

**Centre Universitaire Abdelhafid BOUSSOUF-Mila**

**Institut des Sciences et de la Technologie**

**Département de Génie Civile et Hydraulique**



No. Ref :.....

**Projet de Fin d'Etudes préparé En vue de l'obtention du diplôme  
de MASTER**

**Spécialité : Structures**

**Comparaison entre la maçonnerie chaînée et  
remplie sous la poussée latérale conjuguée  
par un chargement vertical.**

**Réalisé par :**

**Ayyoub KERDOUD  
Messeoud BELKHIR**

**Soutenu devant le jury :**

**M. A. GUETTICHE  
M. DJEGHADER  
Dr. C. BELGHIYAT**

**Président  
Examineur  
Promoteur**

**Année universitaire : 2021/2022**



# *Remerciements*

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de docteur Choayb BELGHIAT, directeur de recherche de notre mémoire. Nous le remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel et aide précieuse, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Enfin, nous remercions tous nos proches et amis, qui nous ont accompagnés, aidés, soutenus et encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

# *Dédicace*

A l'être le plus cher de ma vie, celle qui m'a fait de moi un homme,  
ma Mère,

Qui s'est toujours sacrifiée pour me voir réussir,  
Tes prières et ta présence à mes côtés ont toujours été ma source  
de force pour avancer,  
Quoi que je fasse, ou que je dise, je ne saurai point te remercier  
comme il se doit,

Que ce travail, qui traduit mon estime, ma gratitude et mon  
amour, soit l'accomplissement de tes vœux tant allégués,  
Tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes  
qualités humaines, ton affection et ta tendresse

Merci d'être toujours là pour moi,  
Puisse Dieu te protège, te donne santé et bonheur

A toute ma famille, ma fiancée et mes amis pour leur appui et leur  
encouragement tout au long de mon parcours universitaire

Ayyoub KERDOUD

# Dédicaces

**Je dédie ce modeste travail :**

**A mes parents : source d'encouragement et  
D'inspiration qui ont autant sacrifié pour me voir  
Atteindre ce jour.**

**A mon frère BILAL et mes sœurs. A toute  
la famille BELKHIR .**

**A mes amis : WALID et NADIR**

**A toute la promotion 2022, et à tous mes amis sans  
Exception.**

**A tous ceux que je porte dans mon cœur.**

**MESSAOUD**



## Table des matières

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introduction générale</b>                                  | <b>1</b>  |
| <b>Chapitre I : Etude Bibliographique</b>                     |           |
| <b>I. Introduction</b>                                        | <b>3</b>  |
| <b>I.1 Généralités</b>                                        | <b>3</b>  |
| <b>I.1.1. Historique</b>                                      | <b>3</b>  |
| <b>I.1.2. Définition de la maçonnerie</b>                     | <b>4</b>  |
| <b>I.2 Les composants de la maçonnerie</b>                    | <b>5</b>  |
| <b>I.2.1 Les unités de maçonnerie</b>                         | <b>5</b>  |
| <b>I.2.1.1 Les briques de terre cuite</b>                     | <b>5</b>  |
| <b>a. Les briques pleines ou perforées</b>                    | <b>5</b>  |
| <b>b. Les briques creuses à perforation verticale</b>         | <b>6</b>  |
| <b>c. Les briques creuses à perforation horizontale</b>       | <b>7</b>  |
| <b>I.2.1.2 Les blocs ou parpaing de béton</b>                 | <b>7</b>  |
| <b>I.2.2 Les liants</b>                                       | <b>9</b>  |
| <b>I.2.2.1 Le plâtre</b>                                      | <b>9</b>  |
| <b>I.2.2.2 Les mortiers</b>                                   | <b>9</b>  |
| <b>I.2.3 Les bétons</b>                                       | <b>10</b> |
| <b>I.3 Les avantages et les inconvénients</b>                 | <b>10</b> |
| <b>I.4 Les propriétés de la maçonnerie</b>                    | <b>11</b> |
| <b>I.5 Les différents types de construction en maçonnerie</b> | <b>11</b> |
| <b>I.5.1 Mur en maçonnerie de remplissage</b>                 | <b>11</b> |
| <b>I.5.2 Mur en maçonnerie chaînée</b>                        | <b>12</b> |
| <b>I.6 Conclusion</b>                                         | <b>13</b> |
| <b>Chapitre II : Etude Expérimentale</b>                      |           |
| <b>II.1 Introduction</b>                                      | <b>14</b> |
| <b>II.2 Le programme expérimental</b>                         | <b>14</b> |
| <b>II.3 Protocole et déroulement des tests de poussée</b>     | <b>14</b> |
| <b>II.4 Résultats des tests</b>                               | <b>15</b> |
| <b>II.4.1 Les spécimens chaînés</b>                           | <b>15</b> |
| <b>II.4.2 Les spécimens harpé</b>                             | <b>18</b> |
| <b>II.4.3 Les spécimens remplis</b>                           | <b>22</b> |
| <b>II.5 Conclusion</b>                                        | <b>26</b> |

## **Chapitre III : Etude Théorique**

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>III.1 Introduction</b>                                                          | 27 |
| <b>III.2 Etude sismique</b>                                                        | 28 |
| <b>III.3 Zones sismiques étudiées</b>                                              | 28 |
| <b>III.4 Plan et descente de charges</b>                                           | 30 |
| <b>III.5 Application de la méthode Pushover</b>                                    | 31 |
| <b>III.5.1 Construction du spectre de demande sismique</b>                         | 32 |
| <b>III.5.2 Construction du spectre de capacité</b>                                 | 33 |
| <b>III.5.3 Calcul de la masse équivalente et coefficient de transformation</b>     | 40 |
| <b>III.5.3.1 Les spécimens chaînés</b>                                             | 40 |
| <b>III.5.3.2 Les spécimens harpés</b>                                              | 42 |
| <b>III.5.3.3 Les spécimens remplis</b>                                             | 43 |
| <b>III.5.4 Superposition des spectres et détermination du point de performance</b> | 45 |
| <b>III.6. Conclusion</b>                                                           | 55 |

## **Chapitre IV : Etude Comparative**

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>IV.1. Introduction</b>                                                                 | 57 |
| <b>IV.2. Etude comparative expérimentale</b>                                              | 57 |
| <b>IV.2.1 Rigidité</b>                                                                    | 57 |
| <b>IV.2.2 Résistance maximale</b>                                                         | 58 |
| <b>IV.2.3 Capacité de dissipation d'énergie</b>                                           | 59 |
| <b>IV.3. Etude comparative théorique</b>                                                  | 61 |
| <b>IV.3.1. Vulnérabilité sismique de structures basée sur la méthode des déplacements</b> | 61 |
| <b>IV.3.2. Application sur le cas d'étude</b>                                             | 62 |
| <b>IV. 4 Conclusion</b>                                                                   | 64 |
| <b>Conclusion générale</b>                                                                | 65 |
| <b>Références</b>                                                                         | 66 |

# LISTE FIGURES

## Chapitre I - Etude Bibliographique

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Fig. I.1 :</b> Les briques pleines et les briques perforées .....                       | 6  |
| <b>Fig. I.1 :</b> La brique creuse à perforation verticale.....                            | 6  |
| <b>Fig. I.2 :</b> Les différents types des briques creuses à perforation horizontale ..... | 7  |
| <b>Fig. I.4 :</b> Les différents types des blocs ou parpaing de béton .....                | 8  |
| <b>Fig. I.5 :</b> La maçonnerie chaînée en harpage .....                                   | 12 |

## Chapitre II - Etude Expérimentale

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Fig. II.1 :</b> Test sur le spécimen PC1 (chargement monotone-panneau uniforme)..... | 51 |
| <b>Fig. II.2</b> Réponse sous charge monotone du spécimen chaîné .....                  | 51 |
| <b>Fig. II.3 :</b> Test sur le spécimen PC2 (chargement cyclique-panneau uniforme)..... | 51 |
| <b>Fig. II.4</b> Réponse sous charge cyclique du spécimen chaîné .....                  | 51 |
| <b>Fig. II.5:</b> Test sur le spécimen PH1 ( chargement monotone-panneau harpé) .....   | 51 |
| <b>Fig. II.6</b> Réponse sous charge monotone du spécimen harpé .....                   | 02 |
| <b>Fig. II.7 :</b> Test sur le spécimen PH2 (chargement cyclique-panneau harpé) .....   | 05 |
| <b>Fig. II. 8</b> Réponse sous charge cyclique du spécimen harpé.....                   | 00 |
| <b>Fig. II.9 :</b> Test sur le spécimen PR1 (chargement monotone-panneau rempli).....   | 02 |
| <b>Fig. II.10</b> Réponse sous charge monotone du spécimen rempli .....                 | 02 |
| <b>Fig. II.11 :</b> Test sur le spécimen PR2 (chargement cyclique-panneau rempli) ..... | 01 |
| <b>Fig. II.12</b> Réponse sous charge cyclique du spécimen rempli .....                 | 01 |

## Chapitre III - Etude Théorique

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Fig. III.1 :</b> Maisons d'habitation largement répandus en Algérie .....                                                                      | 01 |
| <b>Fig.III.2 :</b> Carte de zonage sismique de l'Algérie .....                                                                                    | 01 |
| <b>Fig.III.3 :</b> Carte géologique de l'Algérie .....                                                                                            | 22 |
| <b>Fig.III.4 :</b> Vu en plan et en élévation de la structure étudiée .....                                                                       | 25 |
| <b>Fig.III.5 :</b> Spectres de demande élastiques des villes Chlef, Blida, Tiaret et Constantine au format ADRS dans tous les types de sols ..... | 22 |
| <b>Fig.III.6 :</b> Représentation graphique de l'effet d'échelle .....                                                                            | 22 |
| <b>Fig.III.7 :</b> Contraintes et dimensions de spécimen réduit et réel .....                                                                     | 21 |
| <b>Fig.III.8 :</b> L'effet d'échelle sur la courbe de réponse des prototypes harpé, uniforme et rempli .....                                      | 21 |

|                                                                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Fig.III.9 : Idéalisations de courbes de réponse .....</b>                                                                                | <b>21</b> |
| <b>Fig.III.10 : Modélisation de la structure (systèmes MDOF et SDOF) .....</b>                                                              | <b>22</b> |
| <b>Fig.III.11 : Spectres de capacité idéalisés (Elasto-plastique spectres) .....</b>                                                        | <b>22</b> |
| <b>Fig. III.12 : Superposition de spectre de capacité du spécimen chaîné avec spectres demande élastique du sol A, B, C, D, et E .....</b>  | <b>21</b> |
| <b>Fig.III.13 : Superposition de spectre de capacité du spécimen harpé avec spectres demande élastique du sol A, B, C, D et E. ....</b>     | <b>21</b> |
| <b>Fig.III.14 : Superposition de spectre de capacité du spécimen rempli avec spectres demande élastique du sol A, B, C, D, et E .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>Fig.III.15 : Superposition de spectre de capacité du spécimen chaîné avec spectres demande inélastiques du sol A, B, C, D, et E.....</b> | <b>15</b> |
| <b>Fig.III.16 : Superposition de spectre de capacité du spécimen harpé avec spectres demande inélastiques du sol A, B, C, D, et E.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>Fig.III.17 : Superposition de spectre de capacité du spécimen rempli avec spectres demande inélastiques du sol A, B, C, D, et E.....</b> | <b>12</b> |
| <b>Chapitre IV - Etude Comparative</b>                                                                                                      |           |
| <b>Fig. IV.1 Ratios des rigidités de spécimen chaîné par rapport au remplissage .....</b>                                                   | <b>11</b> |
| <b>Fig. IV.2 Ratios des résistances maximales de spécimens chaînés par rapport au remplissage.....</b>                                      | <b>11</b> |
| <b>Fig. IV.3 Courbes de l'évolution de l'énergie dissipée en fonction de déplacement de cycle concerné .....</b>                            | <b>12</b> |
| <b>Fig. IV.4 : Etats limite d'endommagement selon.....</b>                                                                                  | <b>10</b> |

## **LISTE TABLEAUX**

### **Chapitre III - Etude Théorique**

**Tableau III.1** : Les facteurs introduisant l'effet de l'échelle..... 21

**Tableau III.2** : Paramètres de d'obtention des spectres inélastiques ..... 21

**Tableau III.3** : Points de performances et déplacements cibles ..... 12

### **Chapitre IV - Etude Comparative**

**Tableau IV.1** : Drifts et états d'endommagemen



**Thème : Comparaison entre la maçonnerie chaînée et remplie sous la poussée latérale conjuguée par un chargement vertical**

**Résumé :**

La maçonnerie chaînée et la maçonnerie remplie sont deux matériaux totalement distincts. Leurs comportements dans les portiques en béton armé dépendent du degré d'interaction avec les éléments entourés (Poteaux poutre ou chainages). Le présent travail vise à comparer les deux systèmes constructifs en vue de leurs comportements vis-à-vis des tests Pushover. A savoir, des prototypes d'une campagne expérimentale antérieure sur des portiques avec panneau de remplissage en maçonnerie et portiques en béton armé avec panneau de maçonnerie chaînée, ont été utilisés. Par la suite, les deux systèmes ont été étudiés en vue de la séismicité algérienne afin de déterminer le mieux avantageux.

مقارنة بين البناء بالسلاسل والمعبأة تحت الدفع الجانبي مع التحميل الرأسي

الملخص :

البناء بالسلاسل والبناء المحشو هما مادتان متميزتان تمامًا. يعتمد سلوكهم في الإطارات الخرسانية المسلحة على درجة التفاعل مع العناصر المحيطة (أعمدة الشعاع أو السلاسل). يهدف هذا العمل إلى مقارنة النظامين البنائين من حيث سلوكهما فيما يتعلق باختبارات التمرين . على وجه التحديد، تم استخدام نماذج أولية من حملة تجريبية سابقة على إطارات البوابات مع لوحة حشو البناء وإطارات البوابة الخرسانية المسلحة مع لوحة البناء بالسلاسل. بعد ذلك، تمت دراسة النظامين بهدف مقارنة الزلازل الجزائية من أجل تحديد أفضل ميزة.

**Abstract:**

Chained masonry and filled masonry are two totally distinct materials. Their behavior in reinforced concrete frames depends on the degree of interaction with the surrounded elements (beam posts or chainings). The present work aims to compare the two constructive systems in view of their behavior with respect to pushover tests. Namely, prototypes from a previous experimental campaign on portal frames with masonry infill panel and reinforced concrete portal frames with chained masonry panel were used. Subsequently, the two systems were studied with a view to Algerian seismicity in order to determine the best advantage.

## **Introduction générale**

Les structures en béton armé avec des panneaux en maçonnerie sont des structures largement répandus en Algérie. Il existe des méthodes distinctes pour la réalisation de ces derniers. Une première méthode consiste à couler le béton et remplir le portique avec de la maçonnerie. Dans ce cas-là, la maçonnerie est dite de remplissage. Une deuxième méthode est aussi utilisable en Algérie qui consiste à chaîner le panneau de maçonnerie. Le panneau dans cette méthode est construit en premier lieu, et par la suite, le portique est coulé autour des murs en maçonnerie. Dans ce cas-là, les poteaux et la poutre deviennent des éléments de chaînage et la maçonnerie devient une maçonnerie chaînée. L'objectif est d'améliorer la connexion panneau/portique. Dans le même sens, l'harpage de la maçonnerie est utilisé pour mieux renforcer cette connexion. Par ailleurs, le matériau nécessaire pour la construction d'un mur soit par la première méthode ou la deuxième est unique, alors quels sont les avantages de l'emploi du chaînage de la maçonnerie.

L'étude présentée dans notre travail vise à comparer les deux systèmes constructifs afin de définir le système le mieux avantageux. La comparaison réalisée compte, dans une première partie, sur des travaux expérimentaux inspirés depuis la littérature. Dans une deuxième partie, une étude théorique basée sur la méthode Pushover est réalisée afin d'analyser les comportements sismiques des deux systèmes comparés.

Le travail présent est organisé en quatre chapitres comme illustré par la suite :

Nous commençons par le premier chapitre qui s'initie par la définition de la maçonnerie et un bref historique sur l'emploi de celle-ci. Ainsi, ce chapitre englobe tout ce qui touche de près et de loin la maçonnerie et ses composants comme matériau (briques parpaings mortier liant ... etc).

Le deuxième chapitre s'agit d'un rapport sur des travaux de la littérature. Ces travaux consistent d'une série de tests réalisés sur des spécimens à différentes configurations. Des murs en maçonnerie chaînée avec des chaînages uniformes, murs en maçonnerie chaînée avec des chaînages harpés et des murs en maçonnerie de remplissage. Le bilan rapporté dans ce

chapitre nous a permis de comparer les systèmes visés vis-à-vis leurs comportements sous sollicitations latérales.

L'étude sismique réalisée dans notre travail est organisée dans le troisième chapitre. Plus précisément, la définition de la méthode Pushover et ces étapes sont discutées en premier lieu. Par la suite, l'application de celle-ci sur notre cas d'étude est réalisée selon la sismicité Algérienne en passant par la formulation des spectres élastique et inélastique et finalement la détermination des points de performance.

Le quatrième chapitre rassemble tous les résultats obtenus dans le deuxième et le troisième chapitre, sur lesquels, on se base pour conduire des études comparatives expérimentale en termes de rigidité, résistance et capacité de dissipation d'énergie et théorique en terme de drift qui représente la performance sismique de ces structures.

Le travail se terminera par une conclusion générale agglomérant tous les résultats obtenus et par la définition du meilleur système de notre point de vue, ce qui représente notre objective visée.

# **Chapitre I**

## **Etude Bibliographique**

### **I.Introduction**

On appelle maçonnerie un ouvrage composé de matériaux (blocs béton, briques, pierres, etc.) unis par un liant (mortier, ciment, plâtre, etc.). Elle est considérée comme la technique de construction la plus ancienne et la plus répandue. En effet, comme elle n'utilise pour l'essentiel que des petits éléments, elle ne nécessite pas de moyen de manutention important sur le chantier. Elle est donc applicable par toutes les entreprises, et en particulier par l'artisan mâçon qui réalise d'ailleurs la plupart des constructions pavillonnaires. Les murs en maçonnerie doivent répondre à un certain nombre de règles, d'exigences que l'on retrouve dans le document technique unifié DTU 20.1 " ouvrages en maçonnerie de petits éléments parois et murs ".

#### **I.1. Généralités**

##### **I.1.1 Historique**

La première apparition de l'argile dans la construction était à la fin de la préhistoire sous forme de Bauge (mélange de l'argile et de paille hachée ou de foin) ou Torchis (mélange de l'argile et des fibres végétales ou poils d'animaux). Dans la période entre le VIII<sup>e</sup> et le I<sup>er</sup> siècle av. J.-C., l'argile a été connue comme étant le matériau de construction fondamentale, la technique de construction en terre a été alors transmise à l'Afrique du Nord, Espagne et au Sud de la France à travers les colonies phéniciennes et grecques entre le VIII<sup>e</sup> et le VI<sup>e</sup> siècle av. J.-C [1]. Dans l'aube de l'histoire l'emploi de l'argile moulée est apparu dans la Tunisie et l'Espagne. Ensuite, l'argile cuite est apparue et généralisée à l'époque romaine [1].

Les études des archives des ateliers qui reviennent à l'époque Abbasside démontrent l'usage répandu de la terre cuite et moulée dans la capitale Algérienne pour des raisons de prévention et de sécurité, le fait qu'elle était sujette au bombardement naval. A la fin du 15<sup>ème</sup> siècle, les immigrants andalous ont reconstruit la ville de Cherchel par des éléments de terre moulée avec toutes leurs connaissances architecturales apprises depuis l'Espagne [2]. La même technique a également été découverte dans la ville de Sétif depuis les grands travaux d'arpentage et de fouilles archéologiques [3]. Parmi les formes de l'usage de ce matériau, nous trouvons des maisons, des constructions industrielles, militaires et religieuses.

La brique, cette invention orientale (Pays du Mashrek), s'est répandue dans tout le bassin méditerranéen. Le développement du moulage des briques d'argile sur site a eu lieu

probablement en Afrique du Nord avant l'arrivée des Romains et se répandit par la suite dans les pays de la Méditerranée occidentale à différentes périodes de l'histoire [3]. Le point de départ de la fabrication industrielle des briques a commencé avec l'introduction du four d'HoffmanKiln en 1858 dans lequel se font toutes les procédures de fabrication à partir de la phase de préparation jusqu'à la cuisson [4].

### **I.1.2 Définition de la maçonnerie**

La maçonnerie est un ensemble composé de différents éléments (briques, parpaings de béton... etc.) liés généralement par des joints de mortier et se comporte comme un tout [2]. Depuis plusieurs millénaires, la maçonnerie est utilisée par les constructeurs. Ce matériau se retrouve sous forme de palaces, de temples, de pyramides, d'arches, de voûtes, forteresses, de cathédrales et de maisons. La popularité de la maçonnerie s'explique par l'accessibilité, la robustesse en compression, la durabilité et la richesse de couleur et de texture de ce matériau qui est peu coûteux et simple à utiliser [Allen et Lano, 2003][5].

La maçonnerie est un matériau poreux et perméable à l'humidité qui est reconnu depuis longtemps pour sa propriété de protection incendie. Les unités de maçonnerie peuvent être de pierre (découpées dans la roche ignée, sédimentaire ou métamorphique), d'argile (briques ou tuiles moulées et cuites) ou de béton (briques ou blocs vibrés et mûris en moules). Ces unités sont liées entre elles par du mortier composé de chaux hydratée, de sable, d'eau et, plus récemment, de ciment Portland. Les propriétés du mortier telles que l'ouvrabilité, la résistance en compression et la résistance d'adhésion du mortier dépendent particulièrement des proportions des composants[6]. Elle n'utilise pour l'essentiel que des petits éléments, elle ne nécessite pas de moyen de manutention important sur le chantier. Elle est donc applicable par toutes les entreprises, et en particulier par l'artisan maçon qui réalise d'ailleurs la plupart des constructions pavillonnaires[7].

Le rôle de la maçonnerie réside généralement dans la séparation entre deux espaces, elle procure, également, une isolation phonique thermique et pare-feu. Outre son rôle de remplissage, elle est souvent considérée dans les structures sous la forme de murs porteurs. Elle se comporte comme un matériau composé ou composite et sa prise en compte dans l'analyse des structures, notamment dans un calcul sismique, est complexe[8].

## **I.2 Les composants de la maçonnerie**

La maçonnerie d'élévation, que ce soit pour « monter » une façade ou un bâtiment tout entier, utilise divers matériaux tels que le sable, la chaux, les briques et le béton. Le parpaing reste cependant le plus utilisé dans la maçonnerie d'élévation. C'est en les reliant entre eux, à l'aide d'un joint de mortier, que s'élèvent au fur et à mesure les rangées du mur.

