

1. INTRODUCTION

La protection, la conservation et le renforcement des anciens bâtis soumis aux actions sismiques constituent un domaine actif de recherche et revêt un intérêt particulier dans les pays du bassin méditerranéen (Turquie, Syrie, Italie, les pays du balcan, etc.....). Le séisme de la Turquie en septembre 2000 a confirmé encore une fois que les pays de la méditerranée où sont concentrés les principaux monuments historiques (Mosquée, Eglise, Palais culturel,.....), sont caractérisés par des niveaux élevés de risque sismique.

Plusieurs études ont été réalisées sur la protection, la conservation et le renforcement parasismique des anciens bâtis, où des méthodes ont été développées par des investigations numériques et expérimentales. Parmi ces études, on cite la méthodologie développée par Gavrilovic et al [1,2], pour la protection, la conservation et le renforcement des églises byzantines en Macédoine. L'objectif de cette méthode est de prendre en considération les caractéristiques physico-chimiques des matériaux de construction, les paramètres sismiques du sol et les caractéristiques dynamiques de la construction. Pour la vérification de cette méthode, un modèle réduit à l'échelle 1:2.75 d'un prototype choisie, a été construit dans le laboratoire de IZZIIS et testé sur la table vibrante sous différents enregistrements sismiques connus. Ensuite le modèle endommagé a été réparé et renforcé de nouveau par la méthodologie appuyée sur le remplacement des ceintures en bois par des armatures d'aciers en précontrainte, et l'injection des fissures avec une pâte composée d'un nouveau matériau de construction a été conçue.

Vu l'importance de la ductilité dans le comportement non linéaire de la construction, dans l'absorption et la dissipation de l'énergie libérée par le sol durant une secousse sismique[3], par le présent article, on tente d'incorporer le concept de la ductilité dans les méthodes de renforcement et la réparation des anciens bâtis.

L'objet de la présente recherche est de réaliser une contribution à l'amélioration de la ductilité dans la méthode proposée par Gavrilovic et al [1,2], pour la réparation et le renforcement sismique des anciens bâtis. A priori, la présentation de la méthode originale proposée sera exposée, par la suite, l'aspect qualitatif de la ductilité sera traité, en faisant préciser la relation entre la déformabilité – la ductilité, le processus d'absorption

de l'énergie sismique par la construction et les facteurs influençant la ductilité.

2.REVUE SUR LA MÉTHODE DE RENFORCEMENT DE GAVRILOVIC

2.1. Principe de la méthode

La protection, la conservation et le renforcement des monuments historiques dans la région de la Méditerranée, constituent aujourd'hui un intérêt particulier pour les chercheurs de la régions [1,2]. Le développement d'une méthode de protection et de renforcement sismique des anciens bâtis avec la conservation de leur authenticité esthétique et historique, a fait l'objet de plusieurs études analytiques, en laboratoire et expérimentales. Gavrilovic et al [1,2], ont développé une méthode expérimentale vérifiée en laboratoire sur la restauration et le renforcement sismique des églises Byzantines en Macédoine.

L'objectif de cette méthode est basé sur :

La définition des caractéristiques physico-chimiques des matériaux de construction;

La définition des paramètres sismiques du sol des fondations des églises;

La définition des caractéristiques dynamiques principales de la construction;

L'analyse de la stabilité parasismique de la structure afin d'évaluer la capacité de portance maximale.

Pour ces détails, ils ont conçus un modèle réduit à l'échelle 1:2.75 d'un prototype choisi d'une église Byzantine pour la définition des caractéristiques existant de la construction, et de vérifier la méthodologie développée pour la réparation et le renforcement. La conception a tenu compte de la similitudes entre les paramètres du prototype et le modèle réduit, tout en respectant la conformité avec les données principales du modèle analysé d'une part, et la précision des objectifs définis pour l'investigation d'autre part. Le modèle réduit a été testé sur la table vibrante avec l'injection des enregistrements sismiques d'El centro, Breginj et Petrovac. Ils ont conclu que le modèle se comporte comme un solide très rigide à l'état élastique.

