

EFFET DE L'ANGLE ET LA LONGUEUR DE LA BIELLE DIAGONALE SUR LA RÉPONSE D'UN CADRE EN BÉTON ARMÉ AVEC MUR DE REMPLISSAGE EN MAÇONNERIE

EFFECT OF ANGLE AND LENGTH OF DIAGONAL STRUT ON THE RESPONSE OF A REINFORCED CONCRETE FRAME WITH MASONRY INFILL WALL

Réception : 05/10/2022

Acceptation : 05/12/2022

Publication : 05/01/2023

ZITOUNI Mohamed Rafik¹, AKNOUCHE Hacene², HADID Mohamed³¹Laboratoire des Travaux Publics, Ingénierie de Transport et Environnement (LTPiTE)- École Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP), e-mail : zitouni.mohamed.rafik.95@gmail.com²Centre National de Recherche Appliquée En Génie Parasismique (CGS), e-mail : haknouche_70@yahoo.fr³Laboratoire des Travaux Publics, Ingénierie de Transport et Environnement (LTPiTE)- École Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP), e-mail : hadid_mohamed2003@yahoo.fr

Résumé- Le mode de construction en béton armé avec mur de remplissage en maçonnerie (BAMR) est un mode très répandu à l'échelle mondiale. Néanmoins, son comportement sismique reste un domaine très hostile pour les ingénieurs comme pour les chercheurs. Dans ce travail, on cherche à explorer l'influence des paramètres dimensionnels (longueur et angle) de la bielle diagonale des murs de remplissages. Pour cela, on procède d'abord par un calibrage de la technique de modélisation proposé par Crisafulli, 1997, en utilisant les résultats expérimentaux effectués au Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). Ce calibrage a montré que le mur présente un module d'élasticité de 17 GPa et une résistance maximale de 7 MPa développée à une déformation de 0,1%. Ensuite, une étude paramétrique est réalisée sur les paramètres en question (longueur et angle de la bielle diagonale) en appliquant séparément des variations allant de -30% à +30% avec un pas de 10% sur chacun des deux paramètres par rapport au modèle calibré. Les résultats ont montré une sensibilité notable de la résistance maximale, l'énergie de dissipation et la réponse hystérétique du cadre rempli vis-à-vis de cette variation.

Mots - clés : Mur de remplissage en maçonnerie, Calibrage numérique, Modélisation par éléments finis, Lois de Comportement, Seismostruct.

Abstract- The reinforced concrete construction mode with masonry infill wall (RCWM) is a very popular worldwide mode, nevertheless its seismic behavior remains a very hostile field for engineers as well as for researchers. In this work we seek to explore the influence of dimensional parameters (length and angle) of the diagonal strut of the infill walls for that we proceed first by a calibration of the modeling technique proposed by (Crisafulli 1997) using the experimental results carried out in the national earthquake engineering research center (CGS), this calibration showed that the infill wall presents a modulus of elasticity of 17 GPa and a maximum strength of 7MPa developed at 0,1% of strain, then a parametric study was conducted on the parameters in question (length and angle of the diagonal strut). by applying separately variations ranging from -30% to +30% with a step of 10% on each of the two parameters compared to the calibrated model, the results showed a significant sensitivity of the maximum resistance, energy dissipation and hysteretic response of the frame filled towards this variation.

Keywords : Masonry infill wall, Numerical calibration, Finite element modeling, Behavioral Laws, Seismostruct.

1-Introduction

Malgré l'utilisation massive des murs de remplissage (MR), l'évaluation de leur contribution à la performance sismique des cadres en béton armé (BA) reste un domaine hostile pour les ingénieurs comme pour les chercheurs vu que ces remplissages sont considérés généralement comme des éléments non porteurs (non structuraux) et leur rôle a toujours été sous-estimé ou complètement négligé par le code de calcul algérien ainsi que plusieurs codes dans le monde. Cependant, lors des études on a observé une interaction entre les murs de remplissage et les éléments qui le confinent sous excitation sismique. Cette interaction peut affecter d'une manière significative le comportement global de l'assemblage cadre en béton armé avec remplissage en maçonnerie (BAMR), ce qui peut causer une rupture fragile ou prématurée des structures.

Au début des années 60, plusieurs chercheurs s'intéressent à ce sujet et tentent d'évaluer cette contribution en proposant des techniques de modélisation numériques associées à des lois de comportement adaptées à ce type d'élément composite constitué de briques de maçonnerie et de joints en mortier. Ces techniques se présentent sous deux familles principales de modélisation :

- La micro-modélisation.
- La macro-modélisation

La micro-modélisation, apparue dans les travaux de Mallick et Severn en 1968 [1], est une approche qui tente de reprendre tous les modes de rupture des BAMR en modélisant par la technique des éléments finis les unités de maçonnerie ainsi que les joints de mortier de la structure en utilisant un maillage raffiné. D'autres chercheurs ont contribué au développement de cette approche à l'image d'Asterisi, 2008 [2], Manos en 2012 [3] et Ahmed en 2020 [4].

La macro-modélisation est une approche qui tente de modéliser le comportement des BAMR d'une manière globale. Elle se caractérise par sa simplicité et son temps de calcul relativement court qui fait d'elle une technique adaptée

aux grandes structures. Elle a été introduite pour la première fois par Polyakov en 1960 [5] où il a montré que la contribution globale du MR peut être modélisée par une barre diagonale équivalente. Cette proposition sera reprise par plusieurs chercheurs à l'image de Holmes 1961 [6], Smith 1966 [7], Mainstone 1971 [8] et El-Ouali 1991 [9],

Ensuite au XXème siècle, d'autres modèles sont apparus, s'inspirant de l'idée de Polyakov, mais en utilisant plusieurs barres équivalentes pour avoir une distribution plus réaliste du moment fléchissant dans le cadre en béton armé comme le modèle de Chrysostomou, 1991 [10], Crisafulli en 1997 [11] et de Caliò et Pantò en 2014 [12].

Dans cet article, le programme expérimental accompli par le Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS, Algérie) publié dans les travaux d'Aknouche et al., 2019 [13], est brièvement présenté ainsi que la technique de modélisation de Crisafulli, 1997 [11], qui sera utilisée dans la modélisation numérique des spécimens. Ces modèles seront calibrés sur les résultats expérimentaux afin d'étudier l'effet de la longueur et de l'angle l'inclinaison de la barre diagonale équivalente sur le comportement global d'un cadre en béton armé avec mur de remplissage en maçonnerie.

2- Programme expérimental

En 2019, Aknouche et al. ont effectué des essais quasi-statiques sur des modèles réduits à une échelle de « 1/2 » d'un cadre en béton armé avec remplissage en maçonnerie de type «briques en terre cuite creuses» (Fig.1) située à l'étage inférieur d'un bâtiment de quatre étages à usage d'habitation, localisé dans la ville de Zeralda en Algérie classée en zone sismique III (zone de forte sismicité indiquant un coefficient d'accélération de zone à 0,15g) par le code parasismique algérien RPA99/2003 [14]. Les spécimens ont été construits par une main-d'œuvre ordinaire pour se rapprocher le plus possible du comportement réel des cadres [13].