### **I.2.1 Les unités de maçonnerie**

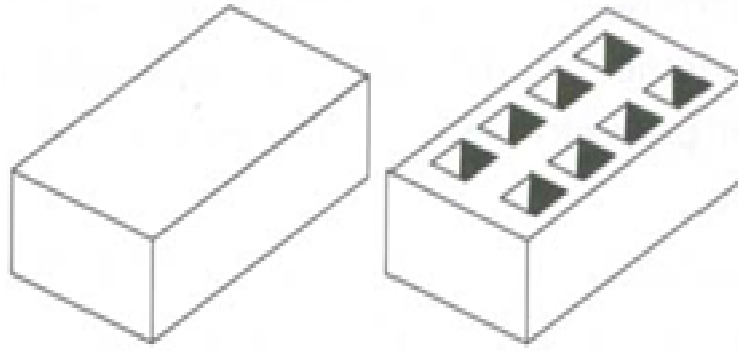
Ce sont les éléments en construisant la maçonnerie qui pouvant être de plusieurs natures : la pierre, la brique, le bloc de béton, la terre, etc.

#### **I .2.1.1 Les briques de terre cuite**

La brique est une pierre artificielle obtenue par cuisson de terres argileuses. Il existe alors deux différents types : les briques pleines ou perforées et les briques creuses.

##### **a. Les briques pleines ou perforées**

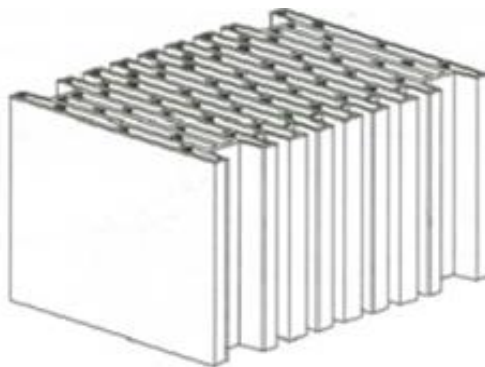
Elles sont des parallélépipèdes rectangles obtenues par pression ou par filage. Elles peuvent rester apparentes ou être enduites. Dans le cas des briques perforées, les perforations sont perpendiculaires au plan de pose. Cependant, la somme des sections des trous est inférieure ou égale à 40% de la section totale, cette valeur est portée à 50 % pour les briques à enduire [6]. Les briques pleines sont à utiliser pour les éléments porteurs apparents et les briques perforées également pour les éléments porteurs isolants. Par ailleurs, elles sont humidifiées et posées à bain de mortier puis mises en place avec une pression uniforme afin que l'épaisseur du joint soit de l'ordre de 8 à 20 mm [6].



**Fig.I.1** : Les briques pleines et les briques perforées [6].

### **b.Les briques creuses à perforation verticale**

Ces briques sont généralement destinées à être enduites, elles dépendent de l'épaisseur de la paroi à bâtir. Les briques creuses sont perforées perpendiculairement à la face de pose dont la somme des sections des trous est inférieure ou égale à 60% de la section totale. Elles contiennent également des nombreuses longues alvéoles ce qui favorise leur résistance thermique (de 12 à 20 alvéoles suivant l'épaisseur). Par ailleurs, ces briques sont couramment posées sur un lit de mortier dont l'épaisseur est d'environ 15 mm [6].

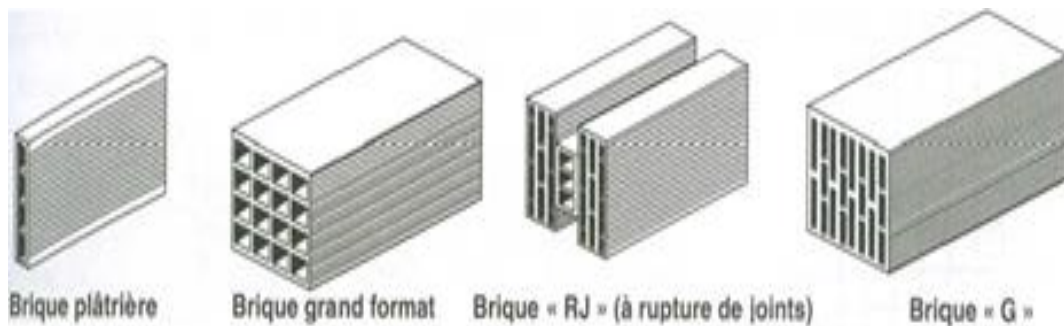


**Fig.I.1** : La brique creuse à perforation verticale [6].

### c. Les briques creuses à perforation horizontale

Ces éléments possèdent des alvéoles parallèles au plan de pose dont la somme des sections est supérieure à 40% de la section totale [6]. On distingue :

- Les briques plâtrières, qui permettent de réaliser des cloisons de distribution ou de doublage.
- Les briques de moyens et de grands formats, elles sont pour réaliser des parois porteuses ou des parois de remplissage. Elles sont à poser à joints décalés sur un lit de mortier dont l'épaisseur est de 10 à 15 mm.
- Les briques à rupture de joints (briques RJ), ce sont des briques améliorées pour l'isolation thermique des parois extérieures.
- Les briques "G" sont caractérisés par un nombre élevé d'alvéoles (7 à 15) et par leurs parois minces. Elles présentent l'intérêt d'avoir une meilleure résistance thermique.



**Fig. I.2 :** Les différents types des briques creuses à perforation horizontale[6].

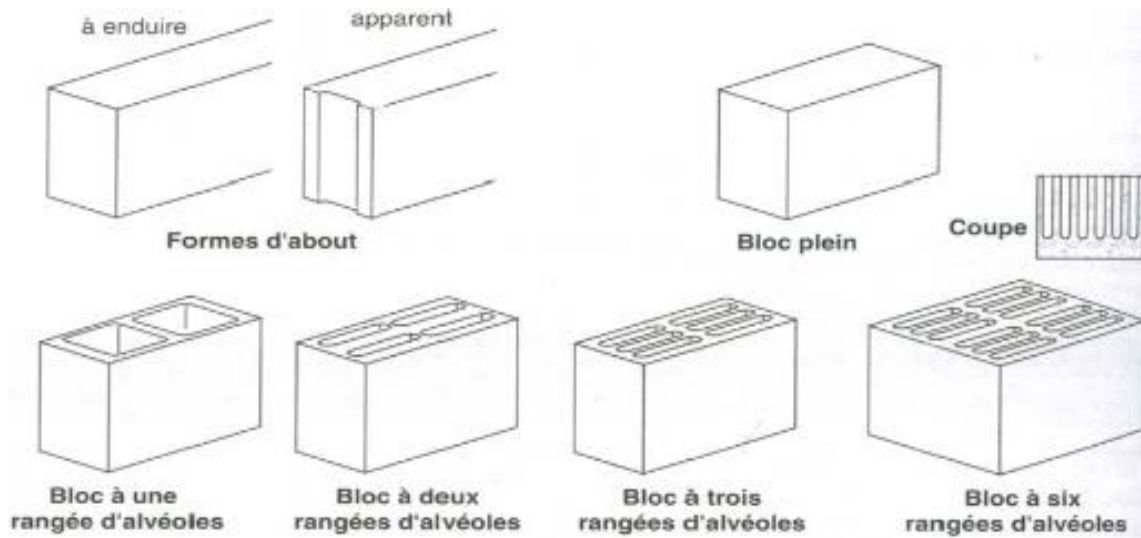
#### I.2.1.2 Les blocs ou parpaing de béton

Ce sont des éléments préfabriqués en béton de forme parallélépipédique, pleins ou creux, dont la longueur n'excède pas 60 cm, ils sont empilés les uns sur les autres à joints décalés, avec interposition d'une couche de mortier. Le constituant principal des blocs ou des parpaings de béton peut être des granulats ordinaires ou des granulats légers (pouzzolane, argile expansée, etc.). Ils présentent cependant une faible résistance mécanique [6].

On distingue généralement trois types de ces éléments :

- Les blocs pleins, sans aucune alvéole ;
- Les blocs perforés, dont la section nette correspond à 75% de la section brute ;

- Les blocs creux, dont la section nette équivaut à 60% de la section brute.



**Fig. I.4 :** Les différents types des blocs ou parpaing de béton [6].

Les blocs pleins en béton de granulats ordinaires sont utilisés pour les parois porteuses reprenant des charges relativement importantes ou pour bâtir des parois répondant à des exigences acoustiques. Par contre, les blocs creux sont à bâtir des façades extérieures ou des murs dont les caractéristiques mécaniques performantes sont à dispenser [6].

Les parpaings sont posés sur un lit de mortier à une épaisseur de 10 à 15mm. Les joints verticaux sont remplis à l'aide de mortier coulé dans les alvéoles formées par les extrémités des blocs. Certains blocs sont conçus de manière à pouvoir placer des armatures verticales et horizontales avant de remplir les alvéoles. Les parpaings permettent également de construire des parois armées reprenant des efforts verticaux et horizontaux [6].

### I.2.2 Les liants

Le liant est le matériau servant à réaliser un mortier. Il peut être de l'argile, de la chaux (hydraulique naturelle ou de synthèse), du ciment, du plâtre.

- L'argile ou la terre crue est le liant présent naturellement dans la terre utilisée en construction.

- La chaux est un liant à base de calcaire, utilisé depuis des millénaires. Elle entre dans la composition des mortiers à maçonner, et peut être aussi utilisée seule avec de l'eau, pour la peinture. Elle sert également en agriculture.
- Le ciment, introduit par Louis Vicat dans la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, sera très utilisé par la suite en raison de ses grandes capacités mécaniques.

### **I.2.2.1Le plâtre**

Le plâtre désigne principalement un matériau de construction à propriétés isolantesou ignifuges, fabriqué industriellement à partir de la matière première rocheuse qu'est le gypse. Le terme désigne, dans la pratique, soit la poudre ou matière poudreuse industrielle de départ (le plâtre sec à aviver), soit la pâte constituée d'un mélange de poudre et d'eau à employer (le plâtre prêt), soit le matériau compact, par exemple sous forme de plaques, voire le revêtement de plâtrage ou l'enduit posé.

### **I.2.2.2Les mortiers**

Le mortier est le mélange d'un liant et d'agréats avec de l'eau. On distingue :

- Le mortier de terre. La terre utilisée en construction est celle qui se trouve à une profondeur variable en dessous de la couche végétale contenant des matières organiques. Cette terre est composée d'un liant (l'argile) et de sable. Il faut réaliser des tests afin de déterminer si la terre que l'on souhaite utiliser peut-être utilisée tel quel comme mortier ou s'il convient de lui ajouter du sable, ou un autre liant.
- Le mortier de chaux est constitué de chaux, de sable et d'eau ; ou bien de chaux, de terre et d'eau. Il est utilisé pour maçonner, pour enduire, généralement associé à la pierre, à la brique, parfois au pisé.
- Le mortier de ciment est constitué de ciment, de sable et d'eau. Il est lui aussi utilisé pour bâtir et pour enduire, généralement avec des éléments de sa classe de résistance. Il est surtout utilisé pour monter des blocs de bétons.
- Le mortier dit bâtard est constitué de chaux, de ciment, de sable et d'eau.
- La colle est un "mortier" récent, utilisé avec les briques à isolation réparti

### **I.2.3Les bétons**

On appelle béton un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant :

- Le béton de terre. La terre utilisée en construction est un béton naturel puisqu'elle contient un liant et des granulats. Le béton de terre est le matériau à partir duquel on fabrique le pisé. On peut aussi faire des dalles en béton de terre, on en trouve chez de grands vignobles.
- Le béton de chaux est constitué de chaux, de sable, de gravier et d'eau. Il s'utilise moins de nos jours, toutefois une utilisation en monuments historiques n'est pas proscrite.
- Le béton de chanvre est constitué de chaux, de chanvre, de sable, et d'eau. On l'utilise comme isolant thermique et phonique en application murale, ou en dallage au sol. Ses avantages sont sa légèreté et son grand pouvoir isolant. Il peut, par exemple, s'utiliser en dalle isolante entre deux niveaux d'une habitation au même titre qu'une dalle allégée au polystyrène. Il est considéré comme écologique.
- Le béton de ciment est constitué de ciment, de sable, de gravier et d'eau. C'est le matériau le plus répandu dans le monde.

### **I.3 Les avantages et les inconvénients**

L'emploi de la brique et de la pierre peut augmenter la masse thermique d'un bâtiment, procurant un confort accru par amortissement de la chaleur de l'été et du froid de l'hiver. Ces matériaux conviennent pour des applications solaires passives. En général, la brique et la pierre n'exigent pas d'être peintes et peuvent ainsi fournir une structure dont le cycle de vie présente un coût réduit ; cependant, une peinture convenablement exécutée réduit le risque d'apparition d'éclats sous les effets du gel. Le bloc de béton ou « aggro » de la variété non décorative est généralement peint ou enduit. L'aspect, surtout s'il est très soigné, peut conférer à la maçonnerie une impression de solidité et de durabilité. Les intempéries, en particulier le gel, peuvent entraîner des dégradations en surface. Ce genre de dégradation est fréquent pour certains types de brique, mais assez rare pour les blocs de béton et la pierre.

Si la brique (à base d'argile) doit être employée, on prendra soin de choisir des briques convenant au climat en question. La maçonnerie doit reposer sur une fondation stable (béton armé, pierres de fondations, ou roche naturelle). Sur des sols à dilatation, cette fondation devra être très soignée et on pourra faire appel à un ingénieur en résistance des matériaux.

### **I.4 Les propriétés de la maçonnerie**

La maçonnerie comme matériau possède comme propriétés ce qui suit :

- Isolation thermique : limite le passage de la chaleur.
- Isolation phonique : limite le passage des bruits extérieurs et intérieurs par les parois de grande inertie.
- Protection contre les intempéries et le feu.
- Assemblage facile : entre le support : pierre, brique, parpaing, et le mortier, etc.
- Stabilité mécanique : pour pallier la diminution des caractéristiques mécaniques du matériau sous sollicitation normales.

### **I.5 Les différents types de construction en maçonnerie**

La maçonnerie est employée couramment tout autour du monde dans la construction des bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels. En générale, on distingue deux différents systèmes de bâtir des murs en maçonnerie : mur en maçonnerie de remplissage et mur en maçonnerie chaînée.

#### **I.5.1 Mur en maçonnerie de remplissage**

Dans le cas d'un mur en maçonnerie de remplissage, le portique en béton armé est réalisé avant la mise en place du panneau. La bonne cohésion de l'interface entre le panneau et le portique est très difficile à obtenir par les méthodes de construction traditionnelles en utilisant des joints de mortier [7]. Dans ce cas, l'ossature porteuse achemine toutes les charges statiques de la structure. Durant le séisme, les panneaux en maçonnerie empêchent l'ossature de se déformer librement. À cause de la faible cohésion, les jeux existants entre l'ossature flexible et les panneaux en maçonnerie, font s'entrechoquer les éléments de la structure [8].

#### **I.5.2 Mur en maçonnerie chaînée**

Dans ce système le mur en maçonnerie est cloîtré par les éléments de l'ossature (poteaux et poutres en béton armée). Ces derniers sont moulés après la mise en œuvre des murs afin d'assurer un lien approprié entre les deux parties de la structure. Les charges statiques de la structure dans ce système sont acheminées par l'ensemble (le panneau et l'ossature porteuse). Durant le séisme, les charges dynamiques (horizontales) sont acheminées par les panneaux en maçonnerie les plus rigides qui jouent alors le rôle d'un contreventement de la structure [8].

Dans le but d'améliorer la cohésion entre le panneau et l'ossature, il est recommandé d'utiliser l'harpage des blocs avec les chaînages [1, 3, 9, 11], et de créer des aspérités pour claveter le béton et les blocs, afin de prévenir leur dissociation pendant la déformation [11]. La figure

(I.6) montre des ossatures avec des murs en maçonnerie chaînée avec harpage, qui se traduit par un coulage du béton en remplacement des demi-briques de rives. Ce système est connu aussi par « le montage à l'italienne ».



**Fig. I.5 :** La maçonnerie chaînée en harpage [11].

Il est à noter d'après ce qui est rapporté au-dessus que la conception et les techniques de construction des murs en maçonnerie sont clairement différentes. Malgré cela, Crisafulli [12] a conclu d'après ses travaux expérimentaux que les réponses des deux systèmes vis-à-vis de charges latérales sont peu similaires. Torrisi et Crisafulli [13] ont par la suite confirmé cette similarité à travers une comparaison expérimentale entre les résultats d'un portique en maçonnerie chaînée et des portiques en maçonnerie de remplissage (travaux de Mihrab et al. [14]). Ils ont noté alors que la première phase du comportement des deux systèmes est caractérisée par l'adhérence parfaite entre le panneau et la structure porteuse. Par la suite, la séparation se produit induisant la perte de cette adhérence. La différence entre les deux systèmes d'après les auteurs [13] se présente au niveau de chargement de séparation, la maçonnerie de remplissage se sépare même par un faible du chargement. Par contre, la séparation dans les murs en maçonnerie chaînée ne se produit que lors d'un chargement plus important. Par ailleurs, Ils ont conclu que, pour les deux systèmes, le panneau en maçonnerie peut être simulé par des modèles similaires mais avec des paramètres calibrés.

### **I.6. Conclusion**

En conclusion, la maçonnerie est un matériau composé ayant comme constituants des briques ou moellons et des joints. Ce matériau a des caractéristiques mécaniques propres. Il est fortement influencé par son environnement et sa mise en place. Par conséquent, il existe des

## *Chapitre I - Etude Bibliographique*

panneaux en maçonnerie chaînée et des panneaux de maçonnerie de remplissage. La différence entre les deux systèmes peut être évaluée par une étude comparative comme illustré par les chapitres suivants.

# **Chapitre II**

## **Etude Expérimentale**

## **II.1 Introduction**

Dans le cadre d'étudier les différentes méthodes de construction des murs en maçonnerie en Algérie, les travaux de Belghiat et al. ont été rapporté dans la partie suivante. Les auteurs ont réalisé des murs réels en maçonnerie avec un échèle d'un demi. Ces tests ont permis de comprendre le comportement de ces structures sous la combinaison de charge horizontales et verticales. Les prototypes et les procédures de tests ont été rapportés dans ce qui suit.

## **II.2Le programme expérimental**

Six spécimens ont été construits à une échelle  $\frac{1}{2}$  tout en conservant le rapport de la hauteur sur la largeur. Pour obtenir des conditions réalistes, les spécimens sont construits sur des longrines préfabriquées en béton armé dont la section verticale vaut  $400 \times 300 \text{ mm}^2$ . Hormis le ferrailage spécifique des longrines, des barres sont mis en attente avec une longueur de 600 mm afin de garantir l'ancrage des poteaux dans la longrine et la continuité de ferrailage.

## **II.3Protocole et déroulement des tests de poussée**

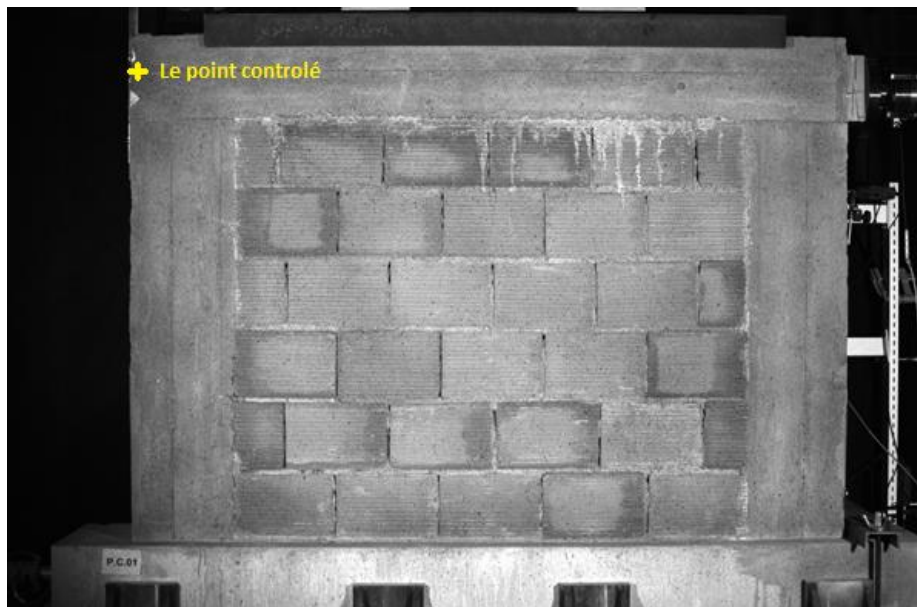
Les six tests de poussée sont réalisés au laboratoire LOCIE à l'aide d'un portique d'essai de grande échelle. Le système est constitué d'un portique métallique adaptable équipé de deux vérins électriques verticaux pour le chargement horizontal. Le chargement latéral est assuré par un vérin hydraulique horizontal. Il est piloté en déplacement, avec une capacité maximale de 300 kN et une longueur de course de 15 cm. Les vérins verticaux sont des vérins électriques pilotés en effort et ayant une capacité maximale de 120 kN.

Cette configuration permet de réaliser des tests de poussée latérale progressive conjuguée à un chargement vertical. Ces tests sont réalisés sur trois types de spécimens, les spécimens du premier type sont des murs en maçonnerie chaînée avec des panneaux en maçonnerie dite uniformes selon la forme de ces derniers. Par contre, les spécimens du deuxième type sont des spécimens harpés autrement dite ce sont des spécimens en maçonnerie chaînée avec harpage ce qui traduit par des indentations laissés dans le panneau avant le coulage du béton. Le troisième type s'agit de la maçonnerie de remplissage.

## **II.4 Résultats des tests**

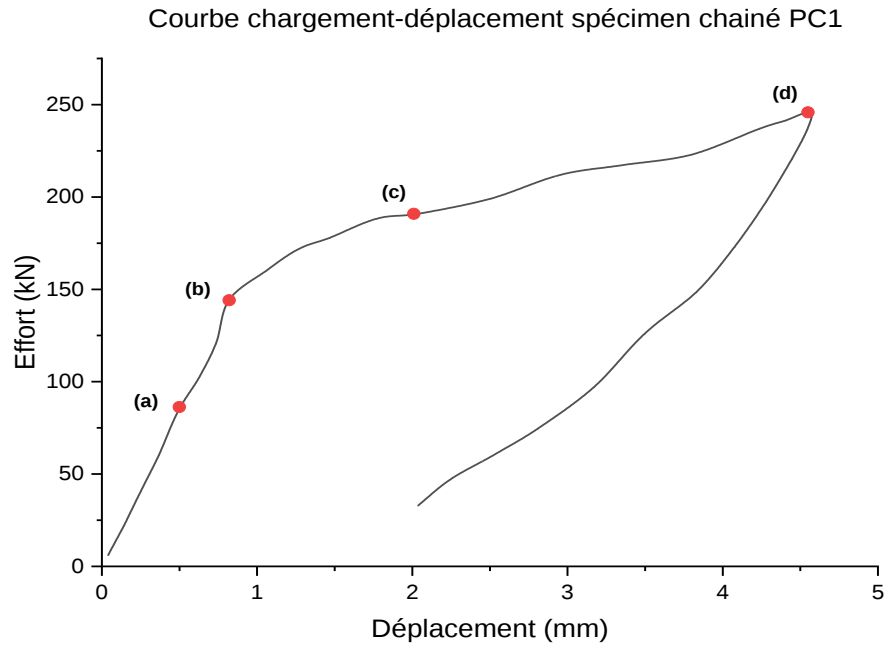
### **II.4.1 Les spécimens chaînés**

Le test sur le spécimen chaîné PC1 est un test de poussée horizontale monotone conjuguée avec un chargement vertical constant de 81 kN. Ce premier spécimen PC1 correspond à un cadre en béton armé coulé autour d'un panneau uniforme de maçonnerie en double parois. Le chargement vertical est appliqué en deux étapes : un palier initial de 1 kN nécessaire pour la mise en contact, suivi par huit pas de 10 kN pour atteindre le chargement vertical final désiré (80 kN). Le chargement réel imposé par le vérin est de 81 kN. Par la suite, la poussée horizontale est appliquée avec une vitesse de 0,017 mm/s (1mm/min).