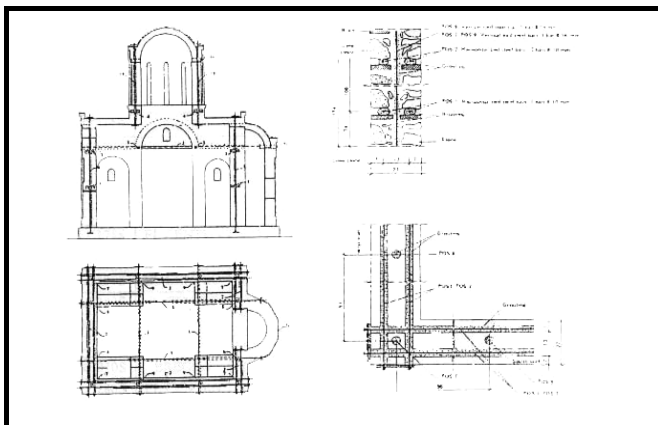
Après l'endommagement du modèle, ils ont réparé et renforcée le modèle réduit endommagé par une méthodologie exposée pour la réparation et le renforcement des anciens bâtis qui respecte les critères de sécurité sismique et qui prend en considération les caractéristiques principales des valeurs esthétiques et historiques de construction.

2.2. Considération de la méthode:

Les considérations prises en compte par cette méthodologie, sont:

- le nouveau matériau utilisé devra avoir des caractéristiques physico-chimiques et de déformabilité similaire à la maçonnerie existant et devra être compatible ;
- les régions occupées par les éléments existant précédemment devront être utilisée au maximum possible pour l'incorporation des nouveaux éléments de résistance;
- les nouveaux matériels, éléments et systèmes installés devront être réversibles pour que chaque nouvelle intervention puisse être remplacée.

2.3. Méthodologie de Renforcement



la coupe de la vue en plan Détail de renforcement

Fig. 1: Méthode appliquée pour le renforcement

Sur la base des critères exposés, la méthode originale pour le renforcement a été développée, comme suit:

1- l'incorporation des barres d'armatures horizontales comme un nouvel élément à la place de la ceinture en bois existant précédemment . Les armatures sont soumises à la précontrainte et le remplissage du vide entourant les armatures sera cimenté par une pâte spéciale;

2- l'injection du mortier liquide dans les fissures et la réparation de la maçonnerie par l'injection systématique du mortier liquide dans les aires vides de la maçonnerie pour le but d'augmenter la capacité de portance des murs.

3- l'incorporation des barres d'armatures verticales, si nécessaire aux extrémités des ouvertures par la précontrainte et les ancrés ensuite. Le remplissage sera effectué par injection et la cimentation par le mortier liquide.

2.4. Interprétation

Par la suite, le modèle renforcé a été soumis à une même série de teste dynamique comme le modèle original, afin de les comparer. Les résultats remarquables enregistrés pour le séisme d'El Centro sont interprétés comme suivant:

A la fin de la phase élastique définie par l'apparitions des premières fissures accompagnées de chutes et la perte de matériaux dans les arcs et les corniches, l'accélération maximale est enregistrée comme suit:

$a_{\max} = 0.17g$ pour le modèle non réparé

$a_{\max} = 0.4g$ pour le modèle réparé

A la fin de la phase plastique, lorsque le modèle subit un large dommage non linéaire ou le modèle devient un mécanisme avec la perte de l'intégrité structurale et le développement des fissures dans tout le modèle, l'accélération maximale est enregistrée comme suit:

$a_{\max} = 0.43g$ pour le modèle non réparé

$a_{\max} = 0.75g$ pour le modèle réparé

ces résultats montrent que le modèle réparé par la méthodologie proposée pour le renforcement sismique augmente largement la capacité de portance et la déformabilité de la structure au dessus du niveau de protection nécessaire.

Malgré l'originalité de la méthode présentée par Gavrilovic et al [1,2] qui a montré leur validité pour le renforcement sismique en laboratoire, le

concept de la ductilité dans leurs exposés a été incorporé d'une manière implicite dans la réparation du modèle, et ceci vu l'immensité du travail réalisé. Dans la suite de notre travail, le concept de base de la ductilité sera éclairé, avec le processus d'absorption de l'énergie par la construction durant une secousse sismique sévère, en faisant expliquer les facteurs influençant la ductilité. Une contribution à la proposition d'une méthode d'amélioration de la ductilité dans le renforcement des anciens bâtis, sera exposée.

3. NOTIONS DE BASE SUR LA DUCTILITÉ

3.1. Relation déformabilité – ductilité

La déformabilité est la capacité d'un matériau, d'un élément de la structure ou d'une structure entière de se déformer avant l'effondrement; par contre, la ductilité est la capacité de subir une déformation après la fin de la phase élastique jusqu' avant la ruine[4], comme le montre la figure 2.

