

Chapitre 1 : Introduction Générale

1.1. Introduction

Au cours du dernier siècle, au moins 1.000.000 séismes frappent dans le monde, à plus ou moins forte magnitude (PORMART, 2012). Quelques-uns d'entre eux ont causé des dommages importants dans le secteur urbanisable. Pour plusieurs pays africains, le risque sismique constitue une menace sérieuse à la vie humaine et à la propriété causant parfois des perturbations économiques majeures (BOUNOUAR, 2005) .

L'Algérie fait partie des pays vulnérables face aux tremblements de terre dans la zone ouest de la méditerranée. Historiquement, cette zone a une riche histoire patrimoniale et des anciennes structures (Photo 1.1). Mais paradoxalement, une riche histoire de la sismicité et de nombreux séismes dévastateurs « Annexe 1 ».



a) Le palais de Dey Hussein à Alger



b) Tombeau de la Chrétienne à Tipaza



c) La grande mosquée à Tlemcen

Photo 1.1 : Des patrimoines historiques en Algérie

1.2. L'objectif

Le séisme reste un phénomène naturel, qui provoque à la surface terrestre des secousses plus au moins violentes et brutales. Donc nous ne pouvons ni empêcher son action ni le prévoir, malgré les recherches et les études effectués par plusieurs chercheurs de différentes spécialités. Dans ce cas les ingénieurs ont pensé de trouver des techniques telles que les voiles et les amortisseurs antisismiques, qui permettent à la structure de résister à toutes les secousses d'intensités inférieures ou égale à l'intensité nominale fixée réglementairement pour chaque zone de sismicité. Dans le but d'assurer la sécurité de la population civile et préserver le patrimoine, en prenant en compte les aspects de conservation patrimoine.

La stratégie d'entretien et de réhabilitation des structures devrait proposer des nouvelles techniques de contreventements afin de diminuer le risque sismique, et par conséquent participer à leur conservation. Dans ce cadre, notre projet offre une méthode innovatrice basée sur l'introduction des Alliages à Mémoire de Forme sous forme d'amortisseurs fils.

1.3. La problématique

Dans ce travail on a cherché à résoudre les problèmes suivants :

- Est-ce que les fils en AMF sont vraiment efficaces pour l'atténuation du risque sismique ?
- Est-ce que le pourcentage de réduction des résultats obtenus est en relation avec le signal ?

1.4. Les applications antérieures dans le domaine du génie civil

Les propriétés spéciales que possède les AMF leur donne une importance pratique dans plusieurs domaines. Quelques applications dans le domaine du Génie Civil sont rappelées dans cette section.

LAFORTUNE, a effectué un essai à échelle réduite sur table vibrante pour comparer l'efficacité des contreventements d'AMF et d'acier installés dans un cadre d'acier. Les résultats obtenus ont démontré que les AMF sont plus efficaces pour contrôler la réponse sismique du portique (LAFORTUNE, Décembre 2006).

CASCIATI, FARAVELLI et HAMDAOUI, ont montré après un essai sur l'isolateur de base que le montage du système coulissant avec des barres en AMF offre trois fonctions supplémentaires à la structure :

- Fournir une rigidité contre une excitation de faible intensité ;
- Mettre en contraste de très grands déplacements ;
- Dissiper de l'énergie pendant le mouvement (CASCIATI, et al., 2007).

CASCIATI et HAMDAOUI, ont effectué un test sur table vibrante sur un modèle réduit d'un mur en maçonnerie. La réponse dynamique de ce prototype a été mesurée avant et après avoir renforcer le mur par des fils précontraints d'AMF. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité de ces fils en termes de dissipation d'énergie. Les auteurs de cet article ont remarqué que les fils reviennent à leurs positions originales, sans aucun déplacement résiduel (CASCIATI & HAMDAOUI, 2008).

CHRYSTOSTOMOU, DEMETRIOU, STASSIS et HAMDAOUI, ont utilisé l'Aqueduc de Larnaca à Chypre pour former la base des études analytiques sur les effets de l'AMF à base de cuivre. La structure de ce dernier est une construction en maçonnerie, il a été sélectionné comme étude de cas pour intégrer les appareils d'amortisseurs par AMF, ce monument du 18^{ème} siècle « période Empire Ottoman », été le premier lien d'application des AMF sur les véritables monuments historiques (STASSIS, et al., 2008).

Les chercheurs précédemment nommés ont utilisé des fils qui étaient fixés en base par des boulons et par un support rigide au-dessus pour soutenir les fils qui transférerait la force sur l'aqueduc. Ils ont montré que les AMF ont un effet significatif sur les caractéristiques dynamiques du monument.

Un programme de recherche établi par EL-ATTAR, SALEH et EL-HABBAL, dans lequel ils ont étudié la possibilité d'utiliser des techniques avancées de la protection sismique pour préserver les monuments historiques. Dans cette recherche, ils ont choisi

deux minarets qui sont situés au Caire « Égypte », le premier étant le minaret « Al Sultaniya » et le deuxième est le minaret « Qusun ». La recherche est basée sur l'étude de ces deux minarets sous un chargement sismique sans et avec les AMF, qui sont placées dans la partie supérieure du minaret, et ils ont appliqué une précontrainte verticale dans la partie inférieure. Les résultats ont montré l'efficacité des AMF pour l'atténuation de l'aléa sismique (El-ATTAR, et al., 2008).

TRAN, BALANDRAUD et DESTREBECQ, ont fait un essai dans le but d'étudier l'influence d'une courbure préalable sur le comportement en traction des fils d'AMF. Le modèle proposé intègre le comportement asymétrique traction/compression de l'AMF. Les résultats obtenus montrent que la contrainte est nulle au niveau du centre du fil d'AMF, avec une contrainte de traction dans la partie supérieure et une contrainte de compression dans la partie inférieure. Plus on s'éloigne du centre d'alliage, plus les contraintes augmentent (TRAN, et al., 2011).

1.5. Méthodologie du travail

Pour voir l'impact de ces AMF, le minaret de la mosquée de Mansourah «Tlemcen» a été sélectionné en raison de sa valeur culturelle comme exemple d'application. Le logiciel ANSYS version 11.0 «Annexe 2», a été utilisé pour la création d'un modèle tridimensionnel du minaret, en raison de la possibilité qu'il offre pour la modélisation AMF. Une analyse dynamique est ensuite conduite face à deux excitations sismiques différentes : la première fraction est 33% du signal enregistré du séisme de Boumerdès 2003, qui est le dernier séisme dévastateur en Algérie, a eu lieu le 21 mai 2003 de magnitude 6.8 sur l'échelle de Richter «Annexe 4». C'est le séisme le plus violent enregistré depuis celui du 10 octobre 1980 à El Asnam «Chlef», causant 2278 morts, 10261 blessés, environ 180000 sans-abri et plus de 43500 bâtiments endommagés. Les dégâts ont été estimés par le gouvernement à 5 milliards de dollars (MATABOSCH, 2011).

La deuxième fraction est une réplique du signal du séisme d'Ain-Temouchent d'une magnitude de 5.5 sur l'échelle de Richter qui a causé la mort de 28 et 150 blessés dont 50 dans un état grave (LARADJ, 2012), modifié par la méthode de SABETTA et PUGLIESE «Annexe 3», sans et avec les amortisseurs en AMF.

A la fin de notre simulation, les données sont analysées et les résultats sont comparés.

1.6. Plan du travail

Mis à part ce chapitre, qui présente une introduction générale et dans lequel nous avons présenté notre problématique, notre manuscrit est composé de trois chapitres :

- Dans un premier temps, nous présenterons les AMF avec des définitions détaillées. Un aperçu sur la transformation martensitique-austénitique, les différentes familles des AMF, et des exemples d'application dans d'autres domaines sont aussi présentés.
- Après quoi, une présentation historique de l'ancienne ville de Mansourah sera abordée dans le chapitre 3. Une description détaillée sur la mosquée de Mansourah et son minaret, une étude des pathologies de la mosquée, ainsi qu'une modélisation de la demi-ruine du minaret seront exposés.
- Dans le quatrième chapitre, un modèle tridimensionnel en élément finis du minaret étudié est mis en œuvre par le logiciel ANSYS. Une analyse dynamique de la structure est menée sans et avec les AMF. Les résultats obtenus à partir de l'analyse du comportement dynamique sont ensuite discutés pour des différents tests.
- En fin, une conclusion sur ce travail de recherche sera présentée tout en répondant au problème étudié. Les perspectives envisagées pour un travail futur seront aussi suggérés.

Chapitre 2:

Les Alliages À Mémoire De Forme

2.1. Introduction

Habituellement, quand un métal ou un alliage est soumis à une contrainte mécanique supérieure à sa limite d'élasticité, il subit une déformation plastique qui n'évolue ensuite pas ou très peu lors du traitement thermique ultérieur. Par contre, les alliages à mémoire de forme « AMF » sont des matériaux très spécifiques qui combinent deux ou plusieurs métaux différents, et qu'ils possèdent deux caractéristiques importantes :

- L'hyper-élasticité.
- La possibilité de se rappeler de leurs formes d'origine.(GUENIN, 1996).

Les AMF font en effet partie d'un groupe de matériaux que l'on dit intelligents «Smart materials» (SULPICE, 2009). L'un de ces intérêts est de produire une force élevée et un déplacement important pour une évolution de température de quelques degrés (PEULTIER, 2005). Leur activation thermique ne leur permet pas de travailler à haute fréquence « quelques cycles par secondes au maximum » (CHEMISKY, 2009), mais ils sont capables de développer un travail mécanique très important. Ils possèdent des propriétés remarquables qui sont associés à une transformation de type martensitique réversible (PORTIER, et al., 2007).

2.2. Historique

Le phénomène qui donne son nom aux AMF n'a été observé pour la première fois que dans l'année 1932 par le chercheur suédois OLANDER Arne. Il a découvert la super-élasticité d'un alliage Or-Cadmium «Au-Cd» (GUILLAUME & VALENTINE, 2007).

Le caractère réversible des effets mémoire a été mis en évidence par CHANG et READ en 1951. Dans les années qui suivent le même phénomène a été trouvé dans d'autres matériaux (MANACH, 1993). La publication du terme «effet mémoire de forme » intervient dans les travaux de HORNBOGEN et WASSERMANN en 1956 (MANACH, 1993).

Les premiers domaines d'utilisation des AMF ont concerné les manchons d'accouplement pour les avions de combat «F-14» en 1967 «Annexe 5».

Mais la recherche a rapidement été classée «secret militaire» et pour cette raison, peu de résultats ont été publiés (GUILLAUME & VALENTINE, 2007).

Dans ces vingt dernières années, les AMF ont connu un développement important. Pendant cette période, divers travaux scientifiques ont été effectués sur ces matériaux afin de mettre au point de nouvelles classes d'alliages et de déterminer les phénomènes de fatigue et de vieillissement (GUILLAUME & VALENTINE, 2007).

2.3. La transformation Martensitique-Austénitique

2.3.1 Définition

Les AMF contiennent deux phases cristallographiques nommées par analogie aux aciers ou bien la réaction martensitique-austénitique, qui a été découvert en 1879 par le physicien MARTENS (JORDAN & ROCHER, 2009).

Une phase mère austénitique formée à haute température «représentée par A», qui se transforme à la deuxième phase qui s'appelle martensitique «représentée par M», avec un refroidissement rapide pour éviter la diffusion des alliages (GUENIN, 1996).

Le passage entre les deux phases fait à la condition de l'un des cas suivants :

- Un simple changement de température : la température de transformation n'a pas lieu à température constante, elles dépendent de la composition chimique du matériau spécifique choisi.
- Une application d'une contrainte (Wikipedia, 2012).

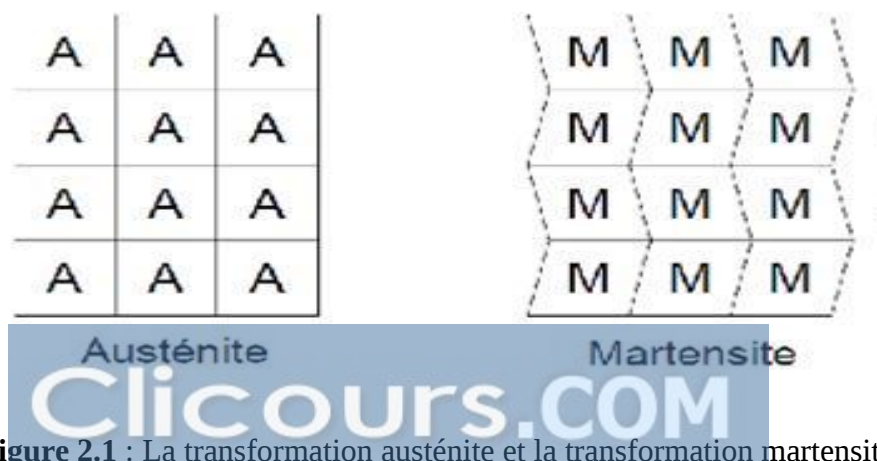


Figure 2.1 : La transformation austénite et la transformation martensite

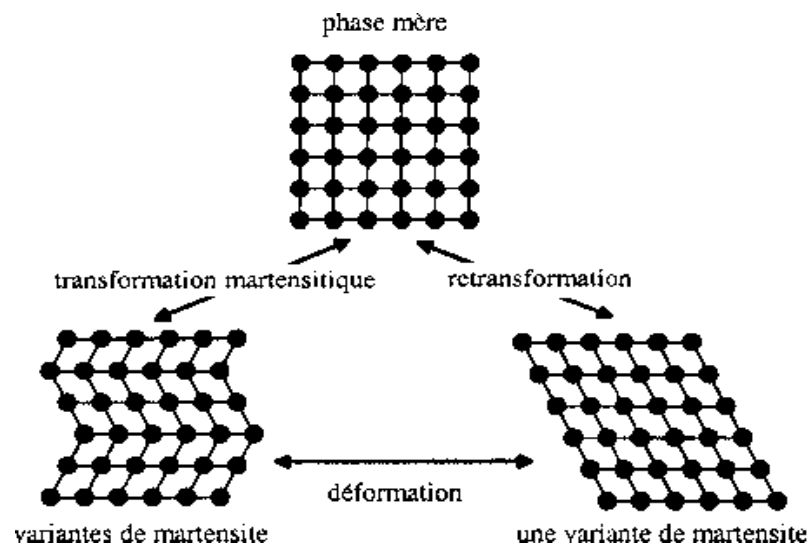


Figure2.2 : Effet de mémoire de forme

2.3.2 Les caractéristiques de la transformation martensitique-austénitique

- Un mouvement collectif d'atomes sur de très petites distances «déformation du réseau cristallin».
- La vitesse de transformation supérieure à la vitesse du son.

Une faible variation de volume, mais cisaillement de la structure dans une direction déterminée.

- Les cristaux de martensite vont pousser en plaquettes pour minimiser l'énergie à l'interface (BARON, 1998).

2.4. Les caractéristiques thermomécaniques des AMF

La caractéristique principale de ces alliages existe dans le fait qu'ils possèdent une mémoire, mais ce n'est pas leur seule spécificité (VIGNES, et al., 2001). Donc on peut distinguer cinq autres propriétés.

- Effet super élastique ;
- Effet de mémoire simple ;
- Effet de mémoire double ;
- Effet caoutchoutique ;
- Effet d'amortissement.

2.4.1 Effet super-élastique

L'AMF est capable de se déformer énormément «jusqu'à 10%» de manière réversible sous l'effet d'une contrainte (Wikipedia, 2008). Recouvrement des déformations large pendant les cycles de chargement-déchargement.