**Fig. II.1 :** Test sur le spécimen PC1 (chargement monotone-panneau uniforme).

La synchronisation de l'ensemble des données durant le premier test permet de tracer la courbe de la figure (II.2). Cette courbe traduit le déplacement horizontal de la poutre supérieure en fonction de la force appliquée (au point appartenant à la ligne moyenne de la poutre et en opposition au vérin horizontal).



**Fig. II.2**Réponse sous charge monotone du spécimen chaîné.

La courbe présente une phase initiale linéaire, suivie d'une seconde phase pour laquelle la rigidité est modifiée. La première est une phase d'apparence élastique jusqu'à 86 kN. Elle se caractérise par une raideur initiale de 176 kN/mm.

Par ailleurs, la charge maximale est définie par l'effort maximale que la structure peut supporter avant atteinte la ruine. Par le moyen d'une courbe de réponse effort/déplacement, elle correspond au sommet de la courbe concernée. D'après la courbe (II.2), le spécimens PC1 est également présente une résistance (charge maximale) de 240 kN.

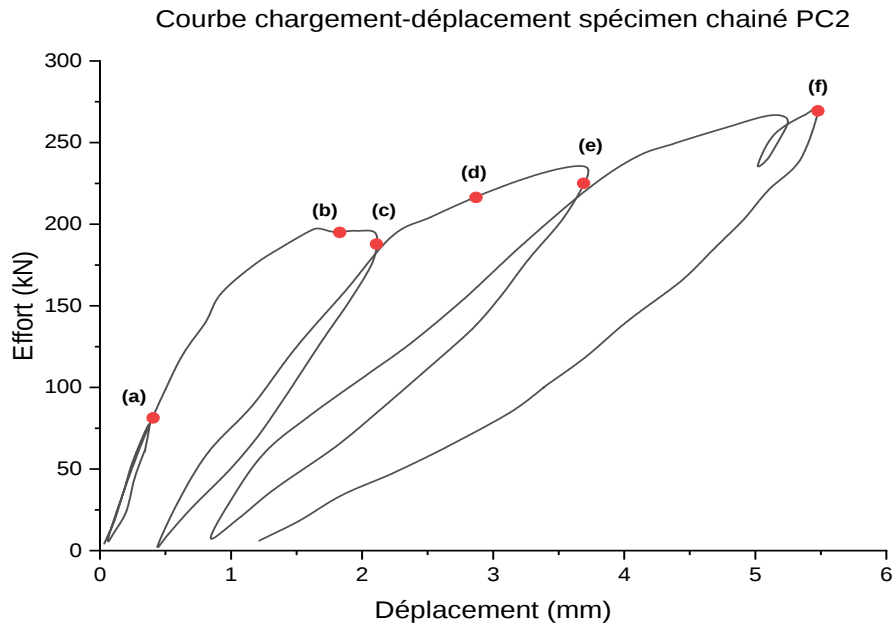
Le deuxième test concerne le spécimen PC2 est un test de poussée horizontale en régime cyclique (charge-décharge) conjuguée avec un chargement vertical constant. Ce deuxième spécimen est similaire au spécimen PC1, il s'agit d'un cadre en béton armé entourant le panneau uniforme en double parois de maçonnerie



**Fig. II.3 :** Test sur le spécimen PC2 (chargement cyclique-panneau uniforme).

D'une manière similaire, la synchronisation de l'ensemble des données permet de tracer la courbe qui traduit le déplacement horizontal de la poutre supérieure en fonction de la force appliquée. La courbe de la figure (II.4) présente alors la courbe de la réponse du spécimen chargé sous le chargement cyclique.

La courbe de réponse du spécimen PC2 est linéaire jusqu'au niveau du chargement de 81 kN représentant une phase élastique caractérisée par une rigidité initiale égale à 200 kN/mm. La charge maximale mesurée dans le présent test est de 280 kN.

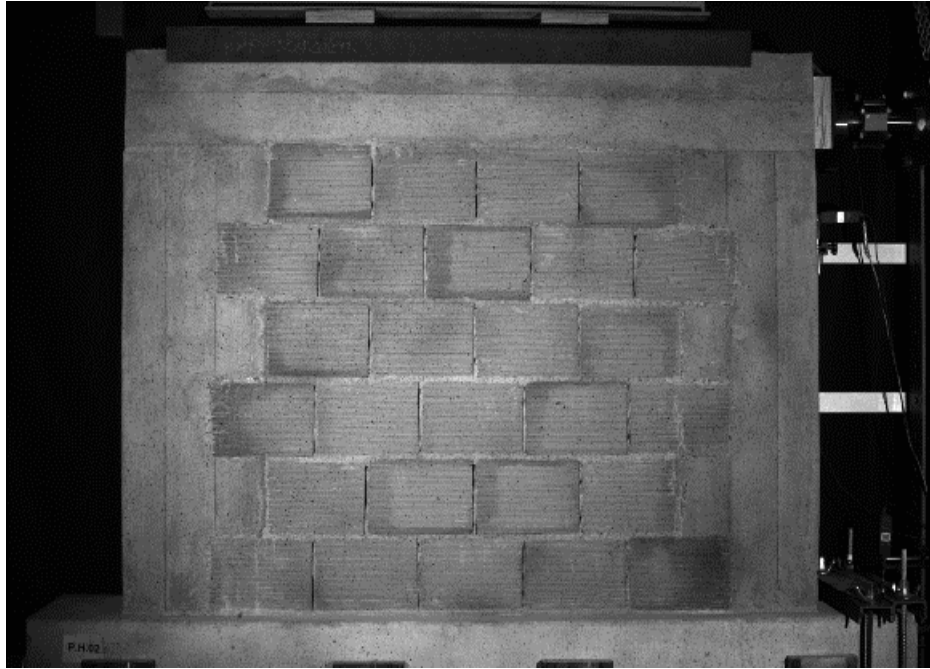


**Fig. II.4** Réponse sous charge cyclique du spécimen chaîné.

L'énergie dissipée est une caractéristique importante des structures surtout vis-à-vis du séisme, elle s'agit de la capacité de la structure à dissiper l'énergie et d'absorber celle-ci ce qui permet de dissiper l'endommagement et d'éviter sa localisation/concentration. Elle est définie comme l'air sous la courbe de réponse effort/déplacement de chaque cycle de charge. Ce paramètre est à déterminer grâce aux tests cycliques ce qui permet de cumuler les aires de tous les cycles réalisés. D'après la courbe de la figure (II.4), l'énergie dissipée du spécimen PC2 est de 3.44 Joules du cycle 1 et 158.95 Joules cycle 2 et 220.61 Joules du cycle 3 et de 332.25 Joules en cycle 4 ce qui donne en énergie cumulée 715.25 Joules.

#### **II.4.2 Les spécimens harpés**

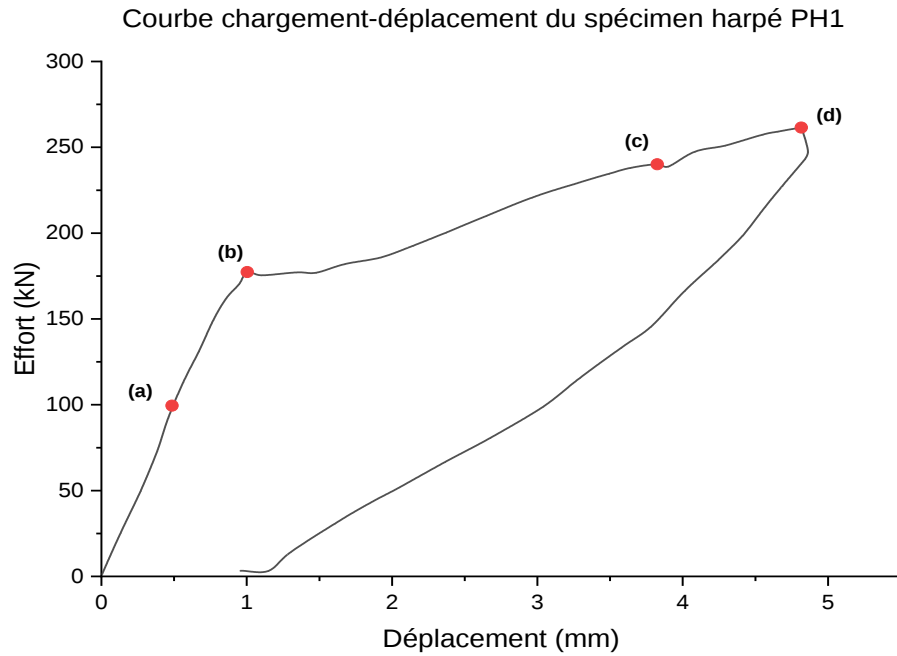
Le troisième test concerne le spécimen PH1, qui est un test de poussée horizontale monotone conjuguée avec un chargement vertical constant. Ce troisième spécimen, noté PH1, se compose d'un cadre en béton armé coulé autour d'un panneau harpé en double parois de maçonnerie.



**Fig. II.5:** Test sur le spécimen PH1 ( chargement monotone-panneau harpé).

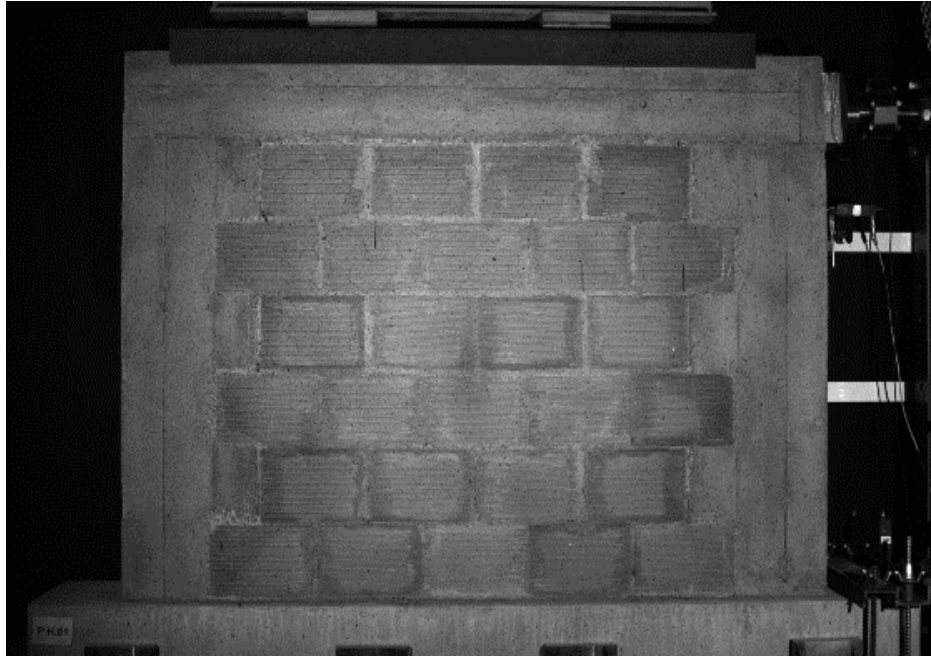
La synchronisation de l'ensemble des données durant le premier test permet de tracer la courbe de la figure (II. 6). Cette courbe traduit le déplacement horizontal de la poutre supérieure en fonction de la force appliquée (au point appartenant à la ligne moyenne de la poutre et en opposition au vérin horizontal).

Il est clair à partir de la courbe que le spécimen PH1 réagit de la même manière que le spécimen PC1. Une première phase linéaire, bornée en force entre 0 et 99 kN caractérise une rigidité initiale de 201 kN/mm. Par ailleurs, la charge maximale définie précédemment et qui correspond au sommet de la courbe présente une résistance (charge maximale) de 280 kN.



**Fig. II.6** Réponse sous charge monotone du spécimen harpé.

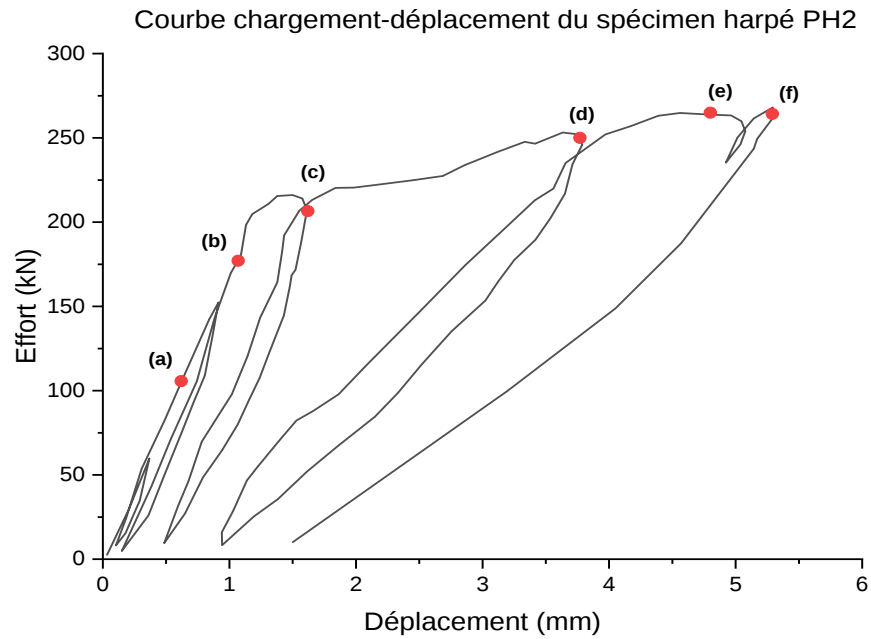
Le quatrième test sur le spécimen PH2 est similaire au deuxième test sur PC2. Une poussée horizontale en régime cyclique (charge-décharge), conjuguée avec un chargement vertical constant, est appliquée de la même manière. Sachant que, le spécimen PH2 est similaire au spécimen PH1 comme montre la figure (II.7), il s'agit donc d'un cadre en béton armé coulé à posteriori entourant le panneau harpé en double parois de maçonnerie.



**Fig .II.7 :** Test sur le spécimen PH2 (chargement cyclique-panneau harpé).

La courbe de la figure (II.8) traduit l'évolution du déplacement mesuré au point appartenant à la ligne moyenne de la poutre et en opposition au vérin horizontal. Cette courbe est linéaire jusqu'au niveau de chargement de 105 kN, elle possède en outre une rigidité initiale égale à 198 kN/mm. La résistance maximale mesurée d'après la courbe est de 275 kN.

L'énergie dissipée définie par l'aire sous la courbe de réponse effort/déplacement de chaque cycle de charge 24.84 Joules sont mesurés en premier cycle, 108.75 Joules en deuxième cycle et 328.22 Joules en troisième cycle et 350.24 Joules en cycle 4 ce qui donne en énergie cumulée totale de 812.05 Joules.



**Fig. II. 8**Réponse sous charge cyclique du spécimen harpé.

#### **II.4.3 Les spécimens remplis**

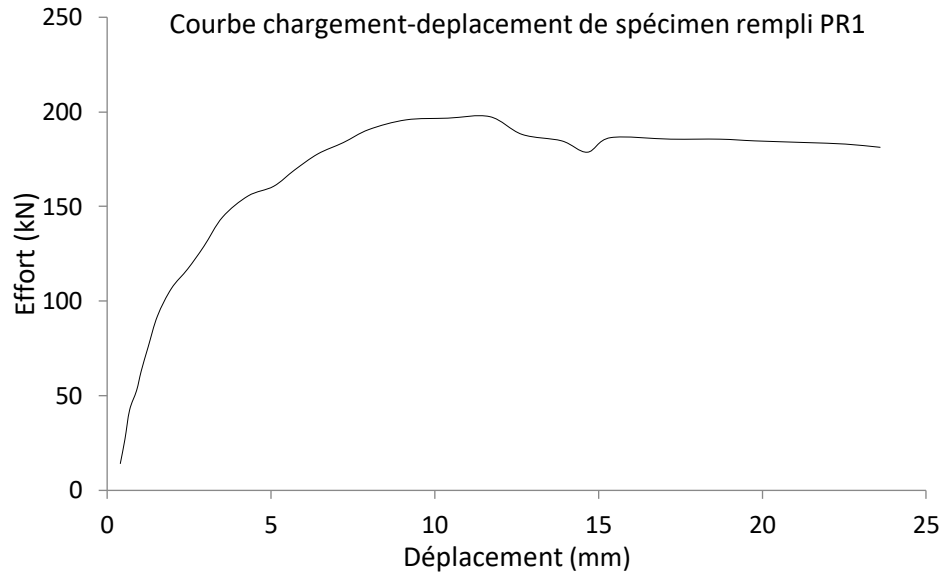
Le test sur le spécimen PR1 est un test de poussée horizontale monotone conjuguée avec un chargement vertical constant de 81 kN. Ce spécimen rempli correspond à un cadre en béton armé avec un panneau de remplissage en double parois. Le chargement vertical est appliqué en deux étapes : un palier initial de 1 kN nécessaire pour la mise en contact, suivi par huit pas de 10 kN pour atteindre le chargement vertical final désiré (80 kN). Le chargement réel imposé par le vérin est de 81 kN. Par la suite, la poussée horizontale est appliquée avec une vitesse de 0,017 mm/s (1mm/min).



**Fig. II.9 :** Test sur le spécimen PR1 (chargement monotone-panneau rempli).

La synchronisation de l'ensemble des données durant le test monotone sur le spécimen rempli permet de tracer la courbe de la figure (II.10) qui traduit le déplacement horizontal de la poutre supérieure en fonction de la force appliquée.

La courbe de la figure (II.10) démontre que la première phase de réponse du spécimen rempli est une phase d'apparence élastique jusqu'à 99 kN et que ce spécimen se caractérise par une raideur initiale de 58 kN/mm. La charge maximale de ce dernier d'après la courbe est d'environ de 197kN.



**Fig. II.10** Réponse sous charge monotone du spécimen rempli.

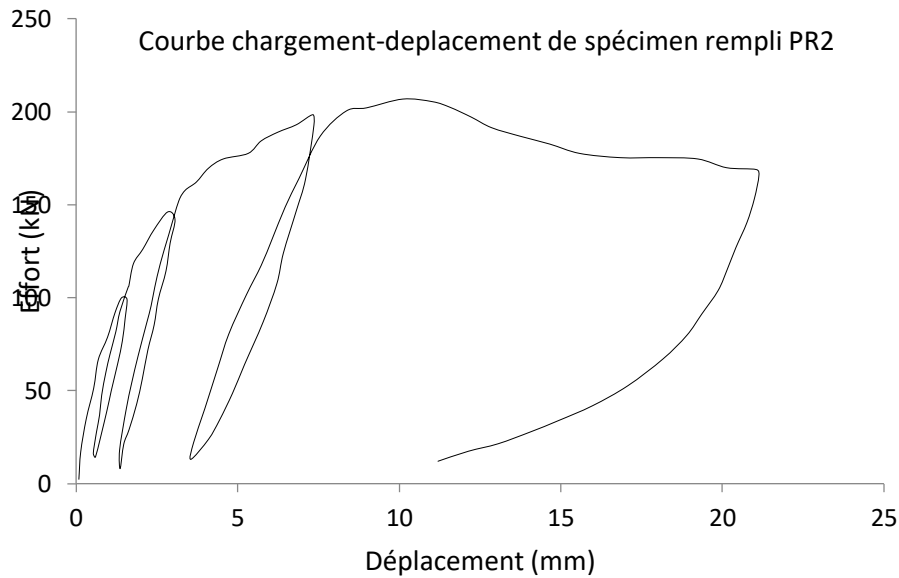
Le test sur le spécimen PR2 est un test de poussée horizontale cyclique conjuguée avec un chargement vertical constant de 81 kN. Ce spécimen PR2 correspond à un cadre en béton armé avec un panneau de remplissage en double parois. L'ensemble de charges est appliqué d'une manière similaire aux tests sur les spécimens PC2 et PH2.



**Fig. II.11** : Test sur le spécimen PR2 (chargement cyclique-panneau rempli).

La courbe de la figure (II.12) traduit l'évolution du déplacement mesuré au point appartenant à la ligne moyenne de la poutre et en opposition au vérin horizontal. Cette courbe est linéaire jusqu'au niveau de chargement de 105 kN, elle possède en outre une rigidité initiale égale à 57 kN/mm. La résistance maximale mesurée d'après la courbe est de 209 kN.

L'énergie dissipée définie par l'aire sous la courbe de réponse effort/déplacement de chaque cycle de charge 29.14 Joules sont mesurés en premier cycle, 137.57 Joules en deuxième cycle et 383.98 Joules en troisième cycle et 995.09 Joules en cycle 4 ce qui donne en énergie cumulée totale de 1545.78 Joules.



**Fig. II.12** Réponse sous charge cyclique du spécimen rempli

## **II. 5 Conclusion**

Les travaux rapportés dans ce chapitre, nous ont permis de conclure que les murs en maçonnerie chaînée et les murs en maçonnerie remplie, malgré qu'ils semblent similaires à l'œil, ils ont des réponses différentes sous sollicitations monotone et cyclique en termes de résistance, rigidité et de la capacité de dissipation d'énergie. En plus, le présent chapitre nous a permis de construire une base de données qui nous servira par la suite dans notre étude comparative entre la maçonnerie chaînée et la maçonnerie remplie.

# **Chapitre III**

## **Etude Théorique**

### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement sismique de structures en béton armé avec panneaux de maçonnerie. Ces structures sont largement répandues en Algérie, leur performance est évaluée vis-à-vis de la faible sismicité et la sismicité élevée. Nous avons étudié les deux systèmes aux cas de villes de Chlef, Blida, Constantine et Tiareten représentant la zone a sismicité élevée, la zone a sismicité moyenne, la zone de la faible sismicité et la zone de sismicité négligeable respectivement.