Le programme expérimental consiste à confectionner des cadres en béton armé identiques : deux cadres resteront vides et deux autres seront remplis. Dans notre cas d'étude,

on s'intéressera au troisième spécimen (SP3) présentant un cadre en béton armé complètement rempli avec un mur en maçonnerie Fig.1.



Figure 1 : Photo du spécimen (PS3)[13]

Figure 1 : Picture of the specimen (PS3)[13]

Ce spécimen est soumis à un chargement combiné d'une force verticale de 100 KN appliqué au niveau de la poutre de chargement au droit de chacun des poteaux (Fig.2) pour simuler le chargement des étages supérieurs. Ce chargement est maintenu constant avec 1% de tolérance (1 KN) tout au long de l'expérience et d'un chargement latéral horizontal (Fig.3) appliqué au niveau de la poutre de chargement. [13]

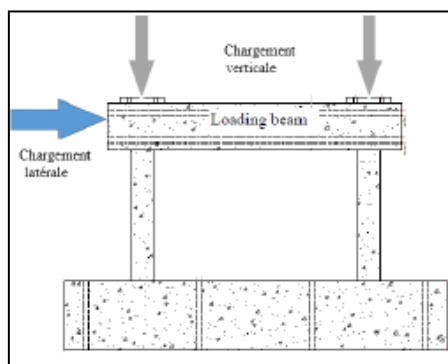


Figure 2 : Schéma de chargement du SP3

Figure 2 : SP3 loading diagram

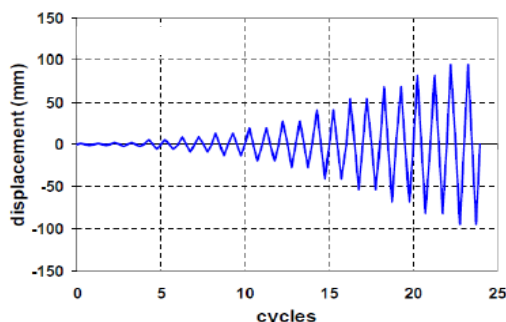


Figure 3 : Courbe de chargement cyclique [13]

Figure 3 : Cyclic loading curve[13]

3- Techniques de modélisation

3.1- Comportement du mur de remplissage

Dans le but de modéliser numériquement le comportement du spécimen SP3, on a choisi d'utiliser une technique proposée dans la littérature par Crisafulli lors de sa thèse de doctorat en 1997 [11] et reprise dans ces travaux avec Carr en 2007 [15] où ils ont démontré que cette technique est capable de reproduire d'une manière adéquate la réponse en plan des cadres avec remplissage. Leur technique figure parmi la famille de la macro-modélisation basée sur une formulation en multi-barres (Fig.4). Elle est implémentée en tant qu'élément de panneau à 4 nœuds et qui prend en compte séparément le comportement en compression et en cisaillement de la maçonnerie en utilisant un mécanisme de doubles barres et un ressort de cisaillement dans chaque direction de chargement [11].

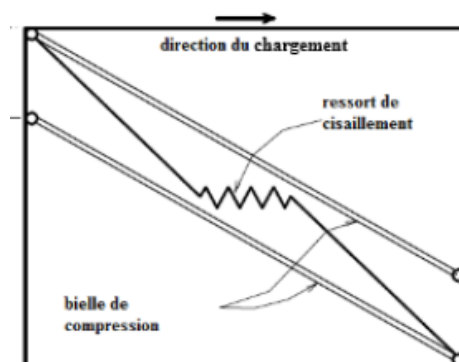


Figure 4 : Modèle à multi-barres [11]

Figure 4 : Multi-bar model [11]

Le comportement axial proposé par Crisafulli, 1997, est un comportement régi par une combinaison de six (06) courbes appelées règles de comportement (Fig.5). Ces règles sont définies avec plus de dix-sept (17) paramètres qui contrôlent leur forme, dont onze (11) influencent d'une manière significative la réponse globale du modèle numérique. Les paramètres en question seront brièvement présentés dans ce qui suit.

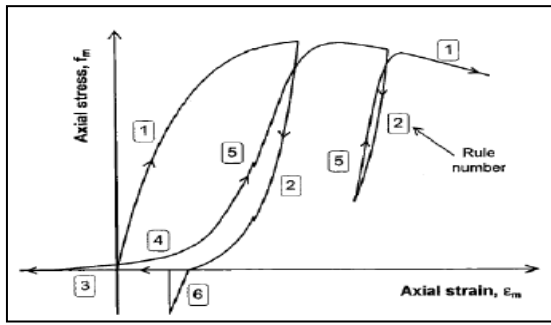


Figure 5 : Courbe de comportement axial [11]

Figure 5 : Axial behavior curve [11]

➤ Paramètres de la courbe enveloppe en compression

Cette courbe (Fig.6) est supposée indépendante de l'historique de chargement et coïncide approximativement avec la courbe de chargement monotone (Pushover). Elle est contrôlée par quatre (04) paramètres (Tab.1).

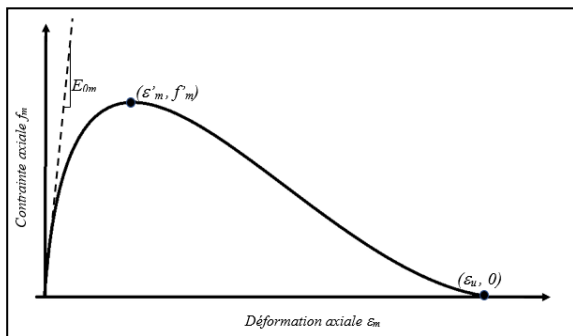


Figure 6 : Courbe enveloppe en compression

Figure 6 : Compression envelope curve

➤ Paramètres de la courbe déchargement complet

C'est la courbe qui contrôle le déchargement depuis la courbe enveloppe jusqu'à l'état de contrainte nulle ($f_m = 0$). Elle est contrôlée en totale par trois (03) paramètres dont un seul est plus déterminant (γ_{un}). Ce paramètre contrôle la pente de la courbe de déchargement E_{un} (Fig.7).

$$E_{un} = \gamma_{un} E_{0m} \quad (1)$$

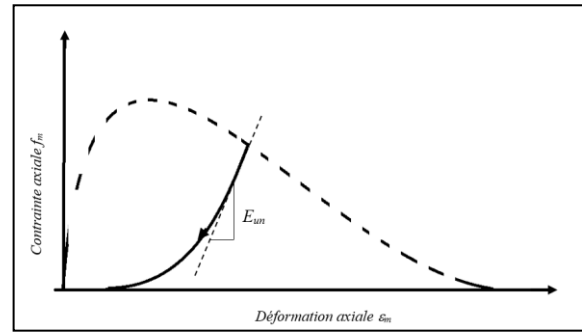


Figure 7 : Courbe de déchargement.

Figure 7 : Unloading curve.

➤ Paramètres de la courbe rechargement complet

La courbe de rechargement commence après un déchargement complet et se termine quand la courbe enveloppe en compression est atteinte. Elle est contrôlée au totale par quatre (04) paramètres dont un (α_{re}) simule l'effet des cycles de chargement sur la dégradation de résistance (Fig.8).