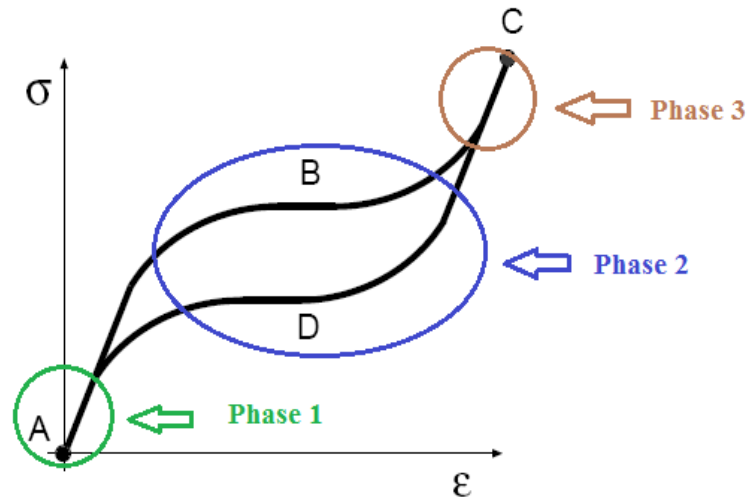


Figure 2.3 : L'effet super-élastique

- ABC (Chargement): Comportement non-linéaire.
- CDA (déchargement): Transformation inverse se produit.
- Point A: « chargement permanent » : le dispositif n'applique aucune force statique.
- Phase 1 «chargement dynamique de faible intensité»: le dispositif reste rigide, sans tolérer des déplacements importants.
- Phase 2 «chargement dynamique de grande intensité»: la rigidité du dispositif diminue donnant la possibilité au mur de se déplacer, pendant où la force reste constante.
- Phase 3 «chargement dynamique extraordinaire»: la rigidité du dispositif augmente et empêche l'instabilité.

Après le déchargement, la martensite induite se retransforme en austénite et l'échantillon retrouve sa forme initiale (BARON, 1998).

2.4.2 Effet de mémoire simple

L'AMF est capable de retrouver par un simple chauffage sa forme initiale après une déformation mécanique (Wikipedia, 2008). Cette dernière peut atteindre 8 % à l'état complètement martensitique, sous un changement de forme remarquable (JORDAN & ROCHER, 2009).

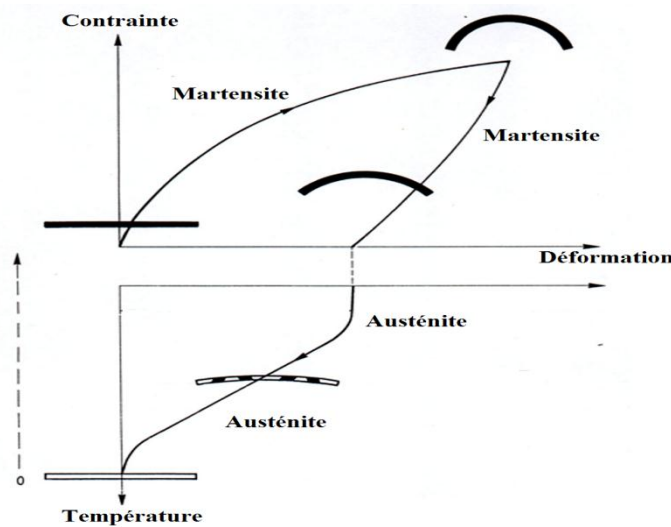


Figure 2.4 : Illustration de l'effet mémoire simple des AMF

2.4.3 Effet de mémoire double

L'AMF est capable après «apprentissage» d'avoir deux formes stables, une forme basse température dans l'état martensitique et une forme haute température dans l'état austénitique (Wikipedia, 2008).

Le passage entre les deux et inversement entraîne un changement de forme qui est réversible sous une contrainte. Il existe deux types de mémoire double.

- Effet mémoire double sens assisté:

Au refroidissement, la martensite apparaît à une température croissante avec la contrainte et il produit une déformation importante. Au réchauffage, en phase austénitique, cette déformation disparaît. Ce comportement est appelé effet mémoire double sens assisté ou super thermo-élasticité.

- Effet mémoire double sens non assisté :

L'effet mémoire double sens non assisté n'est observé que lorsque le matériau a subi un traitement appelé éducation, qui consiste en la répétition d'un certain nombre de cycles thermomécaniques. Elle crée un champ de contraintes internes qui orientera les variantes de martensite lors d'un refroidissement sans contrainte. Donc, on aura le passage réversible d'une forme haute température à une forme basse température par simple cyclage thermique en l'absence de toute contrainte appliquée (VIGNES, et al., 2001).

2.4.4 Effet caoutchoutique

Dans la phase martensitique, l'application d'une contrainte conduit à un déplacement des interfaces et l'échantillon subissant une déformation conservée à deux parties : une partie réversible « ε^e » et une partie résiduelle « ε^{re} » (BARON, 1998).

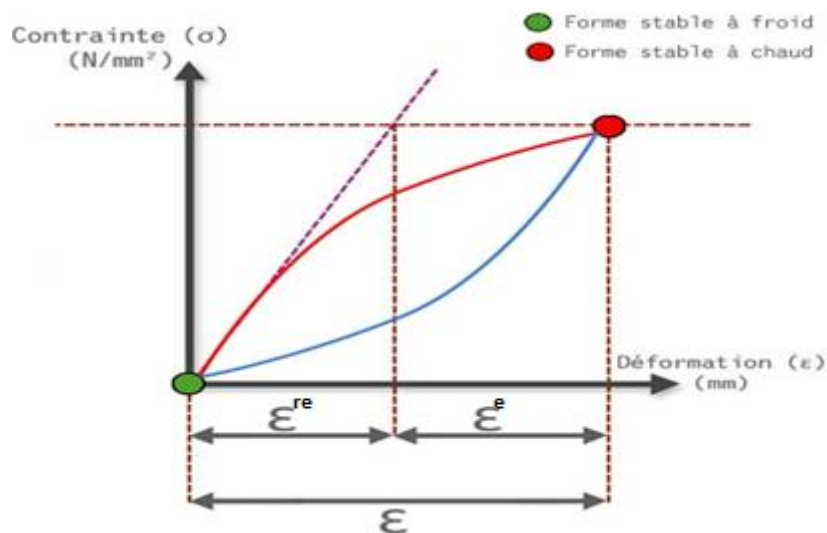


Figure 2.5 : L'effet caoutchoutique (BARON, 1998)

2.4.5 Effet d'amortissement

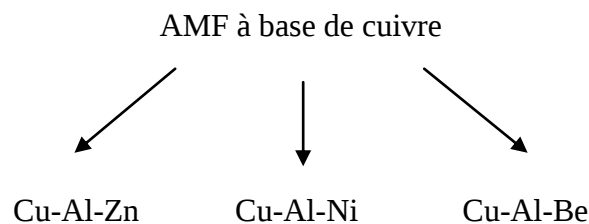
L'AMF présente des capacités importantes aux chocs ou aux atténuations des vibrations mécaniques. Le frottement intérieur ou l'amortissement mécanique des matériaux est associé au mouvement réversible des interfaces entre austénite et martensite. Les avantages du AMF pour résoudre les problèmes d'amortissement sont :

- Un frottement intérieur élevé.
- Une rigidité importante (Wikipedia, 2008).

2.5 Les familles d'alliages à mémoire de forme

Les AMF exposent des meilleures performances en termes de propriétés thermo-élastiques. Ils sont scindés en trois familles en fonction de leur composition chimique (GONZALEZ, 2002).

2.5.1 Les alliages à base de cuivre



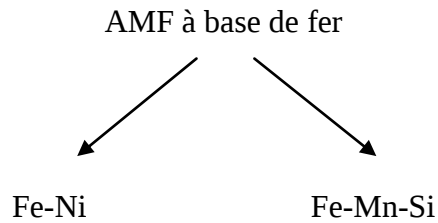
Ils sont caractérisés par:

- Une faible hystérésis de transformation.
- L'effet de mémoire est petit et moins stable.
- La matière première ne coûte pas chère.
- Ces matériaux sont bien adoptés à la super-élasticité.
- Sensibles au vieillissement « perte de mémoire » et aussi à la fatigue.(VIGNES, et al., 2001)



Photo 2.1 : AMF à base de cuivre

2.5.2 Les alliages à base fer



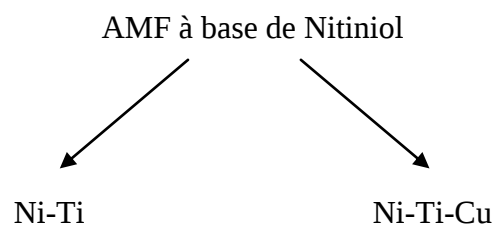
Ils sont caractérisés par :

- Une grande hystérésis de transformation.
- La martensite ne connaît pas la propriété de réorientation et la limite élastique est trop faible pour effectuer un chargement super-élastique.
- Ils peuvent être inoxydables par l'ajout d'éléments d'addition.
- Leurs caractéristiques mécaniques sont brutalement moins bonnes (PEULTIER, 2005).



Photo 2.2 : AMF à base de fer

2.5.3 Les alliages à base Nickel-Titane



Les alliages de Ni-ti sont les plus utilisés, actuellement nommés par Nitiniol, ils ont été développés en 1962 par WILES et BUEHLER au «Naval Ordnance Laboratory» à Maryland « États Unis d'Amérique » (JORDAN & ROCHER, 2009). Ils sont caractérisés par:

- l'effet de mémoire est excellent «10% de déformation réversible» ;
- La matière première est très chère ;
- Ces matériaux sont bien adoptés à la super-élasticité et une bonne caractéristique mécanique ;
- Bonne résistance à la fatigue et à la corrosion ;
- Lors de la fabrication, la prise des propriétés mémoire et super-élastique nécessite un fort écrouissage et une réduction de la dimension des gains pour obtenir une limite élastique élevée. Ce dernier est un inconvénient de ces alliages, lors de la mise en forme du matériau ;
- L'ajout de l'élément d'addition «par exemple le cuivre» permet d'ajuster les caractéristiques mécaniques du Nitinol (PEULTIER, 2005) (VIGNES, et al., 2001).



Photo 2.3 : AMF à base de « Ni-Ti »

Le choix des AMF, est effectué en fonction de:

- Leur propriété mécanique, thermique et électrique ;
- Leur organisation à la mise en forme et de leur préparation, leur coût (VIGNES, et al., 2001).

2.6 Dégradation des propriétés

La résistance à la fatigue est un des problèmes majeurs car elle modifie sensiblement le comportement des alliages. Les AMF utilisés dans des applications qui ont un fonctionnement cyclique et les phénomènes de fatigue doivent être pris en compte.

2.6.1 Résistance à la fatigue

Les AMF sont très sensibles à la fatigue. Ils possèdent des mécanismes supplémentaires liés au changement de phase «mécanisme mécanique et mécanisme thermique».

Les AMF se peuvent que durant la phase d'initiation, la forme des cycles contrainte-déformation évolue. Ce phénomène est expliqué par l'importance relative des dislocations lors des premiers cycles d'utilisation. Ces dislocations se sont le résultat inéluctable de la formation des plaquettes de martensite. Donc l'effort maximal diminuant nettement, c'est un signe de fatigue de l'alliage.

Il existe plusieurs types de ruptures des AMF. Ils dépendent fortement du mode de fatigue mécanique sollicité «super élasticité, réorientation des variantes».

2.6.2 Résistance au vieillissement

La résistance au vieillissement expose par une augmentation de température, il se produit un déplacement d'atomes qui va modifier la phase martensitique. Il existe en fait deux types de vieillissement.

- Vieillissement initial

En phase martensitique, les atomes rapprochent de leur position d'équilibre à résulte effet de stabiliser pour diminuer de son énergie libre et augmenter ainsi les températures.

- Vieillissement à long terme

Ce vieillissement est observable lorsqu'on place un échantillon à une température austénitique. L'augmentation des températures introduisant une forte augmentation

de l'hystérésis et une inhibition complète de la transformation (GUILLAUME & VALENTINE, 2007).

2.7 L'application des AMF dans le monde

Les propriétés des AMF «mémoire de forme et la super-élasticité» ont vite fait intéresser les ingénieurs et les chercheurs. Plusieurs applications ont été imaginées pour ce nouveau matériau:

2.7.1 Dans le domaine biomédical

Le domaine biomédical est toujours en augmentation, beaucoup d'application ont vu le jour et beaucoup d'autres sont à venir. En suite certains alliages de base NiTi ont une température de transformation de 36°C, ce qui est proche de la température du corps humain (GUILLAUME & VALENTINE, 2007).



Figure 2.6: Réduction de la fracture par une agrafe en Nitinol

«position avant et après chauffage» (GUILLAUME & VALENTINE, 2007)

2.7.2 Application automobile

On peut citer quelques avantages de composants en alliages à mémoire de forme « AMF » dans le secteur automobile:

- Faible encombrement ;
- Meilleure intégration des composants ;
- Silencieux ;
- Peu de composants pour un système donné (GUILLAUME & VALENTINE, 2007).

2.7.3 Application avion

Ce fut la première exploitation des propriétés des AMF. Le réel succès des manchons s'explique certainement par le fait que la mémoire de forme était pour le raccordement de tubes en titane, la seule solution. En effet, les circuits hydrauliques des avions de combat F-14 sont en Titane et de nombreux problèmes de raccordement se posaient, suite à la mauvaise soudabilité du matériau.

Les manchons en Nickel-Titane ont permis de contourner cette difficulté de façon simple et efficace. Au refroidissement, le composant en AMF acquiert sa forme basse température «augmentation du diamètre de passage». Retour à température ambiante, l'AMF retrouve sa forme initiale. Il en résulte une force de contact importante responsable du maintien des tubes avec une parfaite étanchéité.

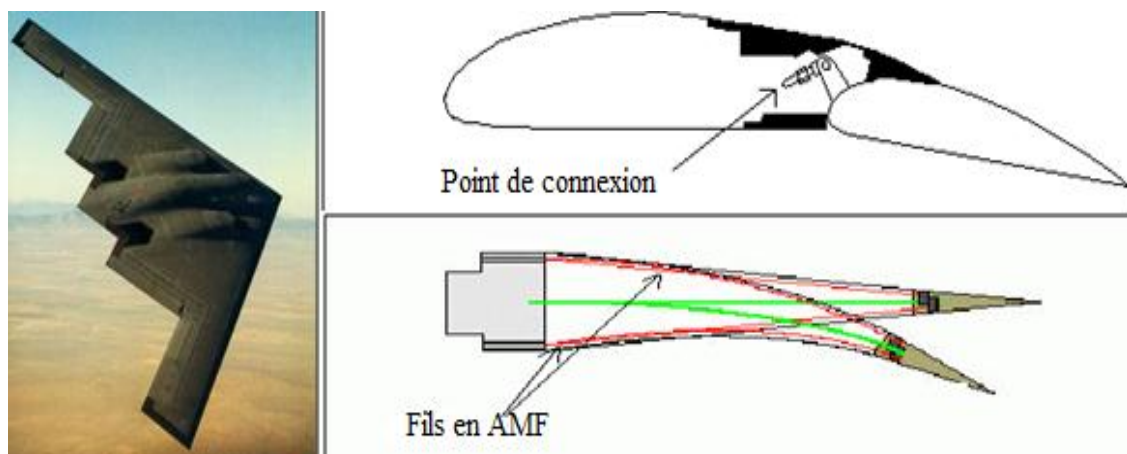


Figure 2.7 : L'utilisation des AMF dans les manchons d'accouplement des avions
(Nimesis, 2011)

2.7.4 Vestimentaire «lunetterie»

L'utilisation des AMF dans la lunetterie fut également un grand succès. Les lunettes sont beaucoup résistantes et ont une grande flexibilité. Ils existent en Ni-Ti ou en alliage cuivreux (GUILLAUME & VALENTINE, 2007) .