La méthode adoptée dans ce travail est la méthode statique non linéaire Push over. Cette méthode est basée sur le suivi chronologique de développement des rotules plastiques dans la structure soumise à des charges verticales et latérales (séisme) jusqu'à la ruine. Elle est utilisée auparavant pour évaluer la performance des structures existantes[15, 16] et pour la conception des nouvelles structures[17, 18]. Parmi les méthodes existantes de l'analyse Pushover, la méthode N2 a été choisie par la suite. Cette méthode est proposée par Fajfar et Fischinger[19], à partir du modèle Q développée par Saidii et Sozan (1981). Les auteurs[19] relient la structure à multi degrés de liberté à un seul système équivalent à un seul degré de liberté. Ils supposent alors que la réponse de la structure est dominée par le premier mode fondamental de vibration et que la forme de réponse reste constante[20, 21]. Le spectre inélastique est à reformuler dans cette méthode d'après le spectre élastique par l'intermédiaire de l'amortissement et la ductilité.

La méthode N2 est adoptée dans plusieurs règlements : FEMA-273, FEMA-356 et l'Eurocode 8. Ces étapes se présentent comme suit :

- Obtenir la courbe Pushover effort-déplacement de la structure.
- Transformer la courbe obtenue du système à multi degré de liberté MDOF à celle d'un système à un seul degré de liberté SDOF équivalent.
- Idéaliser la courbe de SDOF en une courbe bilinéaire élastique parfaitement plastique.
- Déterminer la demande sismique de système SDOF équivalent.
- Vérifier la performance au déplacement maximal cible.

La méthode N2 est adoptée dans ce chapitre pour obtenir les drifts maximaux des structures étudiées. Les spécimens précédemment (PC1, PR1 et PH1) étudiés au chapitre (II) sont utilisé comme étant des prototypes des structures avec panneaux de maçonnerie uniformes, harpés et remplis respectivement. Cependant, la performance est évaluée à l'aide de la méthode d'analyse basée sur le déplacement (Displacement-based method).

### **III. 2 Etude sismique**

L'analyse statique non linéaire (Pushover) est adoptée pour étudier le comportement sismique des bâtiments d'habitation en béton armé avec murs en maçonnerie (Fig.III.1). Ces structures sont classiques dans les villes étudiées, elles sont représentées dans ce travail par les portiques précédemment étudiés (PC1 et PH1 et PR1).

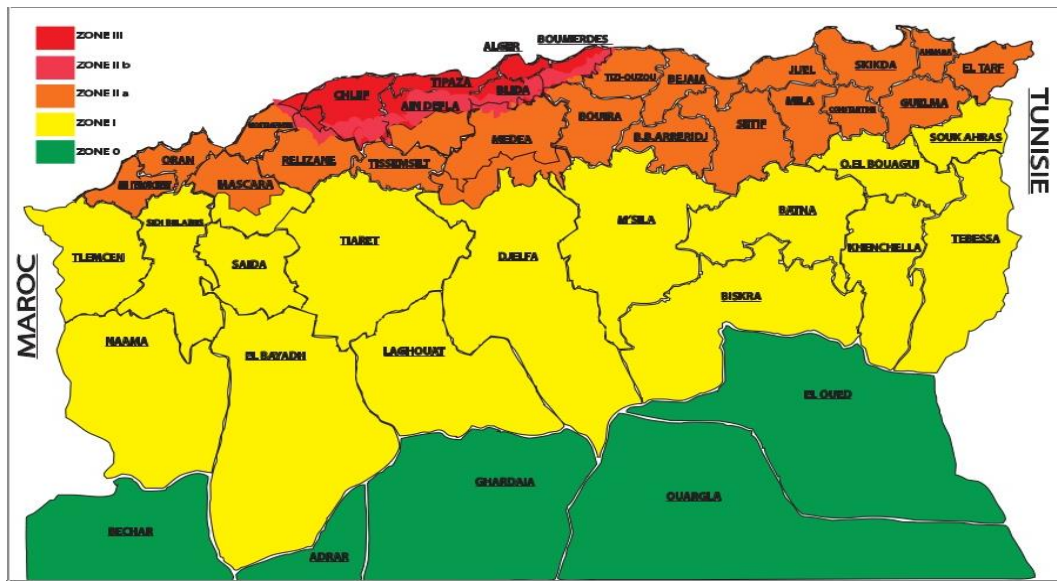


**Fig. III.1 :** Maisons d'habitation largement répandus en Algérie.

L'étude géologique des zones concernées (Chlef, Blida, Constantine et Tiaret) est requise pour construire les spectres élastiques de la demande sismique dans ces villes. Par ailleurs, dans le contexte de tracer le spectre de capacité, la descente de charges d'une structure de deux niveaux à quatre portiques de trois travées est réalisée afin de déterminer les charges permanentes et d'exploitations agissantes sur celle-ci.

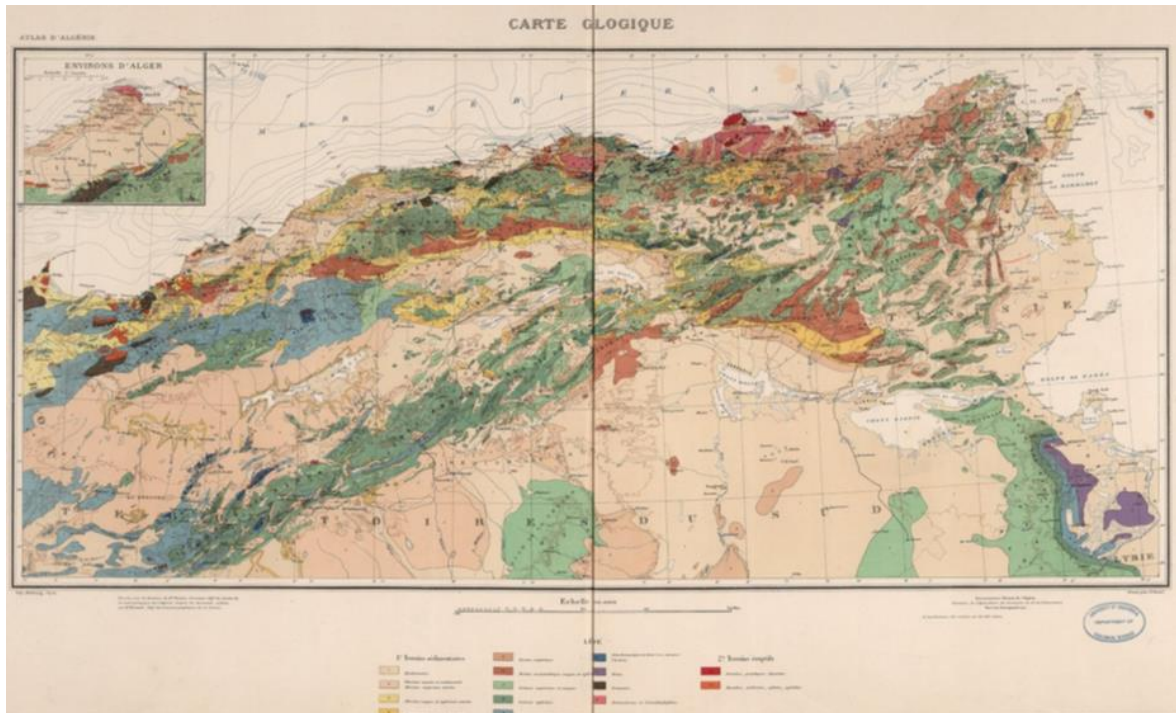
### **III.3 Zones sismiques étudiées**

L'Algérie est un pays méditerranéen connu par sa diversité géographique. Il contient cinq zones sismiques classées selon leurs sismicités. La figure (III.2) illustre le zonage sismique du pays[22]. Sachant que, la zone '0' a une sismicité négligeable, la zone 'I' représente une sismicité faible, zones 'IIa' et 'IIb' ont une sismicité moyenne et la zone 'III' représente une sismicité élevée.



**Fig.III.2 :** Carte de zonage séismique de l'Algérie[22].

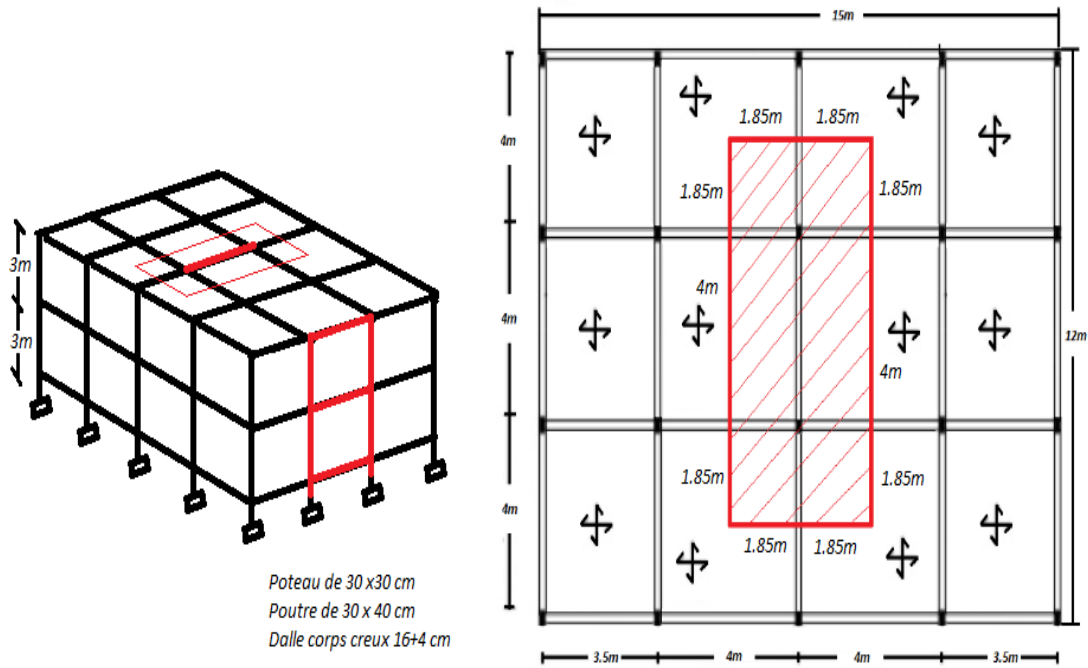
La ville de Tiaret, Constantine, Blida et Chlef se situent dans la zone 'I', 'IIa', 'IIb' et 'III' respectivement[22]. Ce qui conduit à étudier tous les cas de la sismicité. Selon la carte géologique représentée sur la figure (III.3), l'Algérie englobe tous les types de sol A, B, C, D, et E. L'étude alors est réalisée en concernant les différents types de sols existants.



**Fig.III.3 :** Carte géologique de l'Algérie[23].

### III.4 Plan et descente de charges

Les portiques étudiés dans le présent travail font partie d'une structure d'usage d'habitation de deux niveaux (RDC + 1 étage). L'ossature porteuse de cette structure est de type portiques poteaux-poutres en béton armé. Elle est composée de quatre portiques, chacun est formé de quatre travées comme le montre l'image de la figure (III.4), la hauteur d'étage est de 3m et la longueur de la travée est de 4m. Ce qui présente le genre de structure le plus répandu en Algérie. La dalle des niveaux est composée de corps creux (4x16) cm. Les poteaux et les poutres possèdent respectivement les sections (30x30) cm<sup>2</sup> et (40x30) cm<sup>2</sup>. Les murs de cloison sont des panneaux de maçonnerie qui, théoriquement, ne jouent pas de rôle structurel.



**Fig.III.4 :** Vu en plan et en élévation de la structure étudiée.

Le prototype étudié représente le portique le plus sollicité dans la structure (souligné par des lignes rouges sur la figure en dessus). Il supporte l'ensemble de charges permanentes et d'exploitation correspondant à la zone sélectionnée (4m x 8m). La descente de charges est réalisée, selon les instructions de l'Eurocode 8, sur la surface correspondante pour déterminer les charges verticales agissantes sur le portique concerné.

Les charges verticales associées aux niveau 2 et 1 selon la combinaison de charge sismique (EN 1991-1-1 :2002) d'un étage a occupation indépendante est :  $[G+(0.5 \times 0.3) Q + A_{Ed}]$ . En négligeant la composante verticale de l'action sismique, la charge associée au niveau 2 est de 182.67 kN, et celle associée au niveau 1 est de 221.21 kN.

### III.5 Application de la méthode Pushover

L'objectif de ce chapitre consiste à évaluer le comportement sismique des murs en maçonnerie et à comparer les deux systèmes constructifs adoptés (harpage, chaînage uniforme et remplissage). La méthode N2 proposée par Fajfar et Fischinger[19] est utilisée pour atteindre cet objectif. Les démarches suivies et les calculs réalisés pour atteindre ce but sont rapportés comme suite :

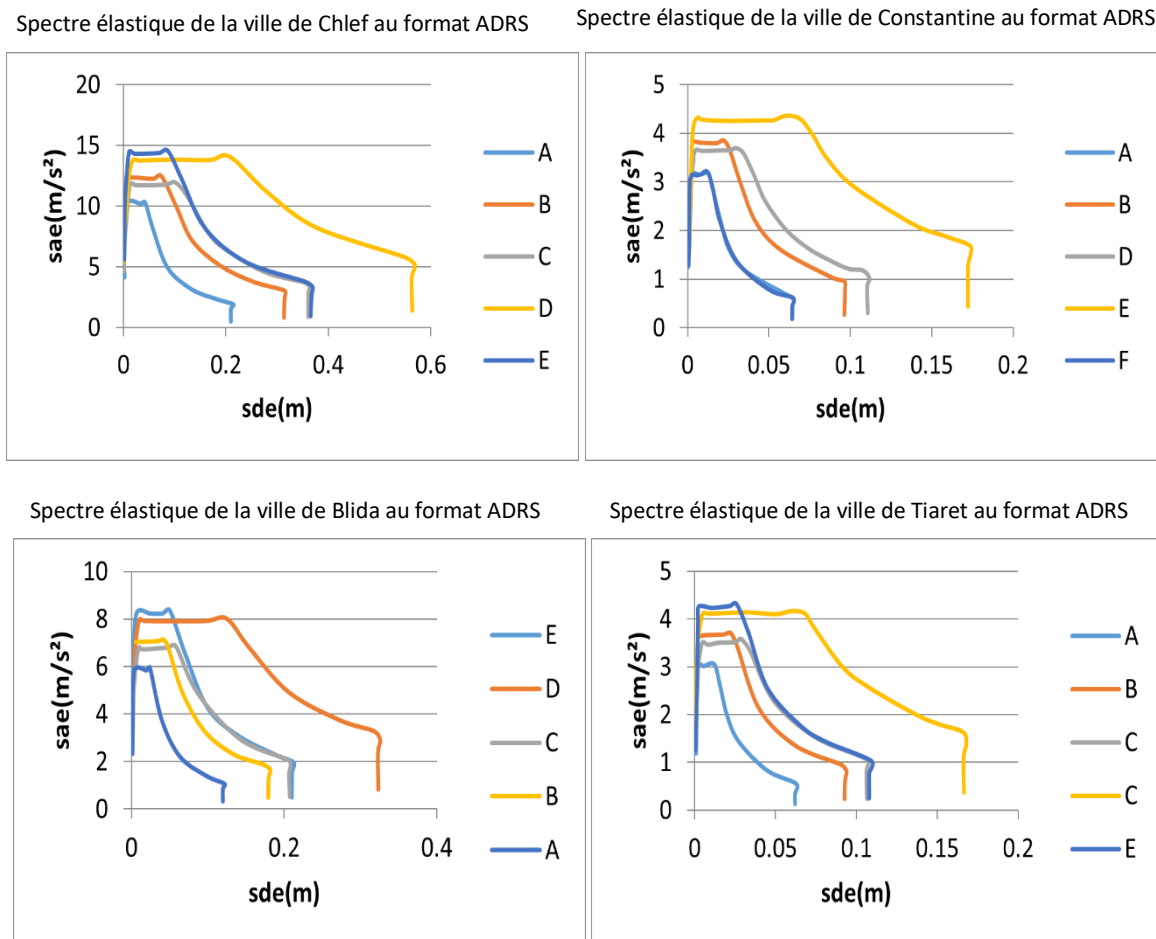
#### III.5.1 Construction du spectre de demande sismique

Le spectre de demande sismique est construit initialement à la base du spectre horizontal élastique standard de l'Eurocode 8[25]. Il est en fonction de type de sol et du coefficient

d'accélération de la zone concernée. Cette accélération en sol de type A (ag) est prise, pour la ville de Chlef, Blida, Constantine et Tiaret depuis les travaux de Pelaez et al.[26] et Hamdache et al.[27] (0.44g ; 0.315g, 0.129g et 0.124g respectivement). Les spectres formulés d'après l'Eurocode 8 sont des spectres au format accélération-période. Il est nécessaire alors de les transformer réalisée suivant la formule (III.1) mentionnée en dessous et rapportée depuis les travaux de Fajfar au format ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum), cette transformation est[28].

$$S_{de} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} \quad (III.1)$$

Cette formule permet de transformer l'axe des périodes en déplacement spectral élastique en exprimant l'accélération élastique ( $S_{ae}$ ) et la période associé (T). Les spectres ADRS résultants après la transformation, pour la ville de Chlef, Blida, Constantine et Tiaret sont représentés sur la figure (III.5).



**Fig.III.5 :** Spectres de demande élastiques des villes Chlef, Blida, Tiaret et Constantine au format ADRS dans tous les types de sols.

### III.5.2 Construction du spectre de capacité

Le spectre de capacité d'une structure est généralement obtenu par un logiciel d'analyse structurale. Dans la présente étude, on va construire ce dernier d'après la courbe expérimentale obtenue par le test Pushover sur les spécimens étudiés (prolongée numériquement dans le cas d'Harpage et du chainage uniforme). Cette technique est précédemment utilisée dans les travaux de ElNabouch et al.[29]. Elle s'agit de tracer la courbe effort-déplacement de la structure étudiée à la base de la courbe Pushover d'un seul prototype (Fig.III.6).

L'effet d'échelle est introduit alors afin de déduire la courbe approximée de la structure réelle étudiée (Portique de la structure d'habitation RDC+1 étage). Cet effet est pris en compte sur la courbe Pushover à l'aide des facteurs d'amplification. Ces facteurs sont déduits analytiquement selon le mécanisme de résistance susceptible à se développer dans la structure réelle. Les démarches suivies et les facteurs déduits sont détaillés par la suite :

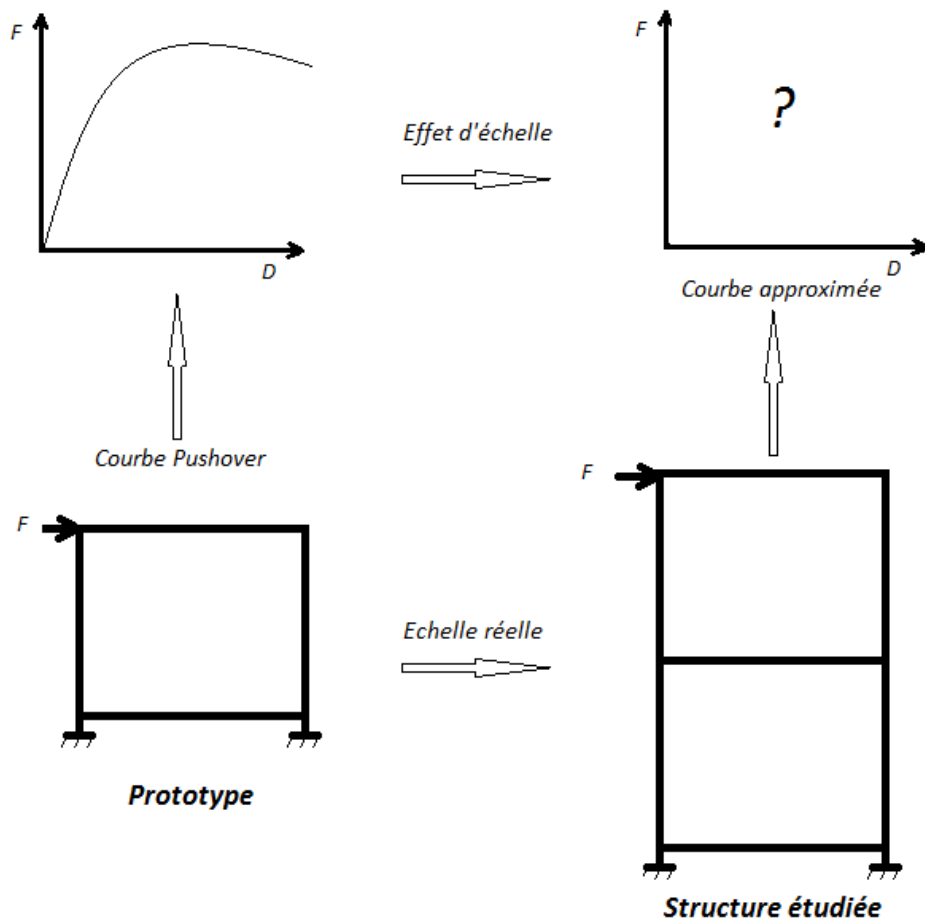


Fig.III.6 : Représentation graphique de l'effet d'échelle.

Au vu des dimensions de la structure, on suppose que le mécanisme de résistance de la structure étudiée est un mécanisme de flexion. La structure étudiée a une hauteur de 6m et une largeur de 4m. Par contre, elle possède une épaisseur de 0.3m, ce qui favorise le développement de mécanisme de flexion. Ceci est confirmé par les fissures de flexion produites dans les poteaux lors des tests Pushover réalisés dans les travaux de Belghiat et al.

Par hypothèse, le portique testé est supposé comme étant une poutre encastrée sollicitée à la flexion avec un chargement concentré au bord libre. La rigidité de la poutre (K) est donnée par :

$$K = 3EI/l^3 \quad (III.2)$$

Le moment d'inertie (I) se déduit à partir de l'épaisseur et la largeur de spécimens qui font 0.3m et 4m respectivement. La longueur de la poutre (L) correspond à la hauteur totale des deux étages (6m). Par contre, le module de Young utilisé est un module équivalent de l'ensemble. Pour ceci, les caractéristiques des matériaux introduites dans le prototype étudié (réduit) et ses caractéristiques géométriques sont utilisées pour déterminer le module de Young équivalent. La formule (III.3) en dessous est alors utilisée :

$$E_{eq} \times A_t = E_m \times A_m + E_a \times A_a + E_b \times A_b \quad (III.3)$$

Sachant que les indices (eq), (t), (m), (a) et (b) signifient : équivalent, totale, maçonnerie, acier et béton. Similairement, (E) et (A) signifient le module de Young et la section. De la même manière, le module de Young de la structure étudiée (portique réel) est calculé en prenant en compte les nouvelles sections des matériaux. Le module de Young du portique réel obtenu est égal à 88% du module de Young du spécimen réduit.

