(a): facteur de perte dans la direction x $\eta_x G$

(b): facteur de perte dans la direction y $\eta_y G$

(c): facteur de perte de cisaillement dans le plan yx $\eta_{yx} G$

(d): facteur de perte de cisaillement dans le plan xy $\eta_{xy} G$

On peut déduire des figures IV.3 qu'une réduction du module d'Young du mortier contribue favorablement à améliorer le facteur de perte et donc les performances d'amortissement structural des panneaux de maçonnerie en particulier dans la direction y. Par exemple, la figure IV.3-a illustre une réduction importante de 35% pour η_x , en faisant varier E_m de 20 à 2000GPa et une dégradation relativement modérée de 18% (figure 4.3-b) pour η_y . L'examen des résultats tracés sur les figures IV.3-c-d révèle que les mêmes variations enregistrées pour η_x et η_y peuvent être généralisées respectivement à η_{xy} et η_{yx} .

Tableau IV.2: variations du facteur de perte de la cellule de maçonnerie homogénéisée en fonction de η^b avec $\eta^m = 0,1$

E_m (MPa)	η_b	η_y	η_x
20	$\eta_b=0,05$	0,0997	0,0987
	$\eta_b=0,1$	0,100	0,100
	$\eta_b=0,2$	0,100	0,102
	$\eta_b=0,5$	0,102	0,107
200	$\eta_b=0,05$	0,0974	0,0899
	$\eta_b=0,1$	0,100	0,100
	$\eta_b=0,2$	0,105	0,119
	$\eta_b=0,5$	0,117	0,167
2000	$\eta_b=0,05$	0,0824	0,065
	$\eta_b=0,1$	0,100	0,100
	$\eta_b=0,2$	0,134	0,169
	$\eta_b=0,5$	0,221	0,361

Tableau IV.3: Variation des facteurs de perte de la maçonnerie homogénéisée en fonction de η_m avec $\eta_b = 0,1$

E_m (MPa)	η_m	η_y	η_x
20	$\eta_m=0,05$	0,05	0,05
	$\eta_m =0,1$	0,1	0,1
	$\eta_m =0,2$	0,199	0,197
	$\eta_m =0,5$	0,497	0,487
200	$\eta_m=0,05$	0,052	0,06
	$\eta_m =0,1$	0,1	0,1
	$\eta_m =0,2$	0,194	0,179
	$\eta_m =0,5$	0,474	0,405
2000	$\eta_m=0,05$	0,067	0,084
	$\eta_m =0,1$	0,1	0,1
	$\eta_m =0,2$	0,164	0,12
	$\eta_m =0,5$	0,340	0,204

L'influence des facteurs de perte de la brique et de mortier sur les facteurs de perte homogènes sont étudiées. Ceci est accompli en modifiant les valeurs numériques des facteurs de perte de la brique de bloc comme indiqué dans le tableau IV.2 et le mortier dans le tableau IV.3. Les valeurs du facteur de perte homogène données par la présente formulation sont les mêmes que celles du mortier, lors de l'utilisation des mortiers souples avec $E_m \leq 200$ MPa. Les résultats présentés dans les tableaux IV.2 et IV.3 démontrent que les mortiers tendres jouent un rôle important pour améliorer encore les propriétés d'amortissement de la cellule élémentaire de maçonnerie.

IV.3.2 Exemple 1 : Vibration libre dans le plan des murs de maçonnerie rectangulaires

Dans cette section, deux types de panneaux de maçonnerie à base fixe de la figure IV.4 sont étudiés. Le premier est un mur de maçonnerie rectangulaire avec un rapport hauteur / largeur de $H / B = 2.093$ (Fig. IV.4-a), le second fait référence à un panneau carré avec un rapport hauteur / largeur de 1.046 (Fig. IV.4-b).

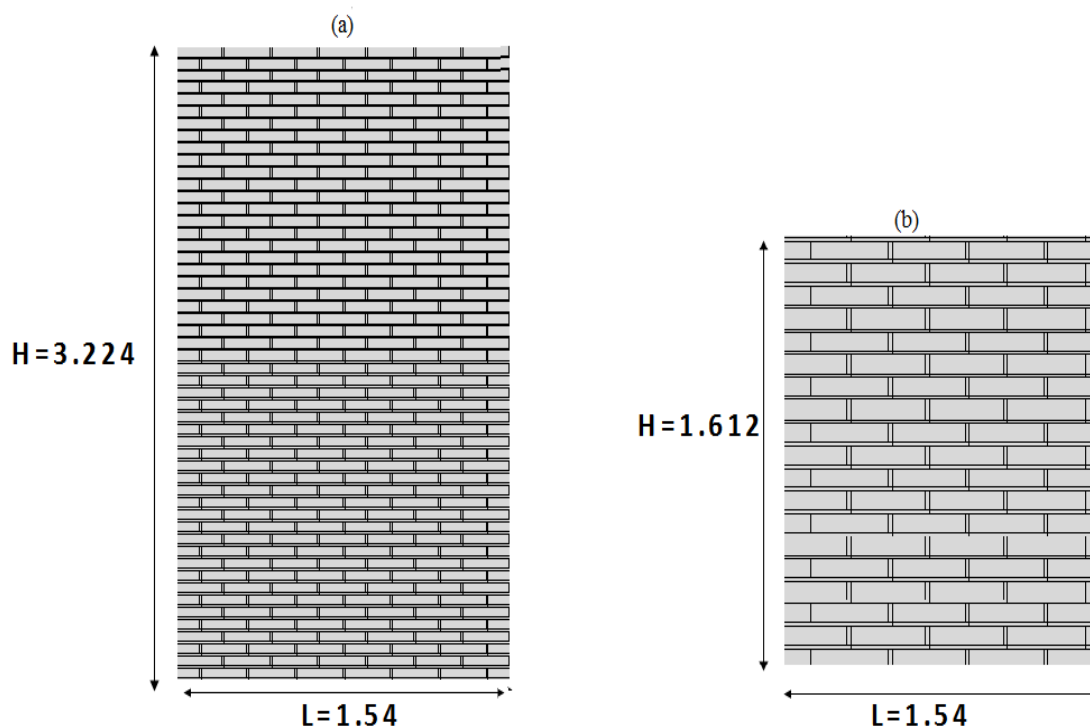


Figure IV.4: Dimensions des murs en maçonnerie de l'exemple 1:
(a) Mur de maçonnerie avec un rapport hauteur / largeur $H / B = 2093$
(b) Mur de maçonnerie carré avec rapport hauteur / largeur $H / B = 1046$

Avant d'effectuer l'analyse des vibrations libres avec le présent modèle, la technique d'homogénéisation proposée est appliquée dans une première étape en tant que source des données matérielles. Ceci est réalisé en faisant varier la propriété élastique du mortier et le facteur de perte de la brique comme indiqué dans le tableau IV.1.

