

Sommaire

Liste des Figures	I
Liste des Tableaux	V
Chapitre 1 : Introduction Générale	1
1.1. Introduction.....	2
1.2. La problématique	4
1.3. L'objectif	4
1.4. Méthodologie du travail.....	5
1.5. Organisation du mémoire.....	6
Chapitre 2 : Les Alliages à Mémoire de Forme	7
2.1. Introduction.....	8
2.2. Historique.....	8
2.3. Définition des AMF	9
2.3.1. <i>La transformation Martensitique-Austénitique</i>	10
2.3.2. <i>Caractéristiques générales</i>	11
2.4. Les propriétés thermomécaniques des AMF	12
2.4.1. <i>Effet mémoire simple sens (EMSS)</i>	12
2.4.2. <i>Effet mémoire double sens (EMDS)</i>	12
2.4.3. <i>Effet d'amortissement (EA)</i>	13
2.4.4. <i>Effet superélastique (SE)</i>	13
2.4.5. <i>Effet caoutchoutique (EC)</i>	14
2.5. Production des AMF	14
2.5.1. <i>Matières premières</i>	15
2.5.2. <i>Fonderie</i>	15
2.5.3. <i>Mise en forme</i>	15

2.5.4. Traitement de bétatisation (ou d'austénisation)	15
2.6. Les familles d'AMF	15
2.6.1. <i>Les alliages à base Nickel-Titane</i>	16
2.6.2. <i>Les alliages à base Fer</i>	16
2.6.3. <i>Les alliages à base Cuivre</i>	17
2.7. Application générale des AMF	18
2.8. Application des AMF dans le génie civil.....	19
2.8.1. <i>Renforcement des structures en béton</i>	20
2.8.2. <i>Protection parasismique</i>	21
2.8.3. <i>Précontrainte durable des constructions en béton</i>	21
2.8.4. <i>Amortisseurs à base d'AMF</i>	22
2.8.5. <i>Capteurs / Actionneurs</i>	23
2.8.6. <i>Réhabilitation des monuments historiques</i>	23
2.8.7. <i>Application des barres en AMF comme isolateur de base</i>	24
2.9. Conclusion	26
Chapitre 3 : Revue de Littérature.....	27
3.1. Introduction.....	28
3.2. Applications des AMF dans les structures historiques	28
3.2.1. <i>Le minaret de Mansourah, Algérie</i>	29
3.2.2. <i>Un ancien Aqueduc, Chypre</i>	30
3.2.3. <i>Mur en maçonnerie</i>	32
3.2.4. <i>Clocher de l'église de San Giorgio, Italie</i>	33
3.2.5. <i>La Basilique de San Francesco, Italie</i>	34
3.3. Intégration des AMF dans les bâtiments modernes	36
3.3.1. <i>Contrôle sismique d'une structure complexe</i>	36

3.3.2. <i>Un réservoir de vidange</i>	37
3.3.3. <i>Structures de longue portée</i>	38
3.3.4. <i>Poutres en béton</i>	39
3.3.5. <i>Confinement actif de cylindres en béton</i>	39
3.4. Limitation des problèmes de ponts par l'application des AMF.....	40
3.4.1. <i>Réparation des zones fissurées dans des ponts routiers</i>	41
3.4.2. <i>Éléments d'amortissement pour les ponts</i>	41
3.4.3. <i>Développement de résistance des ponts aux séismes</i>	42
3.5. Conclusion	43
Chapitre 4 : Identification des Caractéristiques Dynamiques du Minaret d'Ajloun .	44
4.1. Introduction.....	45
4.2. Identification des caractéristiques dynamiques du minaret	45
4.2.1. <i>Les tests de vibration ambiante</i>	45
4.2.2. <i>Le système de technique globale</i>	46
4.2.3. <i>Méthodologie</i>	47
4.3. Description de cas d'étude	47
4.3.1. <i>Historique</i>	47
4.3.2. <i>Caractéristiques géométriques</i>	48
4.3.3. <i>Caractéristiques mécaniques</i>	50
4.3.4. <i>Caractéristiques dynamiques</i>	51
4.4. Etude modale du minaret	52
4.4.1. <i>Hypothèses</i>	52
4.4.2. <i>Étapes de modélisation</i>	53
4.5. Comparaison et interprétation des résultats	56
4.6. Conclusion	57