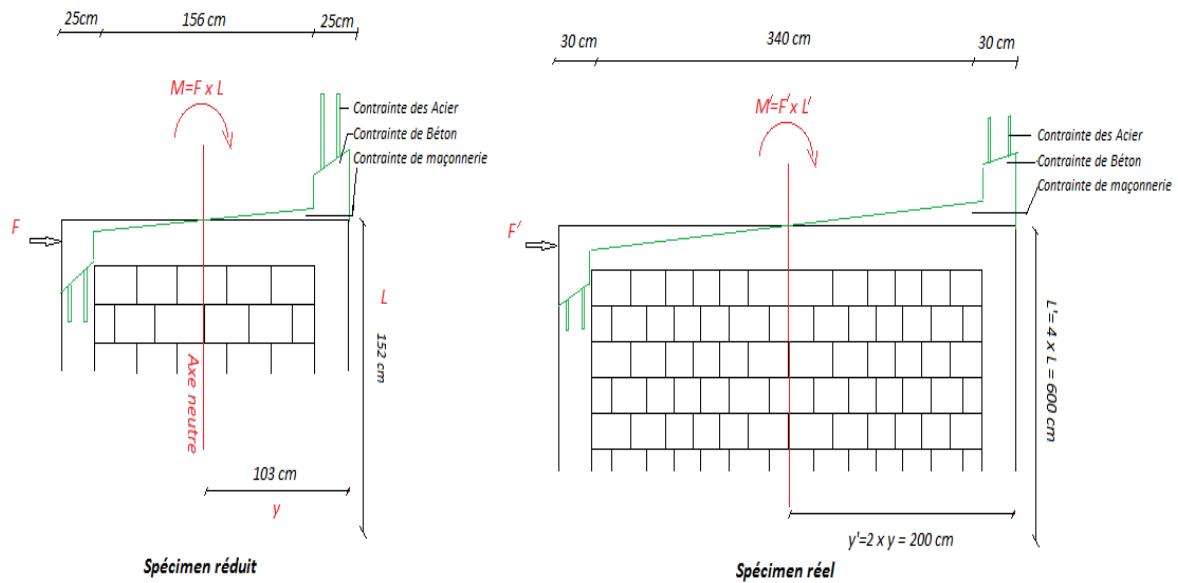
La même technique est utilisée pour calculer le module d'inertie du spécimen réduit et réel. Les résultats obtenus indiquent que le module d'inertie du spécimen réel est équivalent à 631% l'inertie du spécimen réduit.

Concernant l'effort appliqué (la résistance du spécimen), nous avons utilisé la définition de la contrainte dans les fibres extérieures d'une poutre sous la flexion. La formule (III.4) en dessous est utilisée afin d'exprimer la capacité (l'effort appliqué) du spécimen réel en fonction de celle du spécimen réduit.

$$F = \sigma \times I_{eq}/l \times y \quad (III.4)$$

Sachant que (L) et (y) représentent dans ce cas, la hauteur du spécimen (la travée de la poutre) et la demi largeur du spécimen respectivement (distance entre la fibre extrême et

l'axe neutre). La figure (III.7) montre la distribution des contraintes dans les deux cas (de spécimen réduit et réel).



**Fig.III.7 :** Contraintes et dimensions de spécimen réduit et réel.

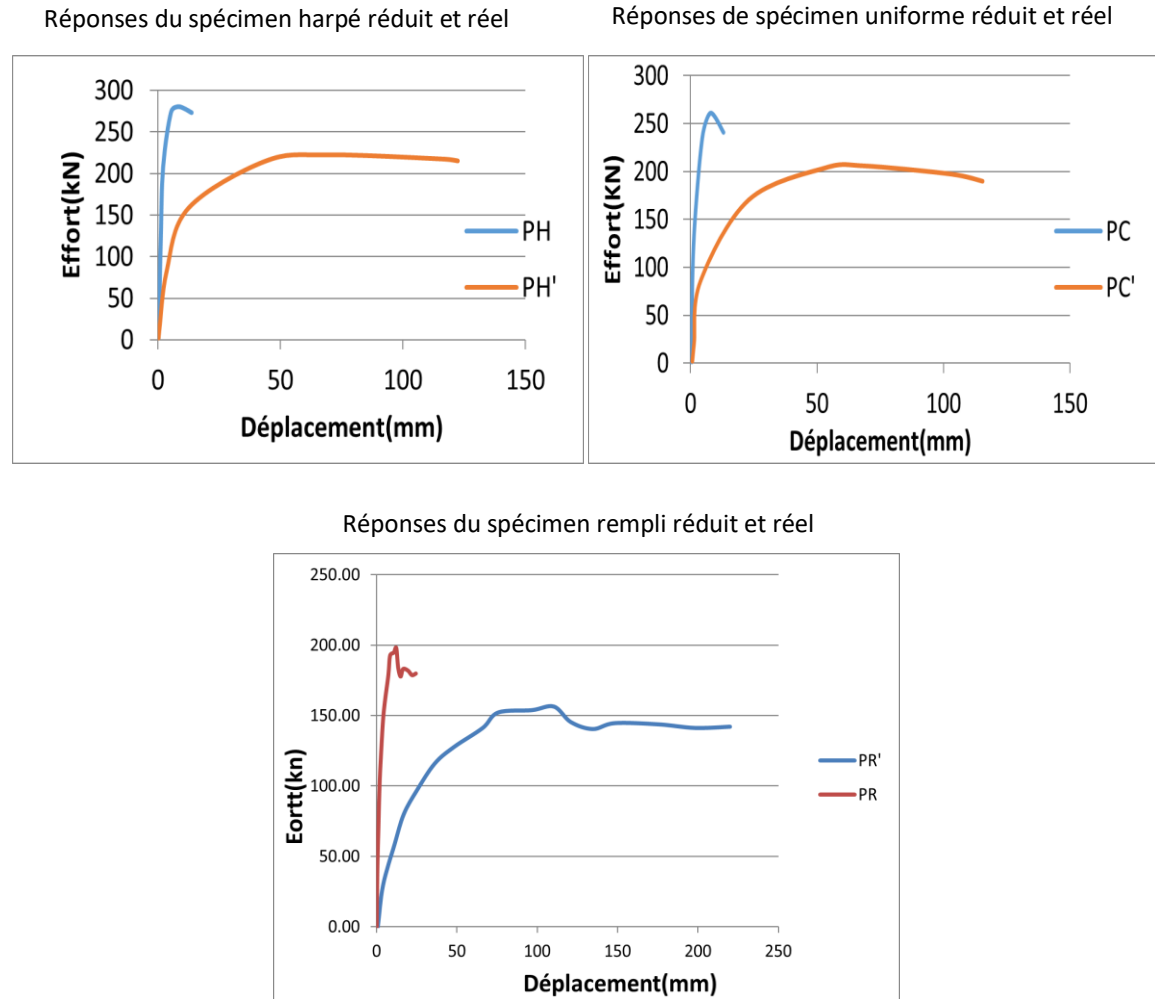
Après avoir déduit la capacité du portique réel en fonction du spécimen réduit, la formule (III.5) en dessous est utilisée afin de déterminer les déplacements associés aux efforts calculés. Les résultats obtenus d'après l'ensemble de calculs analytiques sont résumés dans le tableau (III.1). Les facteurs déduits permettant d'estimer la courbe effort-déplacement approximée, sont (0.79) et (9) respectivement pour la charge appliquée et le déplacement engendré.

$$D = F/K \quad (III.5)$$

**Tableau III.1 :** Les facteurs introduisant l'effet de l'échelle.

| Le paramètre                                            | S. réduit<br>(0.25x2.06x1.56)           | S. réel (0.3x4x6)                                                              |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Module de Young<br>équivalent                           | $E_q=9618$                              | $E_q'=8450.4 \Rightarrow E_q'=0.88 E_q$                                        |
| La rigidité K                                           | $K = 3E_q \cdot I_q / L^3$              | $K' = 3 \times (0.88 E_q \times 6.31 I_q) / (4L)^3$<br>$\Rightarrow K'=0.087K$ |
| Capacité<br>( $F = \sigma \times I_{eq} / L \times y$ ) | $F = \sigma \times I_{eq} / L \times y$ | $F' = \sigma \times 6.31 I_{eq} / 4 L \times 2 y$<br>$\Rightarrow F' = 0.79 F$ |
| Déplacement $D = F/K$                                   | $D = F/K$                               | $D' = 0.79 F / 0.087 K \Rightarrow D' = 9 D$                                   |

Les courbes de la figure (III.8) traduisent d'un côté, l'évolution de l'effort appliqué en fonction du déplacement de spécimen réduits (PC) et (PH) et (PR), qui sont obtenu expérimentalement et prolongée numériquement (Pour le cas de PC et PH). De l'autre côté, elles traduisent les courbes de réponses des portiques (PC') et (PH') et (PR'). Ces derniers concernent la réponse approximée des deux structures réelles correspondantes aux portiques en béton armé d'une seule travée et à deux étages avec murs en double paroi en maçonnerie chaînée, avec chainages uniformes et harpés et avec panneaux de maçonnerie de remplissage respectivement.



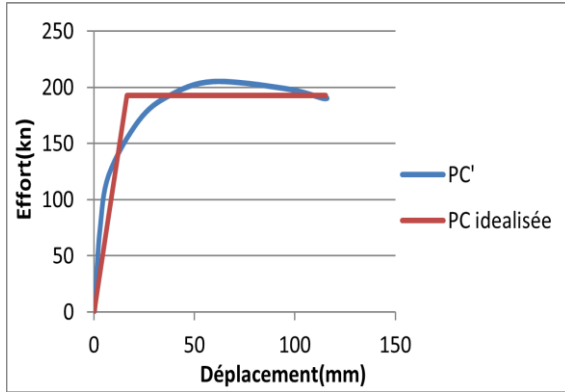
**Fig.III.8 :** L'effet d'échelle sur la courbe de réponse des prototypes harpé, uniforme et rempli.

Les courbes obtenues en tenant en compte l'effet de l'échelle sont par la suite idéalisées. L'idéalisation bilinéaire adoptée est inspirée des travaux de Fajfar[28]. Elle est réalisée selon les considérations suivantes :

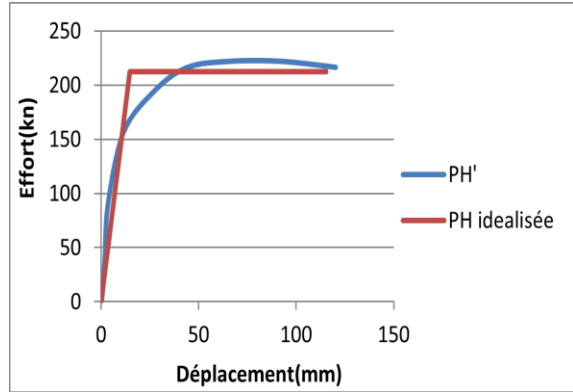
- La rigidité au régime post pic est nulle.
- L'aire sous la courbe idéalisée et la courbe originale et l'axe de déplacement sont approximativement similaire.
- La courbe idéalisée est intersectée par la courbe originale à 60% de la résistance maximale.

Les courbes idéalisées obtenues pour les différents types de spécimens sont représentées sur la figure (III.9).

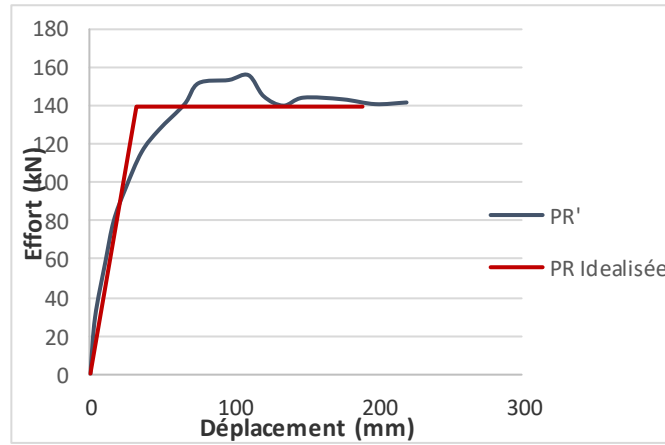
Courbe originale et idéalisée du spécimen harpé



Courbe originale et idéalisée du spécimen uniforme



Courbe originale et idéalisée du spécimen rempli



**Fig.III.9** : Idéalisation de courbes de réponse.

Après avoir obtenu la courbe de réponse idéalisée des prototypes en introduisant l'effet d'échelle, l'étape suivante consiste à formuler le spectre de capacité à partir de celle-ci[28]. Autrement dit, cette étape consiste à transformer le système à multi degrés de libertés MDOF à un système équivalent à un seul degré de liberté SDOF. Il est cependant nécessaire de calculer la masse du système équivalent ( $m^*$ ) et le coefficient de transformation ( $\Gamma$ ) de la même façon que dans les travaux de Fajfar[28].

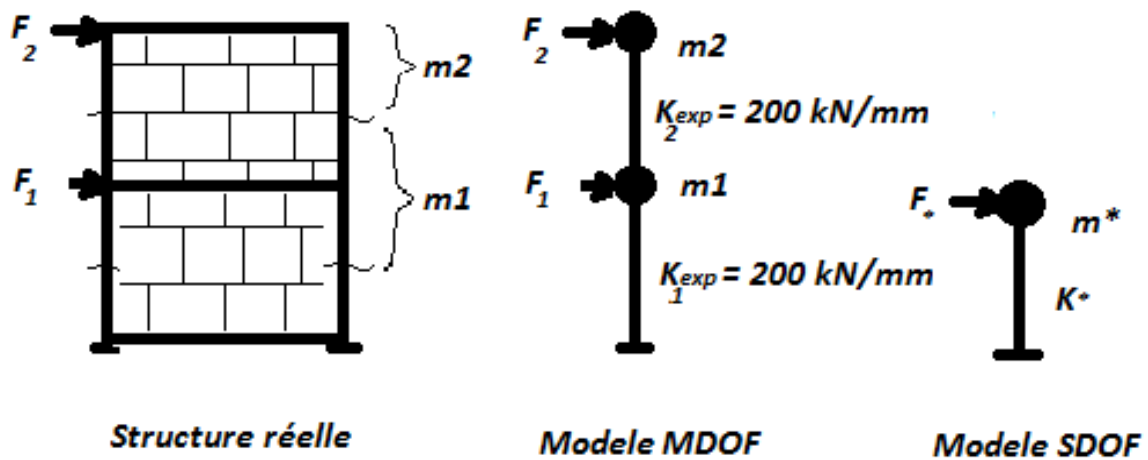
$$\Gamma = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} \quad (\text{III.6})$$

$$m^* = \sum m_i \phi_i \quad (\text{III.7})$$

( $m_i$ ) représente la masse du niveau (i) et ( $\phi_i$ ) est le facteur de forme associé au niveau (i).

### III.5.3 Calcul de la masse équivalente et coefficient de transformation

La masse de chaque niveau est celle déterminée par la descente de charge. La masse totale de chaque niveau est concentrée dans un seul point, comme indiqué sur la figure (III.10). La rigidité de chaque niveau se déduit expérimentalement à partir des tests Pushover. Concernant les facteurs de forme, il existe pour chaque mode propre, un vecteur ( $\emptyset$ ) rassemblant les facteurs de forme associés à chaque niveau. Il est nécessaire alors de calculer les modes propres de la structure afin de déduire les facteurs ( $\emptyset_i$ ) associés au premier mode. Ce mode symbolise le mode admissible pour le cas test quasi statique (Pushover)[19].



**Fig.III.10** : Modélisation de la structure (systèmes MDOF et SDOF).

Les fréquences des modes propres (W) de cette structure se déduisent en imposant la nullité du déterminant de l'équation. Sachant que [M] et [K] représentent la matrice de masse et de rigidité, respectivement.

#### III.5.3.1 Les spécimens chaînés

$$\det([K] - w^2[M]) = \det \begin{bmatrix} (K_1 + K_2) - w^2 m_1 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 - w^2 m_2 \end{bmatrix} = 0$$

$$\det \begin{bmatrix} (352) - w^2 22.1 & -176 \\ -176 & 176 - w^2 18.3 \end{bmatrix} = 0$$

$$(352 - w^2 22.1)(176 - w^2 18.3) - (-176 - 176) = 0$$

$$61952 - 6441.6w^2 - 3889.6w^2 + 404.43w^4 - 30976 = 0$$

$$404.43w^4 - 10331.2w^2 + 30976 = 0$$

$$W^2 = X$$

$$404.43X^2 - 10331.2X + 30976 = 0$$

$$\Delta = (3404.6)^2 - 4(404.43)(3364)$$

$$\Delta = 6149291.08$$

$$X_1 = 22.07 \implies W_1 = 1.86$$

$$X_2 = 3.46 \implies W_2 = 4.69$$

Les coefficients de forme associés au premier mode fondamental  $W_1$  sont :

$$\begin{bmatrix} 275,54 & -176 \\ -176 & 112,68 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_i \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$275,54\phi_i - 176 = 0$$

$$\phi_i = 176 / 275.54 = 0,64$$

Les équations (III.6) et (III.7) deviennent :

$$m^* = \sum m_i \phi_i = m_1 \phi_1 + m_2 \phi_2$$

$$m^* = 22,1 \times 0,64 + 18,3 \times 1$$

$$m^* = 32,4 \text{ t}$$

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} = \frac{m_1 \phi_1 + m_2 \phi_2}{m_1 \phi_1^2 + m_2 \phi_2^2} = \frac{22,1 \times 0,64 + 18,3 \times 1}{22,1 \times 0,64^2 + 18,3 \times 1}$$

$$\Gamma = 32,4 / 27,35216 = 1,18$$

### III.5.3.2 Les spécimens harpés

$$\det([K] - w^2[M]) = \det \begin{bmatrix} (K_1 + K_2) - w^2 m_1 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 - w^2 m_2 \end{bmatrix} = 0$$

$$\det \begin{bmatrix} (402) - w^2 22.1 & -201 \\ -201 & 201 - w^2 18.3 \end{bmatrix} = 0$$

$$(402 - w^2 22.1)(201 - w^2 18.3) - (-201 - 201) = 0$$

$$80802 - 7356.6w^2 - 4442.1w^2 + 404.43w^4 - 40401 = 0$$

$$404.43w^4 - 11798.7w^2 + 40401 = 0$$

$$W^2 = X$$

$$404.43X^2 - 11798.7X + 40401 = 0$$

$$\Delta = (11798.7)^2 - 4(404.43)(40401)$$

$$\Delta = 73851815.97$$

$$X_1 = 3.96 \implies W_1 = 1.98$$

$$X_2 = 25.21 \implies W_2 = 5.02$$

Les coefficients de forme associés au premier mode fondamental  $W_1$  sont :

$$\begin{bmatrix} 315,35 & -201 \\ -201 & 129,256 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_i \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$315.35\phi_i - 201 = 0$$

$$\phi_i = 201 / 315.35 = 0.63$$

Les équations (III.6) et (III.7) deviennent :

$$m^* = \sum m_i \phi_i = m_1 \phi_1 + m_2 \phi_2$$

$$m^* = 22.1 \times 0.63 + 18.3 \times 1$$

$$m^* = 32.4 \text{ t}$$

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} = \frac{m_1 \phi_1 + m_2 \phi_2}{m_1 \phi_1^2 + m_2 \phi_2^2} = \frac{22,1 \times 0,63 + 18,3 \times 1}{22,1 \times 0,63^2 + 18,3 \times 1}$$

$$\Gamma = 32.4 / 27.071 = 1.18$$

### III.5.3.3 Les spécimens remplis

$$\det([K] - w^2[M]) = \det \begin{bmatrix} (K_1 + K_2) - w^2 m_1 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 - w^2 m_2 \end{bmatrix} = 0$$

$$\det \begin{bmatrix} (116) - w^2 22,1 & -58 \\ -58 & 58 - w^2 18,3 \end{bmatrix} = 0$$

$$(116 - w^2 22,1)(58 - w^2 18,3) - (-58 - 58) = 0$$

$$6728 - 2122.8w^2 + 404.43w^4 - 1281.8 = 0$$

$$404.43w^4 - 3404.6w^2 + 3364 = 0$$

$$W^2 = X$$

$$404.43X^2 - 3404.6X + 3364 = 0$$

$$\Delta = (3404.6)^2 - 4(404.43)(3364)$$

$$\Delta = 6149291.08$$

$$X_1 = 1.433 \quad \Longrightarrow \quad W_1 = 1.07$$

$$X_2 = 7.2749 \quad \Longrightarrow \quad W_2 = 2.7$$

Les coefficients de forme associés au premier mode fondamental  $W_1$  sont :

$$\begin{bmatrix} 90.69771 & -58 \\ -58 & 37.04833 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_i \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$90.69771 \phi_i - 58 = 0$$

$$\phi_i = 85 / 90.69771 = 0.64$$

Les équations (III.6) et (III.7) deviennent :

$$m^* = \sum m_i \phi_i = m m_1 \phi_1 + m_2 \phi_2$$

$$m^* = 22.1 \times 0.64 + 18.3 \times 1$$

$$m^* = 32.4 \text{ t}$$

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} = \frac{m_1 \phi_1 + m_2 \phi_2}{m_1 \phi_1^2 + m_2 \phi_2^2} = \frac{22,1 \times 0,64 + 18,3 \times 1}{22,1 \times 0,64^2 + 18,3 \times 1}$$

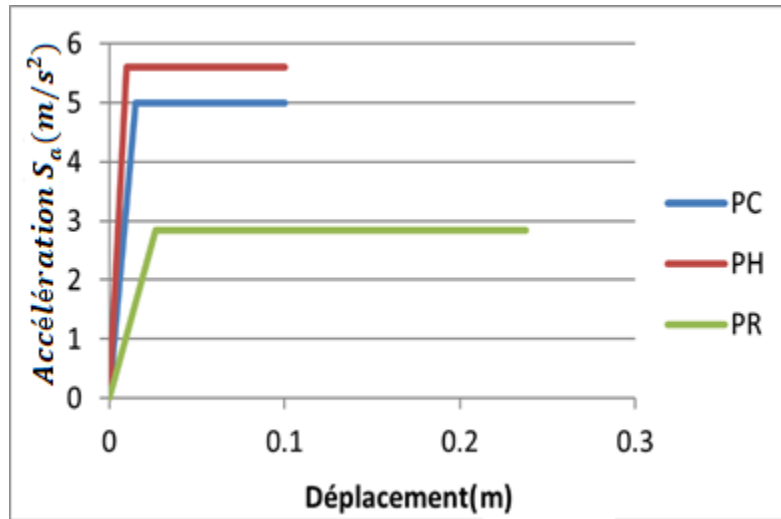
$$\Gamma = 32.4 / 27.35216 = 1.18$$

Après l'obtention du coefficient de transformation et la masse du système équivalent, on convertit la courbe de réponse idéalisée de la structure étudiée en spectre de capacité. Ce dernier correspond alors à la structure équivalente à un seul degré de liberté. De la même manière que dans les travaux de Fajfar[28], les formules en dessous (III.8) et (III.9) permettent de déduire les accélérations et les déplacements spectraux de celui-ci. Les spectres résultants du spécimen uniforme, harpé et réel sont représentés sur la figure (III.11).