Afin de vérifier la validité de la méthode proposée dans l'analyse des vibrations libres des murs de maçonnerie, une comparaison est faite entre les résultats fournis par le modèle proposé et la simulation par éléments finis à l'aide du logiciel Abaqus [43] dans lequel le mur de maçonnerie est modélisé selon une subdivision des cellules élémentaires de maçonnerie

comme indiqué sur la figure IV.5 avec des détails de maillage plus rigoureux des joints de mortier et des blocs de briques.

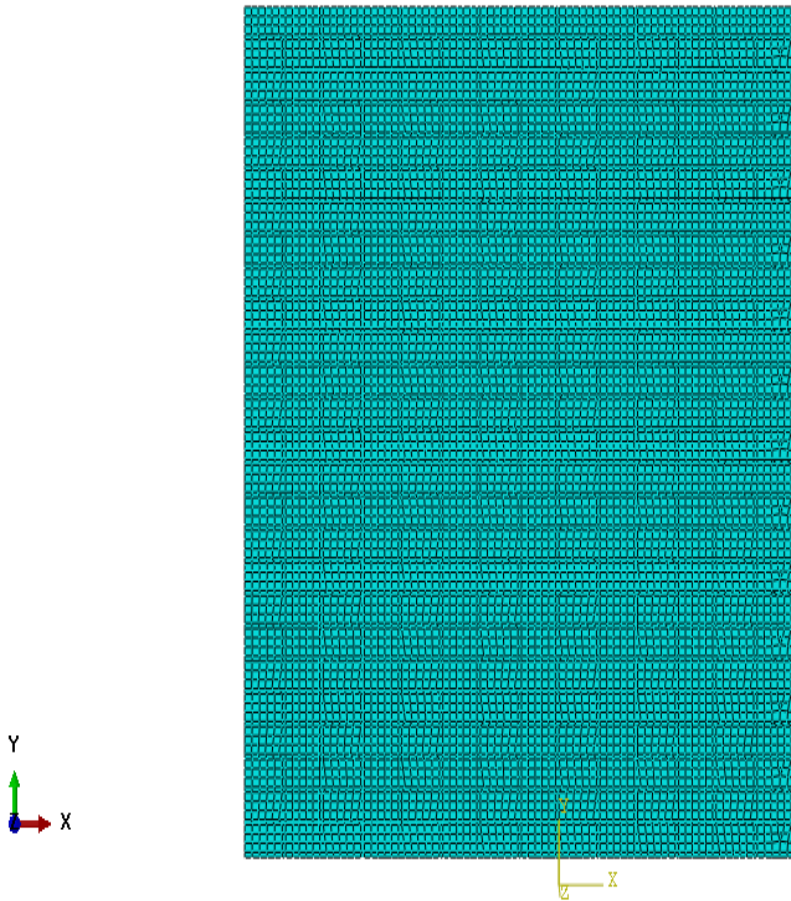


Figure IV.5: Détails du maillage par MFE avec le logiciel Abaqus

Les valeurs des fréquences des quatre premiers modes de vibrations sont listées dans les tableaux IV.4-5. L'examen de ces résultats révèle que le modèle proposé peut conduire à une estimation raisonnable des caractéristiques dynamiques du mur de maçonnerie. Les erreurs relatives ne dépassent pas 4,5% pour les deux murs.

Tableau IV.4: Résultats des fréquences de vibration dans le plan (Hz) pour un mur de maçonnerie avec un rapport hauteur / largeur de $H/B = 2.093$

E_m (MPa)	Present	Modèle maçonnerie en MEF	Erreur Relative %
20	5,461	5,413	0,887
	20,332	20,468	0,664
	21,81	21,261	2,582
	46,043	44,831	2,703
200	16,863	16,664	1,194
	62,786	63,078	0,463
	67,348	65,263	3,195
	142,178	137,51	3,395
2000	43,961	43,456	1,162
	167,275	163,84	2,096
	174,542	170,19	2,557
	368,488	358,58	2,763

Tableau IV.5: Résultats des fréquences de vibration dans le plan (Hz) pour un mur de maçonnerie avec un rapport hauteur / largeur de $H / B = 1,04$

E_m (MPa)	Present	Modèle maçonnerie en MEF	Erreur Relative %
20	16,908	16,537	2,24
	40,665	40,642	0,06
	46,985	45,827	2,53
	84,117	82,112	2,44
200	52,211	50,82	2,74
	125,573	125,32	0,20
	145,087	140,73	3,10
	259,741	250,82	3,56
2000	136,509	132,97	2,66
	328,315	326,4	0,59
	379,336	367,48	3,23
	679,11	650,08	4,47

Il peut être indiqué à partir des résultats des tableaux IV.4, relatifs au mur de maçonnerie d'élanement de 2,093, que le module élastique du mortier affecte fortement les caractéristiques dynamiques du mur de maçonnerie avec une réduction substantielle de 67,62% lorsque E^m est changé de 200 à 20GPa. Alors que la réduction avoisine les 88% pour la dégradation de E^m 2000 à 20 GPa. Les résultats indiqués dans les tableaux IV.5 sont les fréquences du mur de maçonnerie carré avec un élanement de 1,046. Il est surprenant de déduire que les mêmes pourcentages de réduction signalés pour les murs de maçonnerie élancés sont enregistrés pour les murs de maçonnerie carrés. On déduit de ces résultats, que le module d'élasticité du joint de mortier a un effet significatif sur les caractéristiques modales

des murs maçonnés, avec le même degré d'influence, quelles que soient les caractéristiques géométriques imposées par le concepteur.

L'inspection de l'effet du facteur de perte de la brique η^b sur le facteur de perte du mur de maçonnerie η_ω lié aux quatre premiers modes de vibration est rapportée sur la figure IV.6.