Chapitre 5 : Renforcement du Minaret par les Alliages à Mémoire de Forme	58
5.1. Introduction.....	59
5.2. Caractéristiques des matériaux utilisés pour le renforcement	59
<i>5.2.1. Caractéristiques mécaniques des AMF.....</i>	<i>59</i>
<i>5.2.2. Caractéristiques mécaniques du support des AMF.....</i>	<i>60</i>
5.3. Modélisation numérique des AMF	61
5.4. Analyse transitoire du minaret	62
<i>5.4.1. Analyse dynamique du minaret sans AMF</i>	<i>63</i>
<i>5.4.2. Analyse dynamique du minaret avec AMF.....</i>	<i>66</i>
<i>5.4.3. Résultat du renforcement de minaret</i>	<i>74</i>
<i>5.4.4. Renforcement du minaret par les AMF et les bars d'acier.....</i>	<i>77</i>
5.5. Interprétation des résultats	80
5.6. Conclusion	82
Conclusions et Perspectives	83
Références Bibliographiques	86
Annexes.....	92

Liste des Figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Les dégâts structuraux causés par les séismes..... 3

Chapitre 2

Figure 2.1 : Principes de base du fonctionnement d'un AMF..... 10

Figure 2.2 : Effet de mémoire de forme d'un trombone en AMF .. 11

Figure 2.3 : Illustration de l'effet mémoire simple sens des AMF..... 12

Figure 2.4 : Illustration de l'effet mémoire double sens des AMF. 12

Figure 2.5 : Effet superélastique..... 13

Figure 2.6 : L'effet caoutchoutique..... 14

Figure 2.7 : AMF à base de Nickel-Titane..... 16

Figure 2.8 : AMF à base de Fer..... 17

Figure 2.9 : Des barres / fils en AMF à base de Cuivre. 17

Figure 2.10 : Divers exemple d'application des AMF en pourcentage..... 19

Figure 2.11 : Utilisation des barres en AMF pour créer une précontrainte de flexion dans des poutrelles en béton. 20

Figure 2.12 : Schématique du système d'isolation en AMF de bâtiment..... 21

Figure 2.13 : Schéma de précontrainte de cylindres en béton par AMF :
a) Avant chauffage. b) Après chauffage..... 22

Figure 2.14 : Schéma d'amortisseur en AMF pour un pont à haubans. 22

Figure 2.15 : Schéma d'installation de barre en AMF comme actionneur dans un pont ...	23
Figure 2.16 : Clocher de l'église de San Giorgio à Trigna en Italie renforcé par AMF.....	24
Figure 2.17 : Dispositif d'isolement de base en AMF.	24
Figure 2.18 : Géométrie du dispositif proposé.	25

Chapitre 3

Figure 3.1 : Le minaret de la mosquée de Mansourah avec ses ruines.	29
Figure 3.2 : Emplacement d'AMF sur le minaret de Mansourah.....	30
Figure 3.3 : Aqueduc de Larnaka, Chypre.	31
Figure 3.4 : Localisation des fils d'AMF.	31
Figure 3.5 : Dispositif en AMF utilisé pour appliquer la précontrainte.	32
Figure 3.6 : Clocher de l'église de San Giorgio à Trigna en Italie.....	33
Figure 3.7 : La modernisation en AMF.	34
Figure 3.8 : Basilique Saint François à Assise en Italie, modernisation du tympan endommagé par l'introduction de trois groupes d'actionneurs en AMF.....	35
Figure 3.9 : Coupe de dispositif à base AMF utilisé pour le séisme : connexion adaptée du pignon historique et la structure principale de la basilique San Francesco à Assise, Italie.	35
Figure 3.10 : Configuration de superélastique isolateur en AMF.	38
Figure 3.11 : Vue d'une poutre en béton équipée de quatre fils en AMF.	39
Figure 3.12 : Exemple d'endommagement du béton après les tests d'écrasement : a) Béton non confiné. b) Béton confiné.....	40
Figure 3.13 : Pont simple soutenu avec un système de retenue superélastique.	42