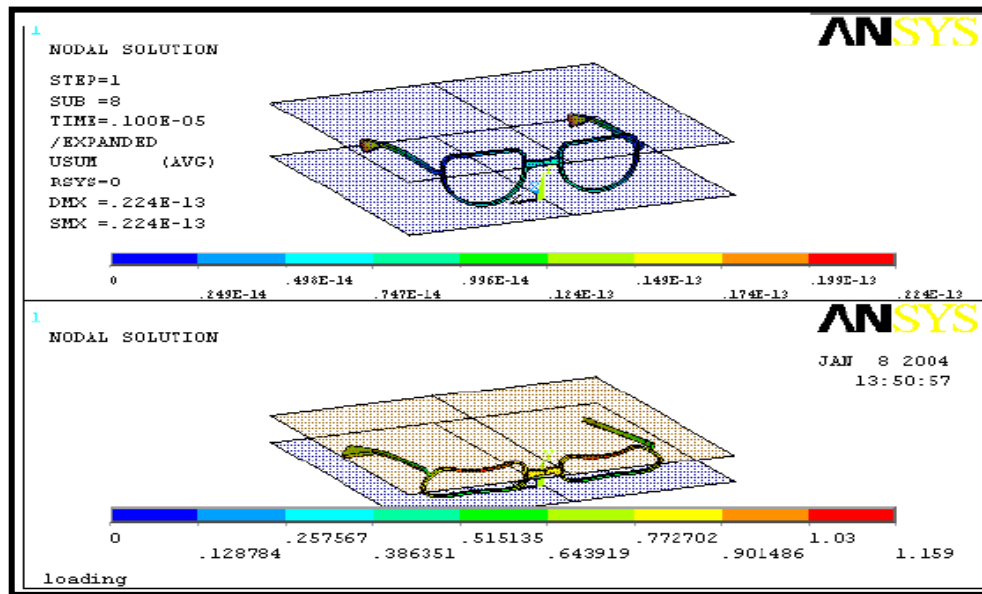


Figure 2.6: Modélisation par ANSYS de cadre de lunette fabriqués en AMF
(GUILLAUME & VALENTINE, 2007)

2.7.5 Sécurité

Plusieurs systèmes ont vu le jour dans ce domaine tels que:

- Des trappes d'évacuation de fumée pour des locaux «immeuble, usine» ;
- Des sprinklers d'extinction d'incendie ;
- Des valves de circuit de gaz ;
- Fermeture de gaines de ventilation. (GUILLAUME & VALENTINE, 2007)

2.8 Conclusion

Ce chapitre donne un aperçu détaillé sur les AMF, à cause de leur rôle important dans le domaine du Génie Civil, spécialement pour les constructions parasismiques.

En revanche, ils sont peu présents dans ce domaine. Le retard pris peut s'expliquer, par leur coût élevé au regard de celui des matériaux de construction usuels, mais aussi par le manque de connaissances des mécanismes impliqués dans leur association à des matériaux de construction traditionnels tels que la maçonnerie ou le béton.

Chapitre 3:
Aperçu Sur la Mosquée
De Mansourah

3.1 Introduction

L'Algérie est un pays riche en mémoires historiques de l'ouvrage humain, notamment à Tlemcen, la capitale de la culture islamique de l'année 2011. Cette ville joue un rôle très important dans le domaine architectural, grâce à ses patrimoines et ses sites archéologiques. On peut distinguer le monument le plus remarquable à Tlemcen «la mosquée du Mansourah», qui se situe à l'ouest de la ville. Actuellement, il ne reste que partie muraille, Tours et le minaret de la mosquée, ce dernier est un bel ouvrage en maçonnerie du XIV^{ème} siècle (ABADIE, 2010). Il est devenu l'un des symboles de la ville de Tlemcen le plus visité. En raison de la valeur culturelle du minaret et de son importance touristique, il doit être préservé pour l'avenir. Ce monument a connu des travaux de restauration et d'entretien qui ont opéré pendant la période coloniale française et postcoloniale par les architectes des monuments historiques et aussi en 2011 lorsque Tlemcen a été sélectionnée capitale de la culture islamique.



Photo.3.1 : Les ruines de la mosquée de Mansourah «Murs et minaret»



Photo 3.2 : Le minaret de la mosquée de Mansourah

3.2 Historique

A plusieurs reprises, le sultan mérinide Aboû Yaqoûb Yoûçof avait menacé la capitale du sultan Abd El Wadit mais les fortes murailles de la ville lui avaient opposé une résistance insurmontable (GEORGES & MARCAIS, 2011). En 1299 que le souverain mérinide résolu d'en venir à bout par la famine. Il bloqua Tlemcen étroitement, l'emprisonna dans un ensemble d'ouvrages de circonvallation, et reçut le soutien de toutes les tribus environnantes, pour bien marquer sa décision de ne pas lever le siège avant la prise de Tlemcen. Tlemcen était réduite à ses propres ressources et ne pouvait rien attendre du dehors (GHOMARI, 2002).

En 1302, le sultan Yoûçof se fit construire un palais pour sa résidence, des bains, des caravansérails, ainsi que la mosquée dont son minaret était d'une hauteur extraordinaire (GEORGES & MARCAIS, 2011). En peu de temps, le camp se transforma en véritable ville de 100 hectares, dressée en face de la vieille capitale Abd El Wadit assiégée. Qui se fit nommée « Tlemcen la neuve », aussi elle reçut de son fondateur le nom Mansourah qui signifie « la victorieuse » (ABADIE, 2010).

Le siège dura 8 ans et 4 jours et se termina en 1307, la ville allait tomber au pouvoir de l'ennemi, lorsque le sultan mérinide fut assassiné par l'un de ses esclaves. Le petit fils d'Abou Yaqoub signa la paix avec le roi de Tlemcen et abandonna intacte la nouvelle ville de Mansourah. Après le départ des mérinides, El Mansourah qui rappelait aux Tlemcenien huit années de souffrance, fut ruinée par eux. Ce ne fut qu'une trentaine d'année plus tard, que les Mérinides revinrent à nouveau et un second siège provoqua la prise de Mansourah que fut restaurée en 1335 (BOURDIM, 2011).

En 1348 le retour des souverains Zianides sur le trône de Tlemcen marqua la ruine définitive de la ville mérinide. Les ruines sont encore imposantes aujourd'hui. Il n'en reste actuellement qu'un minaret dressé dans la proche compagnie Tlemcenienne (BOUALI, 1984).

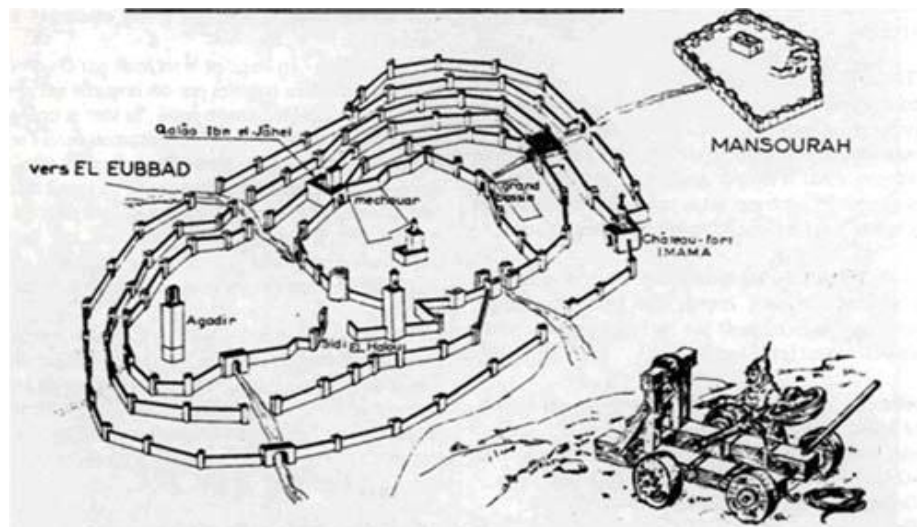


Figure 3.1 : Les deux sièges (BOUALI, 1984)

3.3. Description de site

Le monument de Mansourah est constitué d'une partie de l'enceinte en pisé (murs et Bordjs), de vestige du palais royal et des ruines de la mosquée où s'élève encore le minaret. Cependant, il est utile de mentionner que les vestiges de ce site historique a fait l'objet d'un classement en 1900.

Il y avait, dans cette ville, les palais adorables, les magasins, les bains et les beaux jardins avec la grande mosquée de 60 mètres de large et de 85 mètres de long. La mosquée été occupée par une cour de 30 mètres de côté, une galerie longeant intérieurement, les murs de façades d'une hauteur de 12 mètres avec une épaisseur de 1,50 mètres (GEORGES & MARCAIS, 2011). Deux groupes de 3 nefs longeant les murs latéraux encadrent cette cour, dont une vasque de marbre occupe le centre 13 nefs constituaient la salle de pierre. Elles rencontrent à leur extrémité trois nefs transversales suivant le mur du fond. Un espace libre, que couvrait une vaste coupole ou un plafond pyramidal, interrompait ce triple transept en avant du mihrâb. Le minaret de cette mosquée est placé au milieu de la face nord, elle est accolée au mur de la mosquée dans l'axe du mihrâb. Sa porte monumentale, à la fois entrée principale du minaret et de la mosquée (BOUALI, 1984).

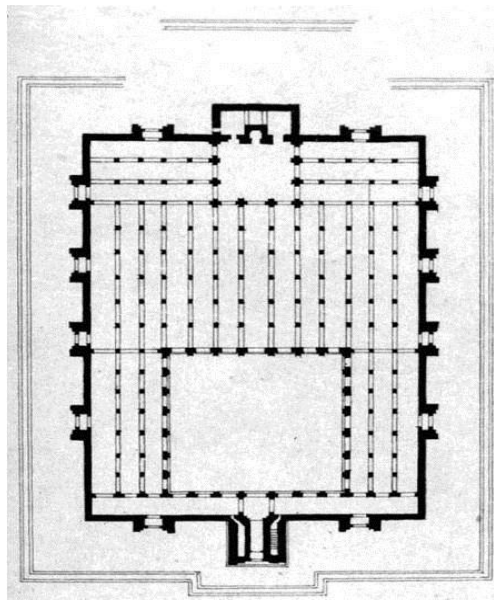


Figure 3.2 : Levé du plan de la mosquée de Mansourah après une fouille archéologique
(KARA SLIMAN, 2005)

3.3.1 Aspect architectural du minaret

Au-dessus de la porte, et au quart environ de la hauteur du minaret, existait en guise d'avent une sorte de balcon, dont l'emplacement est bien marqué et sous lequel on distingue une décoration en moqueras du goût le plus délicat, et des consoles gracieusement ciselées.

Cet auvent a disparu, mais on ne peut guère douter qu'il ait existé (GHOMARI, 2002) (BOURDIM, 2011). Vu la hauteur où il était placé il n'offrait qu'une protection illusoire à l'entrée, mais ce n'était plus là qu'un motif décoratif.

Le décor propre du minaret en moellon siliceux de grand appareil commence au-dessus, avec un panneau défoncé, d'un arc à lambrequins. Plus haut, s'étale le traditionnel panneau losangé des minarets maghrébins reposant sur deux arcades ogivales; en revanche le centre que percent des fenêtres étroites de haut en bas, demeure dépourvu de décors, ainsi qu'à la Giralda de Séville. Une galerie d'arcs lobés sur colonnettes de marbre, dont quelques-unes ont disparues, surmonte ce treillis de pierre et compose un dernier registre.

Cependant on présume que le décor de la tour ne s'arrêtait pas là. Trois mètres de surface restent nus, que pouvait meubler des rosaces en marqueterie céramique comme dans les autres minarets mérinides. La terre emmaillée joue un rôle remarquable dans la parure de cette tour, ce qui contribue à sa puissante originalité. Il semble que les façades entières étaient presque incrustées de mosaïques de faïence de diverses couleurs. Quelques fragments subsistent aux voussures du portail et dans le réseau à losanges où alternent en lignes montantes le vert, le marron et le bleu (GHOMARI, 2002).

Ce qui nous est resté de ce splendide monument nous fait regretter la disparition du lanternon qui le couronnait et de la face orientale qui en complétait le volume. Nous n'avons en effet ici qu'une moitié de minaret. C'est vraisemblablement la rupture de pièces de bois qui servaient de linteaux aux ouvertures latérales qui entraîna l'effondrement de l'autre moitié et des aménagements intérieurs, du noyau central, que devait occuper six chambres superposées et la rampe, que six fois en faisait le tour.

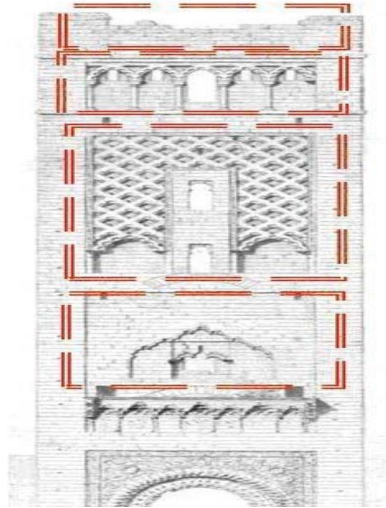


Figure 3.3 : Le registre du décor de la tour principale du minaret de Mansourah

(KARA SLIMAN, 2005)



Photo 3.3: a): La porte principale du minaret

b): Auvent au-dessus de la porte d'entrée du minaret de la mosquée de Mansourah

3.3.2 Caractéristiques géométriques du minaret

Dans notre projet, en basant sur le minaret de la mosquée, qui porte à sa base une ouverture monumentale. Ce minaret servait d'entrée principale de la mosquée, et elle est présentée sous la forme d'un arc plein cintre et mesure 2,50 mètres d'ouverture (KARA SLIMAN, 2005).

Le minaret est quadrangulaire «10x10» m², avec un noyau central creux carré de 10 mètres de côté. Il accuse un fruit extrudé d'un angle de 0,41 gr de la base vers le haut, ce qui lui donne un côté de 9,486 mètres au sommet. Il a une hauteur de 40,00 mètres et atteignait les 47,00 mètres avant l'effondrement (KARA SLIMAN, 2005). C'est donc le plus haut minaret d'Algérie et le troisième du Maghreb après ceux de la Koutoubia de Marrakech et de la mosquée de Hassan II à Rabat (BENKELFAT & MELIH, 2009).

3.3.3 Les caractéristiques mécaniques du minaret

Les anciens minarets sont généralement construits avec des matériaux traditionnels naturels trouvés dans la zone de leur emplacement. C'est le cas du minaret de la mosquée, qui a été réalisé en maçonnerie pierre de taille en gré siliceux de couleur rose. La section de la pierre est d'environ « 25x25 » cm², et d'une longueur variant entre 50cm et 1,20m. Le mortier utilisé était un mélange de sable et de chaux. La structure des voûtes supportant les rampes des escaliers est en brique de terre cuite hourdée d'un liant (KARA SLIMAN, 2005).

Tableau 3.1 : Caractéristiques mécaniques des matériaux de construction

Pierres taillées	
Module d'élasticité (MPa)	20833
Poids volumique (KN/m³)	25
Coefficient de Poisson	0.2
Résistance à la compression (MPa)	14.69
Mortier	
Module d'élasticité (MPa)	4000

3.4. Etude des pathologies

Le diagnostic des causes des désordres ne s'arrête pas aux simples caractéristiques du matériau, mais doit prendre en compte la conception, la construction, l'usage et l'histoire du bâtiment. Il faut être conscient que certains désordres du bâti ancien sont le résultat d'une évolution très lente sur six siècles pour le cas de Mansourah.

La typologie des désordres recensés sur les remparts de Mansourah est classifiée comme suit :

- Érosion de pied ;
- Érosion de tête ;
- Érosion superficielle ;
- Crevasses ;
- Fissures (verticales et en escalier) ;
- Effondrement ou ruine.



Photo 3.4 : Les différentes pathologies recensées sur les remparts en pisé du site historique de Mansourah

L'étude qualitative et quantitative des pathologies a montré une grande fréquence de l'érosion en tête des vestiges. L'effondrement récent dans les années 90 de certaines tours, ou pans de mur, est le résultat de la synergie de plusieurs facteurs : les phénomènes d'érosion, les crevasses, ainsi que les fissures créent autant de points critiques. De plus, l'érosion accentuée au pied de certains murs et la présence de végétation à proximité immédiate. Il est autant de facteurs ayant sans nul doute contribué synergiquement à la ruine.

Si ce type de ruine est advenu après quelques siècles d'agression face aux différents agents climatiques. Il en a fallu quelques heures à l'être humain pour démolir plusieurs résidus de mur de l'enceinte du site historique de Mansourah. C'est à dire que l'homme reste l'élément le plus dévastateur.