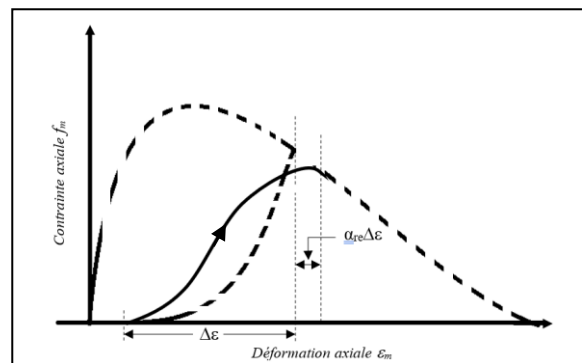


Figure 8 : Courbe de rechargement.

Figure 8 : Reloading curve.

De plus, pour prendre en compte l'effet des fissurations et le phénomène de réduction de la longueur de contact entre le mur en maçonnerie et le cadre environnant, qui ont tendance à diminuer la rigidité des murs de remplissage, cette technique propose de diminuer la section des barres diagonales avec l'augmentation du déplacement axial, comme le montre la Fig.9.

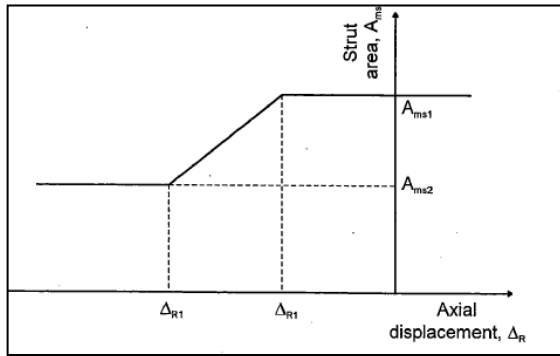


Figure 9 : Courbe de variation de la section des barres diagonale[11]

Figure 9 : Variation curve of the diagonal strut section[11]

La séparation verticale des barres équivalentes h_z varie entre 0,33 et 0,5 de la longueur de contact entre le mur en maçonnerie et le cadre en béton armé « z », calculé par la formule suivante :

$$z = \frac{\pi}{2 \lambda_h} h ; \quad \lambda_h = \sqrt[4]{\frac{E_m t \sin(\theta)}{4 E_c I_c h_m}} \quad (2)$$

Avec :

- z Longueur de contact entre le mur en maçonnerie et le cadre en béton armé ;
- λ_h Raideur relative ;
- t Epaisseur du mur en maçonnerie ;
- d_m Longueur de la diagonale du mur en maçonnerie ;
- h_m Hauteur du mur en maçonnerie ;
- h Hauteur du cadre en béton armé ;
- E_m Module de Young de la maçonnerie ;
- E_c Module de Young du béton ;
- I_c Moment d'inertie des poteaux.

Enfin, le comportement au cisaillement du mur est décrit par une courbe hystérique composée d'une branche linière élastique puis un palier parfaitement plastique modélisant la résistance par frottement (Fig.10), contrôlé principalement par deux (02) paramètres, (Tab.1).

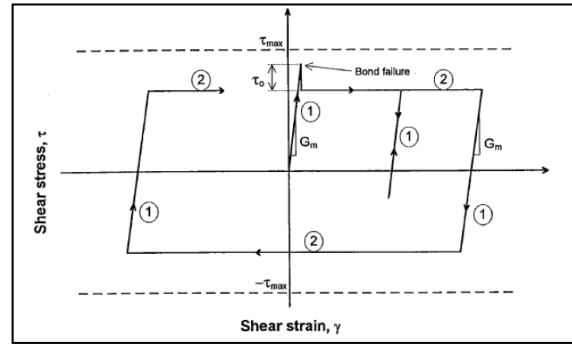


Figure 10 : Comportement au cisaillement [11]

Figure 10 : Shear behavior [11]

3.2- Comportement du béton

Pour le béton (Fig.11), on adopte la loi de comportement proposé par Mander et al. en 1988 [16]. Elle prend en compte le confinement transversal quelle que soit sa forme ainsi que l'historique de la variation de l'état de déformation. Donc, elle permet d'appliquer un chargement cyclique. Les paramètres de cette loi de comportement sont déterminés à partir des écrasements des éprouvettes de bétons réalisés lors des essais expérimentaux.

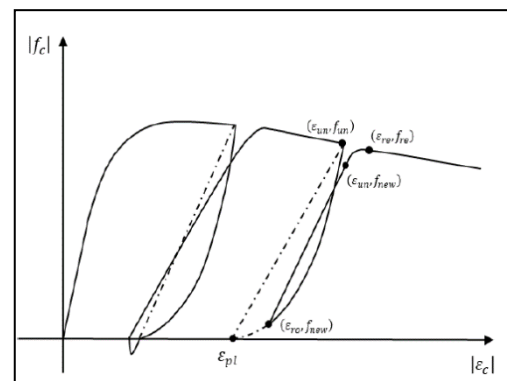


Figure 11 : Loi de comportement du béton. [16]

Figure 11 : Behavioral law of concrete. [16]

3.3- Comportement des aciers

La loi de comportement proposé par Menegotto et Pinto, 1973 [17] (Fig.12) tient compte de l'écroissage isotrope et de l'effet Bauschinger des aciers. Cette loi présente sept (07) paramètres de contrôle dont deux (02) (nuance et module de Young initial) sont fixés à partir des fiches techniques du matériau et les cinq (05) paramètres restants (Tab.1) sont déterminés par le processus de calibrage.

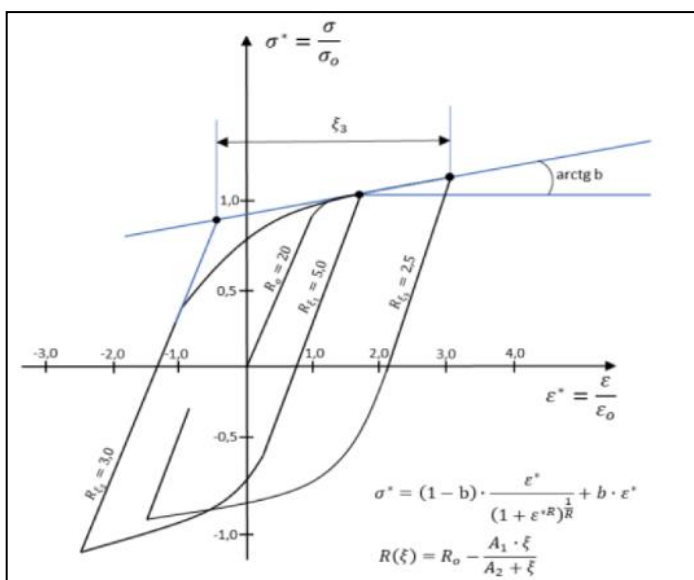


Figure 12 : Loi de comportement de l'acier.

Figure 12 : Behavioral law of steel.