Chapitre 4

Figure 4.1 : Diagramme du processus de la technique globale.....	46
Figure 4.2 : Vue générale de la ville d'Ajloun avec la situation de la mosquée.....	47
Figure 4.3 : Le minaret d'Ajloun.....	49
Figure 4.4 : Différentes coupes transversales du minaret.....	49
Figure 4.5 : Pierres utilisées pour l'extraction des échantillons.....	50
Figure 4.6 : Les échantillons pris de l'ancienne et la nouvelle extension.....	50
Figure 4.7 : Positionnement des capteurs.....	51
Figure 4.8 : Le modèle de minaret en 3-D.....	53
Figure 4.9 : La forme des douze premiers modes.....	55

Chapitre 5

Figure 5.1 : Comportement super-élastique typique des AMF.....	59
Figure 5.2 : Ceinture d'assemblage des AMF.....	61
Figure 5.3 : Définition des AMF dans Ansys.....	61
Figure 5.4 : Structure géométrique du SOLID 185.....	62
Figure 5.5 : L'enregistrement du séisme d'El-Centro 1940.....	62
Figure 5.6 : Positions des 3 points de référence.....	63
Figure 5.7 : (a), (b), (c) les déplacements et (d), (e), (f) les accélérations aux points A, B, C sans AMF sous l'action d'El-Centro.....	64
Figure 5.8 : (a), (b), (c) la variation de la contrainte Sx aux points A, B, C sans AMF sous l'action d'El-Centro.....	65

Figure 5.9 : Concentration des contraintes au niveau des points A et B.....	66
Figure 5.10 : (a) assemblage des AMF par des cornière et (b) assemblage des AMF par des ceinture polygonale.....	67
Figure 5.11 : (a), (b), (c) les déplacements et (d), (e), (f) les accélérations aux points A, B, C avec AMF sous l'action d'El-Centro.....	68
Figure 5.12 : (a), (b), (c) la variation de la contrainte Sx aux points A, B, C avec AMF sous l'action d'El-Centro.....	69
Figure 5.13 : (a), (b), (c) les déplacements et (d), (e), (f) les accélérations aux points A, B, C avec AMF sous l'action d'El-Centro.....	71
Figure 5.14 : (a), (b), (c) la variation de la contrainte Sx aux points A, B, C avec AMF sous l'action d'El-Centro.....	72
Figure 5.15 : (a), (b), (c) les déplacements et (d), (e), (f) les accélérations aux points A, B, C sans et avec AMF sous l'action d'El-Centro	75
Figure 5.16 : (a), (b), (c) la variation de la contrainte Sx aux points A, B, C sans et avec AMF sous l'action d'El-Centro	76
Figure 5.17 : (a), (b), (c) les déplacements et (d), (e), (f) les accélérations aux points A, B, C avec AMF et bars d'acier sous l'action d'El-Centro	78
Figure 5.18 : (a), (b), (c) la variation de la contrainte Sx aux points A, B, C avec AMF et bars d'acier sous l'action d'El-Centro	79

Liste des Tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1 : Principes de base du calcul parasismique. 2

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Domaines d'applications des AMF..... 18

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Propriétés mécaniques des pierres..... 51

Tableau 4.2 : Fréquences mesuré expérimentalement à partir des trois accéléromètres.... 52