La synthèse des pathologies recensées sur le site historique de Mansourah montre la nécessité d'intervenir en urgence dans les parties qui accusent une dégradation accrue pouvant engendrer des risques de ruine.

3.5. Modélisation de la demi-ruine

La modélisation numérique est devenue un outil indispensable pour la prédiction de phénomènes divers. Mais aussi pour la compréhension et la simulation du comportement mécanique d'un ouvrage.

La demi-ruine de l'emblème de Tlemcen qu'est le minaret de Mansourah est légendaire. Pour nous permettre d'élucider cette énigme, une étude a été effectuée à l'aide de la méthode des éléments distincts « adaptée aux constructions en maçonnerie porteuse » sur ruine du minaret après l'avoir restitué dans sa configuration originelle. Cette modélisation permis de retrouver le plan de ruine du minaret (GHOMARI, 2010).

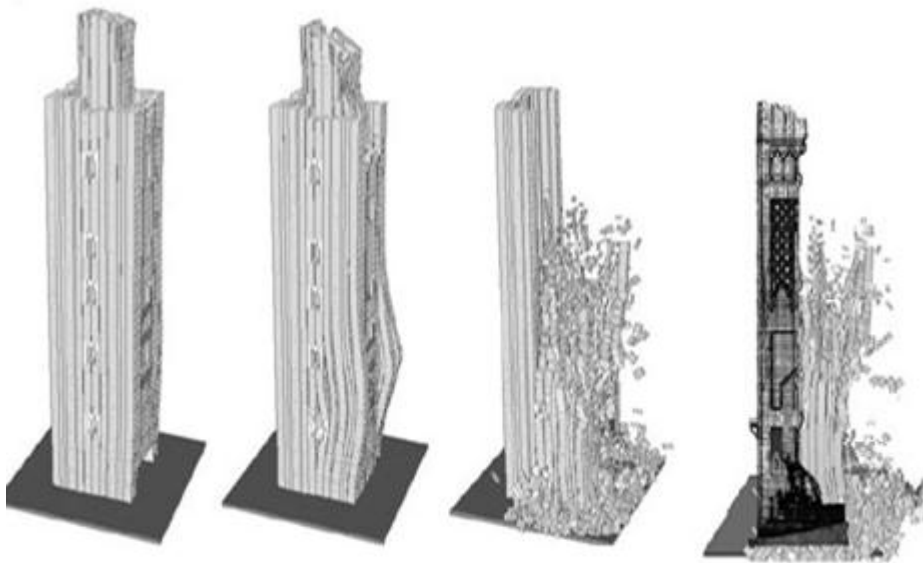


Figure 3.4: Modélisation de l'effondrement du minaret par la méthode des éléments distincts (GHOMARI, 2010)

3.6. Restitution virtuelle

En 2001, un étudiant de l'université d'Abou Baker Belkaid de Tlemcen, a réalisé un travail qui consiste à restituer le minaret de la mosquée de Mansourah à l'origine. Cette

aventure, mais combien même utile, a permis l'aboutissement à un premier travail de modeste qualité.

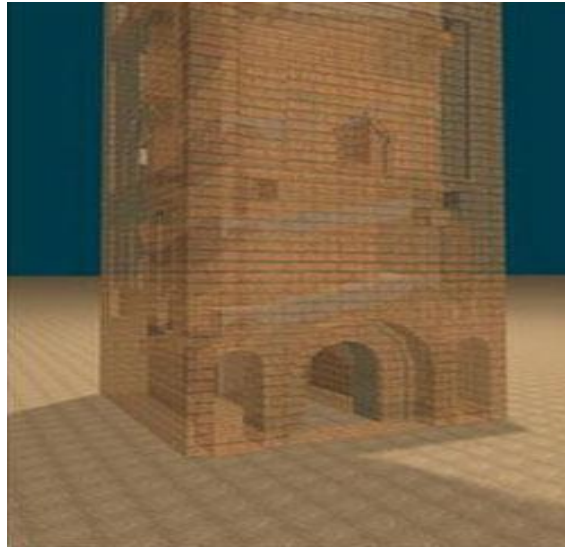


Figure 3.5: Restitution virtuelle du minaret emblématique de la ville de Mansourah
(KADA, 2001)

3.7. Conclusion

Le minaret de la mosquée de Mansourah présente une richesse patrimoniale et historique. Sa préservation monumentale est cruciale aux yeux de l'Algérie en général, et Tlemcen en particulier. Pour cela, une étude dynamique avec le logiciel ANSYS va être établie afin de voir l'impact d'AMF dans la réduction des risques sismiques de cette structure.

Chapitre 4:
Modélisation Dynamique du
Minaret de Mansourah par la
Méthode des Éléments Finis

4.1 Introduction

A l'aide du logiciel de calcul d'élément finis ANSYS version 11.0, nous avons étudié le comportement dynamique du minaret de la mosquée de Mansourah, caractérisé par sa hauteur de 40 m. Cette étude a été faite dans le but d'analyser les fréquences et les périodes propres, sans et avec des fils en AMF. Sous deux excitations différentes «33% du signal enregistré du séisme de Boumerdès 2003, et une réplique du signal du séisme d'Ain-Temouchent modifié par la méthode de SABETTA et PUGLIESE». Les résultats seront présentés dans ce chapitre tel que les déplacements, les accélérations, et la distribution des contraintes.

4.2 Les principales hypothèses

Les hypothèses retenues dans la modélisation sont :

- Le comportement du matériau du minaret est supposé être linéaire, élastique, isotrope.
- Le modèle est tridimensionnel donc on a été amené à utiliser l'élément de type « solide 45 » pour modéliser la structure et les cornières d'assemblage et « solide 185 » pour modéliser les AMF ;
- Les ouvertures «fenêtres et porte» sont prises en considération dans le modèle ;
- Le modèle numérique est supposé être encasté à sa base ;
- L'épaisseur des murs de la structure est de 1,40 m ;
- L'effet de mortier entre les pierres rocheuses du minaret est pris en considération pour cela on a pris comme module élasticité de la structure, un module équivalent et qui est estimé à 30% du module élasticité original « de la pierre » ;
- Le poids propre du minaret est pris en considération.

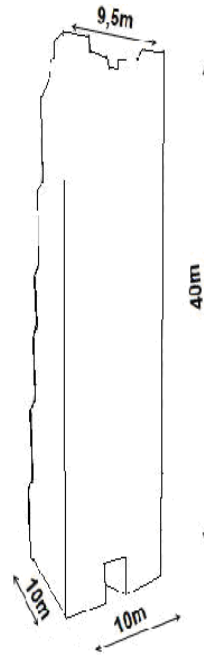


Figure 4.1 : Description géométriques du minaret de Mansourah.

4.3 Propriétés des matériaux utilisés

4.3.1 Caractéristiques du minaret et des AMF

Les caractéristiques mécaniques du minaret ont été présentées dans le tableau 3.1. En plus, nous avons considéré pour notre modélisation dynamique un amortissement de 5%. Concernant les AMF, le tableau 4.1 représente les différents paramètres utiles pour notre modélisation tandis leurs caractéristiques mécaniques, elles sont mentionnées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.1: Les paramètres des AMF

σ_s^{AS}	σ_F^{AS}	σ_s^{SA}	σ_F^{SA}	ε_L	α
140 MPa	270 MPa	200 MPa	70 MPa	0.03	0.27

Avec :

- σ_s^{AS} : valeur de contrainte initiale du chargement.
- σ_F^{AS} : valeur de contrainte finale du chargement.
- σ_s^{SA} : valeur de contrainte initiale déchargement.
- σ_F^{SA} : valeur de contrainte finale déchargement.

- ε_L : déformation résiduelle maximum.
- α : paramètre de comptabilité de pour des réponses matérielles dans la tension et la compression.

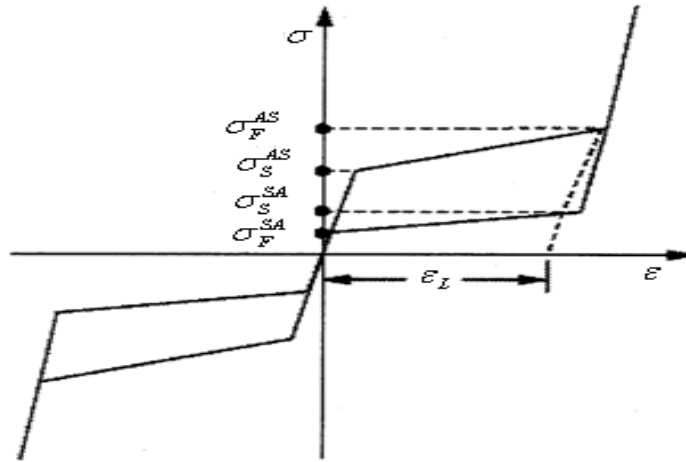


Figure 4.2 : La modélisation des paramètres des AMF

Tableaux 4.2 : Caractéristiques mécaniques des AMF

AMF	
Module d'élasticité (MPa)	70 000
Coefficient de poisson	0.33

4.3.2 Les cornières d'assemblage «Acier»

Afin de fixer les AMF sur la structure, des cornières sous forme de « L » ont été rajoutées selon le schéma de la figure 4.3. Ces éléments ont été choisis de telle sorte qu'ils ne modifient, ni les caractéristiques de la structure, ni celles des AMF. Il s'agit d'un acier ordinaire dont ses caractéristiques sont représentées dans le tableau 4.3.

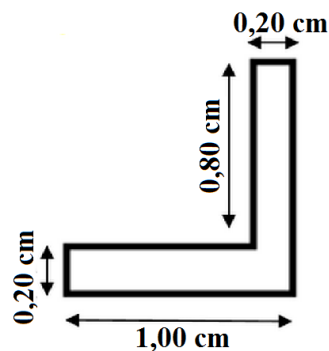


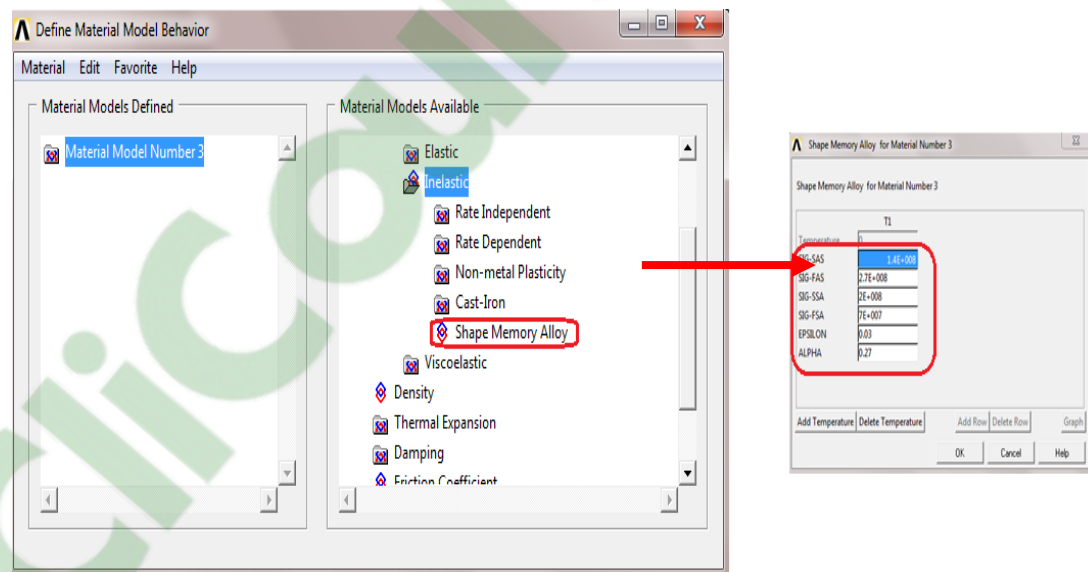
Figure 4.3 : Les cornières d'assemblage

Tableau 4.3 : Caractéristiques mécaniques des cornières

Cornière en acier	
Module d'élasticité (MPa)	210 000
Poids volumique (KN/m ³)	78,50
Coefficient de Poisson	0,28

4.4 Modélisation et analyse du minaret

On a proposé de faire cette étude par logiciel ANSYS, par ce qu'il est le seul programme qui définit la loi de comportement des AMF. En effet, ce matériau est introduit directement dans la banque de donnée d'ANSYS, où il faut spécifier les caractéristiques mécaniques présenté dans la figure 4.2. La figure 4.4 illustre la définition de ce type de matériaux.

**Figure 4.4** : Définitions des AMF dans ANSYS

La figure 4.5 présente le modèle élaboré, dont le maillage est constitué d'un total de 3044 éléments et 1037 nœuds.

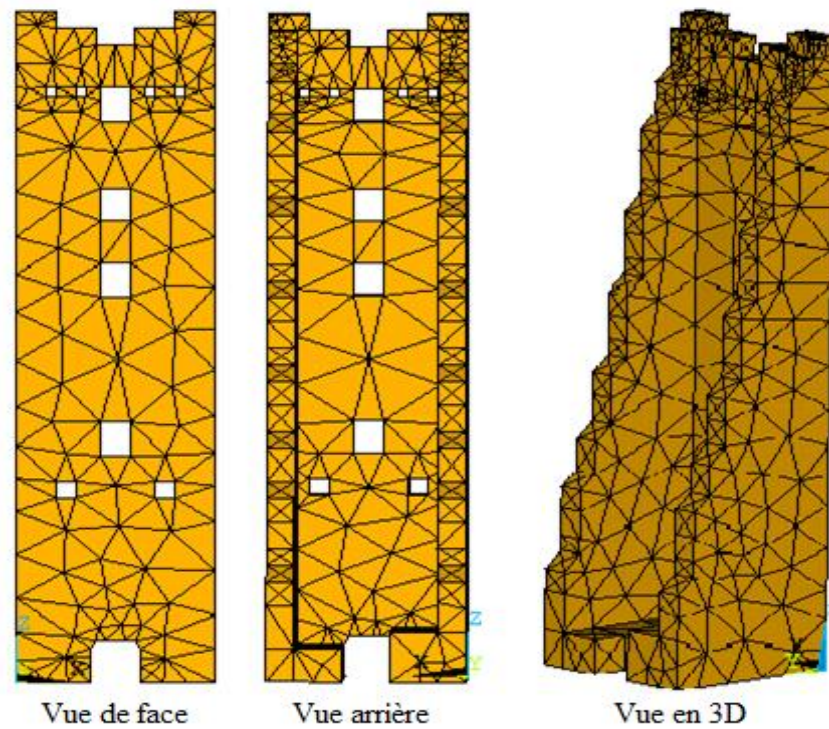


Figure 4.5 : Le model numérique du minaret

4.4.1 Analyse modale

Après l'analyse modale, on a obtenu les résultats suivants :

Tableau 4.4 : Représentation des modes et leurs facteurs de participation suivant la direction X.

Mode	Fréquence (Hz)	Période (s)	Ratio
1	2.02820	0.49305	0.014777
2	2.23722	0.44698	1.000000
3	5.61576	0.17807	0.109907
4	7.16957	0.13948	0.013646
5	8.06444	0.12400	0.593196
6	12.0185	0.083205	0.002695
7	13.2948	0.075217	0.048336
8	13.5898	0.073585	0.216174
9	15.1743	0.065901	0.001758
10	16.1010	0.062108	0.284563

Tableau 4.5 : Représentation des modes et leurs facteurs de participation suivant la direction Y

Mode	Fréquence(Hz)	Période(s)	Ratio
1	2.02820	0.49305	1.000000
2	2.23722	0.44698	0.012507
3	5.61576	0.17807	0.009169
4	7.16957	0.13948	0.690799
5	8.06444	0.12400	0.017357
6	12.0185	0.083205	0.118122
7	13.2948	0.075217	0.018977
8	13.5898	0.073585	0.006518
9	15.1743	0.065901	0.475188
10	16.1010	0.062108	0.010312

Tableau 4.6 : Représentation des modes et leurs facteurs de participation suivant la direction Z

Mode	Fréquence(Hz)	Période(s)	Ratio
1	2.02820	0.49305	0.073727
2	2.23722	0.44698	0.000334
3	5.61576	0.17807	0.004053
4	7.16957	7.16957	0.068309
5	8.06444	0.12400	0.006362
6	12.0185	0.083205	1.000000
7	13.2948	0.075217	0.261065
8	13.5898	0.073585	0.020389
9	15.1743	0.065901	0.012835
10	16.1010	0.062108	0.014854

Le rapport « Ratio » est le facteur de participation de chaque mode. Quand ce facteur est égal à 1, les modes deviennent fondamentaux. Le chargement sismique est appliqué dans la direction où la fréquence est petite ou bien une grande période.