Tableau 1 : Résumé des seize (16) paramètres de contrôle les plus influençant sur la réponse du modèle

Table 1 : Summary of the sixteen (16) most influential control parameters on the model response

| Paramètre | Description |
|---------------|--|
| f'_m | Contrainte maximale supportée par la maçonnerie |
| ϵ'_m | Déformation correspondante à la contraint maximale f'_m |
| E_{0m} | Module de Young initial |
| ϵ_u | Déformation ultime correspondante à la dégradation totale du mur où aucune contrainte ne peut se développer |
| γ_{un} | Constante empirique simulant une augmentation de rigidité lors du déchargement |
| α_{re} | Paramètre empirique traduisant l'influence des cycles de chargement déchargement |
| A_{ms1} | Section initiale |
| A_{ms2} | Section finale |
| h_z | Distance entre les barres diagonales |
| τ_0 | Cohésion relative du mur en maçonnerie |
| τ_{max} | Résistance en cisaillement maximale. |
| R_0 | Paramètre de forme de la courbe de transition initiale |
| $A1$ $A2$ | Coefficients utilisés pour calibrer les changements qui doivent être appliqués au paramètre R_0 afin d'obtenir le paramètre de forme de la courbe de transition actualisée |
| $A3$ $A4$ | Coefficients définissant le degré d'introduction du durcissement isotrope dans la réponse cyclique |

4- Modélisation et calibrage

4.1- Présentation du logiciel

Dans la modélisation numérique du spécimen (Fig.13) on a opté pour l'utilisation du logiciel de calcul par la méthode des éléments finis SeismoStruct 2022. Muni d'une licence académique, ce logiciel est capable de prédire le comportement à de grands déplacements des cadres sous chargement statique ou dynamique en tenant compte des non-linéarités géométriques et de l'anélasticité des matériaux [18].

De plus, les lois de comportement présentées ultérieurement sous le titre « Technique de modélisation » sont déjà implémentées dans ce logiciel.

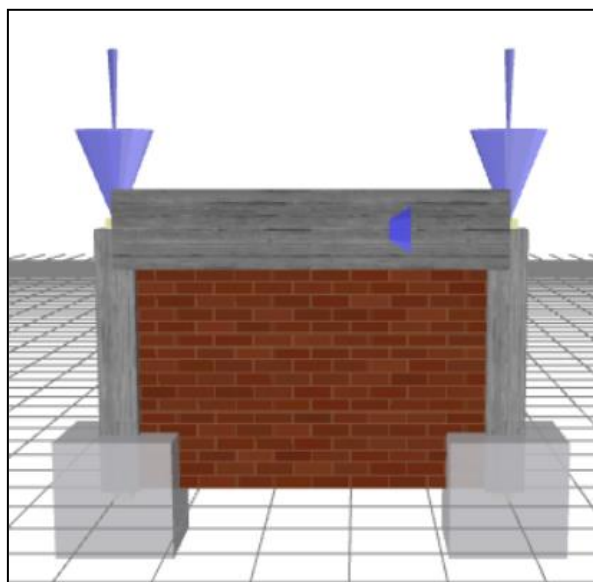


Figure 13 : Modèle numérique du SP3.

Figure 13 : Numerical model of SP3

4.2-Méthode et résultats du calibrage

Le but du calibrage est de déterminer les valeurs des seize (16) paramètres de contrôle des lois de comportements du modèle numérique présentés précédemment (Tab.1) afin de reproduire avec une précision acceptable la réponse expérimentale.

La Fig.14 schématise le processus utilisé pour le calibrage du modèle et qui se résume aux étapes suivantes :

1. Initialiser les variables par des valeurs par défaut ;
2. Déterminer la variable à optimiser ;
3. Fixer la plage de variation de cette variable ;
4. Calculer la structure par SismoStruct pour déterminer la réponse hystérétique, la courbe enveloppe et la courbe d'énergie ;
5. Calculer les erreurs entre les résultats numériques et expérimentaux ;
6. Déterminer la valeur optimale et mettre à jour des variables d'entrée ;
7. Refaire le processus à partir de l'étape 2 jusqu'à que toutes les variables soient optimisées.

Donc, cet algorithme se comporte comme un algorithme d'optimisation avec objectif de minimiser les erreurs calculées à l'étape 5 et qui sont des erreurs cumulées (Err_{env} , Err_{eng} et Err_{hys}) calculées depuis la courbe enveloppe, Eq.(3), la courbe d'énergie, Eq.(4) et la courbe hystérétique, Eq.(5).

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet d'évaluer la sensibilité de la réponse par apport aux variations des paramètres des lois de comportement avec l'avantage d'être adaptées aux modèles avec un nombre important de paramètres influant [19]. De plus, elle est moins coûteuse en temps de calcul. Néanmoins, cette méthode de calibrage néglige d'une façon systématique l'interaction entre les paramètres et dépend fortement des conditions initiales. Dans le but de limiter ses effets et de converger vers une solution dont le taux d'erreur soit acceptable, on fait

répéter cet algorithme en variant à chaque fois la combinaison initiale des paramètres.

déformation ultime ϵ_u de 0,5%. Les résultats du calibrage sont résumés dans le Tab.2.

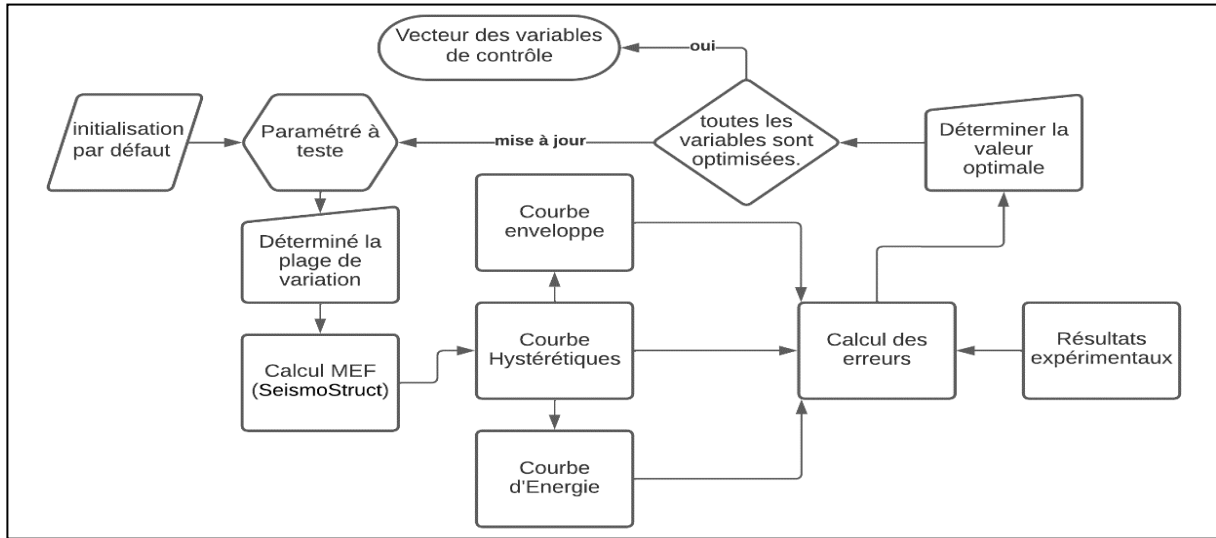


Figure 14 : Algorithme du calibrage

Figure 14 : Calibration algorithm

Tableau 2 : Résultats du calibrage

Table 2 : Calibration results

$$Err_{env}(x) = \sqrt{\frac{\sum((\psi - \tilde{\psi}(x))^2)}{\sum(\psi^2)}} \quad (3)$$

$$Err_{eng}(x) = \sqrt{\frac{\sum((E - \tilde{E}(x))^2)}{\sum(E^2)}} \quad (4)$$

$$Err_{hys}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{\frac{\sum((\phi_i - \tilde{\phi}_i(x))^2)}{\sum(\phi_i^2)}} \right) \quad (5)$$

Avec :

- x Vecteur des paramètres de contrôle ;
- $\psi, \tilde{\psi}$ Courbe enveloppe expérimentale et numérique respectivement ;
- E, \tilde{E} Courbe d'énergie expérimentale et numérique respectivement.
- $\phi_i, \tilde{\phi}_i$ Courbe hystérétique expérimentale et numérique respectivement à la $i^{ème}$ boucle.