Tableau 4.3 : Les périodes et les fréquences des douze premiers modes..... 55

Tableau 4.4 : Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux. 56

Chapitre 5

Tableau 5.1 : Propriétés caractéristiques des AMF..... 60

Tableau 5.2 : Caractéristiques mécaniques des AMF. 60

Tableau 5.3 : Caractéristiques mécaniques des ceintures d'assemblage..... 61

Tableau 5.4 : Résultats de renforcement dans le premier endroit. 70

Tableau 5.5 : Résultats de renforcement dans le deuxième endroit. 73

Tableau 5.6 : Comparaison entre les deux emplacements. 74

Tableau 5.7 : Résultats de renforcement du minaret par les AMF..... 77

Tableau 5.8 : Résultats de renforcement du minaret par les AMF et les barres d'acier. ... 80

Chapitre 1 :

Introduction Générale

1.1. Introduction

Un séisme est un événement violent et extraordinaire qui peut provoquer l'endommagement et/ou l'effondrement des structures. Quelques-uns d'entre eux ont causé des dommages importants dans le secteur urbanisable, et notamment les monuments historiques parce qu'ils sont généralement des structures moins résistantes (figure 1.1). Chaque année, les séismes coûtent plusieurs milliards en réparations et font de nombreuses victimes. Mais, il est important de souligner que ce ne sont pas les séismes qui tuent, mais les bâtiments qui s'écroulent sur leurs occupants. C'est pourquoi qu'il y a d'investissements, des sommes importantes pour améliorer les performances sismiques des structures.

La recherche parasismique devient de plus en plus indispensable surtout avec la complexité croissante des problèmes à traiter. C'est le défi de maintenir debout les constructions après un séisme que les chercheurs essayent de surmonter. Néanmoins, cette recherche est très délicate et les résultats obtenus sont insatisfaisants du fait que les séismes sont de plus en plus intenses et dévastateurs.

Les normes parasismiques actuelles se fondent sur le déplacement qu'une structure peut subir sans s'effondrer. L'approche classique de design sismique consiste donc à permettre à certaines membrures de se déformer de façon ductile afin de dissiper une certaine quantité d'énergie de façon sécuritaire. Donc, c'est de faire avec une pierre deux coups, éviter les pertes de vie et protéger nos constructions. Cette approche est dite de « performance-based design » (conception basée sur la performance). Le (tableau 1.1) résume cette philosophie pour les structures.

Tableau 1.1 : Principes de base du calcul parasismique (Filiatrault, 2002).

Séismes	À éviter	Facteur requis
Mineurs	Dommages architecturaux	Rigidité
Moyens	Dommages structuraux	Résistance
Importants	Effondrement	Ductilité

Dans la dernière décennie, les innovations technologiques à base des matériaux actifs ont été intensivement développées pour satisfaire les besoins de l'ingénierie et tentent de réduire les risques sismiques, ce sont les systèmes de dissipation d'énergie. Parmi lesquels, certains misent sur l'absorption de l'énergie en se déformant telle que les alliages à mémoire de forme (AMF), ce qui les caractérisent vis-à-vis des métaux traditionnels.

En effet, ces matériaux présentent des propriétés mécaniques remarquables qui peuvent être avantageux pour les applications en génie civil, et parmi ces applications la réhabilitation et l'atténuation du risque sismique.



a) Un bâtiment effondré par le séisme de boumerdès



b) Pont détruit par le séisme de Kobe



c) Ruines des bâtis après le séisme de Népal



d) Arcade centrale, niche endommagée

Figure 1.1 : Les dégâts structuraux causés par les séismes (Réol et Sylvie, 2001).