$$S_{ae} = F' / m^* \times \Gamma \quad (III.8)$$

$$S_{de} = D' / \Gamma \quad (III.9)$$

Spectres de capacité idéalisée des spécimens uniforme (PC) et rempli (PR) et harpé (PH)

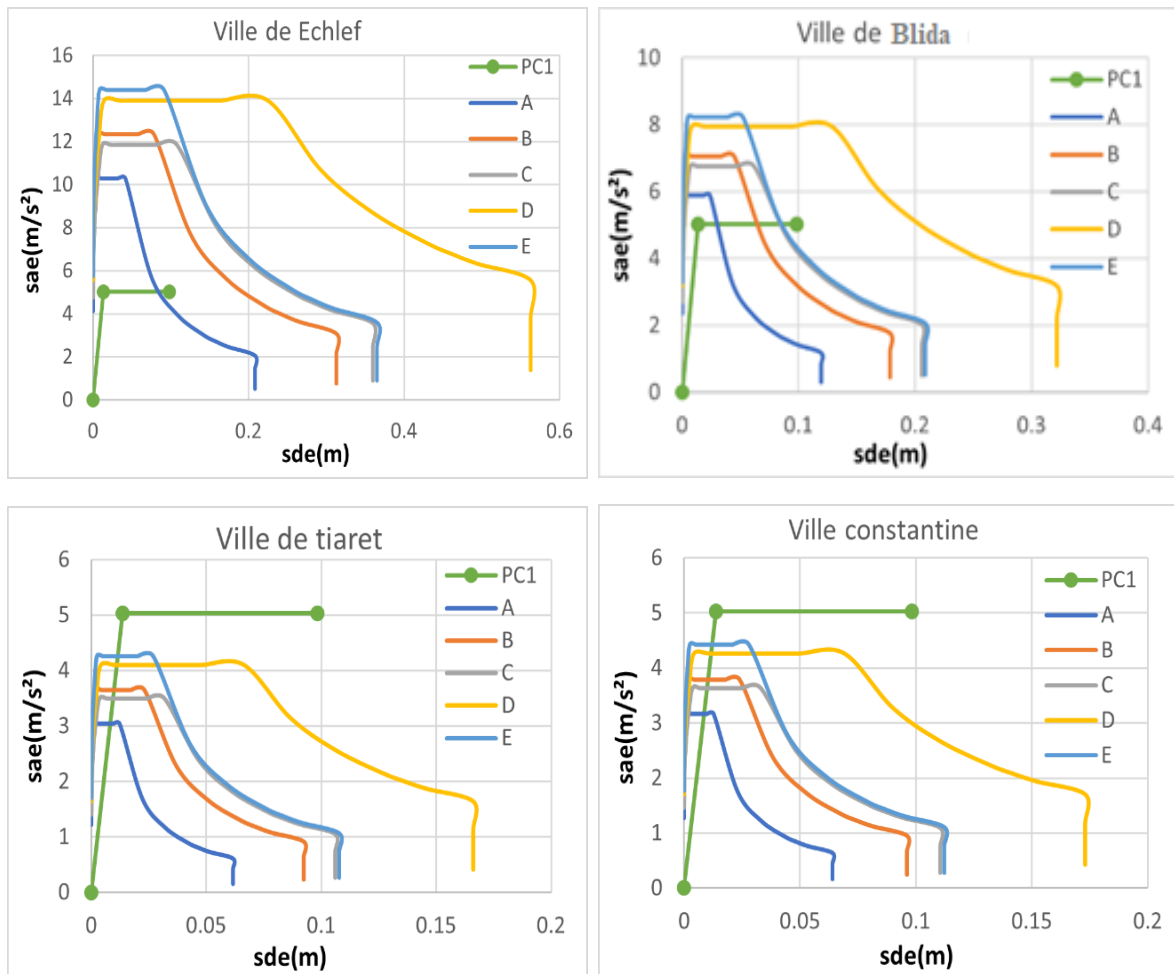


**Fig.III.11** : Spectres de capacité idéalisés (Elasto-plastique spectres).

#### III.5.4 Superposition des spectres et détermination du point de performance

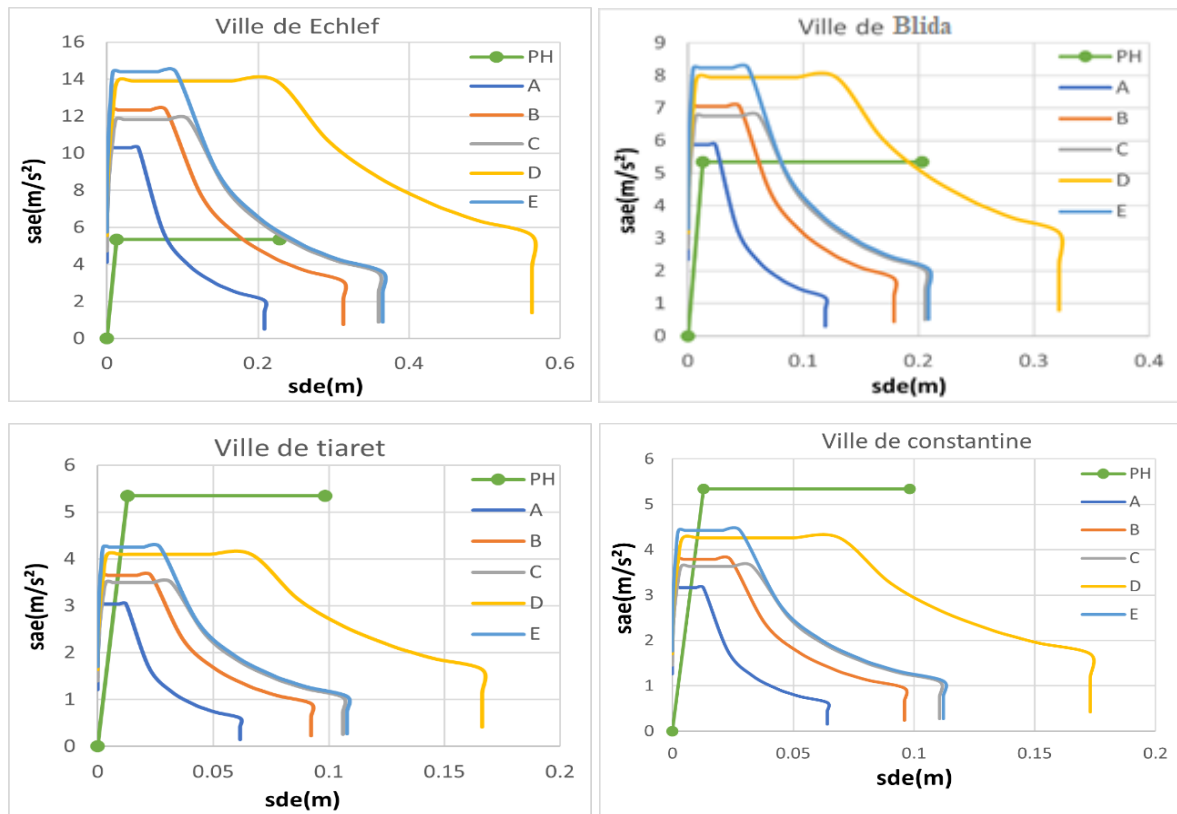
L'étape subséquente, après obtention de spectres de demande et de capacité au format ADRS, est de superposer ces spectres pour obtenir le point de performance. Ce qui nous permettra de déterminer le déplacement et l'accélération cibles et de déduire par conséquence le spectre de demande inélastique. Pour ce but, nous adoptons la méthode modifiée proposée par Fajfar[28].

La superposition des spectres de capacité idéalisés du spécimen chaîné uniforme avec les spectres de demande sismique correspondant aux villes de Chlef, Blida, Constantine et Tiaret pour les sols de types 'A', 'B', 'C', 'D' et 'E' est présentée sur la figure (III.12).

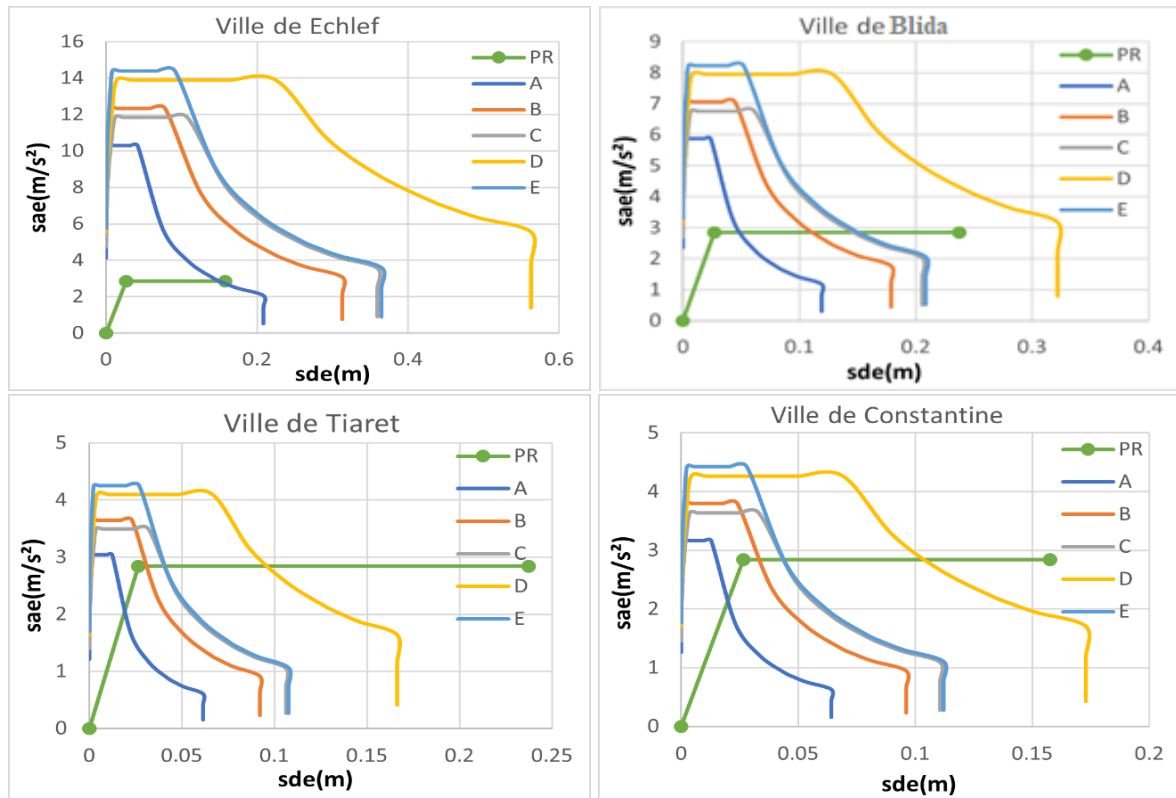


**Fig. III.12 :** Superposition de spectre de capacité du spécimen chaîné avec spectres demande élastique du sol A, B, C, D, et E.

D'une manière similaire, le spectre de capacité idéalisé du spécimen chaîné en harpage a été superposé avec les spectres de demande sismique correspondant aux villes de Chlef, Blida, Constantine et Tiaret pour les sols de types 'A', 'B', 'C', 'D' et 'E'. La figure (III.13) représente les spectres résultants. Les mêmes procédures et étapes ont été suivies avec le spécimen rempli qui s'agit de portique en béton armé avec le panneau de remplissage en maçonnerie. Les spectres qui concernent ce dernier sont illustrées par les images de la figure (III. 14).



**Fig.III.13 :** Superposition de spectre de capacité du spécimen harpé avec spectres demande élastique du sol A, B, C, D et E.



**Fig.III.14 :**Superposition de spectre de capacité du spécimen rempli avec spectres demande élastique du sol A, B, C, D, et E.

D'après les figures (III.12, III.13 et III.14), les deux spécimens chaînés soit uniforme ou harpé, font intersectés les spectres en zone élastique dans le cas de la ville de Tiaret et Constantine (Zones de faible sismicité). Ce qui signifie que la demande sismique dans les villes de Tiaret et Constantine pour tous les types de sols est plus faible que la capacité de spécimens. Par contre, la demande sismique dans la ville de Echlef et de la ville de Blida est plus grande que la capacité de l'ensemble de spécimens soit pour tous les types de sols A, B, C, D, et E. En outre, le spécimen rempli a fait l'exception, il a démontré que sa capacité est moins que la demande sismique dans toutes les zones sismiques et même pour tous les types de sols existants.

Après évaluer la capacité élastique de l'ensemble de spécimens vis-à-vis les différents types de sols et zones sismiques. Il est nécessaire alors d'introduire l'effet de la ductilité des spécimens et de construire les spectres inélastiques de demande sismique pour tous les types de sol A, B, C, D, et E ainsi que pour les différentes zones sismiques.

Selon la méthode modifiée proposée par Fajfar[28], la manière d'obtenir le spectre inélastique dépend de la période ( $T^*$ ) associée à la phase élastique de spectre de capacité (formule III.10) et de la période de transition ( $T_0$ ) (formule III.11). Dans le cas où la

période ( $T^*$ ) est inférieure à ( $T_0$ ), le facteur de réduction  $R_u$  est obtenu par le rapport de l'accélération élastique ( $S_{ae}$ ) et l'accélération de seuil ( $S_{ay}$ ). Le facteur de ductilité ( $\mu$ ) est déterminé dans ce cas-là par la formule réarrangée (III.12). Le spectre inélastique se détermine finalement à l'aide des formules (III.13) et (III.14), sachant que ( $S_{de}$ ) représente la demande spectrale élastique en déplacement.

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}} \quad (\text{III.10})$$

$$T_0 = 0.65 \mu^{0.3} T^* \leq T_0 \quad (\text{III.11})$$

$$\mu = (R_u - 1) \frac{T}{T^*} + 1 \quad (\text{III.12})$$

$$S_a = S_{ae} / R_u \quad (\text{III.13})$$

$$S_d = S_{de}^\mu / R_u \quad (\text{III.14})$$

**Tableau III.2 :** Paramètres de d'obtention des spectres inélastiques.

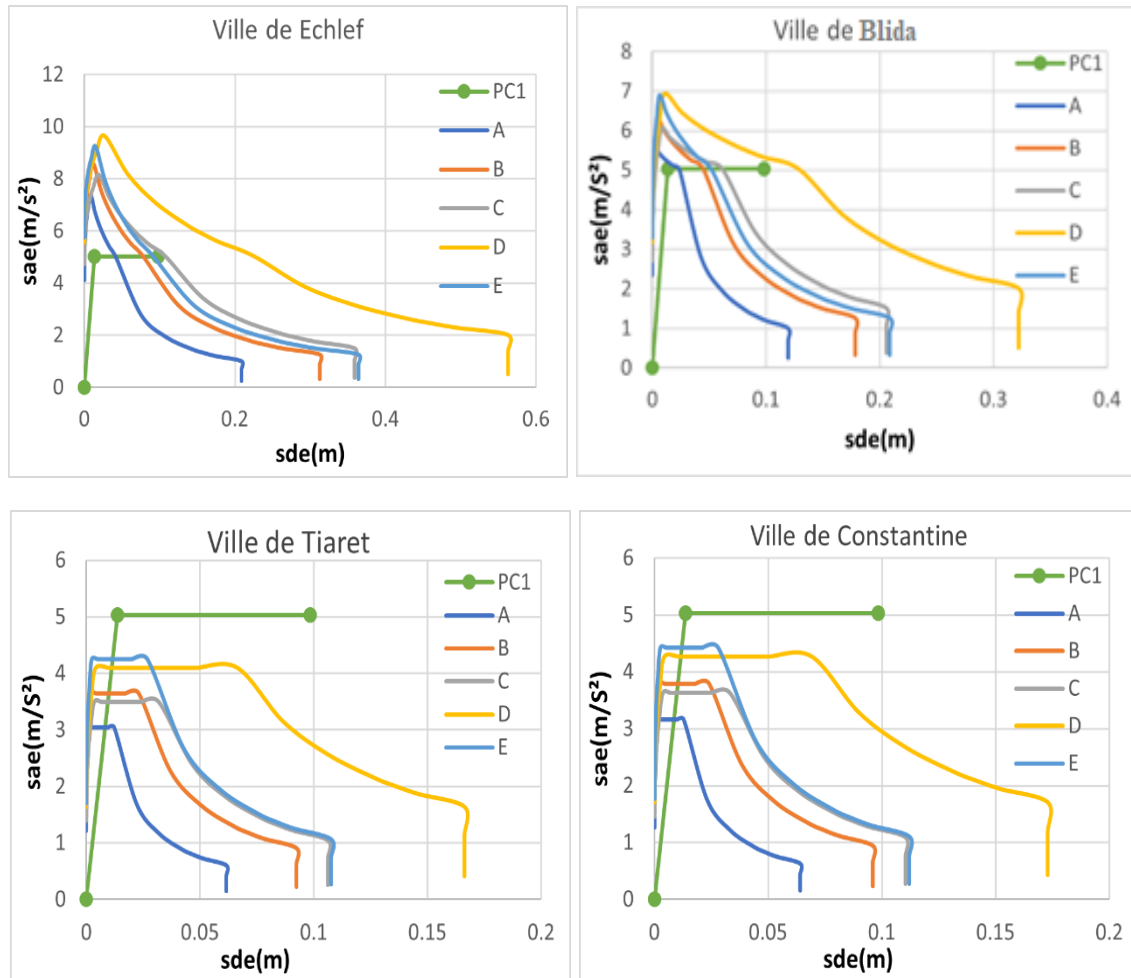
|              | Spécimen | $F_y^*$ (kN) | $D_y^*$ (mm) | $T^*$ (sec) | Sol | $T_0$ (sec) | $R_u$ |
|--------------|----------|--------------|--------------|-------------|-----|-------------|-------|
| <b>Chlef</b> | PC       | 192.2        | 16.1         | 0.327       | A   | 0.4         | 2.04  |
|              |          |              |              |             | B   | 0.5         | 2.45  |
|              |          |              |              |             | C   | 0.6         | 2.35  |
|              |          |              |              |             | D   | 0.8         | 2.76  |
|              |          |              |              |             | E   | 0.5         | 2.86  |
|              | PH       | 204.3        | 15.1         | 0.307       | A   | 0.4         | 1.92  |
|              |          |              |              |             | B   | 0.5         | 2.31  |
|              |          |              |              |             | C   | 0.6         | 2.21  |
|              |          |              |              |             | D   | 0.8         | 2.60  |
|              |          |              |              |             | E   | 0.5         | 2.70  |
|              | PR       | 139.8        | 17.06        | 0.395       | A   | 0.4         | 2.01  |
|              |          |              |              |             | B   | 0.5         | 3.11  |
|              |          |              |              |             | C   | 0,6         | 2.99  |
|              |          |              |              |             | D   | 0,8         | 3.50  |
|              |          |              |              |             | E   | 0.5         | 4.83  |
| <b>Blida</b> | PC       | 192.2        | 16.1         | 0.327       | A   | 0.4         | 1.17  |
|              |          |              |              |             | B   | 0.5         | 1.40  |
|              |          |              |              |             | C   | 0,6         | 1.34  |
|              |          |              |              |             | D   | 0,8         | 1.58  |
|              |          |              |              |             | E   | 0.5         | 1.63  |
|              | PH       | 204.3        | 15.1         | 0.307       | A   | 0.4         | 1.10  |
|              |          |              |              |             | B   | 0.5         | 1.32  |
|              |          |              |              |             | C   | 0.6         | 1.26  |
|              |          |              |              |             | D   | 0,8         | 1.48  |
|              |          |              |              |             | E   | 0.5         | 1.54  |
|              | PR       | 139.8        | 17.06        | 0.395       | A   | 0.4         | 2.07  |
|              |          |              |              |             | B   | 0.5         | 2.48  |
|              |          |              |              |             | C   | 0.6         | 2.38  |
|              |          |              |              |             | D   | 0.8         | 2.79  |
|              |          |              |              |             | E   | 0.5         | 2.89  |

|             | Spécimen | $F_y^*$ (kN) | $D_y^*$ (mm) | $T^*$ (sec) | Sol | $T_0$ (sec) | $R_u$ |
|-------------|----------|--------------|--------------|-------------|-----|-------------|-------|
| Constantine | PC       | 192,2        | 16.1         | 0.327       | A   | 0.4         | 1     |
|             |          |              |              |             | B   | 0.5         | 1     |
|             |          |              |              |             | C   | 0,6         | 1     |
|             |          |              |              |             | D   | 0,8         | 1     |
|             |          |              |              |             | E   | 0.5         | 1     |
|             | PH       | 204.3        | 15.1         | 0.307       | A   | 0.4         | 1     |
|             |          |              |              |             | B   | 0.5         | 1     |
|             |          |              |              |             | C   | 0.6         | 1     |
|             |          |              |              |             | D   | 0.8         | 1     |
|             |          |              |              |             | E   | 0.5         | 1     |
|             | PR       | 139.8        | 17.06        | 0.395       | A   | 0.4         | 1.11  |
|             |          |              |              |             | B   | 0.5         | 1.33  |
|             |          |              |              |             | C   | 0.6         | 1.28  |
|             |          |              |              |             | D   | 0,8         | 1.50  |
|             |          |              |              |             | E   | 0.5         | 1.56  |
| Tiaret      | PC       | 192.2        | 16.1         | 0.327       | A   | 0.4         | 1     |
|             |          |              |              |             | B   | 0.5         | 1     |
|             |          |              |              |             | C   | 0.6         | 1     |
|             |          |              |              |             | D   | 0.8         | 1     |
|             |          |              |              |             | E   | 0.5         | 1     |
|             | PH       | 204.3        | 15.1         | 0.307       | A   | 0.4         | 1     |
|             |          |              |              |             | B   | 0.5         | 1     |
|             |          |              |              |             | C   | 0.6         | 1     |
|             |          |              |              |             | D   | 0.8         | 1     |
|             |          |              |              |             | E   | 0.5         | 1     |
|             | PR       | 139.8        | 17.06        | 0.395       | A   | 0.4         | 1.07  |
|             |          |              |              |             | B   | 0.5         | 1.28  |
|             |          |              |              |             | C   | 0.6         | 1.23  |
|             |          |              |              |             | D   | 0.8         | 1.44  |
|             |          |              |              |             | E   | 0.5         | 1.50  |

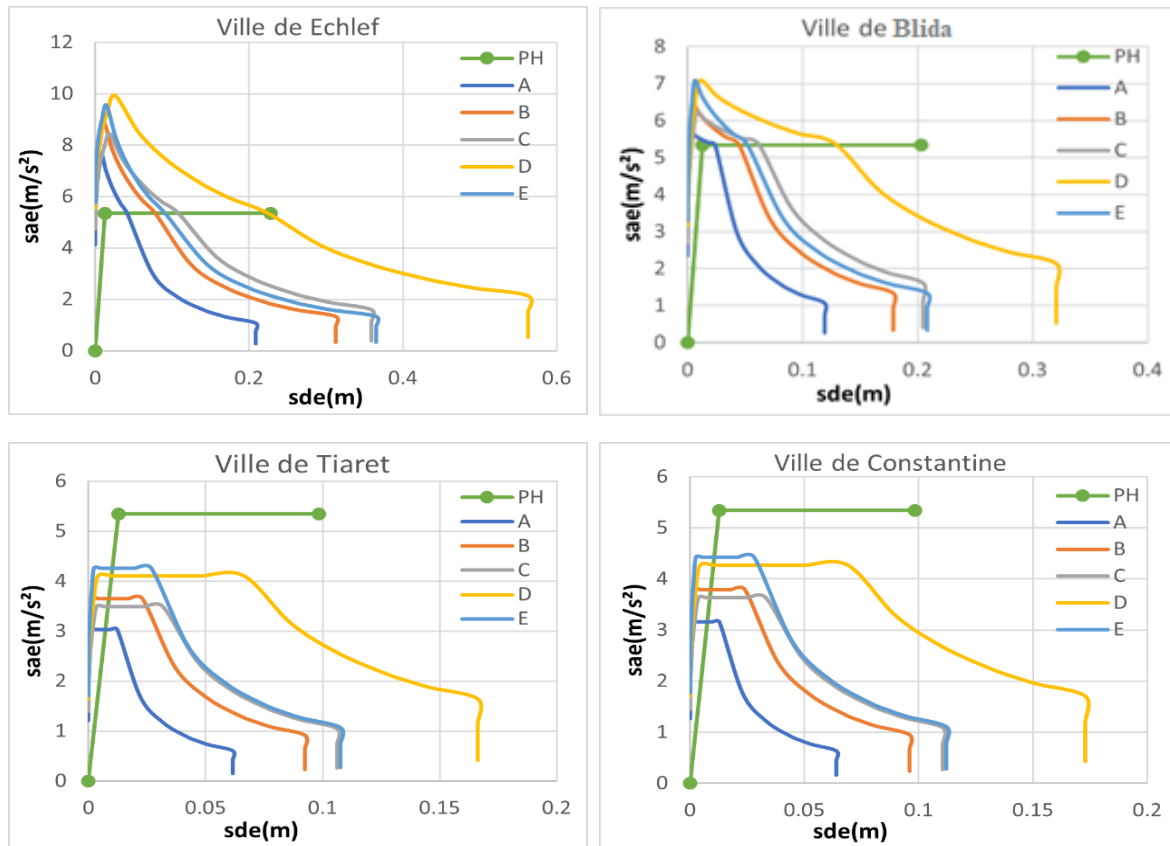
Les résultats, de l'application numérique de ces procédures, se récapitulent au tableau (III.2). Sachant que, ( $F_y^*$ ) et ( $D_y^*$ ) représentent l'effort et le déplacement de seuil de

plasticité de la courbe de réponse idéalisée des spécimens. ( $T^*$ ) et ( $T_0$ ) sont la période associée au point de seuil et la période de transition respectivement.