Les trois premiers modes de vibration sont illustrés dans la figure 4.6. Le premier mode est en mouvement de translation horizontale suivant la direction Y ($T_1=0,49305s$). Le deuxième mode est aussi en translation horizontale mais suivant la direction de X ($T_2=0,44698s$). Le troisième mode est un mode torsionnel ($T_3=0,083205s$).

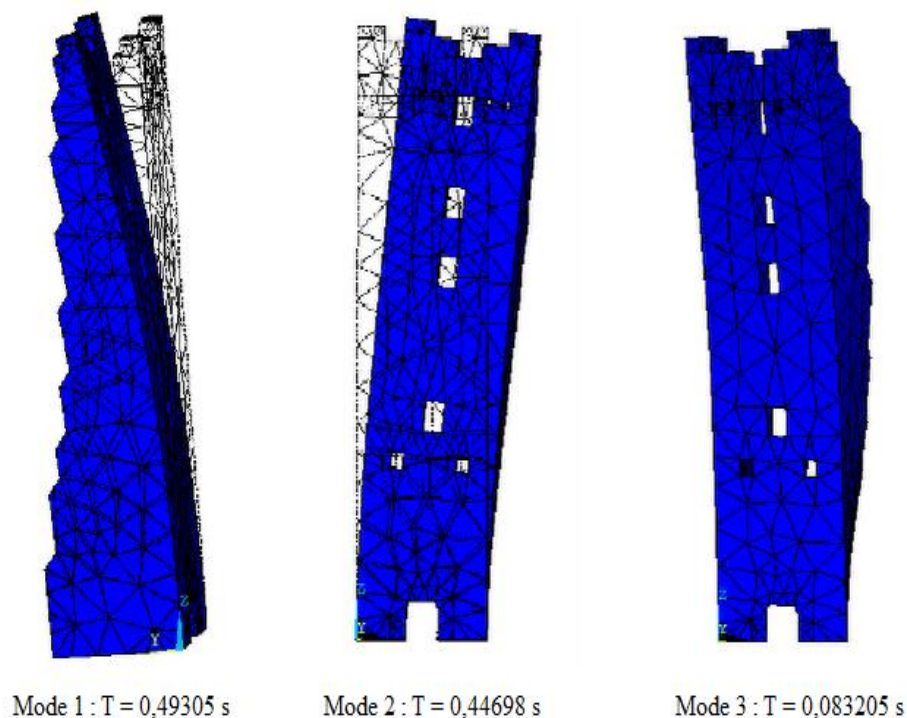


Figure 4.6: Présentation des différents modes du minaret

Remarque

Pour afficher les résultats obtenus, on a sélectionné trois points aléatoires du minaret:

A (0; 0; 40), B (0; 0; 35,50) et C (0; 0; 3). Comme indiqué sur la figure 4.7.

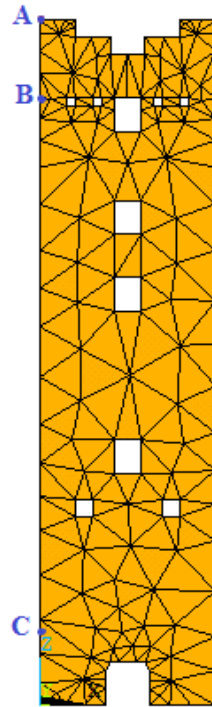


Figure 4.7 : Présentation des points choisis

4.4.2 Analyse dynamique

Dans cette partie, nous avons considéré deux types de séismes afin de faire notre étude sismique du minaret, le premier concerne le séisme de Boumerdès et le second représente une réplique du séisme d'Ain-Temouchent.

a) 33% de Boumerdès

En appliquant une fraction de 33% de l'accélérogramme du séisme de Boumerdès 2003 suivant la direction Y. Cette idée est basée sur la classification des zones sismiques dans le règlement parasismique, tel que le PGA de la région de Tlemcen, classé comme zone sismique 1 « zone de faible sismicité », représente presque le tiers du PGA de la région de Boumerdès. Qui est classée dans la zone sismique 3 « zone de forte activité sismique ». Par conséquent, le PGA de cet accélérogramme utilisé devient égal à 0.11g, comme il est représenté dans la figure 4.8.

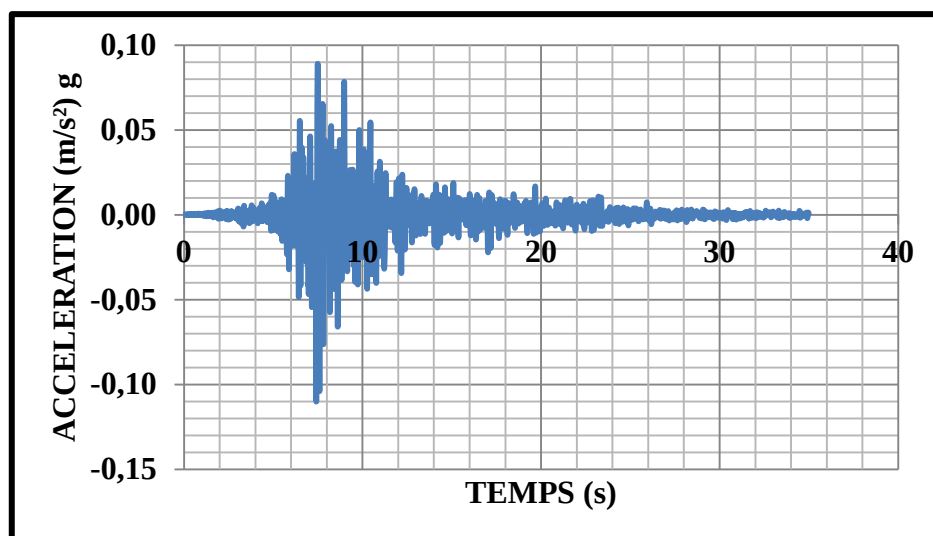


Figure 4.8 : Fraction de 33% l'enregistrement du séisme de Boumerdès 2003

- Sans AMF :

Les résultats obtenus sont représentés par les figures ci-dessous.

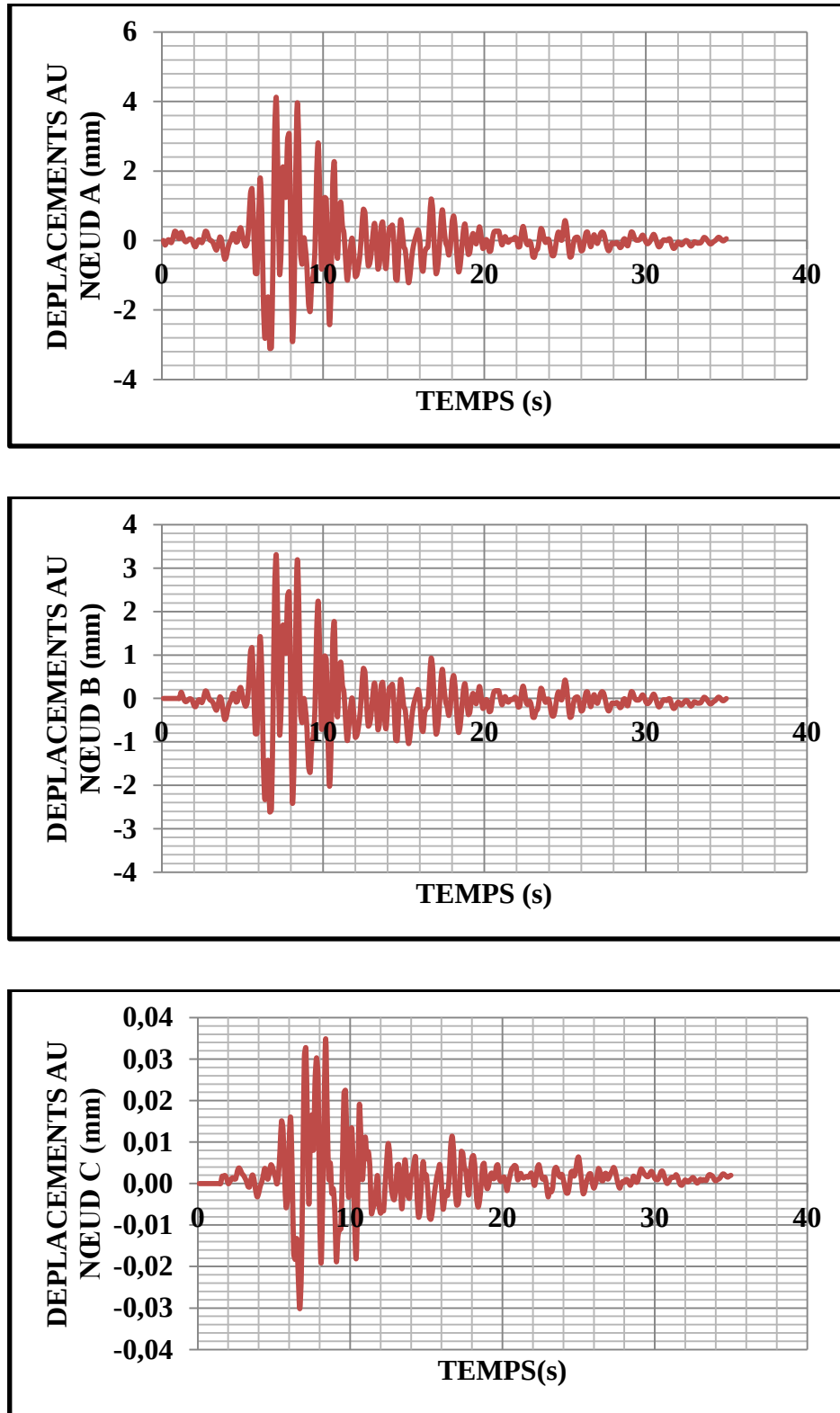


Figure 4.9 : Les déplacements aux nœuds A, B et C sans AMF (Boumerdès)

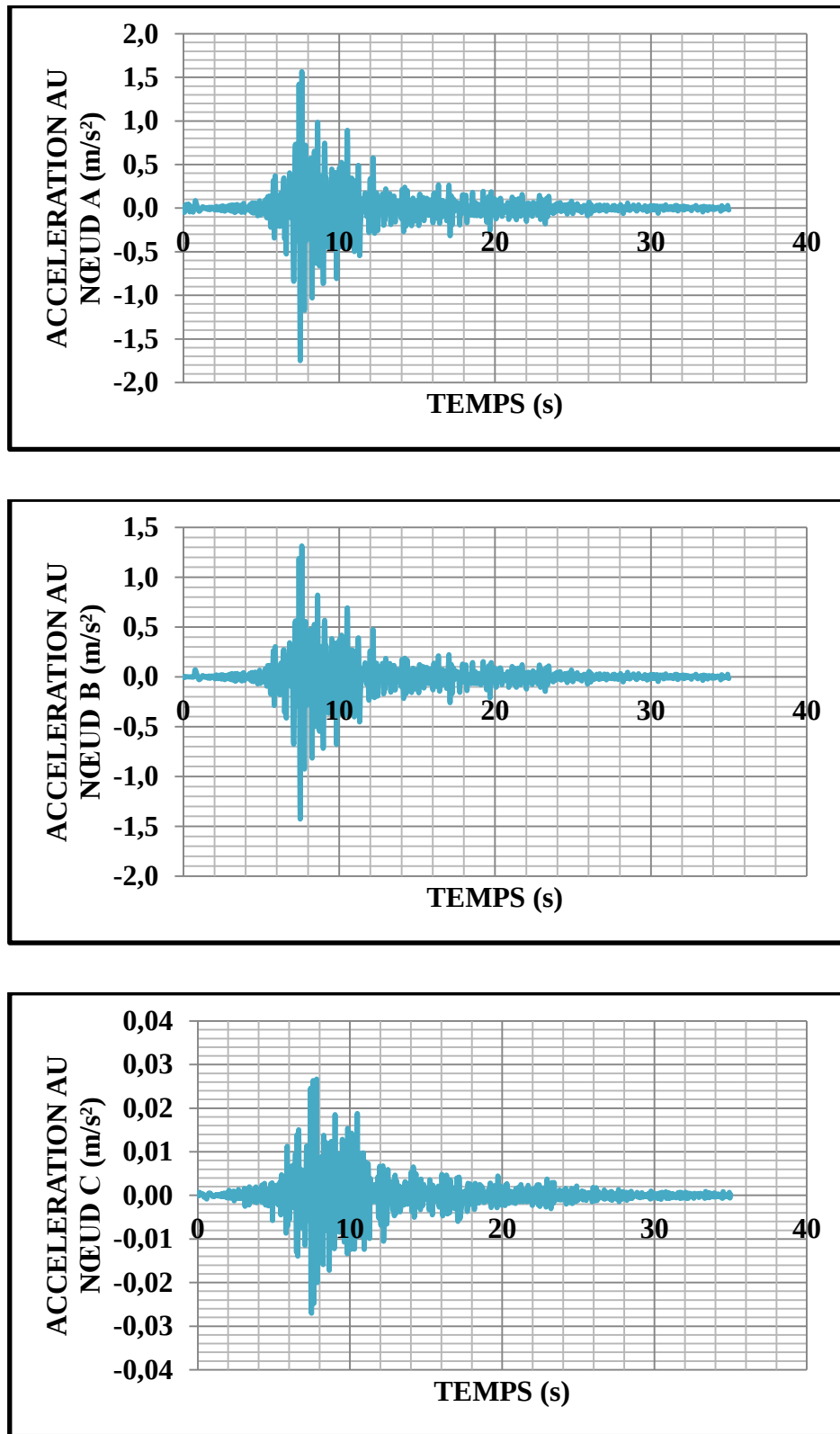


Figure 4.10 : Les accélérations aux nœuds A, B et C sans AMF (Boumerdès)

- Avec les AMF

Dans cette partie d'étude, on a ajouté 5 fils des AMF du diamètre 3,5 mm et d'une hauteur de 1m, ils sont placés dans la partie supérieure flexible du minaret, avec un espacement de 1,2m entre-axe. L'assemblage des AMF avec le minaret est fait par des cornières en L d'épaisseur 2 mm (Figure 4.3).