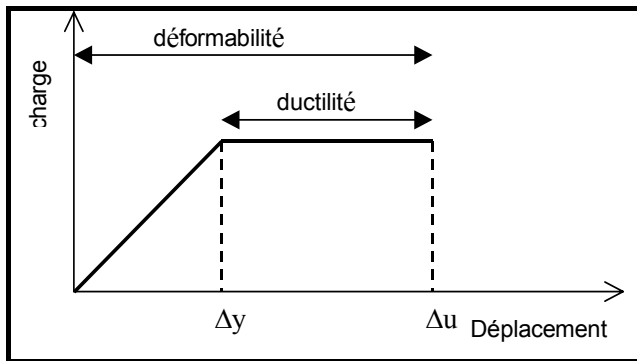


Fig. 2: Courbe charge – déformation ‘ Relation déformabilité – ductilité’

Il est à noter qu'une structure peut avoir une grande déformabilité, alors qu'elle est moins ductile comme le montre la figure 3, où on constate que les murs en béton armé (voile) possèdent une faible déformation alors qu'ils sont plus ductiles comparativement aux portiques qui sont plus déformables et moins ductiles [4].

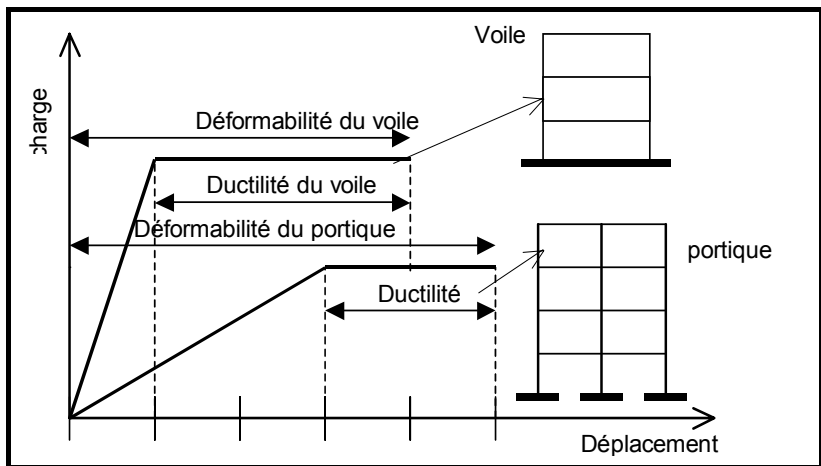


Fig. 3: Déformabilité et ductilité des voiles et portiques en béton armé

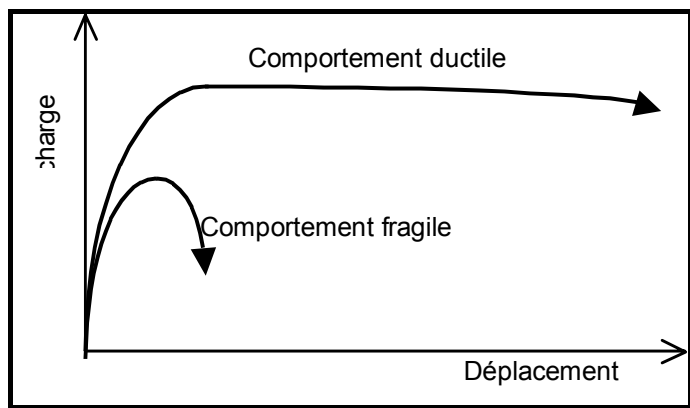


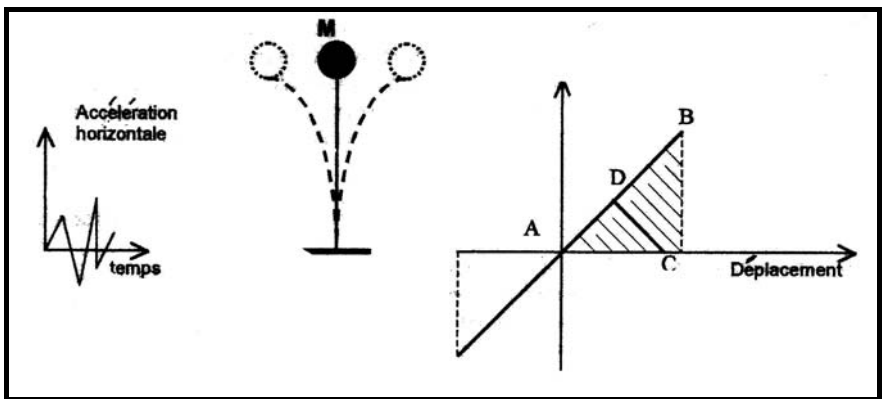
Fig. 4: Comportement d'un élément 'ductile et fragile' [5].