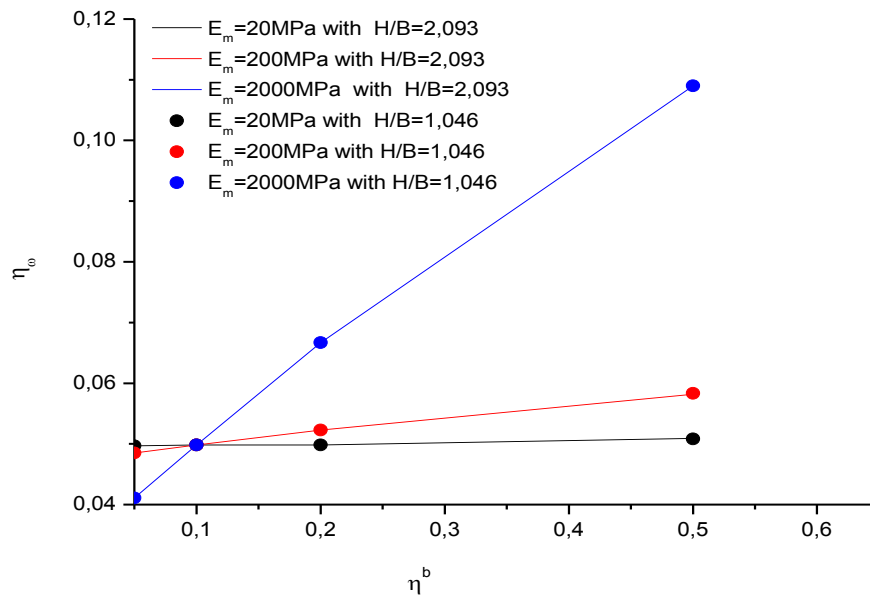


Fig. IV.6: Variation du facteur de perte de vibration dans le plan pour les murs de maçonnerie carrés et rectangulaires

Cette figure appelle les commentaires suivants :

1-Le facteur de perte du mur de maçonnerie pour les différents modes de vibrations devient inchangé et peut être estimé comme la moitié du facteur de perte homogène dans la direction y, on écrit donc :

$$\eta_\omega = \frac{\eta_y^G}{2} \quad (25)$$

2- Le facteur de perte du mur de maçonnerie n'est pas sensible aux caractéristiques géométriques. Celui-ci est directement attribué à η_y .

3- Le module d'élasticité du mortier a une grande influence sur le facteur de perte η_ω de paroi. On observe à partir de ces résultats, que dans le cas d'un mortier moue avec $E^m = 20\text{MPa}$, le facteur de perte de brique n'influe pas sur les caractéristiques d'amortissement du mur de maçonnerie. Pour un mortier plus rigide $E^m = 200\text{MPa}$, on obtient une légère pente qui peut être attribuée à la participation du facteur de perte de la brique. Dans ce cas, une amélioration faible est enregistrée, de 0,048 à $\eta^b = 0,05$ à 0,058 pour $\eta^b = 0,5$. Alors qu'une tendance inverse est observée pour le mortier dur avec $E_m = 2000\text{GPa}$ avec une pente plus importante. Le facteur de perte de paroi est augmenté de 0,041 pour $\eta^b = 0,05$ à 0,109 pour $\eta^b = 0,5$.

IV.3.3.Exemple 2: vibration libre dans le plan des porte-à-faux rectangulaires de maçonnerie.

Cet exemple consiste en des poutres de maçonnerie comme le montre la figure IV.7, en vibration libre.

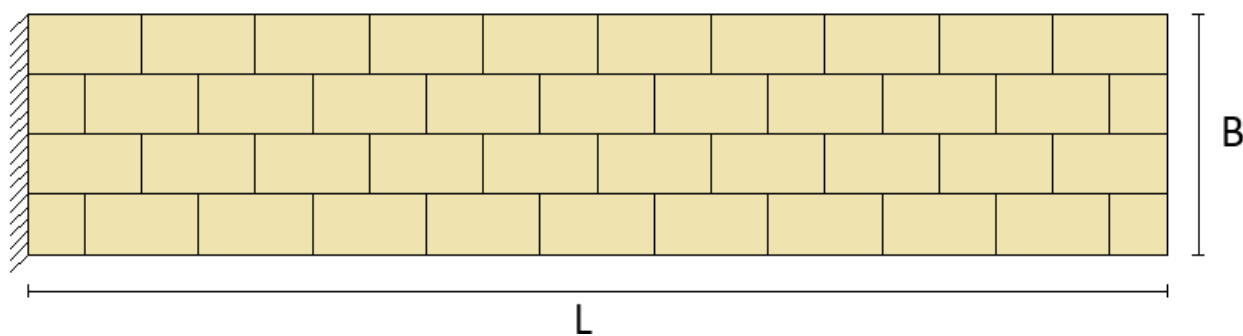


Fig.IV.7 : Elément de maçonnerie en porte-à-faux avec longueur L et largeur B

Deux modèles de porte-à-faux de largeurs différentes ($B = 0,372$ et $0,744$) sont considérés. Le premier est un porte-à-faux élancé avec un rapport hauteur / largeur $B / L = 0,24$. Le deuxième est une console en maçonnerie courte avec un élancement de $0,48$. Dans cet exemple, le module d'élasticité du mortier varie de 20 à 2000 MPa. Dans le cadre du processus de validation, le facteur de perte de brique (η^b) est modifié de la même manière que dans l'exemple 1.

Les quatre premières fréquences calculées avec la présente méthode sont énumérées dans le tableau IV.6-7, et bien comparées aux résultats MEF.

Ces résultats montrent qu'une convergence acceptable soit obtenue pour les trois premières fréquences dans les deux cas étudiés. Comme on peut le voir, des erreurs relatives importantes sont signalées pour la quatrième fréquence, avec des différences moyennes de 23% pour $B / L = 0,24$ et 34% pour $B / L = 0,48$. Il est à noter, comme indiqué Tab.IV.6-7, que des différences importantes sont enregistrées dans le cas du mortier moue avec $E_m = 20$ MPa. Ces différences sont dues à la valeur élevée du soi-disant facteur d'échelle $l_G/L=0,14$, qui a tendance à surestimer la rigidité structurelle globale.

Tableau IV.6: Résultats des fréquences de vibration dans le plan pour un porte-à-faux de maçonnerie (Hz) avec un rapport hauteur / largeur de $B/L = 0,24$ avec $L = 1,54m$ et $B = 0,372m$

E_m (MPa)	Present	Modèle maçonnerie en MEF	Erreur Relative %
20	11,9	12,97	8,25
	62,467	55,47	12,61
	79,392	91,69	13,41
	147,239	119,91	22,79
200	34,105	35,07	2,75
	178,923	149,44	19,73
	227,405	251,52	9,59
	421,723	321,73	31,08
2000	64,829	64,11	1,12
	340,117	308,64	10,20
	432,254	438,92	1,52
	801,688	690,45	16,11

Tableau IV.7: Résultats des fréquences de vibration dans le plan pour un porte-à-faux de maçonnerie (Hz) avec un rapport hauteur / largeur de $B / L = 0,48$ avec $L = 1,54m$ et $B = 0,744m$

E_m (MPa)	Present	Modèle maçonnerie en MEF	Erreur Relative %
20	21,551	20,06	7,43
	79,392	66,49	19,40
	86,328	92,37	6,54
	181,975	129,05	41,01
200	61,728	57,66	7,06
	227,405	189,22	20,18
	247,265	263,04	6,00
	521,215	372,38	39,97
2000	117,337	113,78	3,13
	432,254	408,06	5,93
	470,051	446,67	5,23
	990,848	821,86	20,56

Comme l'exemple précédent, on étudie dans cette section, la sensibilité du facteur de perte de maçonnerie en porte-à-faux η_ω au facteur de perte de brique η^b . Pour cet objectif, le facteur η^b a été varié de 0,1 à 0,5 et la valeur du facteur de perte de mortier η^m est maintenue constant, égale à 0,1. La figure IV.8 inspecte cette sensibilité pour les éléments de maçonnerie en porte-à-faux avec $B / L = 0,24$ et $0,48$ respectivement.