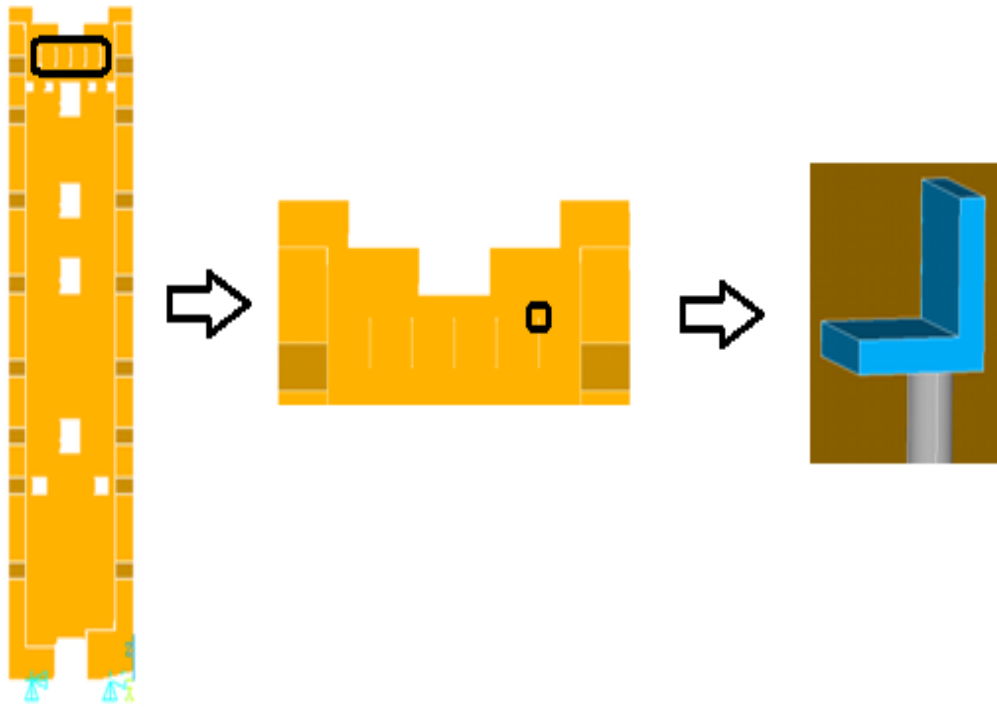


Figure 4.11 : L'emplacement des AMF au sommet du minaret

Les résultats obtenus après l'ajout des AMF sont représentés dans la figure 4.12 et 4.13

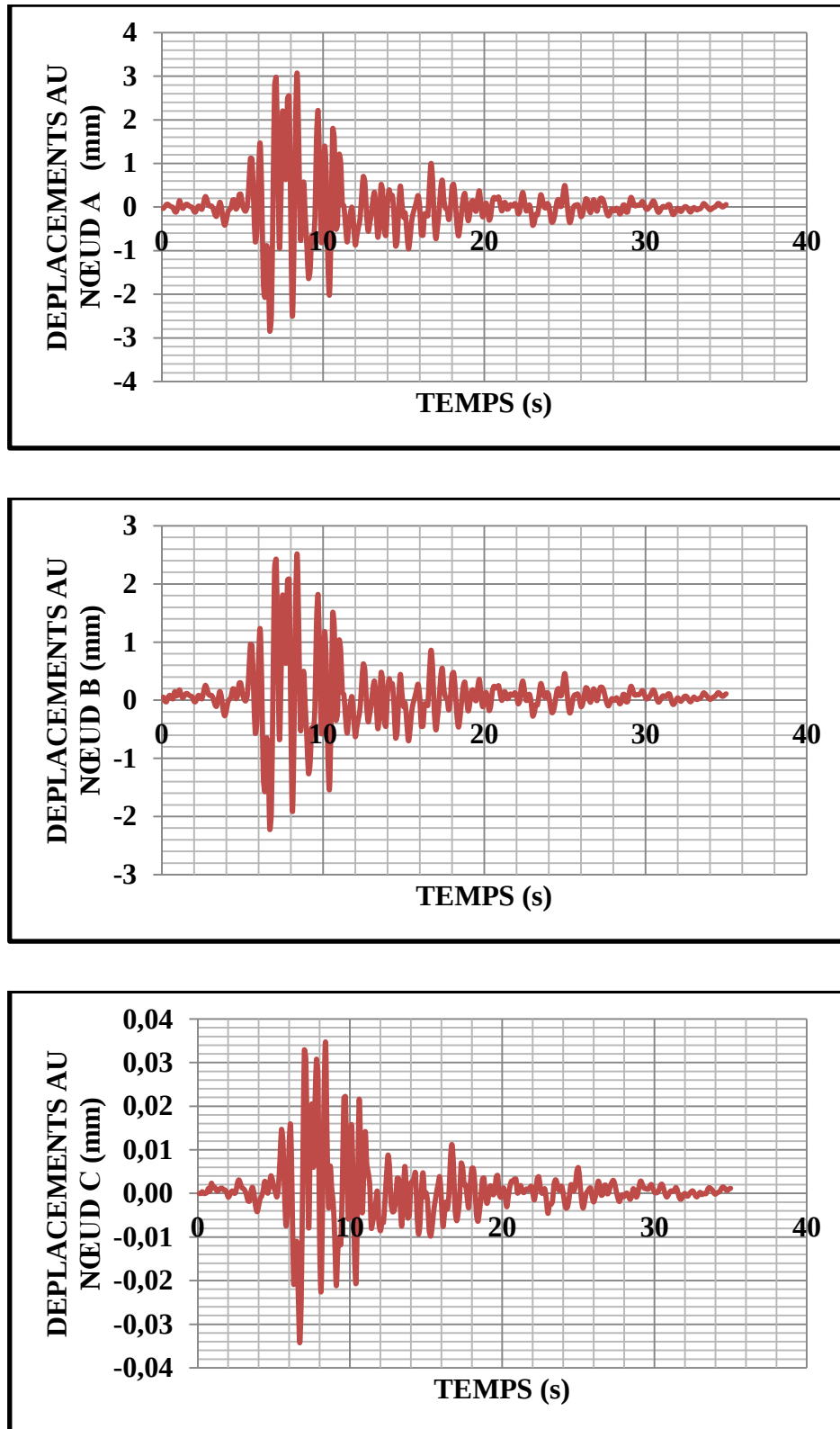


Figure 4.12 : Les déplacements aux nœuds A, B et C avec AMF (Boumerdès)

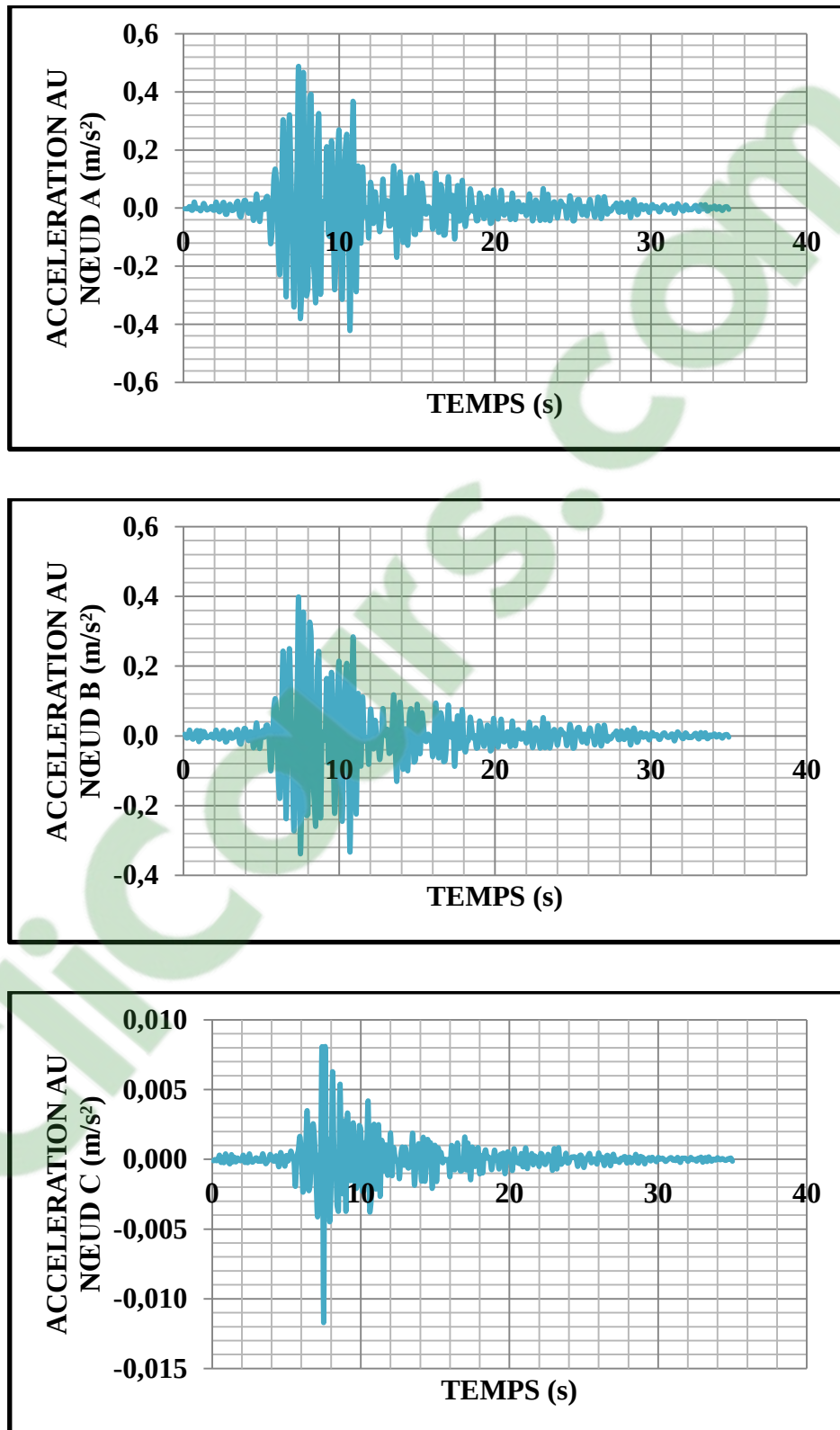


Figure 4.13 : Les accélérations aux nœuds A, B et C avec AMF (Boumerdès)

b) Réplique du signal du séisme d'Ain-Temouchent modifié

La distance entre la wilaya de Tlemcen et la wilaya d'Ain-Temouchent est inférieure à 100 Km, ce qui permet d'utiliser la méthode de SABETTA et PUGLIESE pour produire un signal sismique artificiel à Tlemcen.

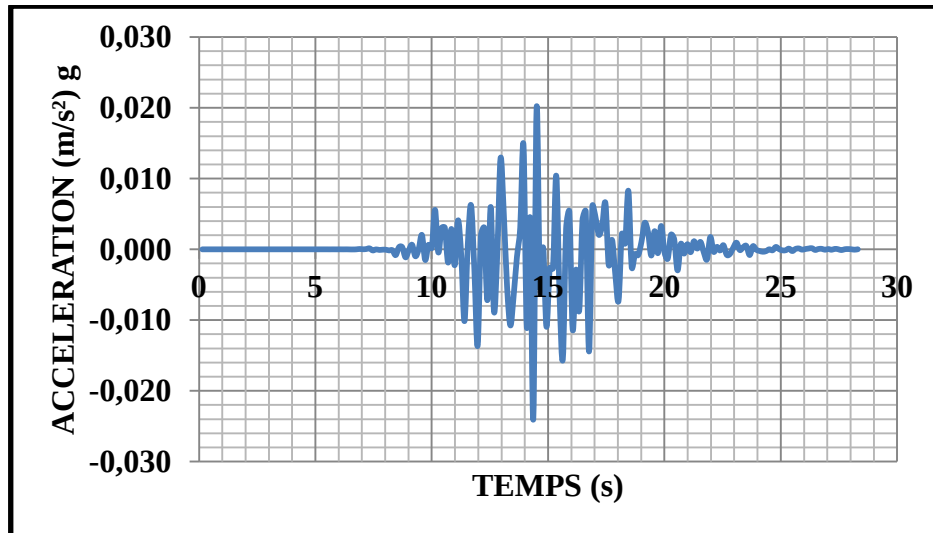


Figure 4.14 : Réplique du signal du séisme d'Ain-Temouchent modifié par la méthode de SABETTA et PUGLIESE

- Sans AMF :

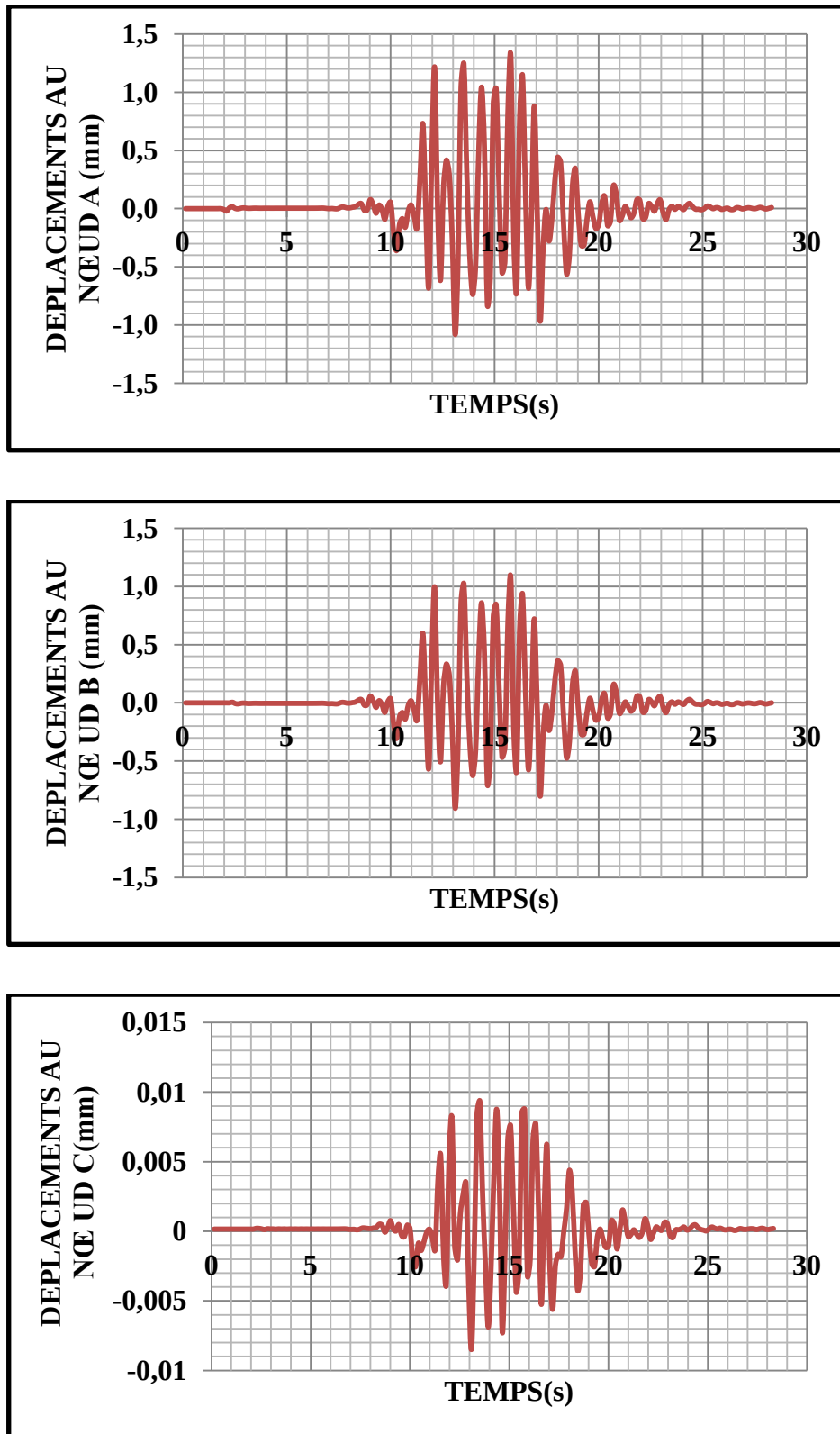


Figure 4.15 : Les déplacements aux nœuds A, B et C (Ain-Temouchent)