Pour les éléments en béton armé, lorsque le palier de non linéarité (plasticité) est long, on dit que l'élément est ductile. Cependant, lorsque le palier de non linéarité est court, on dit que l'élément est fragile (figure 4). Un comportement fragile aura lieu dans le cas où l'élément est sous armé (quantité d'armature insuffisante) et dans le cas où l'élément est armé en excès, l'élément est dit rigide [5].

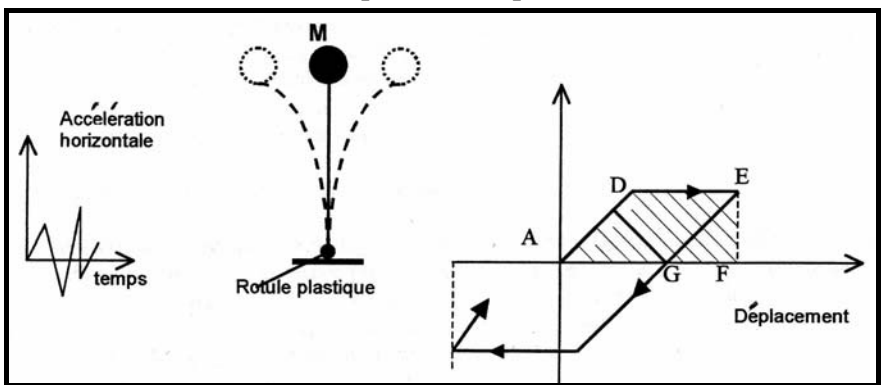
3.2. Processus d'absorption de l'énergie sismique

L'argument précédent du comportement non linéaire sera clarifié encore, par la considération du mode d'absorption d'un oscillateur simple de l'énergie libérée par le sol durant une secousse sismique sévère. Un tel oscillateur, répondant élastiquement, aura une relation charge-déplacement (fig. 5.a), où le point B est la réponse maximale. L'aire ABC sous la courbe représente l'énergie potentielle emmagasinée au déplacement maximale; et quand la masse M retourne à la position d'équilibre, l'énergie sera convertie en une énergie cinétique. Si l'oscillateur ne subit pas une force élastique et développe une rotule plastique avec les caractéristiques élasto - plastique, la courbe charge déformation comme montre la figure 5.b. Lorsque la capacité du rotule plastique est améliorée, la réponse de déplacement procède le long de la ligne DE et le point E représente la réponse maximale. L'énergie potentielle emmagasinée au déplacement maximal dans ce cas est représentée par l'aire ADEF. Lorsque la masse retourne à la position d'équilibre, l'énergie sera convertie en une énergie cinétique représenté par l'aire du petit triangle EFG, car l'énergie représentée par l'aire ADEG est dissipée par la rotule plastique par la conversion en une énergie dégagee par la chaleur et l'autre en une énergie irréversible.

Donc, il est évident que dans les structures élastiques, l'ensemble de l'énergie emmagasinée sera retournée comme une énergie cinétique dans chaque cycle, par contre dans les structures élasto plastiques seulement une partie en sera retournée. D'ici, le potentiel de l'énergie emmagasinée dans les structures élasto plastiques dans chaque cycle ne doit pas demandée nécessairement d'être grand comme les structures élastiques, et le déplacement maximal des structures élasto- plastiques n'est pas obligatoirement supérieur à celui des structures élastiques [6].



Un- Réponse élastique



b- Réponse élasto-plastique

Fig. 5: La réponse d'un oscillateur à une mouvement sismique [6].

3.3. Ductilité – Facteur de ductilité

La ductilité est l'aptitude de la structure, l'élément de la structure où la section de l'élément de ce déformer après la fin de la phase élastique jusqu' avant la ruine avec une dégradation signifiante de la rigidité [3]. La mesure de la ductilité est exprimée par le facteur de la ductilité définie par la relation (figure 2):

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

où Δ_u est la déformation ultime disponible et Δ_y la déformation à la fin de la phase élastique.