1.2. La problématique

La conservation des ouvrages d'art et notamment les monuments historiques est la responsabilité de tout le monde et l'ingénieur de génie civil joue un rôle important dans cette mission. Dans ce mémoire nous avons cherché à répondre aux questions suivantes :

- Le progrès technologique tel que l'utilisation des AMF peut réduire l'impact de certaines catastrophes naturelles telles que les tremblements de terre ?
- Est-ce que l'utilisation de ce système de dissipation d'énergie a une bonne efficacité pour le contrôle et l'atténuation des actions sismiques ?
- Est-ce que le nombre et l'emplacement de ces AMF influe sur les résultats ?
- Est-ce que ces AMF sont vraiment efficaces et répondent à nos exigences pour limiter les risques sismiques ?
- Quels sont les paramètres qui influent sur la minimisation de l'action sismique ?

1.3. L'objectif

Dans ce travail, plusieurs objectifs sont ciblés. Mais, le but principal, est d'améliorer le comportement des structures suite à un séisme donné, et diminuer les dégâts qui peuvent être causés par ce de dernier. En outre, avoir une meilleure réduction de vibrations.

Plusieurs méthodes ont été développées, tel que les isolateurs antismismiques et les murs voiles. Pour notre cas et dont le but est de réhabiliter et conserver des monuments historiques, nous allons utiliser des matériaux innovants tels que les alliages à mémoire de forme, appliqués sur le minaret d'Ajloun en Jordanie.

Autrement dit, faire une étude sismique sur cet ancien minaret en lui appliquant des AMF sans compromettre l'intégrité de ce monument. Donc produire un comportement de dispositif efficace et capable de dissiper de l'énergie.

Le rôle de ces barres en AMF est de garantir et réduire trois mesures de la superstructure (contraintes, déplacements et accélérations), de dissiper l'énergie par leur loi de comportement superélastique. Cette approche permet des conceptions économiques.

1.4. Méthodologie du travail

Le minaret de la mosquée d’Ajloun (Jordanie) a été sélectionné comme exemple d’application en premier lieu, en raison de sa valeur culturelle, en plus de la disponibilité des caractéristiques surtout dynamiques de ce monument.

Le logiciel ANSYS version 11.0, sera utilisé pour la création d’un modèle tridimensionnel du minaret, pour voir la possibilité qu’il offre pour la modélisation des AMF.

Ensuite, une analyse dynamique sera faite avant et après renforcement du minaret par ces AMF face à une excitation sismique (le signal enregistré d’El-Centro). Ce signal a été enregistré le 18 mai 1940 dans Vallée Imperial, dans le sud de Californie du sud près de la frontière internationale des États-Unis et le Mexique. Il y avait une grandeur de magnitude 6,9 et une intensité maximale de la perception X sur l’échelle de Mercalli «Annexe 1». Il était le plus fort tremblement de terre enregistré qui a frappé la Vallée Imperial, et a causé des dégâts considérables aux systèmes d’irrigation et a conduit à la mort de 9 personnes (Hough, 2004).

La dernière étape de notre simulation consiste à intégrer les AMF en différents dispositifs, pour voir l’impact de ces derniers. Donc sur le modèle tridimensionnel du minaret de la mosquée d’Ajloun, ont va appliquer ces dispositifs de dissipation d’énergie comme « système de protection parasismique » afin de contrôler et voir au même temps la différence entre les contraintes, déplacements et accélérations du minaret sans et avec AMF durant les mouvements sismiques, dans le but d’analyser les données et comparer les résultats.

1.5. Organisation du mémoire

Ce travail se compose de quatre chapitres en plus de celui-ci, dont les contenus sont brièvement décrits ci-dessous :

La démarche que nous avons adoptée pour mener à bien ce travail a débuté par un premier chapitre d’introduction générale qui mentionne l’importance du développement

des concepts technologiques innovateurs pour une protection des structures et des personnes. À travers la problématique, l'objectif et la méthodologie du travail on met un bref sur le contenu de ce mémoire.