Le mur en maçonnerie présente un module de Young initial E_0 de 17 GPa et une contrainte maximale f'_m de 7 MPa développée à une déformation ϵ'_m de 0,1%. Le mur ne développe aucune contrainte et sera complètement détruit à une

| | Paramètre | Valeur |
|-------------------|---------------|----------------------|
| Maçonnerie | f'_m | 7 MPa |
| | ϵ'_m | 0.1 % |
| | E_{0m} | 17 GPa |
| | ϵ_u | 0.5 % |
| | γ_{un} | 2.5 |
| | α_{re} | 0.2 |
| | A_{ms1} | 0.027 m ² |
| | A_{ms2} | 0.014 m ² |
| | h_z | 0.85 m |
| | τ_0 | 300 KPa |
| | τ_{max} | 500 KPa |
| Acier | R_0 | 21 |
| | $A1$ | 20 |
| | $A2$ | 0.1 |
| | $A3$ | 0.02 |
| | $A4$ | 1 |

Les erreurs enregistrées par rapport aux résultats expérimentaux sont de 7,50% pour la courbe enveloppe (Fig.15), 8,46% pour la courbe d'énergie (Fig.16) et 11,25% comme une erreur cumulée moyenne entre les cycles hystériques (Fig.17).

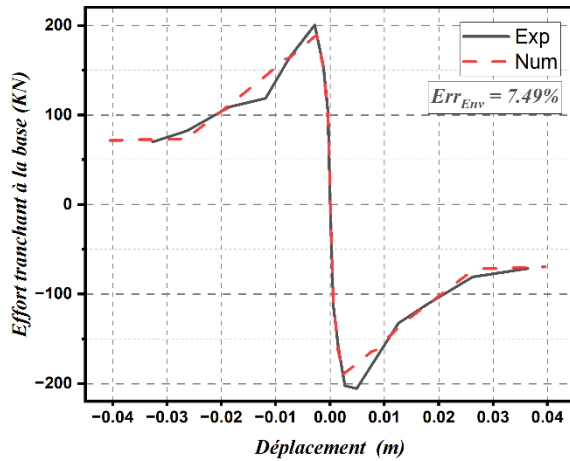


Figure 15 : Courbe enveloppe expérimentale et numérique

Figure 15: Experimental and numerical envelope curve

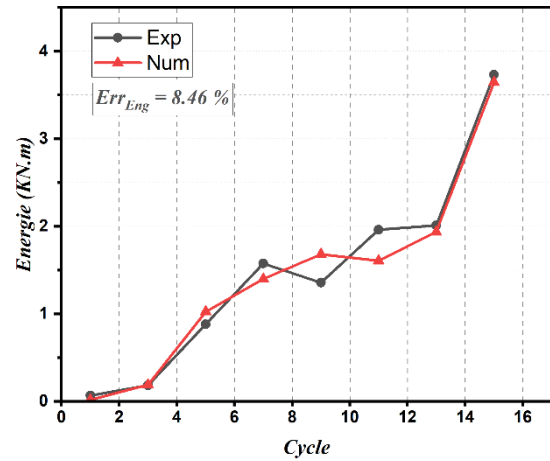


Figure16 : Courbe d'Energie expérimentale et numérique

Figure 16 : Experimental and numerical energy curve

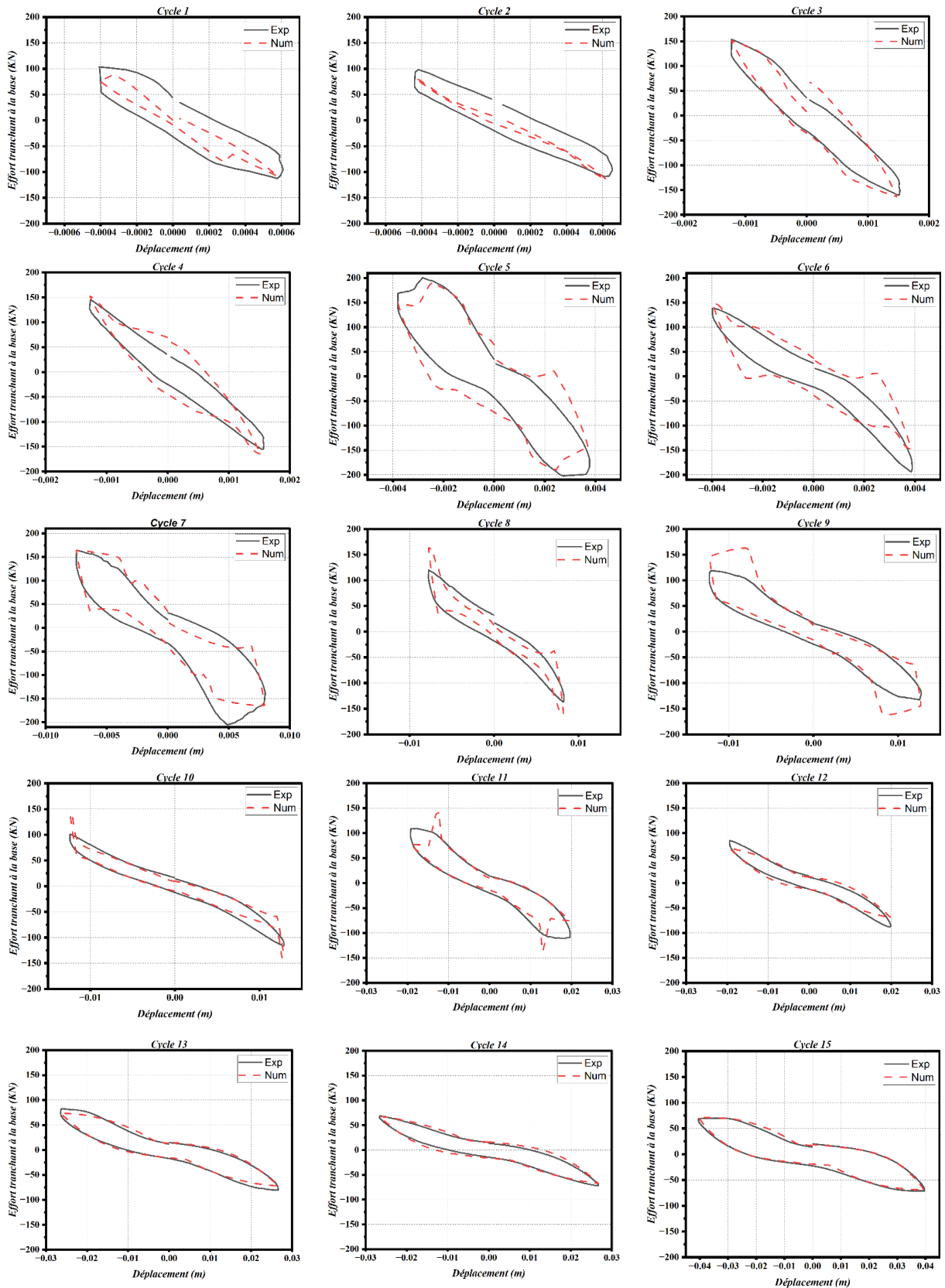


Figure15 : Cycles de la courbe hystérique expérimentale et numérique

Figure 15 : Cycles of the experimental and numerical hysteretic curve

5- Étude Paramétrique sur la géométrie

Cette étude paramétrique vise à investiguer numériquement l'influence et la sensibilité de la réponse globale d'un cadre en béton armé avec remplissage en maçonnerie à la variation de 30% des paramètres dimensionnels, notamment, la longueur et l'angle d'inclinaison de la bielle diagonale (d_m et θ_m respectivement).