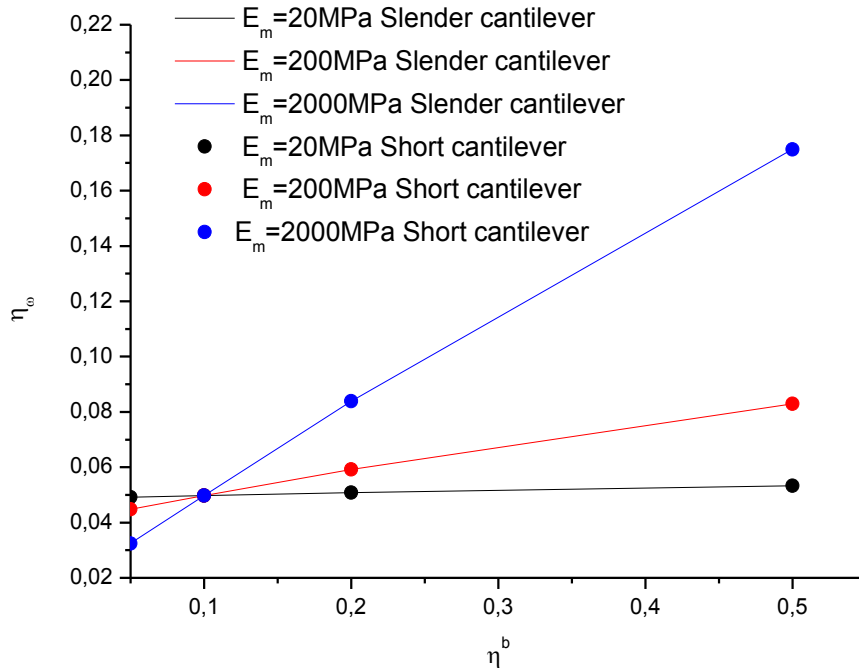


Fig4.8: Variation du facteur de perte des poutres de maçonnerie en porte-à-faux (Sous vibration dans le plan)

Ces résultats mènent aux remarques suivantes :

1-Le facteur de perte de la maçonnerie en porte-à-faux est presque constant pour tous les modes de vibration considérés, et peut être évalué directement η_x^G à partir de :

$$\eta_\omega = \frac{\eta_x^G}{2}$$

(26)

2- Le facteur de perte de la maçonnerie en porte-à-faux augmente avec l'augmentation de E_m , et sa valeur ne dépend pas d'élançement structurel B / L .

3- On peut remarquer qu'aucun effet significatif n'a été rapporté pour le facteur de perte de brique η^b sur η_ω , notamment dans le cas du mortier moue. Alors que celui-ci a tendance à être fortement influencé par le facteur de perte de brique η^b lorsque E^m est augmenté.

IV.3.4. Exemple 3 : vibration libre hors plan de murs de maçonnerie rectangulaires à bord fixe.

Dans ce test, l'analyse des vibrations libres hors plan des panneaux carrés et rectangulaires est considérée. La hauteur du panneau carré est $H = 3,72\text{m}$ et $H = 1,86\text{m}$ pour le panneau rectangulaire. La largeur B est fixée à la valeur de $B = 3,08\text{m}$, pour les deux panneaux. Le module du mortier varie de $E^m = 20$ à 2000 MPa et le module de Young de la brique est fixé à la valeur de $E^b = 20000$ MPa. Les conditions aux limites des panneaux sont encastées libre dans la direction y et libres dans la direction x . Dans le cadre de l'analyse des vibrations hors plan des panneaux de maçonnerie, le comportement structurel est décrit par la théorie des plaques.

Les tableaux IV.8 et IV.9 montrent les quatre premières fréquences obtenues par le modèle proposé, après avoir déterminé le paramètre homogène. On peut observer à partir de ces tableaux que, les résultats fournis par le modèle proposé sont en excellent accord avec ceux obtenus avec MEF, dans le cas d'un joint de mortier moue avec $E^m = 20\text{GPa}$. Alors que dans le cas de $E^m = 200$ et 2000MPa l'erreur est sensiblement supérieure, proche de 10-20%.

Tableau IV.8 : Résultats des fréquences de vibration hors plan pour les panneaux de maçonnerie (hrz) avec un rapport hauteur / largeur de $H/B = 1,2$ ($B = 3,08\text{m}$ $H = 3,72\text{m}$)

E_m (MPa)	Present	Modèle maçonnerie en MEF	Erreur Relative %
20	0,366	0,368	0,543
	1,526	1,585	3,722
	2,289	2,297	0,348
	5,006	5,086	1,572
200	1,131	1,135	0,352
	4,493	3,977	12,974
	7,078	7,082	0,056
	14,844	13,218	12,301
2000	2,959	2,963	0,1349
	9,834	8,693	13,125
	18,514	18,458	0,303
	33,006	29,965	10,148

Tableau IV.9 : Résultats des fréquences de vibration hors plan pour les panneaux de maçonnerie (hrz) avec un rapport hauteur / largeur de $H/B = 0,6$ ($B = 3,08m$ $H = 1,86m$)

E_m (MPa)	Present	Modèle maçonnerie en MEF	Erreur Relative %
20	1,462	1,450	0,828
	3,539	3,573	0,952
	9,101	8,924	1,983
	10,105	9,491	6,469
200	4,522	4,475	1,050
	10,493	9,260	13,315
	28,145	25,172	11,811
	29,287	27,571	6,224
2000	11,827	11,756	0,604
	23,618	20,884	13,091
	59,510	48,878	21,752
	73,614	72,402	1,674

Afin de mettre en évidence la dépendance du facteur de perte à la nature du mode de vibration, les quatre premiers facteurs de perte modale globale η_ω obtenus par le présent modèle sont tracés en fonction du facteur de perte de la brique η^b sur la figure IV.9 (a et b) pour $E^m = 200$ MPa.