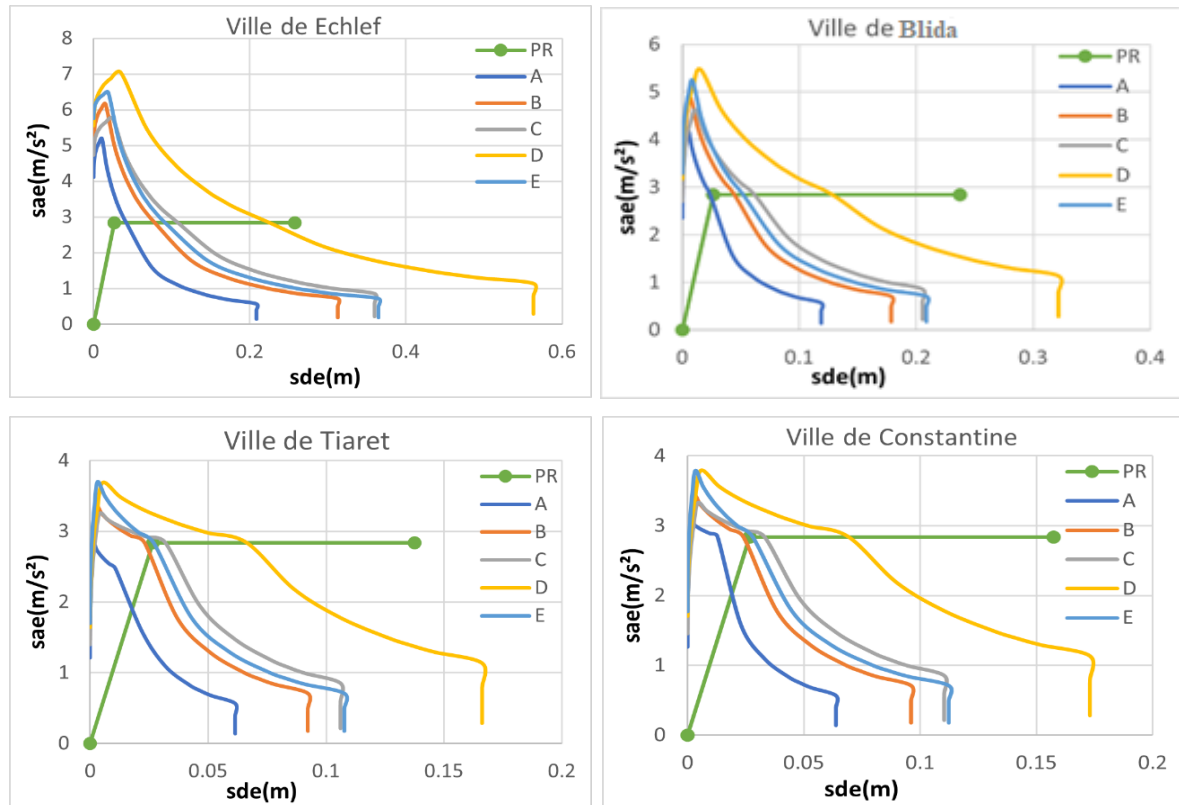
Les spectres inélastiques obtenus en utilisant les résultats du tableau (III.2) et les formules (III.13) et (III.14) sont représentés sur les figures (III.15, III.16 et III.17). Ces spectres croisent les spectres de capacité des spécimens PC et PH et PR aux points spéciaux ce qu'on appelle les points de performance.



**Fig.III.15 :** Superposition de spectre de capacité du spécimen chaîné avec spectres demande inélastiques du sol A, B, C, D, et E.



**Fig.III.16 :** Superposition de spectre de capacité du spécimen harpé avec spectres demande inélastiques du sol A, B, C, D, et E.



**Fig.III.17 :** Superposition de spectre de capacité du spécimen rempli avec spectres demande inélastiques du sol A, B, C, D, et E.

Les points de performance déduits par l'intersection des spectres traduisent l'accélération et le déplacement spectraux demandés par le séisme. Par l'intermédiaire du coefficient de transformation ( $\Gamma$ ) et de la masse équivalente ( $m^*$ ), cette accélération et ce déplacement peuvent être transformé en force et au déplacement du système équivalent à un seul degré de liberté SDOF. Par la suite, le vecteur de forme ( $\phi_i$ ) nous permet de déduire l'effort et le déplacement, de chaque niveau, demandés par le séisme.

L'ensemble des résultats de transformation obtenus sont rapportés au tableau (III.3).

Sachant que :

- ( $S_a$ ) et ( $S_d$ ) représentent la demande spectrale en accélération et en déplacement,
- ( $F^*$ ) et ( $D^*$ ) représentent la demande en effort et en déplacement de la structure équivalente en SDOF,
- ( $F_1$ ) et ( $D_1$ ) représentent l'effort et le déplacement au niveau '1' correspondant à la demande sismique,
- ( $F_2$ ) et ( $D_2$ ) représentent l'effort et le déplacement au niveau '2' correspondant à la demande sismique,

- ( $\delta_2$ ) est le drift en pourcentage de deuxième étage calculé par rapport à la hauteur totale de la structure réelle (6m).

**Tableau III.3 :** Points de performances et déplacements cibles.

| Type | Ville       | Sol | S <sub>a</sub><br>(ms <sup>-2</sup> ) | S <sub>d</sub><br>(mm) | F*(kN) | D*<br>(mm) | F <sub>1</sub> (kN) | D <sub>1</sub><br>(mm) | F <sub>2</sub> (kN) | D <sub>2</sub><br>(mm) | $\delta_2$<br>(%) |
|------|-------------|-----|---------------------------------------|------------------------|--------|------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|-------------------|
| PC   | Blida       | A   | 5,027                                 | 23                     | 192,19 | 27,14      | 123,00              | 17,36                  | 192,19              | 27,14                  | 0,45              |
|      |             | B   | 5,027                                 | 44                     | 192,19 | 51,92      | 123,00              | 33,22                  | 192,19              | 51,92                  | 0,86              |
|      |             | C   | 5,027                                 | 61                     | 192,19 | 71,98      | 123,00              | 46,06                  | 192,19              | 71,98                  | 1,20              |
|      |             | D   | 5,027                                 | 128                    | 192,19 | 151,04     | 123,00              | 96,66                  | 192,19              | 151,04                 | 2,51              |
|      |             | E   | 5,027                                 | 52                     | 192,19 | 61,36      | 123,00              | 39,27                  | 192,19              | 61,36                  | 1,02              |
|      | Chlef       | A   | 5,027                                 | 41                     | 192,19 | 48,38      | 123,00              | 30,96                  | 192,19              | 48,38                  | 0,80              |
|      |             | B   | 5,027                                 | 78                     | 192,19 | 92,04      | 123,00              | 58,90                  | 192,19              | 92,04                  | 1,53              |
|      |             | C   | 5,027                                 | 107                    | 192,19 | 126,26     | 123,00              | 80,80                  | 192,19              | 126,26                 | 2,10              |
|      |             | D   | 5,027                                 | 225                    | 192,19 | 265,5      | 123,00              | 169,92                 | 192,19              | 265,5                  | 4,425             |
|      |             | E   | 5,027                                 | 91                     | 192,19 | 107,38     | 123,00              | 68,72                  | 192,19              | 107,38                 | 1,78              |
|      | Tiaret      | A   | 3,038                                 | 7                      | 116,18 | 8,26       | 74,355              | 5,28                   | 116,18              | 8,26                   | 0,137             |
|      |             | B   | 3,645                                 | 7                      | 139,35 | 8,26       | 89,184              | 5,28                   | 139,35              | 8,26                   | 0,137             |
|      |             | C   | 3,49                                  | 7                      | 133,42 | 8,26       | 85,388              | 5,28                   | 133,42              | 8,26                   | 0,137             |
|      |             | D   | 5,027                                 | 13                     | 192,19 | 15,34      | 123,00              | 9,81                   | 192,19              | 15,34                  | 0,25              |
|      |             | E   | 4,253                                 | 9                      | 162,60 | 10,62      | 104,06              | 6,79                   | 162,60              | 10,62                  | 0,177             |
|      | Constantine | A   | 3,160                                 | 7                      | 120,81 | 8,26       | 77,318              | 5,28                   | 120,81              | 8,26                   | 0,137             |
|      |             | B   | 3,792                                 | 8                      | 144,97 | 9,44       | 92,780              | 6,04                   | 144,97              | 9,44                   | 0,15              |
|      |             | C   | 3,634                                 | 7                      | 138,93 | 8,26       | 88,915              | 5,28                   | 138,93              | 8,26                   | 0,137             |
|      |             | D   | 4,266                                 | 11                     | 124,86 | 12,98      | 79,910              | 8,30                   | 124,86              | 12,98                  | 0,21              |
|      |             | E   | 4,424                                 | 9                      | 130,90 | 10,62      | 83,776              | 6,79                   | 130,90              | 10,62                  | 0,17              |
| PH   | Blida       | A   | 5,34                                  | 23                     | 204,15 | 27,14      | 130,65              | 17,36                  | 204,15              | 27,14                  | 0,47              |
|      |             | B   | 5,34                                  | 41                     | 204,15 | 48,38      | 130,65              | 30,96                  | 204,15              | 48,38                  | 0,80              |
|      |             | C   | 5,34                                  | 61                     | 204,15 | 71,98      | 130,65              | 40,06                  | 204,15              | 71,98                  | 1,19              |
|      |             | D   | 5,34                                  | 128                    | 204,15 | 151,04     | 130,65              | 96,66                  | 204,15              | 151,04                 | 2,51              |
|      |             | E   | 5,34                                  | 52                     | 204,15 | 61,36      | 130,65              | 39,27                  | 204,15              | 61,36                  | 1,02              |
|      | Chlef       | A   | 5,34                                  | 41                     | 204,15 | 48,38      | 130,65              | 30,26                  | 204,15              | 48,38                  | 0,8               |
|      |             | B   | 5,34                                  | 78                     | 204,15 | 92,04      | 130,65              | 58,90                  | 204,15              | 92,04                  | 1,53              |
|      |             | C   | 5,34                                  | 107                    | 204,27 | 126,26     | 130,73              | 80,8                   | 204,27              | 126,26                 | 2,1               |
|      |             | D   | 5,34                                  | 225                    | 204,27 | 265,5      | 130,73              | 169,92                 | 204,27              | 265,5                  | 4,42              |
|      |             | E   | 5,34                                  | 91                     | 204,27 | 107,38     | 130,65              | 68,72                  | 204,27              | 107,38                 | 1,78              |
|      | Tiaret      | A   | 3,038                                 | 7                      | 116,14 | 8,26       | 74,329              | 5,28                   | 116,14              | 8,26                   | 0,13              |
|      |             | B   | 3,645                                 | 7                      | 139,35 | 8,26       | 89,184              | 5,28                   | 139,35              | 8,26                   | 0,13              |
|      |             | C   | 3,493                                 | 3                      | 133,54 | 3,54       | 85,465              | 2,26                   | 133,54              | 3,54                   | 0,05              |
|      |             | D   | 4,101                                 | 10                     | 156,78 | 11,8       | 100,33              | 7,55                   | 156,78              | 11,8                   | 0,19              |
|      |             | E   | 4,253                                 | 9                      | 162,60 | 10,62      | 104,06              | 6,79                   | 162,60              | 10,62                  | 0,17              |
|      | Constantine | A   | 3,160                                 | 7                      | 120,81 | 8,26       | 77,318              | 5,28                   | 120,81              | 8,26                   | 0,13              |

|    |             |   |       |     |        |        |        |        |        |        |      |
|----|-------------|---|-------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
|    |             | B | 3,792 | 8   | 144,97 | 9,44   | 92,780 | 6,04   | 144,97 | 9,44   | 0,15 |
|    |             | C | 3,63  | 7   | 138,78 | 8,26   | 88,819 | 5,28   | 138,78 | 8,26   | 0,13 |
|    |             | D | 4,266 | 1   | 163,09 | 1,18   | 104,37 | 0,75   | 163,09 | 1,18   | 0,01 |
|    |             | E | 4,424 | 5   | 169,13 | 5,9    | 108,24 | 3,77   | 169,13 | 5,9    | 0,09 |
| PR | Blida       | A | 2,84  | 23  | 108,57 | 27,14  | 69,484 | 17,36  | 108,57 | 27,14  | 0,45 |
|    |             | B | 2,84  | 44  | 108,57 | 51,92  | 69,484 | 33,22  | 108,57 | 51,92  | 0,86 |
|    |             | C | 2,84  | 61  | 108,57 | 71,98  | 69,484 | 46,06  | 108,57 | 71,98  | 1,19 |
|    |             | D | 2,84  | 128 | 108,57 | 151,04 | 69,484 | 96,66  | 108,57 | 151,04 | 2,51 |
|    |             | E | 2,84  | 52  | 108,57 | 61,36  | 69,484 | 39,027 | 108,57 | 61,36  | 1,02 |
|    | Chlef       | A | 2,84  | 41  | 108,57 | 48,38  | 69,484 | 30,96  | 108,57 | 48,38  | 0,8  |
|    |             | B | 2,84  | 78  | 108,57 | 92,04  | 69,484 | 58,90  | 108,57 | 92,04  | 1,53 |
|    |             | C | 2,84  | 107 | 108,57 | 126,26 | 69,484 | 80,80  | 108,57 | 126,26 | 2,1  |
|    |             | D | 2,84  | 225 | 108,57 | 265,5  | 69,484 | 169,92 | 108,57 | 265,5  | 4,42 |
|    |             | E | 2,84  | 91  | 108,57 | 107,38 | 69,484 | 68,72  | 108,57 | 107,38 | 1,78 |
|    | Tiaret      | A | 2,48  | 10  | 94,315 | 11,8   | 60,361 | 7,55   | 108,57 | 11,8   | 0,19 |
|    |             | B | 2,84  | 23  | 108,57 | 27,14  | 69,484 | 17,36  | 108,57 | 27,14  | 0,45 |
|    |             | C | 2,84  | 31  | 108,57 | 36,58  | 69,484 | 23,41  | 108,57 | 36,58  | 0,6  |
|    |             | D | 2,84  | 66  | 108,57 | 77,88  | 69,484 | 49,84  | 108,57 | 77,88  | 1,29 |
|    |             | E | 2,84  | 26  | 108,57 | 30,68  | 69,484 | 19,63  | 108,57 | 30,68  | 0,5  |
|    | Constantine | A | 2,84  | 12  | 108,57 | 14,16  | 69,484 | 9,06   | 108,57 | 14,16  | 0,23 |
|    |             | B | 2,84  | 12  | 108,57 | 14,16  | 69,484 | 9,06   | 108,57 | 14,16  | 0,23 |
|    |             | C | 2,84  | 33  | 108,57 | 38,94  | 69,484 | 24,92  | 108,57 | 38,94  | 0,64 |
|    |             | D | 2,84  | 69  | 108,57 | 81,42  | 69,484 | 52,10  | 108,57 | 81,42  | 1,35 |
|    |             | E | 2,84  | 28  | 108,57 | 33,04  | 69,484 | 21,14  | 108,57 | 33,04  | 0,55 |

### III.6.Conclusion

L'analyse statique non linéaire Pushover est utilisée pour évaluer le comportement sismique des structures en béton armée avec panneaux en maçonnerie en utilisant la méthode N2 de l'Eurocode 8 et interprétée par Fajfar et Fischinger[19]. Trois systèmes sont étudiés : maçonnerie chaînée uniforme, maçonnerie chaînée par harpage et maçonnerie de remplissage. Cependant, ces structures ont été étudiées vis-à-vis de la sismicité de quatre villes Algériennes. Il est à noter que Constantine et Tiaret ont une faible sismicité. Par contre, Chlef et Blida représentent deux niveaux de sismicité élevée.

L'étude réalisée durant ce chapitre nous a fourni alors des données qui servent à comparer les systèmes étudiés en terme de drift sous les différentes conditions séismiques des zones algériennes ainsi que les différents types de sols existant dans notre pays. Ces données nous permettront de conduire une étude théorique comparative entre les trois systèmes dans le chapitre suivant.

# **Chapitre IV**

## **Etude Comparative**

## **IV. 1. Introduction**

Après avoir construire des bases de données expérimentaux ainsi théoriques nous allons comparer les systèmes en maçonnerie chaîné uniforme, harpé et de remplissage en deux aspects. Le premier aspect concerne les résultats expérimentaux du chapitre (II) rapportés depuis les travaux de Belghiat et al. Par contre le deuxième aspect tient en compte notre travail théorique qui s'agit d'une étude sismique par l'analyse statique non linéaire Pushover réalisée dans le chapitre (III).

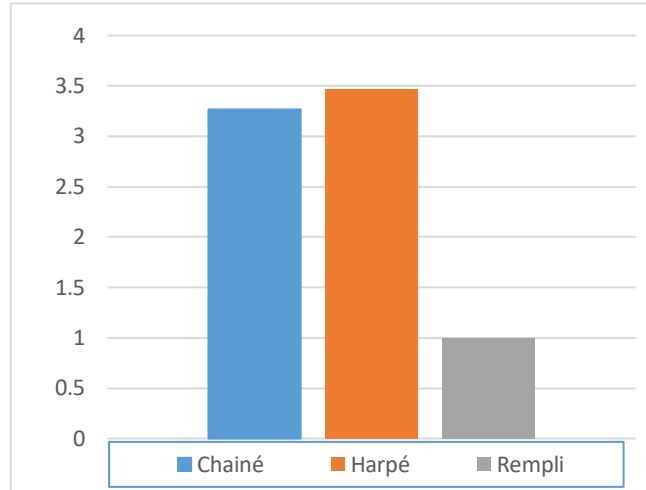
## **IV.2. Etude comparative expérimentale**

Comme auparavant motionné, les résultats des tests réalisés sur six portiques en béton armé avec différentes configurations de panneaux de maçonnerie dedans, fournissent des courbes de réponse pour chaque test réalisé. Ces courbes traduisant l'évolution de l'effort appliqué horizontal en fonction du déplacement latéral du spécimen, permettent d'extrapoler plusieurs paramètres liés au comportement de ces systèmes. Parmi ceux : la rigidité, la résistance maximale et la capacité de dissipation d'énergie. Ces paramètres ont été par la suite utilisés pour comparer les méthodes de construction en maçonnerie.

### **IV.2.1 Rigidité**

La rigidité du spécimen est définie par la pente de la courbe de réponse de celui-ci. D'après ce qu'on vu dans le chapitre (II) les spécimens chaînés uniformément représentent des rigidités de 176 kN/mm et 200 kN/mm ce qui donne une moyenne de 188 kN/mm. D'un autre part, les spécimens chaînés en harpage représentent des rigidités de 201 kN/mm et 198 kN/mm d'une moyenne de 199.5 kN/mm. Par contre, les spécimens remplis démontrent une rigidité de 58 kN/mm et 57 kN/mm avec une moyenne de 57.5 kN/mm. Vu les moyennes obtenues les spécimens chaînés sont beaucoup plus rigides que les spécimens remplis malgré que tous les spécimens consistent de mêmes matériaux et de quantités similaires. On peut conclure de cet effet que le chaînage de la maçonnerie augmente la rigidité vis-à-vis la poussée latérale.

Afin de mieux visualiser cette augmentation, les rigidités des spécimens chaîné ont été tracer sous forme d'histogramme comme montre la figure (IV.1) traduisant le ratio de la rigidité du chaînage soit uniforme ou harpé par rapport à la rigidité de spécimen rempli.