Dans le but de se rapprocher des conditions réelles du comportement des murs de remplissage, on prend pour référence dans cette étude paramétrique le modèle calibré précédemment et dont les paramètres de contrôle des lois de comportement des matériaux restent inchangés.

Cette variation, appliquée d'une manière indépendante, conduit inévitablement à des changements dans la géométrie générale du cadre, comme le montrent les Fig.18 et Fig.19. La configuration du cadre est gouvernée par la position du nœud N3. Les Tab.3 et Tab.4 donnent la position du nœud N3 en fonction de la variation imposée pour d_m et θ_m respectivement. Les positions des autres nœuds sont données dans le Tab 5.

Tableau 3 : Position du nœud N3 en fonction du taux de variation de d_m

Table 3: Position of node N3 as a function of the rate of change of d_m

| var. d_m | $d_m(m)$ | X-N3(m) | Z-N3(m) |
|------------|----------|---------|---------|
| -30% | 1.69 | 1.40 | 0.95 |
| -20% | 1.93 | 1.60 | 1.09 |
| -10% | 2.18 | 1.80 | 1.22 |
| 0% | 2.42 | 2.00 | 1.36 |
| +10% | 2.66 | 2.20 | 1.50 |
| +20% | 2.90 | 2.40 | 1.63 |
| +30% | 3.14 | 2.60 | 1.77 |

Tableau 4: Position du nœud N3 en fonction du taux de variation de θ_m .

Table 4 : Position of node N3 as a function of the rate of change of θ_m .

| var. θ_m | θ_m | X(N3) | Z(N3) |
|-----------------|------------|-------|-------|
| -30% | 23.95° | 2.21 | 0.98 |
| -20% | 27.37° | 2.15 | 1.11 |
| -10% | 30.79° | 2.08 | 1.24 |
| 0% | 34.22° | 2.00 | 1.36 |
| +10% | 37.64° | 1.92 | 1.48 |
| +20% | 41.06° | 1.82 | 1.59 |
| +30% | 44.48° | 1.73 | 1.69 |

Tableau 5 : Position des Nœuds N1, N2 et N4 en fonction du Nœud N3.

Table 5 : Position of Node N1, N2 and N4 according to the Node N3.

| Nœud | X | Z |
|------|------|------|
| N1 | 0.00 | 0.00 |
| N2 | 0.00 | Z-N3 |
| N3 | X-N3 | Z-N3 |
| N4 | X-N3 | 0.00 |

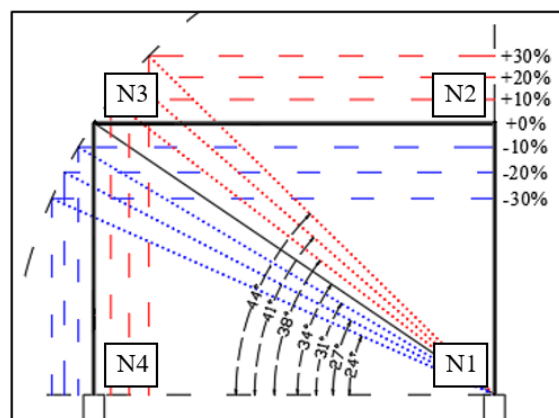


Figure 18 : Géométrie du cadre en fonction de la variation de θ_m

Figure 18 : Geometry of the frame as a function of the variation of θ_m .

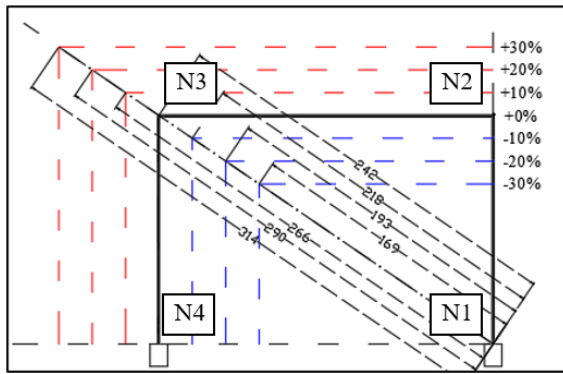


Figure 19 : Géométrie du cadre en fonction de la variation de d_m

Figure 19 : Geometry of the frame as a function of the variation of d_m

Pour chaque variation de d_m et θ_m , on calcule la réponse hystérétique de la structure ainsi que la courbe enveloppe et la courbe d'énergie. Afin de quantifier l'influence de cette variation sur la réponse du modèle numérique, on calcule le taux de variation de la rigidité initiale K_0 , la résistances maximales f_{max} , le déplacements à la résistances maximales d_{fmax} , la courbe hystérétique hys , la courbe enveloppe env et la courbe d'énergie eng , Eq.(6) .

$$Var (P, \Delta x) = \left(1 - \frac{P(\Delta x)}{P_0} \right) \quad (6)$$

Avec :

Var Taux de variation entre les résultats du modèle de référence et du modèle après application de la variation de d_m ou θ_m . On garde le signe de la différence pour enregistrer s'il s'agit d'une augmentation ou diminution ;

P Paramètre de comparaison ($K_0, f_{max}, d_{fmax}, hys, env, ou eng$) ;

Δx Taux de variation appliqué à d_m ou θ_m ($\pm 10\%$, $\pm 20\%$ ou $\pm 30\%$) ;

P_0 Valeur référence du paramètre « P » (0% de variation).

Les résultats de cette étude paramétriques ont montré qu'une augmentation de 30% de d_m ou θ_m conduit à une hausse de 20% dans la rigidité initiale (K_0) de la structure (Tab.6).

La résistance maximale f_{max} montre une insensibilité notable vis-à-vis de la variation de d_m (Fig.20 et Fig.21). Cependant, f_{max} est très affectée par la variation de θ_m car une diminution de 30% dans θ_m cause une chute dans f_{max} de 26% et l'augmentation dans θ_m de 30% provoque un accroissement f_{max} de 17% (Tab.6, Fig.24 et Fig.25). Par contre, le déplacement à la résistance maximale d_{fmax} est beaucoup plus sensible aux variations de d_m qu'aux variations θ_m . En effet, la variation de θ_m n'a aucun effet sur d_m . En revanche, une réduction ou une hausse de 30 % dans d_m cause une décroissance de 36% et une croissance de 37% de d_{fmax} respectivement, (Tab.6). Malgré cette variation notable, elle reste imperceptible à l'échelle d'une structure de ce type (BAMR) comme le montrent la Fig. 20 et la Fig. 21 car ces structures atteignent leur résistance maximale à des petits déplacements de l'ordre du millimètre. De ce fait, une variation de 35% dans d_{fmax} n'affecte pas l'aspect général de la réponse globale de la structure et les courbes enveloppes semblent identiques.