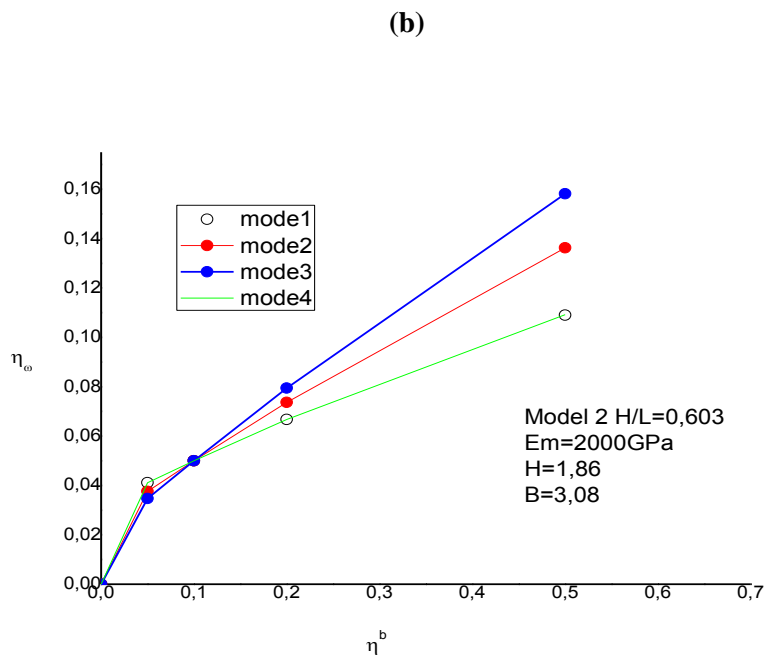
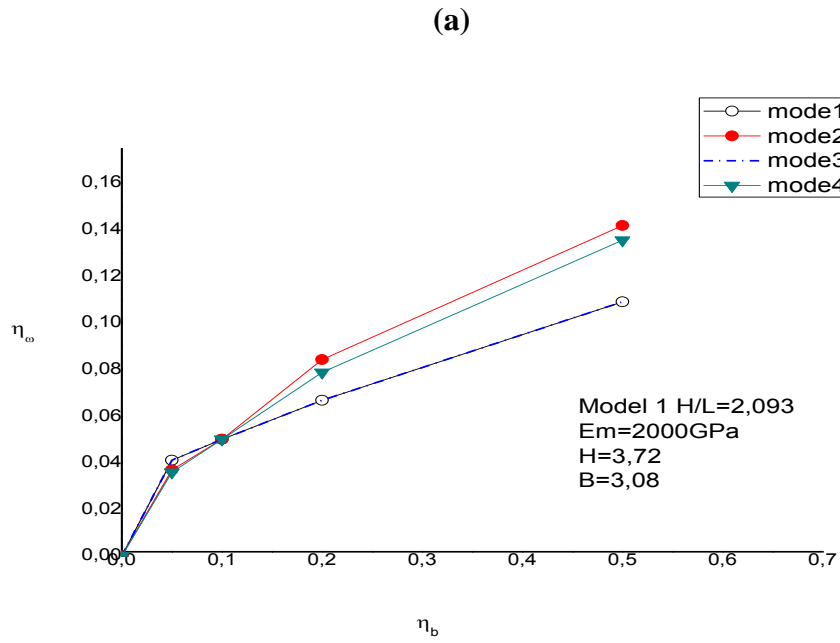


Fig.IV.9 : Variation du facteur de perte de l'exemple 3
(a) : Mur carré- (b) : mur rectangulaire.

Les résultats montrent que le facteur de perte global η_ω augmente avec l'augmentation de η^b selon une loi bilinéaire. Il a également été observé à partir de ces figures que, à l'inverse de la vibration des murs de maçonnerie dans le plan et les vibrations hors plan, la structure présente des caractéristiques d'amortissement différentes, fortement affectées par forme modale. Par exemple, on observe dans le cas du panneau de maçonnerie carré (Fig.IV.9-a), le facteur de perte η_ω du premier et du troisième mode de vibration peut être approché par :

$$\eta_\omega = \frac{\eta_y^G}{2} \quad (27)$$

Ainsi, l'examen des modes de vibration de forme hors plan de ce panneau de maçonnerie indique que les premiers et troisièmes vecteurs propres correspondent aux premiers et deuxièmes modes de vibration de flexion autour de l'axe x , respectivement. Il convient de noter que, dans ce comportement en flexion, la structure de maçonnerie n'agit que dans la direction y , par conséquent, le comportement en flexion ne peut être décrit que par les modules élastiques Ey^{*G} et G_{yx}^{*G} . Les deuxièmes et quatrièmes vecteurs propres sont respectivement les modes de vibration de torsion et de distorsion.

L'étude de la variation du facteur de perte η_ω du panneau de maçonnerie rectangulaire en fonction de η^b (Fig.IV.9-b) révèle une autre tendance, principalement caractérisée par les modes de vibration de flexion autour de l'axe x , associés respectivement aux premiers et quatrièmes vecteurs propres, tandis que les deuxièmes et troisièmes vecteurs propres sont les modes de vibrations associés à la torsion et à la flexion autour de l'axe y .

IV.3.5. Exemple 4 : murs encastré libre dans les deux les directions x et y

Sur la base de la stratégie exposée précédemment qui consiste à attribuer les fréquences et leurs facteurs de perte correspondants aux formes de mode. Les panneaux traités dans le dernier exemple sont à nouveau considérés en modifiant leurs conditions aux limites comme étant encastré libre dans les deux directions x et y . Les résultats de fréquences des deux spécimens sont listés dans les tableaux IV.10.