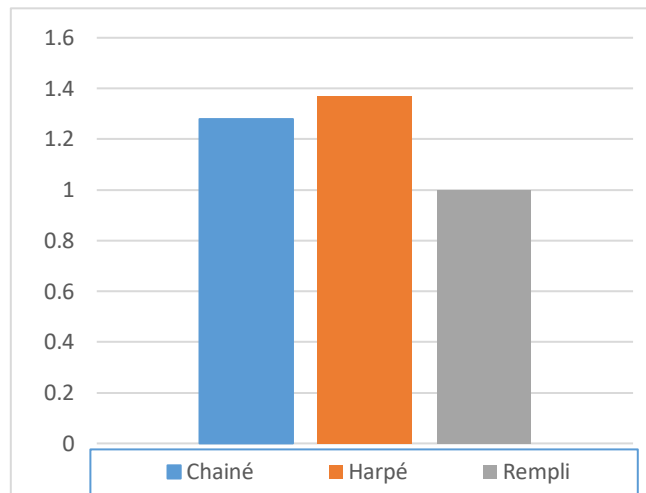
**Fig. IV.1** Ratios des rigidités de spécimen chaîné par rapport au remplissage.

Comme montre l'histogramme ci-dessus, le chaînage de la maçonnerie conduit à une augmentation de 227% de la rigidité du spécimen en maçonnerie. En parallèle, l'harpage de la maçonnerie aussi augment la rigidité du spécimen, une augmentation de 247% est mesurée par rapport au remplissage de la maçonnerie. Par contre, l'harpage de la maçonnerie ne joue pas un grand rôle dans l'augmentation de la rigidité par rapport à la maçonnerie chaînée uniforme.

#### IV.2.2 Résistance maximale

La résistance maximale des spécimens est comparée dans cette partie. D'après les courbes du chapitre (II) les spécimens chaînés uniformément résistent l'effort horizontal jusqu'à 240kN et 280 kN ce qui donne une moyenne de 260kN. D'un autre part, les spécimens chaînés en harpage représentent une résistance de 280 kN et 275 kN d'une moyenne de 277.5 kN. Par contre, les spécimens remplis démontrent une résistance de 197 kN et 209 kN avec une moyenne de 203 kN. En vue des moyennes obtenues les spécimens chaînés sont beaucoup plus résistants que les spécimens remplis. Par conséquence, le chaînage de la maçonnerie augmente la résistance vis-à-vis la poussée latérale.

Afin de mieux visualiser l'augmentation de résistances des spécimens grâce au chaînage de la maçonnerie, ces résultats ont été transformés en histogramme, comme montre la figure (IV.2), d'une manière similaire à celle de la comparaison de la rigidité.



**Fig. IV.2** Ratios des résistances maximales de spécimens chaînés par rapport au remplissage

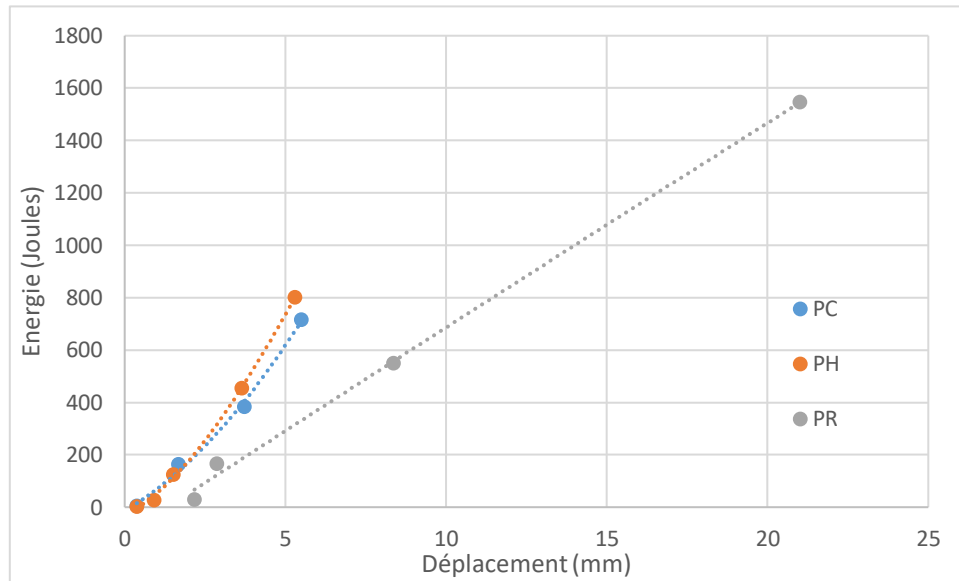
Comme montre l'histogramme ci-dessus, le chaînage de la maçonnerie conduit à une augmentation de 28% de la résistance maximale du spécimen en maçonnerie. En parallèle, l'harpage de la maçonnerie aussi augment la résistance du spécimen, une augmentation de 37% est mesurée par rapport au remplissage de la maçonnerie. Par contre, l'harpage de la maçonnerie ne joue pas un grand rôle dans l'augmentation de la résistance par rapport à la maçonnerie chaînée uniforme.

#### IV.2.3 Capacité de dissipation d'énergie

La capacité de dissipation d'énergie est une caractéristique très importante des structures surtout vis-à-vis du séisme, elle s'agit de la capacité de la structure à dissiper l'énergie et d'absorber celle-ci, ce qui permet de dissiper l'endommagement et d'éviter sa localisation/concentration. Elle est définie comme l'aire sous la courbe de réponse effort/déplacement de chaque cycle de charge. Ce paramètre est à déterminer grâce aux tests cycliques ce qui permet de cumuler les aires de tous les cycles réalisés. D'après la courbe de la figure (II.4) du chapitre deux, l'énergie dissipée du spécimen PC2 est de 3.44 Joules du cycle 1 et 158.95 Joules cycle 2 et 220.61 Joules du cycle 3 et de 332.25 Joules en cycle 4 ce qui donne en énergie cumulée 715.25 Joules. De la même manière, la courbe de la figure (II.8) démontre que le spécimen harpé enregistre 24.84 Joules en premier cycle, 108.75 Joules en deuxième cycle et 328.22 Joules en troisième cycle et 350.24 Joules en cycle 4 ce qui donne en énergie cumulée totale 812.05 Joules. D'un autre côté et selon la figure (II.12), l'énergie dissipée par le spécimen rempli est de 29.14 en premier cycle, 137.57 Joules en deuxième

cycle et 383.98 Joules en troisième cycle et 995.09 Joules en cycle 4 ce qui donne en énergie cumulée totale 1545.78 Joules.

Afin de comparer les trois types de spécimen en terme de capacité de dissipation d'énergie, les énergies dissipées cumulées dans chaque cycle réalisé ont été tracées sous forme de courbe en fonction du déplacement maximale de cycle concerné. La figure (IV.3) illustre les courbes obtenues des trois types de maçonnerie.



**Fig. IV.3** Courbes de l'évolution de l'énergie dissipée en fonction de déplacement de cycle concerné.

D'après la courbe, le spécimen avec panneau de maçonnerie harpé dissipe mieux l'énergie que le spécimen avec maçonnerie chaînée en panneaux uniformes. Ainsi, les deux systèmes chaînés présentent une capacité de dissipation d'énergie assez mieux que le spécimen avec panneaux remplis avec un écart satisfaisant en vue de la quantité de matériaux utilisés.

### **IV.3. Etude comparative théorique**

Les résultats théoriques obtenus durant l'analyse sismique réalisée dans le chapitre (III) seront utilisés dans cette partie visant de comparer les trois systèmes en vue de leurs réponses sismiques estimées par la méthode Pushover. Ces résultats s'agissent de drift maximal d'une structure en deux étages construit avec les systèmes en maçonnerie en question.

### IV.3.1. Vulnérabilité sismique de structures basée sur la méthode des déplacements

Cette méthode consiste à évaluer la capacité de la structure à résister au séisme à la base de son drift. Par conséquent, il est nécessaire de calculer le drift de l'étage du sommet d'après la courbe Pushover. Ce drift donne une indication sur la situation de la structure au moment de séisme en terme d'endommagement (Calvi[30], Restrepo-velez et Magenes[31], Borzi et al.[32]). Les états limites proposés dans les travaux de Borzi et al.[32] sont utilisés. Les auteurs définissent trois états d'endommagement (Fig.IV.4) : léger endommagement, endommagement significatif et endommagement de ruine. Les limites numériques adoptées sont :

- Etat de léger endommagement : un drift limite de 0.13% avec un coefficient de variation de 35%.
- Etat d'endommagement significatif : un drift limite de 0.34% avec un coefficient de variation de 30%.
- Condition de l'état de ruine : pour le cas de la maçonnerie avec un grand pourcentage de vide, un drift limite de 45% avec coefficient de variation de 30%.

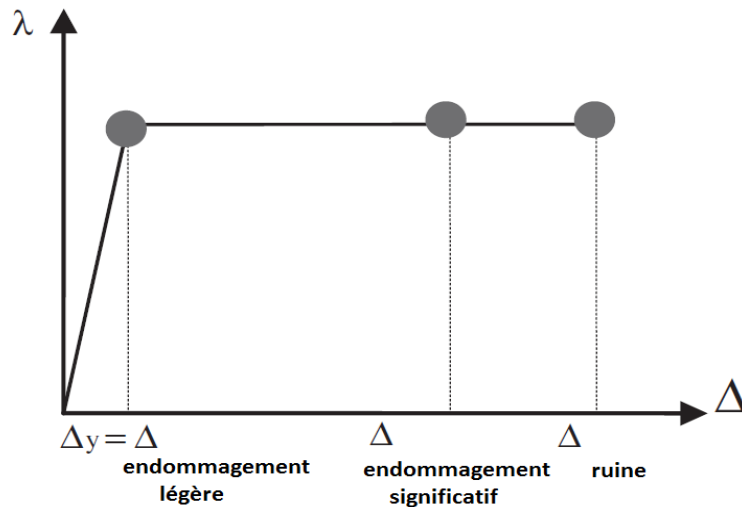


Fig.IV.4 : Etats limite d'endommagement selon[32].

Dans la partie suivante, on applique de la méthode de déplacement dans le contexte de la vulnérabilité sismiques des différents systèmes de construction en maçonnerie afin de les comparer et de définir le mieux avantageux.

#### **IV.3.2. Application sur le cas d'étude**

D'après les résultats du tableau (III.3), les différents types de structures à deux étages (avec panneaux uniformes et avec panneaux harpés et avec panneaux remplie) reflètent des drifts assez grands (0.81 % jusqu'à 4.37 %). Selon les limites d'endommagement définies par Borzi et al.[32], ces drifts traduisent un état de ruine. Ce qui signifie que tous les systèmes sont assez faibles vis-à-vis du risque sismique des villes Chlef (Sismicité élevée) et Blida (Sismicité moyenne) pour tous les type de sols A, B, C, D, et E.

Par contre, la sismicité des villes de Constantine et Tiaret (à sismicité faible et négligeable) mène à une distinction entre les différents systèmes :

- Les murs en chainages uniformes pour les types de sols A, B et C illustrent des drifts qui varient entre 0.16 % et 0.20 % en traduisant un état léger d'endommagement. Par contre, il atteignent l'état d'endommagement significatif dans les type de sol D et E.
- L'état d'endommagement significatif des structures à deux étages avec chainages harpés est aussi attendue dans les sites à sol de type 'E' (Vu les drifts obtenus de 0.21 %). Par contre, ce système reflète un endommagement léger dans le reste des des type de sols (A, B, C et D), les drifts enregistrés dans ce cas la varient dans l'intervalle 0.14 % et 0.19 %.
- Concernant les murs remplis, un endommagement significatif est signalé dans le type de sol A par des drifts égaux à 0.34 % et 0.37 %. Mais, dans les site à sol de type (B, C, D et E) la structure à panneau rempli atteinte la ruine les drifts enregistrés dans ce cas là varient entre 0.49 % et 1.32 %.

Le bilan de drifts obtenus et les états correspondant d'endommagement sont résumés au tableau (IV.1) suivant :

**Tableau IV.1 :** Drifts et états d'endommagement.

| Zone sismique III (Séismicité élevée Ville de Chlef)        |                   |               |               |                   |                   |
|-------------------------------------------------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|
|                                                             | Type de sol A     | Type de sol B | Type de sol C | Type de sol D     | Type de sol E     |
| PC                                                          | (0.81) Ruine      | (1.51) Ruine  | (2.08) Ruine  | (4.36) Ruine      | (1.76) Ruine      |
| PH                                                          | (0.81) Ruine      | (1.50) Ruine  | (2.09) Ruine  | (4.36) Ruine      | (1.77) Ruine      |
| PR                                                          | (0.83) Ruine      | (1.53) Ruine  | (2.1) Ruine   | (4.37) Ruine      | (1.8) Ruine       |
| Zone sismique II.b (Séismicité Moyenne Ville de Blida)      |                   |               |               |                   |                   |
|                                                             | Type de sol A     | Type de sol B | Type de sol C | Type de sol D     | Type de sol E     |
| PC                                                          | (0.45) Ruine      | (0.86) Ruine  | (1.20) Ruine  | (2.5) Ruine       | (1.01) Ruine      |
| PH                                                          | (0.46) Ruine      | (0.86) Ruine  | (1.21) Ruine  | (2.48) Ruine      | (1.01) Ruine      |
| PR                                                          | (0.5) Ruine       | (0.88) Ruine  | (1.22) Ruine  | (2.5) Ruine       | (1.03) Ruine      |
| Zone sismique II.a (Faible Séismicité Ville de Constantine) |                   |               |               |                   |                   |
|                                                             | Type de sol A     | Type de sol B | Type de sol C | Type de sol D     | Type de sol E     |
| PC                                                          | (0.17) Léger      | (0.20) Léger  | (0.19) Léger  | (0.21) Signifiant | (0.23) Signifiant |
| PH                                                          | (0.15) Léger      | (0.17) Léger  | (0.16) Léger  | (0.19) Léger      | (0.21) Signifiant |
| PR                                                          | (0.37) Signifiant | (0.5) Ruine   | (0.64) Ruine  | (1.32) Ruine      | (0.53) Ruine      |
| Zone sismique I (Séismicité négligeable Ville de Tiaret)    |                   |               |               |                   |                   |
|                                                             | Type de sol A     | Type de sol B | Type de sol C | Type de sol D     | Type de sol E     |
| PC                                                          | (0.16) Léger      | (0.19) Léger  | (0.19) Léger  | (0.21) Signifiant | (0.22) Signifiant |
| PH                                                          | (0.14) Léger      | (0.17) Léger  | (0.16) Léger  | (0.19) Léger      | (0.21) Signifiant |
| PR                                                          | (0.34) Signifiant | (0.49) Ruine  | (0.63) Ruine  | (1.30) Ruine      | (0.5) Ruine       |

#### IV. 4 Conclusion

Les spécimens chaînés soit uniforme ou harpé démontre des capacités latérales mieux de ceux des spécimens remplis. La comparaison expérimentale confirme l'avantage du chaînage de la maçonnerie. Une augmentation de 237% en rigidité latérale est mesuré. La résistance latérale s'augmente aussi pat 32.5 %. De même, cette comparaison communique une amélioration de la capacité de dissipation d'énergie.

De l'autre partie, la comparaison théorique démontre le système uniforme et le système harpé améliore la résistance au séisme. Ils limitent le déplacement latéral de la structure. La ruine attendue des spécimens remplis en zones de faible et de séismicité négligée est peut-être éviter gardant le même cout de construction en utilisant le système de chainage de la maçonnerie.

## **Conclusion générale**

Le travail que nous avons réalisé dans notre projet de fin d'étude a permis de soulever les conclusions suivantes :

- La maçonnerie est un matériau composé ayant comme composants des briques et du mortier. Il est généralement utilisé à la construction des murs soit chaînés ou remplis. Ces murs malgré qu'ils semblent similaires à l'œil, ils ont des réponses différentes sous sollicitations monotone et cyclique en termes de résistance, rigidité et de la capacité de dissipation d'énergie.
- Nous avons conclu d'après les expérimentaux rapportés que le chaînage de la maçonnerie améliore la rigidité par 237% et par 32.5 % concernant la résistance ainsi qu'il améliore la capacité de dissipation d'énergie.
- La comparaison théorique démontre que le chaînage de la maçonnerie améliore la résistance au séisme en limitant le déplacement latéral de la structure (drift). Le risque de la ruine des spécimens avec maçonnerie de remplissage dans les zones de faible et de sismicité négligée est peut-être évité en utilisant le système de chaînage de la maçonnerie tout en restant dans le même coût de construction.

## Références

- [1]CHAZELLES, C.-A. de, La construction en brique crue moulée dans les pays de la Méditerranée du Néolithique à l'époque romaine. Réflexions sur la question du moulage de la terre.,3. *Actes Du Colloq. Int. Les Cult. Constr. La Brique Crue, Toulouse, Montpellier, Ed. Espérrou, 2011, p. 153-164.,n.d.*
- [2]Chennaoui Youcef, Le matériau pisé à Cherchell : un autre type d'architecture en terre, nature et filiation.,*MEDITERRA 2009 Proceedings, Monfalcone. Edicom Ed. Ital.,(2009),437-449.*
- [3]Programme de recherches archéologiques TERMaghreb 2014 2016, *العمارة الطينية ببلاد المغرب*.
- [4] Fouchal, F., Thèses:Contribution à la modélisation numérique des interfaces dans les structures maçonnées, (2006), Université de Reims Champagne-Ardenne.
- [5] Allen, E. et Lano, J. (2003). *Fundamentals of Building Construction : Materials and Methods*, Chapter 8: Masonry. 4e édition. John Wiley and Sons, Inc., New Jersey, p. 257-349.
- [6] Julie THERRIEN-TRUCHON. 2012 ; COMPORTEMENT SISMIQUE DES MURS DE REMPLISSAGE EN MACONNERIE DE TUILES STRUCTURALES D'ARGILE.
- [7] Fabien Lagier Augustin Parret-Freud , 2006 ; Les murs en maçonnerie.
- [8] Balandier, P., *Constructions de Maçonnerie*, in: DDE La Martinique - SECQUIP, n.d.
- [9] Meziane Hakim, *Cours de construction-Chapitre V-La maçonnerie*, n.d. <http://fr.calameo.com/books/0010161930555fd17b4e1>.
- [10] [www.batiproduits.com](http://www.batiproduits.com)
- [11]Balandier, D., *Cours Formation Parasismique Constructeurs Batiments*, (2009).
- [12]Crisafulli, F.J., Thèses:Seismic Behaviour of Reinforced Concete Structures with Masonry Infills, university of Canterbury Christchurch, New Zealand, (1997).
- [13]Torrisi, G.S. & Crisafulli, F.J., *An innovative Model for the In-Plane Nonlinear Analysis of Confined Masonry and Infilled Frame Structures*,(2011).
- [14]Mehrabi, A.. & Shing, P., *Performance Of Masonry-Infilled Ric Frames Under In Plane Lateral Loads*, Report no. CU/SR-94-6. Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder., (1994).
- [15]Fajfar, P., *A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design*,*Earthq. Spectra*,16,(2000),573-592. Doi:10.1193/1.1586128.
- [16]Magenes, G., *A method for pushover analysis in seismic assessment of masonry*

- buildings,*Proc. 12 World Conf. Earthq. Eng.*,(2000),1-8. Doi:10.1029/2011JA016504.
- [17]Williams, M.S. & Clément, D.E., Application of pushover analysis to the design of structures containing dissipative elements,*13 Th World Conf. Earthq. Eng.*,(2004).
- [18]Fahjan, Y., Doran, B., Akbas, B., & Kubin, J., Pushover Analysis for Performance Based-Seismic Design of RC Frames with Shear Walls,*15th World Conf. Earthq. Eng.*,(2012).
- [19]Fajfar, P. & Fischinger, M., N2 - A Method for Non-Linear Seismic Analysis of Regular Buildings,*Proceeding Ninth World Conf. Earthq. Eng.*,Tokyo, Jap,(1988).
- [20]Chopra, A.K. & Goel, R.K., A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings,*Earthq. Eng. Struct. Dyn.*,33,(2004),903-927. Doi:10.1002/eqe.380.
- [21]Abdesslam, I., Thèses:Analyse sismique des structures en béton arme par la méthode Pushover, Université Mohamed Khider- BISKRA, n.d.
- [22]RPA99, Regles Parasismiques Algeriennes 99 / Version 2003, (2003).
- [23]Bernard, A. & de Flotte de Roquevaire, R., Atlas d'Algerie. Carte Geologique,*David Rumsey Hist. Map Collect.*,(1925).
- [24]Odum, J.K., Williams, R.A., Stephenson, W.J., & Worley, D.M., Near-Surface S-wave and P-wave Seismic Velocities of Primary Geological Formations on the Piedmont and Atlantic Coastal Plain of South Carolina, USA, (2003).
- [25]CEN, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance,*120*,(2004),1-229. [http://web.ist.utl.pt/guilherme.f.silva/EC/EC8 - Design of structures for earthquake resistance/64-1998-1\\_e\\_stf.pdf](http://web.ist.utl.pt/guilherme.f.silva/EC/EC8 - Design of structures for earthquake resistance/64-1998-1_e_stf.pdf).
- [26]Peláez, J.A., Hamdache, M., & Casado, C.L., Updating the probabilistic seismic hazard values of Northern Algeria with the 21 May 2003 M 6.8 Algiers earthquake included,*Pure Appl. Geophys.*,162,(2005),2163-2177. Doi:10.1007/s00024-005-2708-5.
- [27]Hamdache, M., Peláez, J.A., Talbi, A., Mobarki, M., & Casado, C.L., Ground-motion hazard values for northern Algeria,*Pure Appl. Geophys.*,169,(2012),711-723. Doi:10.1007/s00024-011-0333-z.
- [28]Fajfar, P., Capacity spectrum method based on inelastic displacement ratio,*J. Earthq. Eng. Soc. Korea*,28,(1999),979-993. Doi:10.5000/EESK.2008.12.2.069.
- [29]Nabouch, R., Bui, Q.B., Plé, O., Perrotin, P., Poinard, C., Goldin, T., & Plassiard, J.P., Seismic Assessment of Rammed Earth Walls Using Pushover Tests,*Procedia Eng.*,145,(2016),1185-1192. Doi:10.1016/j.proeng.2016.04.153.

- [30]Calvi, G.M., A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings,*J. Earthq. Eng.*,3,(1999),411-438. Doi:10.1080/13632469909350353.
- [31]Restrepo-velez, L.F. & Magenes, G., Simplified procedure for the seismic risk assessment of unreinforced masonry buildings,*13 Th World Conf. Earthq. Eng.*,(2004).
- [32]Borzi, B., Crowley, H., & Pinho, R., Simplified pushover-based earthquake loss assessment ( SP-BELA ) method for masonry buildings,*Int. J. Archit. Herit.*,2,(2008),353-376. Doi:10.1080/15583050701828178.
- [33] Choayb Belghiat, Jean-Patrick Plassiard, Ali Messabhia, Olivier Ple, Mohamed Guenfoud, Analytical and numerical study of double-panel confined masonry walls, *Journal of Building Engineering*, 39, 102322, 2021