Concernant la variation en énergie $Var (eng)$, on note que cette grandeur est très sensible aux variations des deux paramètres (d_m ou θ_m), mais elle est deux fois plus sensible à leur diminution par rapport à leur augmentation. De plus, les Fig .23, Fig. 26 et Fig. 27 montrent que l'écart entre les courbes d'énergie évolue d'une manière proportionnelle suivant les cycles de chargement et inversement proportionnelle suivant le taux de variation appliqué, sauf que l'augmentation d_m provoque des oscillations de la courbe d'énergie autour de la courbe de référence (Fig.22).

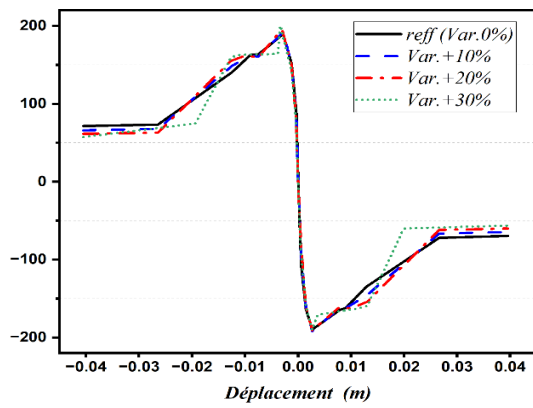


Figure 20 : Courbes enveloppe de d_m (variation positive)

Figure 20 : Envelope curves of d_m (positive variation)

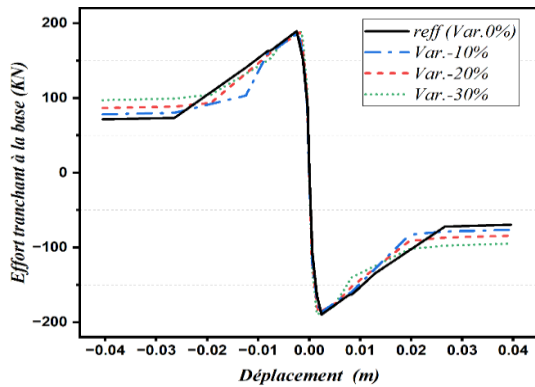


Figure 21 : Courbes enveloppe de d_m (variation négative)

Figure 21 : Envelope curves of d_m (negative variation)

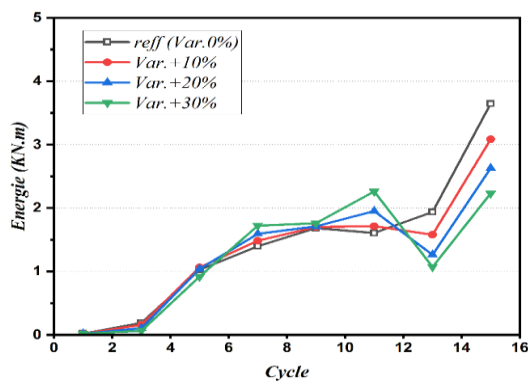


Figure 22 : Courbes d'Énergie de d_m (variation positive)

Figure 22 : Energy curves of d_m (positive variation)

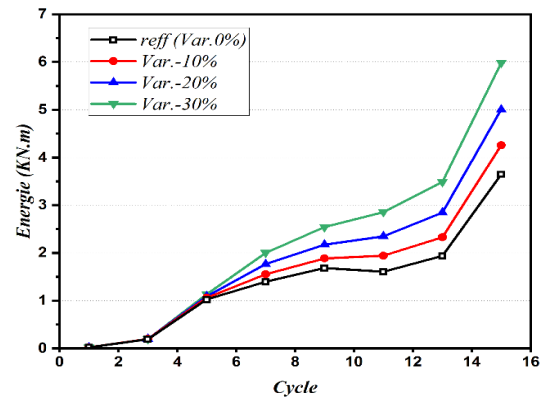


Figure 23 : Courbes d'énergie de d_m (variation négative)

Figure 23 : Energy curves of d_m (negative variation)

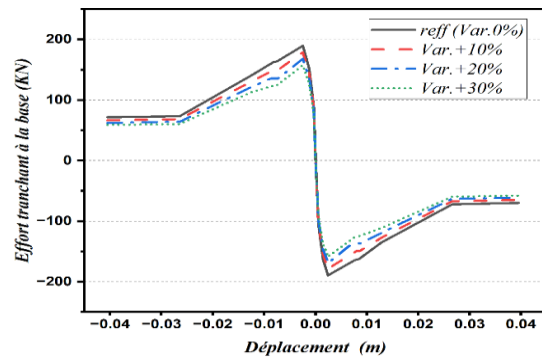


Figure 24 : Courbes enveloppe de θ_m (variation positive)

Figure 24 : Envelope curves of θ_m (positive variation)

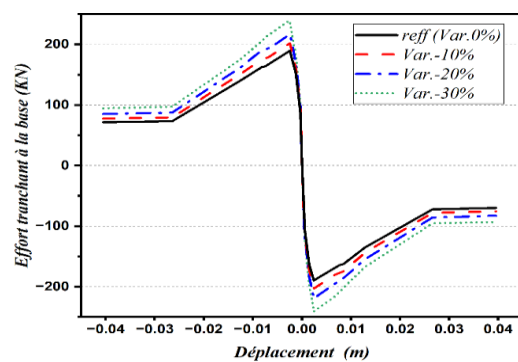


Figure 25 : Courbes enveloppe de θ_m (variation négative)

Figure 25 : Envelope curves of θ_m (negative variation)

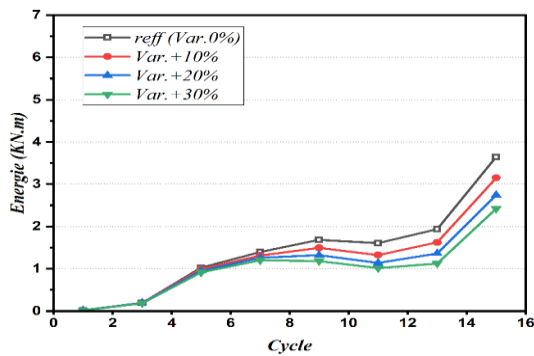


Figure 26 : Courbes enveloppe de θ_m (variation positive)

Figure 26 : Energy curves of θ_m (positive variation)

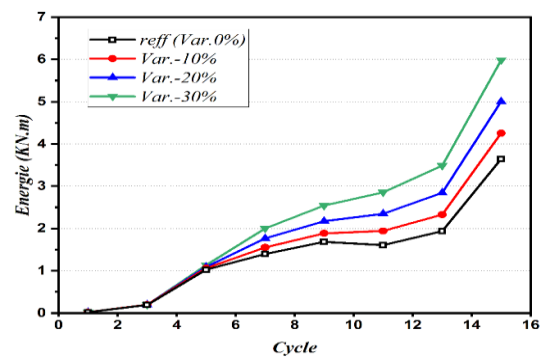


Figure 27 : Courbes enveloppe de θ_m (variation négative)