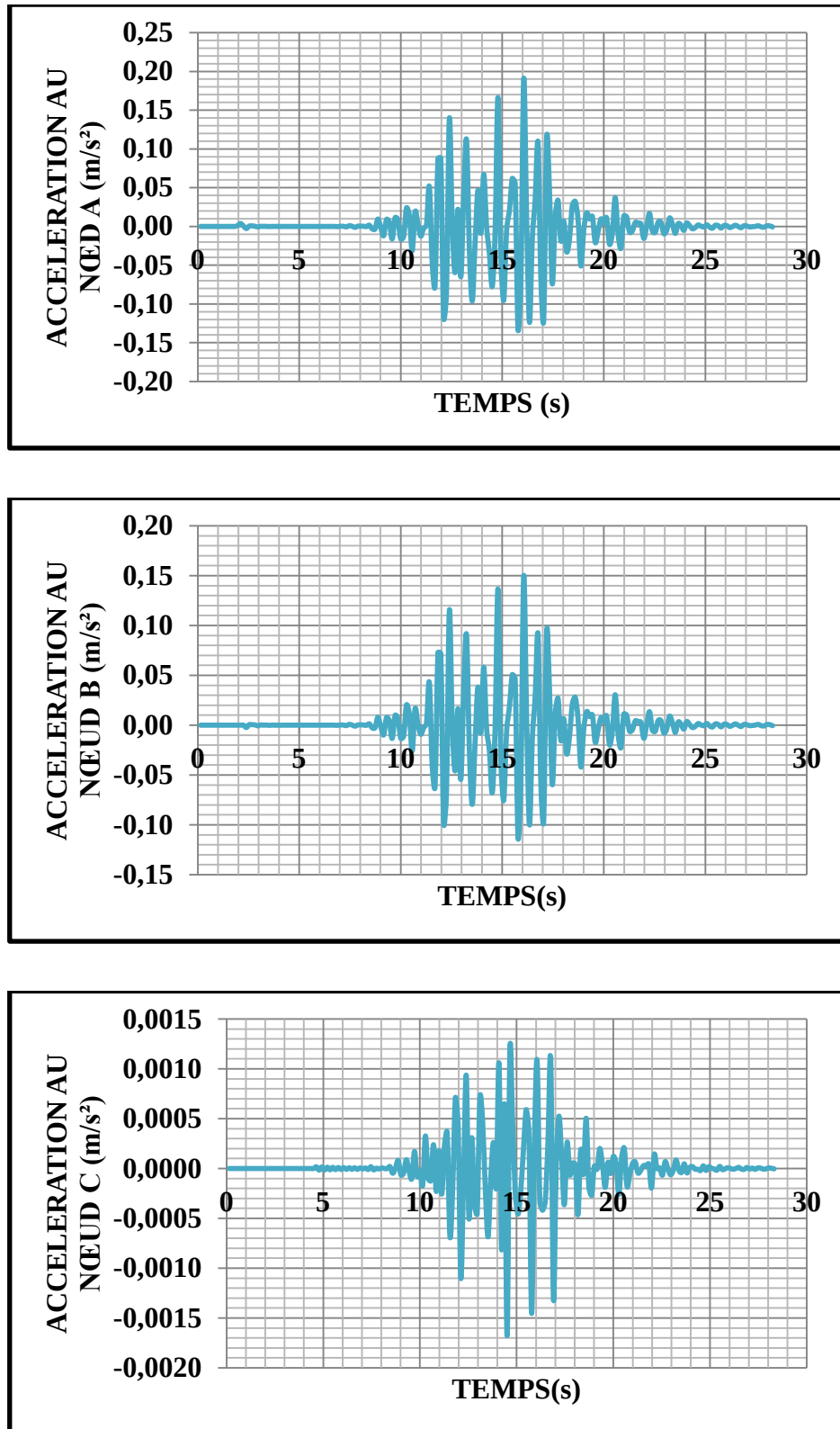


Figure 4.16 : Les accélérations aux nœuds A, B et C sans AMF (Ain-Temouchent)

- Avec AMF :

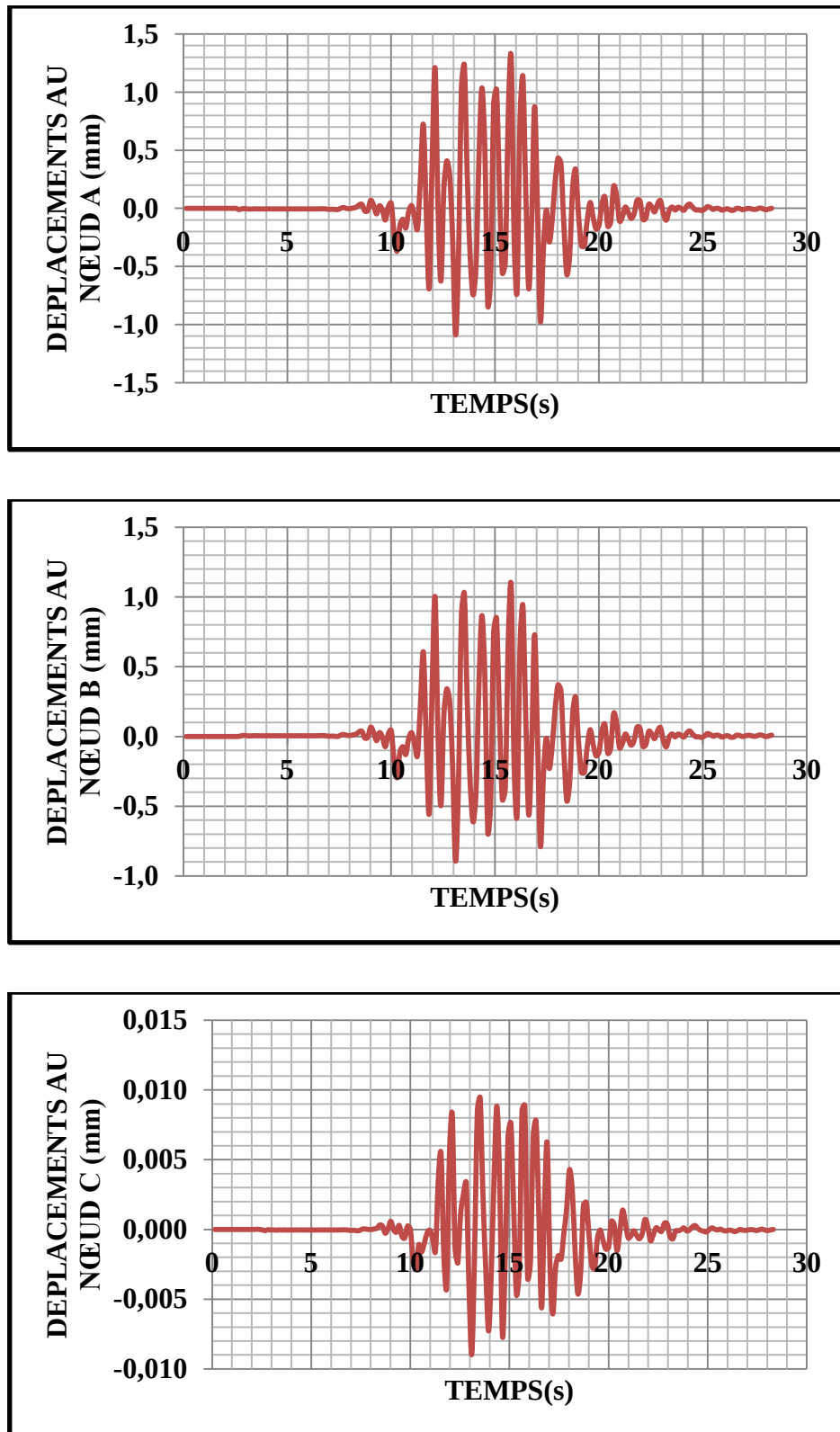


Figure 4.17 : Les déplacements aux nœuds A, B et C avec AMF (Ain-Temouchent)

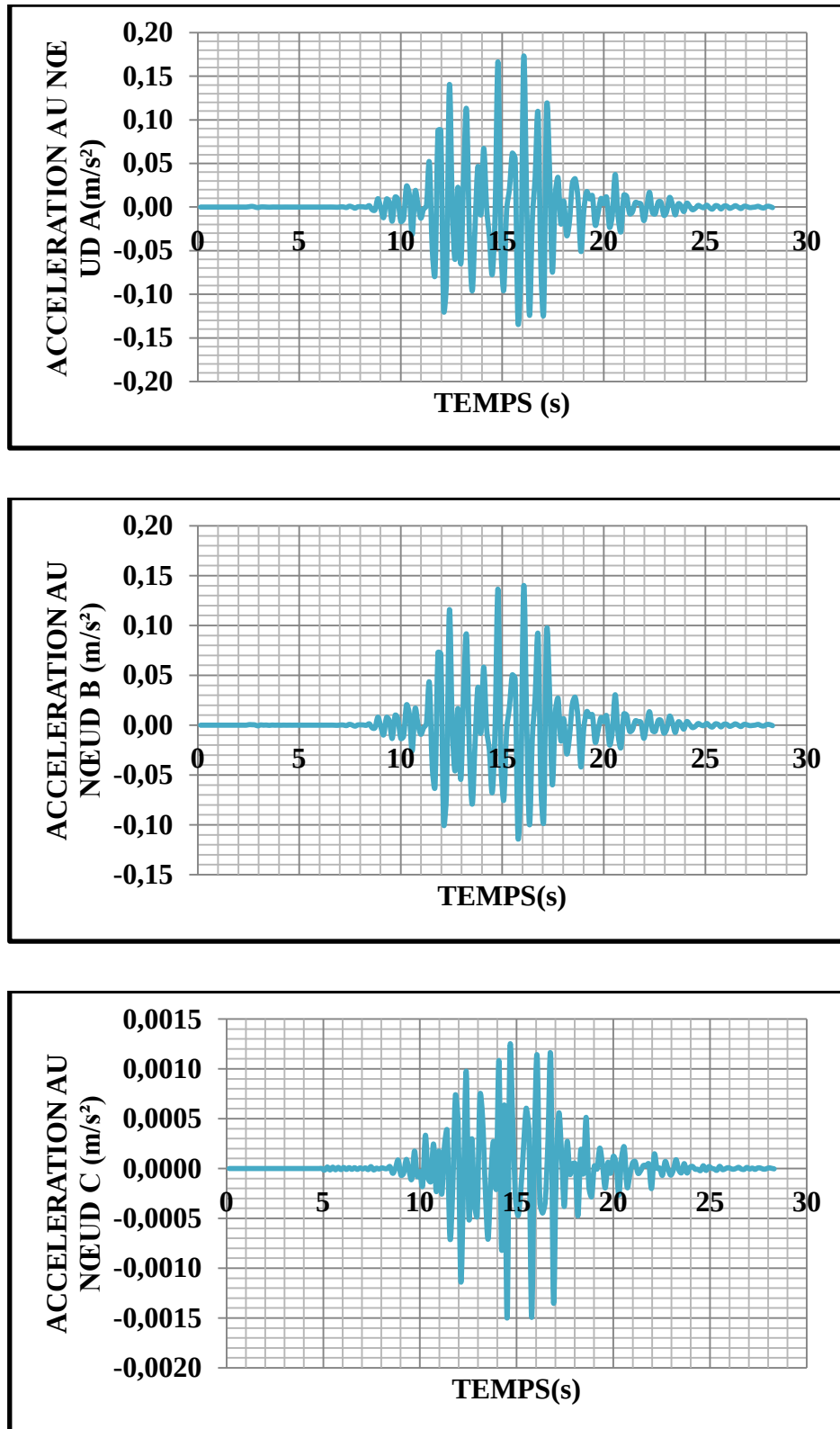


Figure 4.18 : Les accélérations aux nœuds A, B et C avec AMF (Ain-Temouchent)

▪ **Résultats en termes de contraintes :**

Pour étudier la distribution des contraintes maximales calculées avant et après l'emplacement des AMF, on a choisi des points aléatoires au sommet du minaret et autour des AMF (Figure 4.19).

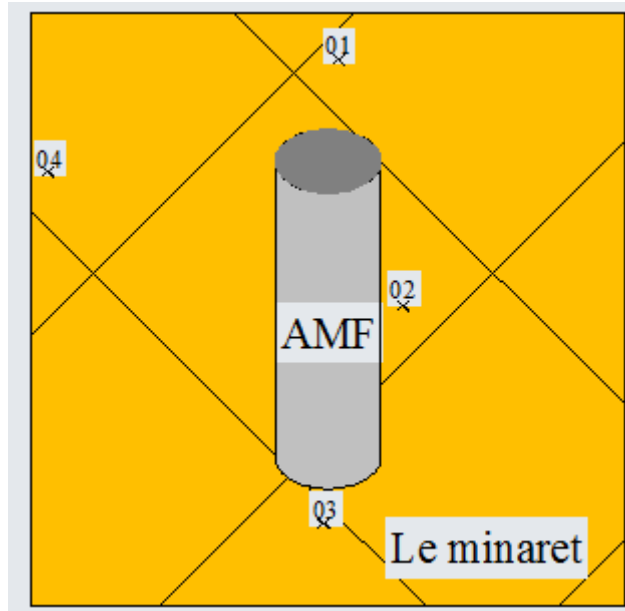


Figure 4.19 : La position des nœuds choisis pour étudier la distribution des contraintes

Tableau 4.7 : Distribution des contraintes au sommet du minaret avant et après l'emplacement des AMF

Points	Avant AMF (PA)	Après AMF (PA)	Pourcentage (%)
01	-691.279	-300.656	56.51%
02	+1253.86	+59.74	95.23%
03	-228.699	+774.508	70.47%
04	-1515.11	-978.323	35.43%

4.5 Interprétation des résultats et conclusion

Tableau : 4.8 : Déplacement et accélération maximums (Boumerdès)

Points	Avant		Après	
	Depl. Max. (mm)	Acc. Max. (m/s ²)	Depl. Max. (mm)	Acc. Max. (m/s ²)
A	4,1070	1,7489	3,0682	0,4749
B	3,2960	1,4272	2,5130	0,3875
C	0,0349	0,0270	0,0345	0,0117
Le pourcentage de réduction du déplacement (%)				16,63
Le pourcentage de réduction d'accélération (%)				67,43

Tableau 4.9 : Déplacement et accélération maximums (Ain-Temouchent)

Points	Avant		Après	
	Depl. Max. (mm)	Acc. Max. (m/s ²)	Depl. Max. (mm)	Acc. Max. (m/s ²)
A	1,3099	0,1818	1,3009	0,1722
B	1,0728	0,1495	1,0684	0,1393
C	0,0093	0,0016	0,0089	0,0015
Le pourcentage de réduction du déplacement (%)				1,74
Le pourcentage de réduction d'accélération (%)				7,54

- A partir de ces résultats, on peut dire que la structure étudiée est très rigide, et les déplacements horizontaux maximums engendrés par l'application de cette action sismique se trouvent dans une gamme acceptable.

- Pour le tremblement de terre de Boumerdès, les résultats de réduction obtenus sont plus élevés par rapport à ceux d'Ain-Temouchent. On note que le signal sismique influe sur le comportement des AMF, (Tableau 4.8 et Tableau 4.9).

- Les barres des AMF travaillent comme des barres d'acier pour un faible signal sismique (Ain-Temouchent) car leur comportement est situé dans phase 1 (Figure 2.3), par contre pour le signal sismique élevé de Boumerdès, les AMF travaillent dans la phase 2 (Figure 2.3).

- Au niveau du point A, une réduction importante du déplacement et d'accélération est remarquée. Cette réduction diminue en s'approchant de la partie basse du minaret, ce dernier s'explique par la présence de l'encastrement. À ce niveau, une concentration de contrainte a été constatée, ce qui signifie que ces endroits sont très critiques et ne doivent pas être ignorés.

- Au sommet du minaret, on a observé que le pourcentage de réduction diminue en divergeant du centre de gravité du fil en AMF, (Tableau 4.7).

La particularité de double action « traction-compression » des AMF impose au minaret une contrainte de traction ou de compression qui permet de réduire les contraintes du minaret de telle façon à ne pas dépasser les contraintes admissibles.

Conclusions et perspectives

Au cours de ce travail, on a démontré l'efficacité d'une nouvelle technique mise à niveau pour l'atténuation des risques sismiques des patrimoines historiques. Le minaret de la mosquée de Mansourah « Tlemcen », a été choisi comme un modèle tridimensionnel en éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS. Cette technique basée sur l'utilisation des amortisseurs sous forme de fil en matériaux intelligents AMF.

Pour constater l'efficacité de ces AMF sur la structure, on a exposé le minaret sous deux excitations dynamiques différentes, le premier est de 33% de la fraction du Boumerdes 2003 et le deuxième une réplique du séisme d'Ain-Temouchent.

Les résultats obtenus montrent que dans le cas de la réplique du séisme d'Ain-Temouchent, la réduction des déplacements et accélérations est minimale vis-à-vis du séisme de Boumerdes, ce qui permet de dire que l'effet des AMF est à prendre en considération dans le cas des forts séismes. En revanche, il n'a pas d'influence pour les séismes moins importants.

Les résultats obtenus montrent une réduction de la réponse dynamiques « accélération – déplacement », et les contraintes au voisinage des AMF. Ces matériaux ont permis d'absorber l'énergie dissipée.