Tableau IV.10-a: Résultats de fréquences pour le panneau de maçonnerie de l'exemple 4 (hrz) avec rapport d'aspect ($H/B = 1,2$ ($B = 3,08m$ $H = 3,72m$))

E_m (MPa)	Present	Modèle maçonnerie en MEF	Erreur Relative %
20	1,421	1,681	15,47
	3,558	3,825	6,98
	6,700	7,702	13,01
	7,697	8,043	4,30
200	4,137	4,364	5,20
	10,625	10,331	2,85
	19,252	21,269	9,48
	23,399	22,277	5,04
2000	8,570	8,241	3,99
	24,755	23,573	5,01
	37,268	37,013	0,69
	57,437	54,004	6,36

Tableau IV.10-b: Résultats de fréquences pour le panneau de maçonnerie de l'exemple 4 (Hz)
avec un rapport hauteur / largeur $H/B = 0,6$ ($B = 3,08m$ $H = 1,86m$)

E_m (MPa)	Present	Modèle maçonnerie en MEF	Erreur Relative %
20	2,609	2,842	8,20
	8,09	9,296	12,97
	10,378	10,367	0,11
	17,618	18,759	6,08
200	7,472	7,566	1,24
	23,445	23,34	0,45
	31,655	30,351	4,30
	52,164	49,368	5,66
2000	17,568	16,644	5,55
	47,571	45,260	5,11
	79,693	76,641	3,98
	108,605	104,52	3,91

On remarque que le modèle proposé conduit à des résultats de fréquences acceptables par rapport à la modélisation MEF. La différence importante enregistrée est inférieure à 16% (tableau IV.10-a), attribuée au panneau carré réalisé avec du mortier mou ($E_m = 20\text{MPa}$).

L'inspection des résultats des facteurs de perte représentés sur les figures IV.10 par rapport au facteur de perte de mortier pour les panneaux de maçonnerie fabriqués avec du mortier moyennement mou ($E_m = 200\text{ MPa}$), permet de clarifier l'effet d'élançement du panneau mural (H/B) sur les facteurs de perte et leur correspondance avec les modes de vibration.

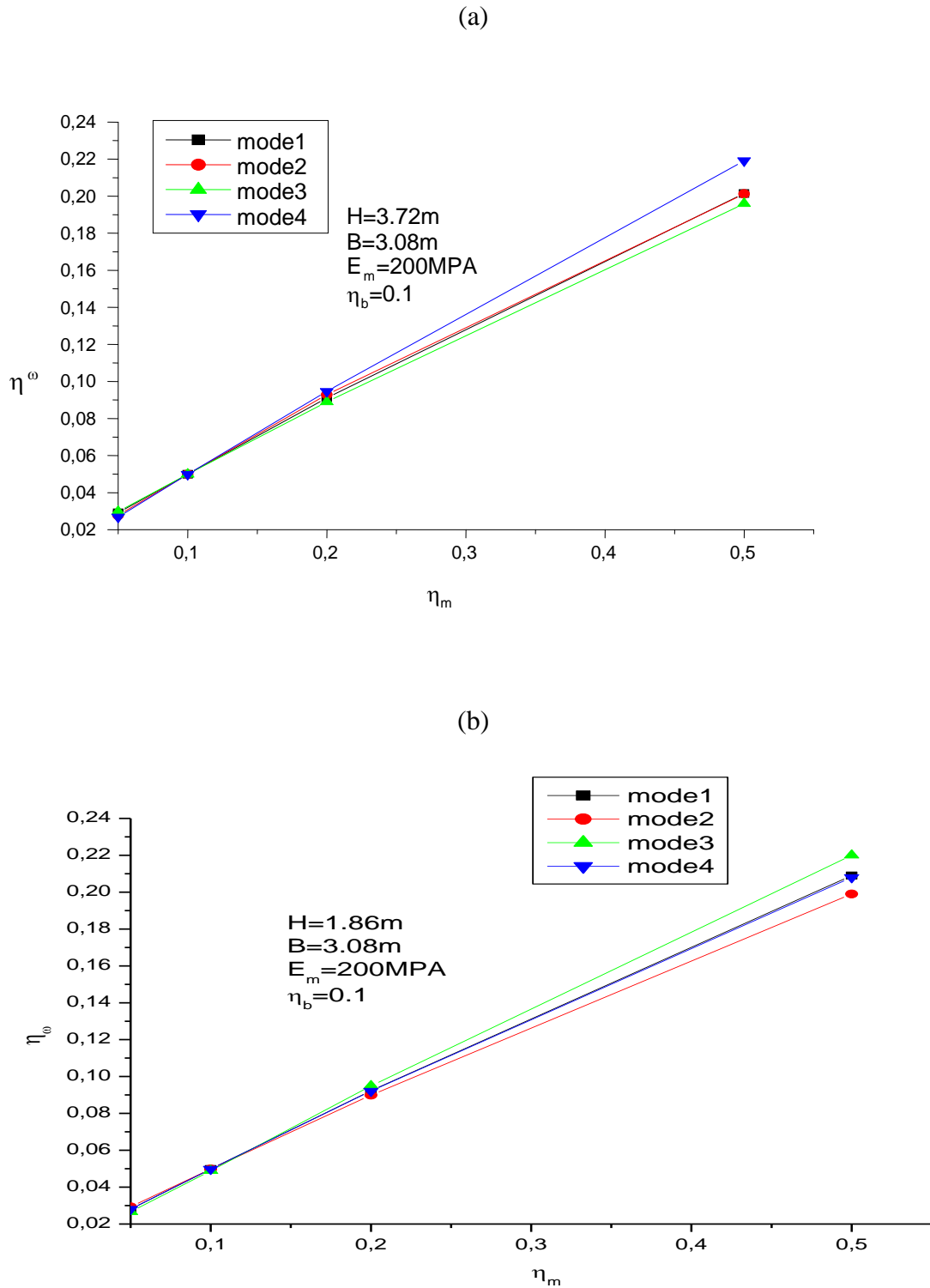


Fig.IV.10: Variation du facteur de perte de l'exemple 4
(a), paroi carrée- (b): paroi rectangulaire

Tout d'abord, on remarque que l'évolution des facteurs de perte est proportionnelle au facteur de perte du mortier η_m , pour tous les modes de vibration considérés. De plus, les résultats révèlent des différences modérées entre les facteurs de perte des quatre premiers modes, en particulier dans le cas des faibles valeurs du facteur de perte du mortier, inférieures à 0,2. Au-delà de cette valeur, les différences deviennent plus importantes.

Deuxièmement, on observe, que dans le cas du panneau carré (Fig.IV.10-a) ; une correspondance parfaite est mise en évidence entre les facteurs de perte des premiers et seconds modes. Les valeurs de facteur de perte les plus faibles correspondent au troisième mode et les plus élevées sont attribuées au quatrième mode.

Il faut également mentionner que pour un mur en maçonnerie rectangulaire avec un rapport hauteur / largeur $H / b = 0,6$, les premier et quatrièmes modes affichent les mêmes facteurs de perte. Cependant, les facteurs de perte inférieurs et supérieurs sont affectés respectivement aux deuxième et troisième modes de vibration.

IV.4. Conclusion :

Concernant l'analyse des vibrations libres des panneaux de maçonnerie, un bon accord est obtenu pour les fréquences déterminées par la méthode proposée et celles fournies par la méthode des éléments finis. L'étude des facteurs de perte évalués pour les vibrations dans le plan révèle que ces facteurs peuvent être déduits directement des facteurs de perte de maçonnerie des cellules.