Figure 27 : Energy curves of θ_m (negative variation)

Tableau 6: Résumé des résultats de l'étude paramétrique

Table 6 : Summary of the results of the parametric study

| Paramètre | Var appliquée | Var (K_0) | Var (f_{max}) | Var (d_{fmax}) | Var (hys) | Var (env) | Var (eng) |
|------------|---------------|---------------|-------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| θ_m | -30% | -16% | -26% | -4% | 25% | 27% | 65% |
| | -20% | -11% | -15% | 0% | 15% | 16% | 38% |
| | -10% | -5% | -7% | 0% | 7% | 7% | 17% |
| | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | 10% | 5% | 6% | 0% | 6% | 7% | 14% |
| | 20% | 10% | 11% | 0% | 11% | 13% | 24% |
| | 30% | 15% | 17% | 0% | 16% | 19% | 33% |
| d_m | -30% | -16% | 0% | 36% | 24% | 15% | 61% |
| | -20% | -9% | 1% | 23% | 15% | 9% | 35% |
| | -10% | -2% | 1% | 14% | 8% | 10% | 15% |
| | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | 10% | 11% | -1% | -15% | 7% | 4% | 12% |
| | 20% | 22% | -3% | -24% | 12% | 8% | 23% |
| | 30% | 22% | -6% | -37% | 17% | 13% | 31% |

6- Conclusion

La capacité de modéliser le comportement des murs de remplissage soumis à des charges latérales dépend fortement du spécimen testé ainsi que de la méthode de modélisation adoptée. Dans notre cas on a pu modéliser numériquement le spécimen du programme expérimental effectué au niveau du Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS) à l'aide de la technique de modélisation en multibarres équivalentes de Crisafulli 1997.

Après un calibrage effectué sur les seize (16) paramètres de contrôle des lois de comportement utilisées dans la modélisation numérique, on a pu aboutir à des résultats numériques qui se calent au mieux possible aux résultats expérimentaux obtenus en laboratoire. Néanmoins, la méthode de calibrage utilisée dans ce travail s'inspire de la méthode One-AT-Time, souvent utilisée dans les analyses de sensibilité, adaptée pour effectuer un calibrage des paramètres un par un, ne prend pas en compte l'effet de l'interaction entre les paramètres des lois de comportement. Pour cela un autre travail est prévu pour la comparaison des résultats de cette méthode avec d'autres algorithmes d'optimisations aux fonctions adjectifs multiples.

Ce calibrage nous a permis d'effectuer une étude paramétrique sur la longueur et l'angle de la bielle diagonal du mur de remplissage qui consiste à appliquer des variations en termes d'augmentation et de diminution de 10%, 20% et 30% par rapport à la géométrie du modèle calibré.

L'étude paramétrique a dévoilé la sensibilité notable de la réponse du cadre vis-à-vis de la variation appliquée où on a observé une relation inversement proportionnelle entre l'angle de la bielle diagonale et la résistance maximale du cadre. Cette relation existe aussi entre cet angle et l'aspect général de la courbe d'énergie de dissipation. Par contre, la longueur de la bielle affecte très peu la résistance maximale du mur. En revanche, son effet sur l'énergie de dissipation est complexe,

car l'augmentation de cette longueur provoque un effet d'oscillation de l'énergie autour de la courbe de référence et sa diminution provoque l'augmentation de l'énergie de dissipation.

Ces résultats numériques doivent toujours être confirmés avec des études expérimentales dans le contexte algérien pour clarifier l'interaction qui existe entre un cadre en béton armé et un mur de remplissage lors d'un évènement sismique et mettre en évidence l'effet de la géométrie sur leurs performances sismiques.

7- Références bibliographiques

- [1] V. Mallick and T. Severn, "the behaviour of infilled frames under static loading," no. April, pp. 639–656, 1968.
- [2] P. G. Asteris, "finite element micro-modeling of infilled frames," *Electron. J. Struct. Eng.*, vol. 8, no. 8, pp. 1–11, 2008.
- [3] G. C. Manos, V. J. Soulis, and J. Thauampth, "the behavior of masonry assemblages and masonry-infilled r/c frames subjected to combined vertical and cyclic horizontal seismic-type loading," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 45, no. 1, pp. 213–231, 2012, doi: 10.1016/j.advengsoft.2011.10.017.
- [4] H. A. Ahmed and K. Shahzada, "Numerical modeling of confined brick masonry structures with parametric analysis and energy absorption calculation," *Int. J. Prot. Struct.*, vol. 12, no. 2, pp. 129–152, 2021, doi: 10.1177/2041419620947730.
- [5] S. V Polyakov, "On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall," *Transl. Earthq. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 36–42, 1960.
- [6] I. L. Holmes, "Load-bearing Masonry design," *New Zeal. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 23–31, 1961.

- [7] B. Stafford Smith and C. Carter, “a Method of Analysis for Infilled Frames,” *Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 31–48, 1969, doi: 10.1680/iicep.1969.7290.
- [8] R. J. Mainstone, “on the stiffness and strengths of infilled frames,” *Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. 49, no. 2, p. 230, 1971.
- [9] T. El-Ouali, “comportement d’un cadre rempli soumis b un chargement cyclique : modklisation pour une analyse dynamique non lindaire,” 1991.
- [10] C. Z. Chrysostomou, “effects of degrading infill walls on the nonlinear seismic response of two-dimensional steel frames,” *Cornell Univ.*, no. April, p. 348, 1991.
- [11] F. J. Crisafulli, “seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills,” *Civil Engineering*. p. 404, 1997. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10092/1221>
- [12] I. Calìo and B. Pantò, “a macro-element modelling approach of infilled frame structures,” *Comput. Struct.*, vol. 143, pp. 91–107, 2014, doi: 10.1016/j.compstruc.2014.07.008.
- [13] H. Aknouche, A. Airouche, and H. Bechtoula, “effect of masonry infilled panels on the seismic performance of a r/c frames,” *Earthq. Struct.*, vol. 16, no. 3, pp. 329–348, 2019, doi: 10.12989/eas.2019.16.3.329.
- [14] CGS, “DTR.B.C.2.48 : Règles parasismiques algériennes RPA 99”, 2003.
- [15] F. J. Crisafulli and A. J. Carr, “Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures,” *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.*, vol. 40, no. 2, pp. 69–77, 2007, doi: 10.5459/bnzsee.40.2.69-77.
- [16] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, “conducted providing the stress-strain model for confined concrete,” *J. Struct. Eng.*, vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826, 1988.
- [17] M. Menegotto and P. E. Pinto, “Method of Analysis for Cyclically Loaded R. C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending,” *Proc. IABSE Symp. Resist. Ultim. Deform. Struct. Acted by Well Defin. Loads*, pp. 15–22, 1973.
- [18] Seismosoft, “SeismoStruct - A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures.” 2022. [Online]. Available: www.seismosoft.com
- [19] M. Matieyendou, “Analyse de Sensibilité pour les modèles dynamiques utilisés en agronomie et environnement,” p. 182, 2009, [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00470153>