La déformation peut être exprimée soit par le déplacement (Δ), la rotation (φ) ou la courbure (ϕ). Lorsqu'on détermine le facteur de ductilité globale de la construction, on utilise le rapport des déplacements (Δ_u/Δ_y), mesuré à l'aide de la réponse enregistrée par l'accélérographe sismique. Quand on parle de la ductilité de l'élément, on utilise le rapport des rotations (θ_u/θ_y), déterminé analytiquement par des méthodes de résistance des matériaux ou expérimentalement en laboratoire. Pour l'étude du comportement post-élastique des éléments fléchis le rapport des courbures (ϕ_u/ϕ_y), qui constitue une mesure préférable, est appelé le facteur de ductilité de courbure des sections [3].

3.4. Facteurs influençant la ductilité

La ductilité de la structure permet d'apprécier le niveau de la résistance de la construction en phase élastique et les dégradations dues aux déformations dans le domaine élasto – plastique qu'elle peut subir sous l'effet des charges sismiques ou accidentelles qui entraînent le plus souvent des rotules plastiques dans certains points de la structure.

Un grand nombre de recherches expérimentales et analytiques [7,8,9,10], a été conduit pour l'amélioration de la capacité des rotules plastiques de l'absorption et la dissipation de l'énergie sismique. Or, cette amélioration dépend de plusieurs facteurs intrinsèques qui influent sur la ductilité et la portance des rotules plastiques. Parmi ces facteurs, on cite:

- la résistance à la compression du béton;
- le confinement transversal des éléments;
- les pourcentages des armatures tendues et comprimées
- la limite élastique des armatures
- l'effort normale dans les poteaux.
- la résistance élevée des armatures tendues

L'analyse des travaux [7,8,9,10], a montré que certains facteurs ont un effet défavorable sur la ductilité comme la résistance élevée des armatures tendues et l'effort normal dans les éléments. Par ailleurs, les autres facteurs ont un effet favorable sur la ductilité à savoir la résistance

élevée de la compression du béton et le pourcentage élevé des armatures comprimées. Ainsi, particulièrement le confinement transversal des éléments en béton armé par des cadres ou par des spirales.

4. MÉTHODE D'AMÉLIORATION DE LA DUCTILITE DANS LE RENFORCEMENT DES ANCIENS BÂTIS

Bien que la méthode de réparation et de renforcement proposée par Gavrilovic [1,2], a produit une large déformabilité dans le domaine plastique de point de vue expérimental en laboratoire, l'amélioration pratique de cette méthodologie s'avère nécessaire afin d'obtenir une méthode de réparation et de renforcement parasismique très utile qui tient compte de la ductilité locale de l'élément devenu un objectif principal dans les codes parasismiques récents [11,12].

4.1. Aspect de confinement

Parmi les paramètres influençant favorablement la ductilité locale, le confinement latéral de l'élément et qui a un rôle très important dans l'amélioration et l'augmentation de la résistance de compression du béton et la déformation maximale du béton et qui par conséquent, augmente la résistance et la ductilité dans les éléments.

Le confinement peut être réalisé soit par les spirales d'armatures circulaires ou par des cadres carrés ou rectangulaires. Comme il est influencé par plusieurs paramètres, suivant [7,8,9,10];

- le pourcentage volumique des armatures transversales, p_{vt} ;
- la résistance limite des armatures transversales f_{yh} ;
- l'espacement des cadres s_t ;
- la forme des cadres;

- la distribution des armatures longitudinales le pourtour de la section de l'élément.

4.2. Méthodologie d'amélioration de la ductilité locale dans les anciens bâtis

Les étapes de la méthodologie proposée par Gavrilovic et al [1,2], pour le renforcement et la réparation des anciens bâtis, dans sa globalité restent intactes, en faisant introduire quelques suggestions pratiques, et ayant prouvé leur efficacité dans les constructions moderne.

- 1-L'incorporation des poutres confinées latéralement par des cadres transversaux très serrés ayant la même section que les anciennes ceintures en bois, comme on peut ajouter une barre d'acier en précontraint, à la place des armatures horizontales proposées par Gavrilovic et l'ancienne ceinture en bois, comme le montre la figure 6, le remplissage de la poutre incorporée par l'injection de la pâte spéciale ayant prouvé leur validité de leur caractéristiques physico - chimiques en lui ajoutant des fibres d'aciers laminées, où leur efficacité a été examinée par plusieurs chercheurs.
- 2-L'injection du mortier liquide dans les fissures et la réparation de la maçonnerie par le remplissage du vide par la pâte spéciale.
- 3-L'incorporation des poteaux verticaux confinés latéralement par de la cadres d'armatures transversales très serrées aux extrémités des ouvertures des murs, après en les ancrées convenablement aux extrémités des ouvertures (figure 6). Ensuite, le remplissage par la pâte spéciale en lui ajoutant des fibres d'aciers laminées.