Cependant, pour le problème des vibrations hors plan, les facteurs de perte varient avec le mode de vibration. Il ressort de la présente enquête que les panneaux de maçonnerie présentent des propriétés d'amortissement différentes, soit en flexion autour des axes x et y ; ou bien en torsion et distorsion.

Il a été établi à partir des résultats obtenus, que les paramètres géométriques, principalement le rapport hauteur / largeur des panneaux de maçonnerie et les conditions aux limites affectent de manière significative les fréquences et leurs facteurs de perte correspondants.

Conclusion Générale

Conclusion générale:

Dans ce travail nous avons abordé une étude de la réponse dynamique des murs en maçonnerie compte tenu des interfaces brique mortier. Nous avons présenté au début les différents paramètres qui influencent le comportement mécanique des structures en maçonnerie, sous les différentes sollicitations, à savoir les actions axiales et de cisaillement.

Notre étude s'est articulée sur la modélisation mathématique du comportement des structures en maçonnerie en vibration libre. L'approche adoptée dans notre étude est basée sur le principe d'homogénéisation pour la détermination à la fois des propriétés élastiques et d'amortissement. Cette approche de micro-modélisation a permis d'aborder le problème dynamique des murs en maçonnerie en vibration amortie en plan et hors plan, en adoptant la même stratégie employée dans l'étude des structures composites.

En effet, le modèle mathématique proposé dans l'étude vibratoire est formulé dans le contexte de la méthode de Ritz, basée sur l'emploi des fonctions de forme, vérifiant les conditions aux limites, celles-ci sont appliquées directement sur l'énergie potentielle. A cet effet notre choix s'est fixé sur les fonctions polynomiales, en raison de leur simplicité d'utilisation et de leur rapide convergence vers une solution stable.

Dans le cadre de cette thèse, un programme dédié au calcul numérique des fréquences propres et des coefficients de perte associés aux vibrations en plan et hors plan a été conçu sous MATLAB. Les résultats obtenus que ce soit en phase d'homogénéisation et de calcul vibratoires ont été confrontés à ceux fournis par la méthode des éléments finis en employant le logiciel Abaqus. Après avoir validé les résultats donnés par notre modèle, une étude paramétrique est abordée, permettant la détermination des propriétés anisotropes d'une cellule représentative d'un mur en maçonnerie. Dans cette procédure d'homogénéisation l'accent est d'avantage mis sur la détermination des propriétés d'amortissement, afin d'achever un contrôle passif approprié de la maçonnerie. Ceci est réalisé par l'adoption d'un choix optimal, appliquée sur les joints de mortier et la brique, dans la confection de la structure en maçonnerie.

L'étude des vibrations libres a permis de mettre en évidence la dépendance des fréquences naturelles des murs en maçonnerie aux propriétés géométriques et matérielles de ces constituants (Joint de mortier et la brique). Il en résulte des résultats obtenus, que cette dépendance est d'autant plus accrue dans les vibrations hors plan par rapport à ceux en plan. Dans ce contexte on a relevé une grande disparité dans les résultats de coefficient de perte pour les modes de flexion, de torsion et de la distorsion des murs sous différentes conditions aux limites.

Référence Bibliographique

Références bibliographiques :

- [1] **Anthoine, A. (1995)**. Derivation of the in-plane elastic characteristics of masonry through homogenization theory. *International journal of solids and structures*, 32(2), 137-163.
- [2] **Backes, H. P. (1985)**. On the behavior of masonry under tension in the direction of the bed joints. *Aachen University of Technology, Aachen, Allemagne*.
- [3] **Balandier, P (1990)**. Le séisme et les constructions béton armé et en maçonnerie. *Materials and structures*, vol.4,
- [4] **Baud, G. (1988)**. *La construction du bâtiment: maçonnerie et béton armé*. Dunod.
- [5] **Baraldi, D., Bullo, S., & Cecchi, A. (2016)**. Continuous and discrete strategies for the modal analysis of regular masonry. *International Journal of Solids and Structures*, 84, 82-98.
- [6] **Betti, M., & Vignoli, A. (2011)**. Numerical assessment of the static and seismic behaviour of the basilica of Santa Maria all'Impruneta (Italy). *Construction and Building Materials*, 25(12), 4308-4324.
- [7] **Brasile, S., & Casciaro, R. (2009)**. Multilevel approach for brick masonry walls—Part III: A strategy for free vibration analysis. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 198(49-52), 3934-3943.
- [8] **Cerrolaza, M., Sulem, J., & Elbied, A. (1999)**. A Cosserat non-linear finite element analysis software for blocky structures. *Advances in Engineering Software*, 30(1), 69-83.
- [9] **Cecchi, A., & Sab, K. (2002)**. A multi-parameter homogenization study for modeling elastic masonry. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 21(2), 249-268.
- [10] **Cecchi, A., & Sab, K. (2004)**. A comparison between a 3D discrete model and two homogenised plate models for periodic elastic brickwork. *International journal of solids and structures*, 41(9-10), 2259-2276.
- [11] **Code, P. (2005)**. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. *Brussels: European Committee for Standardization*.

Références bibliographiques :

- [12] Costa, A. A., Arêde, A., Costa, A., Guedes, J., & Silva, B. (2012). Experimental testing, numerical modelling and seismic strengthening of traditional stone masonry: comprehensive study of a real Azorian pier. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(1), 135-159.
- [13] Destrac, J. M., D. Lefavre, Y.. Maldent, & S.. Vila. (2011). *Génie civil: du bac pro aux écoles d'ingénieurs en génie civil*. Casteilla.
- [14] Dhanasekar, M., Page, A. W., & Kleeman, P. W. (1985). The failure of brick masonry under biaxial stresses. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 79(2), 295-313.
- [15] Dhanasekar, M. (2010). Review of modelling of masonry shear. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 2(3), 106-118.
- [16] Dutu, A., Yamazaki, Y., & Sakata, H. (2018). Shear spring model proposed for seismic evaluation of a timber framed masonry infilled wall. *Engineering Structures*, 167, 671-682.
- [17] Drougkas, A., Roca, P., & Molins, C. (2016). Nonlinear micro-mechanical analysis of masonry periodic unit cells. *International Journal of Solids and Structures*, 80, 193-211.
- [18] Ernst, M. (1997). *Untersuchungen zum Tragverhalten von bewehrtem Mauerwerk aus Hochlochziegeln*. VDI-Verlag.
- [19] Fouchal, F., Lebon, F., & Titeux, I. (2009). Contribution to the modelling of interfaces in masonry construction. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2428-2441.
- [20] Haber, R. A., & Smith, P. A. (1987). Overview of traditional ceramics. *Ceramics and Glasses: Engineered Materials Handbook*, 4, 3-15.
- [21] Hamid, A. A., & Drysdale, R. G. (1980, September). Concrete masonry under combined shear and compression along the mortar joints. In *Journal Proceedings* (Vol. 77, No. 5, pp. 314-320).
- [22] Hendry, A. W., Sinha, B. P., & Davies, S. R. (Eds.). (2017). *Design of masonry structures*. CRC Press.
- [23] Hurez, M., Juraszek, N., & Pelcé, M. (2014). *Dimensionner les ouvrages en maçonnerie*. Editions Eyrolles.
- [24] Jacques, G., Berger, S., Gibiat, V., Jean, P., Villot, M., & Ciukaj, S. (2011). A homogenised vibratory model for predicting the acoustic properties of hollow brick walls. *Journal of Sound and Vibration*, 330(14), 3400-3409.