Le deuxième chapitre présente les connaissances de base des alliages à mémoire de forme. Une étude bibliographique sur ces AMF en mettant l'accent sur leurs spécificités. En dotant de quelques applications des systèmes de protection parasismique à base d'AMF dans le monde.

Le troisième chapitre est une revue de littérature sous forme des exemples réels sur l'application des AMF dans différentes constructions (monuments historiques, bâtis et ponts). Dans le but de mettre en évidence cette technologie avancée basée sur l'utilisation de ces matériaux intelligents dans le domaine de génie civil.

Le quatrième chapitre représente notre modèle d'étude « minaret d'Ajloun » modélisé en 3D via le logiciel Ansys version 11.0. Tout d'abord, une identification des caractéristiques dynamiques est réalisée en se basant sur des données expérimentales, à travers une analyse modale.

Le cinquième chapitre vise à montrer l'effet du dissipateur d'énergie (AMF) sur la réponse dynamique du minaret de la grande mosquée d'Ajloun qui sera soumise à l'excitation sismique. Une analyse dynamique de cet ancien minaret est menée sans et avec les AMF, pour un taux d'amortissement fixe ainsi que l'influence de l'emplacement des dispositifs en AMF dans le minaret.

Comme tout travail, ce mémoire est constitué d'une conclusion générale qui synthétise tout ce qui a été fait. Enfin, une série d'annexes vient d'apporter plus de détails et d'explication à nos chapitres.

Chapitre 2 :

Les Alliages à Mémoire de Forme

2.1. Introduction

Le désir de miniaturisation des systèmes mécaniques impose le développement de nouvelles technologies permettant de repousser toujours plus loin les limites de la science. Parmi ces nouvelles technologies, les innovations à base des matériaux actifs ont été intensivement développées ces dernières années. Ce chapitre sera consacré à un de ces matériaux appelés « alliages à mémoire de forme » (AMF) ou en anglais « shape memory alloys » (SMA), qui seront développés par la suite.

Depuis de longues années, un effort immense a été réalisé pour produire des alliages à mémoire de forme de composition variée afin de satisfaire à un nombre croissant d'applications. Ces derniers ont considérablement révolutionné et effectivement ils sont de plus en plus industrialisés et donnent de nouvelles lignes d'horizon pour des applications dans variant domaines.

2.2. Historique

Historiquement, c'est en 1932 qu'ont été découverts les premiers alliages à mémoire de forme par Chang et Read (Chang et Read, 1951). Pendant de longues années, ils sont restés méconnus des industriels, ne dépassant pas le statut de curiosités.

Ce n'est cependant qu'en 1962 que la découverte de la mémoire de forme dans les alliages à base de Nickel-Titane « NiTi » (50/50 %) attire l'attention des scientifiques dans le monde entier, depuis la liste des AMF s'est considérablement développée et leur intérêt fondamental ou pratique n'a fait que croître (Vignes et al., 2001).

Puis, dans les années quatre-vingt, des alliages à bases de cuivre sont mis en avant, permettant des coûts moins onéreux. Bien que plusieurs autres alliages à mémoire de forme aient été découverts depuis lors, la série de Nickel-Titane est restée le plus répandue et utilisée. Donc il a fallu attendre le Vingt-et-un siècle pour constater que des alliages métalliques présentent un effet comparable. Si les orientations industrielles de production de masse de composant à AMF n'a que peu de succès, ces alliages présentent maintenant un grand intérêt dans des applications à plus forte valeur ajoutée.

Effectivement, ces dix dernières années, ils commencent à quitter le laboratoire pour entrer dans le monde industriel et apportent des nouvelles perspectives pour des applications très diverses. Ils sont classés dans la catégorie des « matériaux intelligent » et « avancés », grâce à leurs propriétés mécaniques remarquables et avantageusement.