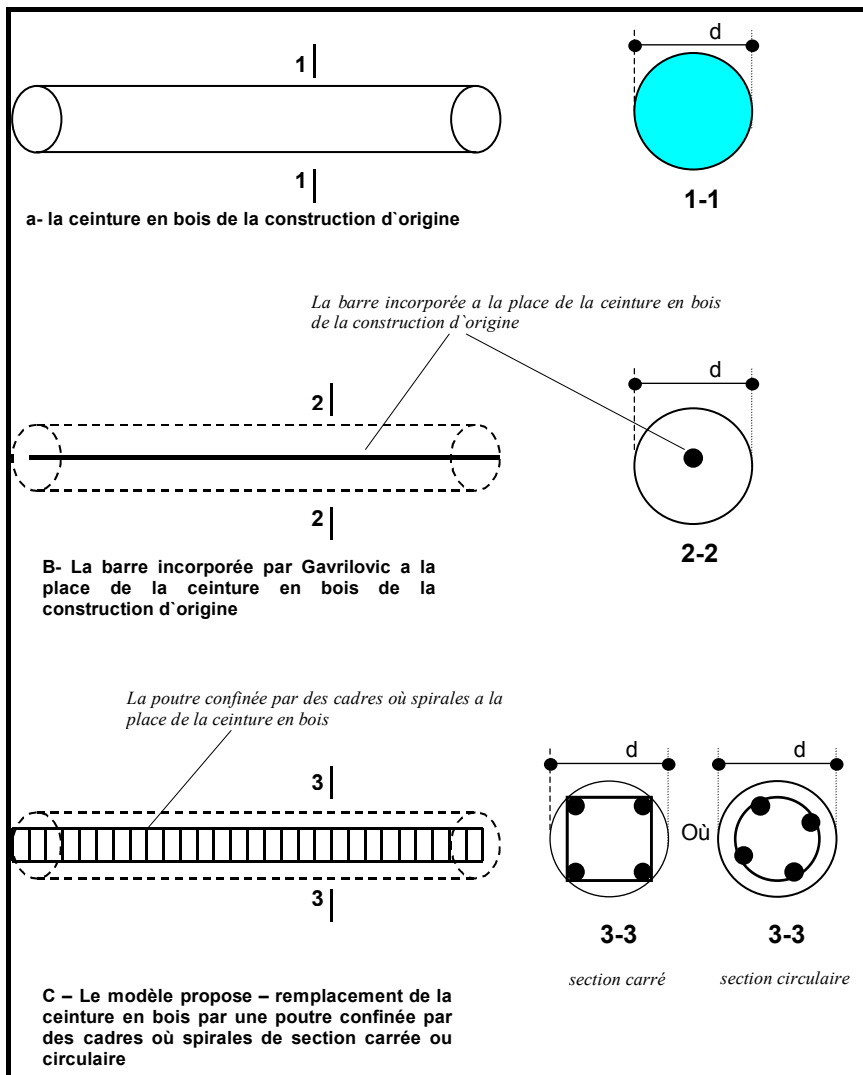


Fig. 6: la méthodologie de renforcement parasismique

4.3. Exemple

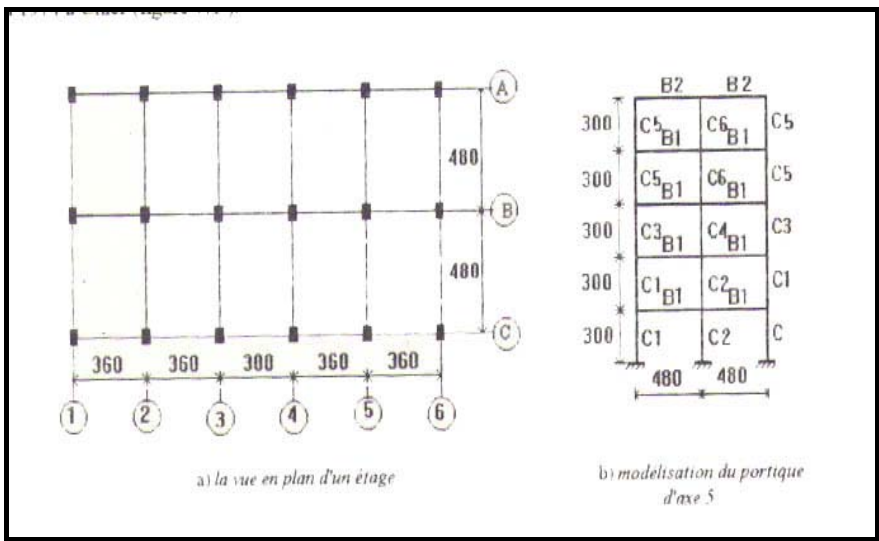
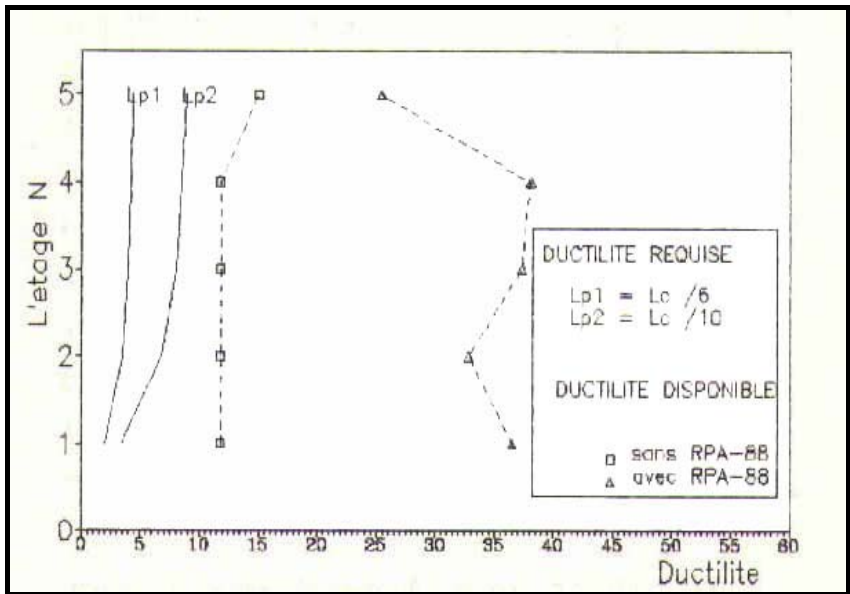


Fig. 7 Détail du bâtiment étudié (5 niveaux)

Pour l'éclaircissement encore de l'effet du confinement sur la ductilité dans les anciens bâtis et vu que les données nécessaires de l'église n'était pas connues exactement pour la vérification de la méthode proposée dans cet article, on a réalisé une étude analytique sur une structure ancienne endommagée par le séisme d'El Asnam 1980 (chlef, Algérie). La structure de cinq niveaux (figure 7), endommagée par le séisme, a été réparée et renforcée avec l'utilisation du confinement latéral dans les sections des poutres et des poteaux [13].

4.4. Interprétation des résultats

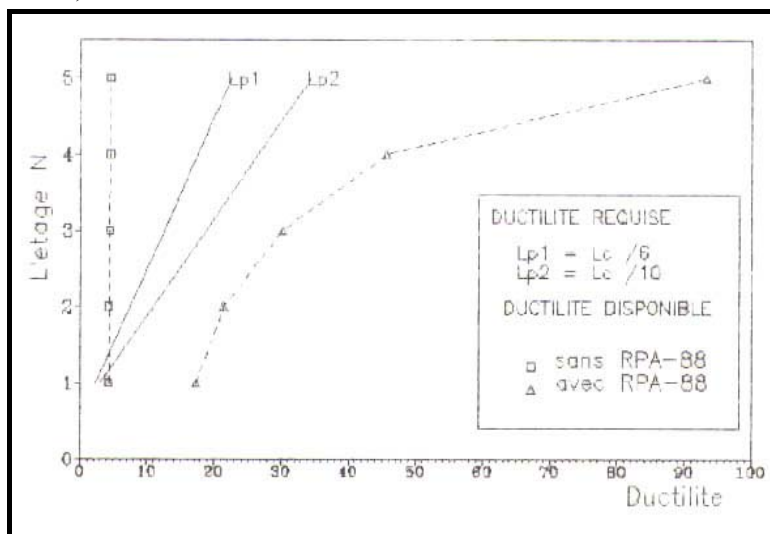
La figure 8 (a et b) montre le fuseau situé entre les courbes l_{p1} et l_{p2} qui représente la ductilité requise de la structure. Lorsque la courbe représentant la ductilité disponible dans les sections critiques dans chaque étage est inférieure a ce fuseau, on dit que la structure est non ductile ; par contre , lorsque la courbe dépasse cette fuseau, on dit que la structure est ductile.