Références bibliographiques :

- [25] Lopez, J., Oller, S., Oñate, E., & Lubliner, J. (1999). A homogeneous constitutive model for masonry. *International journal for numerical methods in engineering*, 46(10), 1651-1671.
- [26] Lourenço, P. B., Barros, J. O., & Oliveira, J. T. (2004). Shear testing of stack bonded masonry. *Construction and Building Materials*, 18(2), 125-132.
- [27] Lourenço, P. J. B. B. (1997). Computational strategies for masonry structures.
- [28] Lourenço, P. B. (2002). Computations on historic masonry structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 301-319.
- [29] MATLAB. (2006) 7,1, The MathWorksInc, Natick, MA.
- [30] Maurizio, A. (2014). Mechanics of Masonry Structures.
- [31] Mallardo, V., Malvezzi, R., Milani, E., & Milani, G. (2008). Seismic vulnerability of historical masonry buildings: a case study in Ferrara. *Engineering Structures*, 30(8), 2223-2241.
- [32] Miha, T. (2009). Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: shear versus tensile strength of masonry [J]. *Materials and Structures*, 42, 889-907.
- [33] Milani, G., Lourenço, P., & Tralli, A. (2006). Homogenization approach for the limit analysis of out-of-plane loaded masonry walls. *Journal of structural engineering*, 132(10), 1650-1663.
- [34] Pande, G. N., Liang, J. X., & Middleton, J. (1989). Equivalent elastic moduli for brick masonry. *Computers and Geotechnics*, 8(3), 243-265.
- [35] Page, A. W. (1981). The biaxial compressive strength of brick masonry. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 71(3), 893-906.
- [36] Page, A. W. (1983). The strength of brick masonry under biaxial tension-compression. *International journal of masonry construction*, 3(1), 26-31.
- [37] Parisi, F., Balestrieri, C., & Asprone, D. (2016). Blast resistance of tuff stone masonry walls. *Engineering Structures*, 113, 233-244.
- [38] Pietruszczak, S., & Niu, X. (1992). A mathematical description of macroscopic behaviour of brick masonry. *International journal of solids and structures*, 29(5), 531-546.
- [39] Petry, S., & Beyer, K. (2014). Scaling unreinforced masonry for reduced-scale seismic testing. *Bulletin of earthquake engineering*, 12(6), 2557-2581.
- [40] Perales, R. (2007). *Modélisation du comportement mécanique par éléments discrets des ouvrages maçonnés tridimensionnels. Contribution à la définition*

Références bibliographiques :

d'éléments de contacts surfaciques (Doctoral dissertation, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc).

[41] Pourrat, H. (2009). Ouvrage de maçonnerie. *Journal of Structure*,

[42] Reddy, B. V., & Vyas, C. V. U. (2008). Influence of shear bond strength on compressive strength and stress-strain characteristics of masonry. *Materials and Structures*, 41(10), 1697-1712.

[43] Reddy, J. N. (1984). A simple higher-order theory for laminated composite plates.

[44] Rekik, A., & Lebon, F. (2012). Homogenization methods for interface modeling in damaged masonry. *Advances in Engineering Software*, 46(1), 35-42.

[45] Sacco, E. (2009). A nonlinear homogenization procedure for periodic masonry. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 28(2), 209-222.

[46] Salamon, M. D. G. (1968, November). Elastic moduli of a stratified rock mass. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 5, No. 6, pp. 519-527). Pergamon.

[47] Samarasinghe, W., & Hendry, A. W. (1980). The tensile of brickwork under biaxial tensile and compressive stress. In *Proc. 7th International Symposium on Load Bearing Brickwork, London* (pp. 129-139).

[48] Serpieri, R., Alfano, G., & Sacco, E. (2015). A mixed-mode cohesive-zone model accounting for finite dilation and asperity degradation. *International Journal of Solids and Structures*, 67, 102-115.

[49] Stefanou, I., Sab, K., & Heck, J. V. (2015). Three dimensional homogenization of masonry structures with building blocks of finite strength: A closed form strength domain. *International Journal of Solids and Structures*, 54, 258-270.

[50] Taliervo, A. (2014). Closed-form expressions for the macroscopic in-plane elastic and creep coefficients of brick masonry. *International Journal of Solids and Structures*, 51(17), 2949-2963.

[51] Valente, M., & Milani, G. (2016). Seismic assessment of historical masonry towers by means of simplified approaches and standard FEM. *Construction and Building Materials*, 108, 74-104.

[52] Van der Pluijm, R. (1992). Material properties of masonry and its components under tension and shear.

Références bibliographiques :

[53] Vasconcelos, G., & Lourenço, P. B. (2009). Experimental characterization of stone masonry in shear and compression. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3337-3345.

[54] Vintzileou, E., Mouzakis, C., Adami, C. E., & Karapitta, L. (2015). Seismic behavior of three-leaf stone masonry buildings before and after interventions: Shaking table tests on a two-storey masonry model. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(10), 3107-3133.

[55] Youzera, H., Meftah, S. A., Challamel, N., & Tounsi, A. (2012). Nonlinear damping and forced vibration analysis of laminated composite beams. *Composites Part B: Engineering*, 43(3), 1147-1154.

[56] Youzera, H., & Meftah, S. A. (2017). Nonlinear damping and forced vibration behaviour of sandwich beams with transverse normal stress. *Composite Structures*, 179, 258-268.

[57] Zhen, W., & Wanji, C. (2008). An assessment of several displacement-based theories for the vibration and stability analysis of laminated composite and sandwich beams. *Composite Structures*, 84(4), 337-349.