La disposition des AMF utilisée a été choisie d'une manière aléatoire, il faut chercher la position et la quantité idéales de ces matériaux afin d'optimiser leur coût. Ainsi, augmenter le nombre des fils plus particulièrement dans la partie où il y a une concentration des contraintes.

On propose aussi de refaire le travail, en remplaçant les fils des AMF par des barres d'aciers ordinaires et faire une comparaison.

Annexes

Annexe 1 : Liste des séismes en Algérie

La date	La région et les dommages
03 Janvier 1365	Alger a été totalement détruite, 100 répliques à la nuit, une partie d'Alger était inondé,
03 Février 1716	Intensité X à Alger, 20000 morts,
09 Octobre 1790	Intensité X à Oran, 3000 victimes,
Mars 1819	Intensité X à Mascara, de nombreuses victimes,
02 Mars 1825	Intensité X à Blida, 7000 morts,
22 Novembre 1851	Intensité VII-VIII à Mascara,
22 Août 1856	Intensité IX à Jijel, VIII à Béjaia
16 Novembre 1868	Intensité IX à Biskra,
8 Janvier 1887:	Intensité VIII à El Mansoura,
11 Mars 1908	Intensité VII-VIII à Blida,
4 Août 1908	Intensité VIII, de magnitude 5,1 à Constantine,
24 Juin 1910:	Intensité VIII-X, magnitude 6,4-6,6 à Sour El Gouzlène, 30 morts,
6 Août 1912	Intensité VI, magnitude 5,3 à Oued Marsa,
25 Août 1922	L'intensité IX-X, de magnitude 5,1 à Bordj Abou Hassan, 2 morts,
16 Mars 1924	Intensité IX, magnitude 5,6 à Batna, beaucoup de morts,
5 Novembre 1924	Intensité VIII, de magnitude 5,0 près d'Alger,
24 Août 1928	Intensité VIII, magnitude 5,4 à Oued Rhiau,
15 Août 1931	Intensité VIII, magnitude 4,9 au Djebel Dira,
7 Septembre 1934	Intensité VII-IX, de magnitude 5,0 à El Abadia, 0 mort,
19 Septembre 1935	Magnitude 5,1 près de Chetaibi,
10 Février 1937	Intensité VIII, magnitude 5,4 près de Guelma,
16 Avril 1943	Intensité IX, magnitude 4,0 près d'El Mansoura, de nombreuses victimes,
12 Février 1946	Intensité VIII-IX, magnitude 5,6 à la montagne Hodna,
6 Août 1947	Intensité VIII-IX, magnitude 5,3 à Oued Hamimine, de nombreuses victimes,

17 Février 1949	Intensité VIII, magnitude 4,9 près de Kherrata,
20 Avril 1950	Intensité VI-VIII, de magnitude 5,1 près d'Aflou,
5 Juillet 1953	Intensité VIII, près d'Ain Bessam,
29 Août 1953	Intensité VIII-IX à la montagne Hodna, 1 mort,
9 Septembre 1954	Intensité X, magnitude 6,7 à Chlef, 1243 morts et 20000 de la maison détruite,
10 Septembre 1954	Intensité IX, magnitude 6,2, réplique à Chlef,
4 Février 1955	Intensité VIII, réplique à Chlef,
8 Mai 1955	Intensité VIII à Beni Haoua,
14 Février 1956	Intensité VI-VII, magnitude 5,9 à Bordj Abou Hassan,
12 Février 1960	Intensité VIII-IX, magnitude 5,6 à Béjaia, 264 morts, 1000 de la maison détruite, 112 blessés,
21 Février 1960	Intensité VIII, magnitude 5,6 à Melouza (M'sila), 47 morts et 88 blessés,
2 Décembre 1961	Magnitude 5,5 à Annaba (en mer),
4 Septembre 1963	Magnitude 5,7 près de Sétif, 1 mort et 100 blessés,
1 Janvier 1965	Magnitude 5,5 à M'Sila, 5 morts, 24 blessés et 1304 de la maison détruite,
13 Juillet 1967	Intensité VII, de magnitude 5,1 près de Sig, 10 morts et 15 blessés,
En 1980	Magnitude 7,2 à El 'Asnam, 3500 morts, 4500 blessés et des dégâts sont estimés à 10 milliard de dinars
En 1985	A Constantine, Pertes en vie humaines et dégâts matériels importants

Annexe 2 : Description du Logiciel Ansys

Le logiciel ANSYS est un programme spécialisé sur la méthode des éléments finis (Wikipedia, 2013), Il est utilisé pour l'étude d'une grande variété de problèmes dans les sciences de l'ingénieur (RAS, 2002), On peut citer plusieurs principes de ce logiciel à savoir :

- ANSYS Structural : Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures, Ses principales capacités sont :
 - l'analyse statique
 - l'analyse modale
 - l'analyse harmonique
 - l'analyse temporelle
- ANSYS mécanique : Ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement,
- ANSYS fluent : Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides
- ANSYS électromagnétiques : Ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques,
- ANSYS multiphysics : Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite (Wikipedia, 2013),

Ce programme s'adapte à plusieurs types de comportement structuraux tels que l'élasticité, linéaire et non-linéaire et la plasticité,

Le travail de ce logiciel est constitué de 4 étapes :

- Construction du modèle
- Maillage de la structure générale
- Introduction des conditions aux limites
- Définition des options de solution.

Annexe 3 : La méthode de SABETTA

SABETTA et PUGLIESE : sont deux chercheurs italiens qui ont proposé une méthode en 1996 pour étudier l'atténuation des spectres de réponse et de simuler les accélérogrammes artificiels en fonction de la magnitude, de la distance et de la géologie du site (SABETTA & PUGLIESE, 1996).

Annexe 4 : L'échelle de Richter

L'échelle de Richter a été instaurée en 1935 par le Géophysicien américain Francis Richter,

L'échelle de Richter est une fonction continue non limitée logarithmique, nous fournit ce qu'on appelle la magnitude d'un séisme « La mesure dépend de la sensibilité des sismographes », la magnitude est calculée à partir de la quantité d'énergie dégagée du foyer,

Annexe 5 :

Le Grumman F-14 Tomcat est un avion de chasse construit par la firme américaine « Grumman Corporation » en 1968, et mis en service le 14 octobre 1972 et retiré le 22 septembre 2006,

L'une des spécificités majeures du Grumman F-14 Tomcat est sa voilure de géométrie variable, qui lui permet une grande manœuvrabilité au combat et une possibilité de soulever des charges lourdes en une très courte distance « les 90 m de la piste d'envol », tout en permettant une grande vitesse de pointe pour les interceptions (Nimesis, 2011).



Photo I: L'avion de combat F-14 (Nimesis, 2011)

Bibliographie

ABADIE, L., 2010. Mansourah. *Algérie Patrimoin*.

ABADIE, L., 2010. Mansourah. *Algérie Patrimoin*, 01 08.

BARON, M.-P., 1998. *Thèse de doctorat- Etude du comportement des interfaces austénite/martensite et martensite/martensite de deux alliages a effet mémoire de forme: le Cu-Zn-Al et le Cu-Al-Be*. Lyon France: L'Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon.

BENKELFAT, W. & MELIH, H., 2009. Tlemcen Algérie: Université Abou Bekr Blkaid Tlemcen.

BENKELFAT, W. & MELIH, H., 2009. *Projet de fin d'étude - Centre de recherche en patrimoine Maghrébien Mansourah-Tlemcen*. Tlemcen: Université Abou Bekr Blkaid Tlemcen.

BOUALI, S., 1984. *Les deux grands sièges de Tlemcen*. ALGERIE: ENAL.

BOUNOUAR, D., 2005. Risque de tremblement de terre en Afrique. Mars.

BOURDIM, S. M. E. A., 2011. *Thèse de doctorat - Diagnostique et analyse sismique d'un monument historique à Tlemcen*. Pavia Italy: Université des ingénieurs, Pavia , Italy.

CASCIATI, F., FARAVELLI, L. & HAMDAOUI, K., 2007. Performance of a base isolator with shape memory alloy bars. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Décembre.

CASCIATI, S. & HAMDAOUI, K., 2008. Experimental and numerical studies toward the implementation of shape memory alloy ties in masonry structures. *Smart Structures and Systems*, 8 AOUT, pp. 153 - 169.

CASCIATI, S. & HAMDAOUI, K., 2008. Experimental and numerical studies toward the implementation of shape memory alloy ties in masonry structures. *Smart Structures and Systems*, 8 AOUT, pp. 153 - 169.

CHEMISKY, Y., 2009. *Thèse - Modélisation du comportement macroscopique des Alliages a Mémoire de Forme*. Paris France: Université Paul Verlaine de Metz.

EL-ATTAR, A., SALEH, A. & EL-HABBAL, I., 2008. *Seismic Risk Mitigation of Historical Minarets Using SMA Wire Dampers*, Egypte: American Institute of Physics.

- GEORGES & MARCAIS, W., 2011. El mansourah Tlemcen. *Les monuments arabes de Tlemcen 1903*, 17 11.
- GHOMARI, F., 2002. *La ville de Mansourah, un site archéologique classé a préserver*. Tlemcen - Algérie: UNESCO.
- GHOMARI, F., 2010. *La ville de Mansourah, un site archéologique classé*. Tlemcen: Magazine d'Architecture en ligne.
- GONZALEZ, C. H., 2002. *Thèse de doctorat - Etude des comportements electro-thermomécaniques et de la stabilisation martensitique d'alliage monocristallins à mémoire de forme base cuivre*. Lyon France: L'Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon.
- GUENIN, G., 1996. *Alliage à Mémoire de Forme*. Technique de L'ingénieur éd. Lyon France: s.n.
- GUILLAUME, D. & VALENTINE, S., 2007. *Les matériaux a mémoire de forme*, France: Institut Polytechnique des Sciences Avancées.
- JORDAN, L. & ROCHER, P., 2009. *Les alliages a Nickel-Titane (Ni Ti)*. s.l.:Société Francophone de Biomatéraix Dentaires.
- KADA, Y., 2001. *Projet de fin d'étude - Restitution du minaret de la mosquée de Mansourah par la méthode de la photogrammétrie architecturale*. Tlemcen: Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- KARA SLIMAN, M., 2005. *Projet de fin d'étude - Etude du comportement mécanique du minaret de la mosquée de Mansourah par le code de calcule 3DEC*. Tlemcen Algérie: Université Aboubakr Belkaid Tlemcen.
- LAFORTUNE, P., Décembre 2006. *Utilisation des alliages à mémoire de forme en control sismique des structures*. s.l.:Ecole technologie supérieure université de Quebec.
- LARADJ, M., 2012. 13 ans après le seisme qui a secoué Ain Tmouchent. *LIBERTE*.
- MANACH, P. Y., 1993. *Thèse de doctortat - Etude du comportement thermomécanique d'Allaige a Mémoire de Forme NiTi*. France: L'Institut Nationale Polytechnique de GRENOBLE.
- MATABOSCH, R., 2011. 21 mai 2003 - Tremblement de terre à Boumerdès. 8 Juin.

PEULTIER, B., 2005. *Thèse de doctorat - Alliage a Mémoire de Forme: Modélisation et calcul de structures*. Paris France: Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Metz.

PORMART, J., 2012. Les séismes les plus puissants de puis un siècle. 23 Octobre.

PORTIER, R. et al., 2007. *Les Alliages a Mémoire de Forme: des matériaux aux propriétés mécaniques singulières*, France: Colloque Gernoble.

SABETTA, F. & PUGLIESE, A., 1996. *Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary*. Italy: Bulletin of the Seismological Society of America.

STASSIS, A., DEMETRIOU, T., HAMD AOUI, K. & CHRYSOSTOMOU, C., 2008. Application of shape memory alloy prestressing device on an ancient aqueduct. *Smart Structures and Systems*, 4 Octobre, pp. 261 - 278.

SULPICE, L. S., 2009. *Thèse de doctorat - Etude et modélisation du comportement cyclique des Alliages a Mémoire de Forme*. Ecole Nationale Supérieure D'ingénieure éd. France: Ecole Nationale D'ingénieurs de BREST.

TRAN, H., BALANDRAUD, X. & DESTREBECQ, J. F., 2011. *L'influence de la courbure d'un fils en AMF sur sons comportement en traction dans une perspective de confinement de composants en béton*, France: Université Blaise Pascal & Institut Francais de mécanique avancée.

VIGNES, J., ANDRE, G. & KAPALA, F., 2001. *Alliage a Mémoire de Forme*, France: C.A.R.M.A.(Centre d'Animation Régional en Matériaux Avances).

Webographie

clitours.com

Nimesis, 2011. *Nimesis Technology*. [En ligne]

Available at: www.nimeseis.com

[Accès le 24 02 2013]

Wikipedia, 2008. *Alliage a Mémoire de Forme*. [En ligne]

Available at: <http://www.wikipedia.fr>

[Accès le 24 02 2013].

Wikipedia, 2012. *Wikipedia*. [En ligne]

Available at: <http://www.wikipedia.fr>

[Accès le 16 12 2012].

Wikipedia, 2013. *ANSYS*. [En ligne]

Available at: <http://www.wikipedia.fr>

[Accès le 30 05 2013].

Sommaire

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Dédicace.....	iii
Résumé	iv
Abstract.....	v
ملخص.....	vi
Liste des Tableaux.....	vii
Liste des Photos.....	viii
Liste des Figures.....	ix
Chapitre 1 :Introduction Générale	1
1.1. Introduction	2
1.2. L'objectif.....	3
1.3. La problématique	3
1.4. Les applications antérieures dans le domaine du génie civil	3
1.5. Méthodologie du travail.....	5
1.6. Plan du travail.....	6
Chapitre 2 :Les Alliages À Mémoire De Forme.....	7
2.1. Introduction	8
2.2. Historique.....	8
2.3. La transformation Martensitique-Austénitique	9
2.3.1 Définition.....	9
2.3.2 Les caractéristiques de la transformation martensitique-austénitique.....	10
2.4. Les caractéristiques thermomécaniques des AMF	10
2.4.1 Effet super-élastique	11
2.4.2 Effet de mémoire simple	12
2.4.3 Effet de mémoire double	12
2.4.4 Effet caoutchoutique.....	13
2.4.5 Effet d'amortissement.....	13
2.5 Les familles d'alliages à mémoire de forme.....	14
2.5.1 Les alliages à base de cuivre.....	14

2.5.2 Les alliages à base fer	15
2.5.3 Les alliages à base Nickel-Titane	15
2.6 Dégradation des propriétés	17
2.6.1 Résistance à la fatigue.....	17
2.6.2 Résistance au vieillissement.....	17
2.7 L'application des AMF dans le monde	18
2.7.1 Dans le domaine biomédical	18
2.7.2 Application automobile	18
2.7.3 Application avion.....	19
2.7.4 Vestimentaire «lunetterie»	19
2.7.5 Sécurité.....	20
2.8 Conclusion	21
Chapitre 3:Aperçu Sur la Mosquée De Mansourah.....	22
3.1 Introduction.....	23
3.2 Historique	24
3.3. Description de site.....	25
3.3.1 Aspect architectural du minaret	26
3.3.2 Caractéristiques géométriques du minaret	28
3.3.3 Les caractéristiques mécaniques du minaret.....	29
3.4. Etude des pathologies	29
3.5. Modélisation de la demi-ruine	31
3.6. Restitution virtuelle.....	31
3.7. Conclusion	32
Chapitre 4:Modélisation Dynamique du Minaret de Mansourah par la Méthode des Eléments finis.....	33
4.1 Introduction.....	34
4.2 Les principales hypothèses.....	34
4.3 Propriétés des matériaux utilisés.....	35
4.3.1 Caractéristiques du minaret et des AMF.....	35
4.3.2 Les cornières d'assemblage «Acier»	36
4.4 Modélisation et analyse du minaret	37
4.4.1 Analyse modale	38
4.4.2 Analyse dynamique	41
4.5 Interprétation des résultats et conclusion	54

Conclusions et perspectives	56
Annexes	58
Bibliographie	63
Webographie.....	67