a- les poutres

La figure 8 (a et b) montre l'effet du confinement sur la ductilité locale, où on constate que la ductilité locale a été augmentée plus de 10 à 15 fois dans la structure renforcée par confinement, comparativement à la structure initiale non ductile qui n'était pas confinée. Cette observation

est valable aussi bien dans les poutres (figure 8a), que dans les poteaux (figure 8b).



b- les poteaux

fig. 8 Ductilité dans les éléments de la structure (5 niveaux) Confinée

5. CONCLUSION

cette recherche comprend trois points distincts:

- le premier point expose les principes de la méthodologie de réparation, de conservation et de renforcement des anciens bâtis (églises Byzantines en Macédonie), basée sur des investigations analytiques, en laboratoire et expérimentales.
- Le deuxième point porte des notions de base sur la ductilité, ou la relation entre la déformabilité – ductilité , définition de la ductilité, et le processus d'absorption et de dissipation de l'énergie ainsi que les facteurs influençant la ductilité, sont éclairées.
- Le troisième point présente une contribution à l'amélioration de la ductilité dans la méthodologie de Gavrilovic. Ainsi, un exemple d'un ancien bâtiment en béton armé endommagé par le séisme d'El Asnam de 1980 , a été traité avec l'interprétation des résultats obtenus.

Il ressort de cette investigation les conclusions principales suivantes:

1-L'incorporation des poutres et des poteaux confinés latéralement par des cadres d'armatures transversales serrées à la place des ceintures en bois existants, est une solution pratique pour l'amélioration de la résistance et la ductilité dans les anciens bâtis.

2-Injection du vide par le mortier préparé ayant prouvé sa validité en ajoutant des fibres d'aciers laminées, où plusieurs études ont montré leur efficacité dans l'augmentation de la résistance.

Bien que ces conclusions sont purement théoriques, l'approbation de ces investigations par des essais expérimentaux sur des modèles réduit sur la table vibrante s'avère nécessaire pour les futures recherches.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- Gavrilovic P., Ginell W.S., Zelenkovska V. et Sumanov L., Development of a methodology and experimental investigation of seismic strengthening of historic monuments. Fifth U.S. national conference on earthquake engineering, Chicago, Illinois, July 10-14, 1994.
- 2- Gavrilovic P., Ginell W.S., Zelenkovska V. et Sumanov L., Development of a methodology for seismic strengthening of Byzantine churches. Fourth international conference on structural studies of historical buildings, STREMA 95.
- 3- Park R., Evaluation of ductility structures and structural assemblages from laboratory testing. Bulletin of the new Zealand society for earthquake engineering, vol 22, N0 3 sep-1989, pp. 155-166.
- 4- BERTERO V.V., Ductility Based Structural Design – State of the Art Report. Proceeding of ninth world conference on earthquake engineering, Tokyo, vol (VIII), Aug-1988, pp. 673-686.
- 5- Park R., et Paulay T., Ultimate deformation and ductility of members with flexure in reinforced concrete structures. John Wiley and sons editions, 1975, pp. 195-268.
- 6- Park R., et Paulay T., Strength and ductility of frames in reinforced concrete structures. John Wiley and sons editions, 1975, pp. 497-607.
- 7- Sheikh S.A. et Uzemri S.M., Strength and ductility of tied concrete columns. Journal of the structural division, vol 108, May-1980, pp.1079-1102.
- 8- Park R., Priestly MNJ. et Gill W.D., Ductility of square confined concrete columns. Journal of the structural division, vol 106, Apr-1982, pp.929-954.
- 9- Priestly MNJ. et Park R., Strength and ductility of reinforced and prestressed concrete columns and piles under seismic loading. ACI-structural Journal, No 84, Jan 1987, pp. 61-76.
- 10- Mander J.B., Priestly MNJ. et Park R., Theoretical stress – strain model for confined concrete. Journal of the structural division, vol 114, Feb-1988, pp.332-351.

- 11- DTR-B-C-2-48, Règles parasismiques algériennes RPA-99. CGS,2000, 90p.
- 12-AFPS90, Recommandations pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes Tome 2. Association Française de Génie parasismique, Presse des Ponts et Chaussées, 1992, 249p.
- 13- Kassoul A., Contribution à l'étude de la ductilité des structures auto-stables en béton armé, Thèse de magister, Centre universitaire de chlef, 1997.

Reçule 3 May, 2001