2.3. Définition des AMF

Les AMF désignent une classe de matériaux métallique qui ont la capacité de revenir à une forme prédéterminée, lorsqu'ils sont chauffés. Toutefois, lorsque le métal est chauffé au-dessus de sa température de transformation, il subit un changement de structure cristalline qui oblige à revenir à sa forme d'origine. Cette propriété est désignée par le terme « effet mémoire de forme » (Georges, 2012).

Quand la température d'un AMF est inférieure à sa température de transformation, il a une très faible limite d'élasticité et se déforme très facilement à n'importe quelle nouvelle forme dont il conservera. Contrairement aux alliages ordinaires, l'AMF lorsqu'il est soumis à des contraintes supérieures à sa limite d'élasticité il se déforme, mais cette déformation n'est pas permanente, car il revient à son état initial par un simple chauffage.

Les propriétés pseudoélastiques des alliages à mémoire de forme (superélasticité, mémoire de forme) reposent sur l'existence d'une transformation de phase à l'état solide appelée « transformation martensitique thermoélastique » (Patoor et Berveiller, 1990).

La figure (2.1) présente un schéma explicatif sur les propriétés de fonctionnement qui apprécié par un AMF. Lorsqu'un AMF est exposé à une déformation importante (figure 2.1.a), il peut récupérer sa forme initiale par simple chauffage (figure 2.1.b). En plus l'alliage a une phase superélastique qui lui permet de retourner à sa forme initiale (figure 2.1.c).

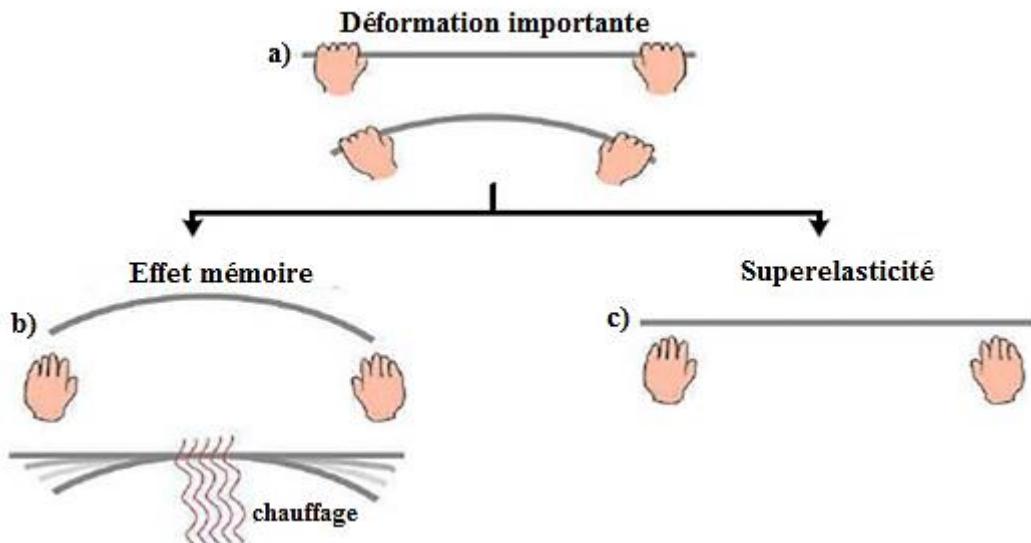


Figure 2.1 : Principes de base du fonctionnement d'un AMF (Vincent, 2012).

2.3.1. La transformation Martensitique-Austénitique

Toutes les propriétés des AMF sont dues à une transformation de phase thermoélastique qui est une phase mère « austénitique ». À travers cette dernière, donne une naissance de façon réversible, à une phase « martensitique » sous l'effet d'une variation de température ou sous l'application d'une contrainte mécanique (Vignes et al., 2001). Ce sont deux phases cristallographiques.

Donc l'appellation de la phase « transformation martensitique » est associée à la transformation de la phase mère « l'austénite » des alliages en « martensite » (découverte par Adolf Martens en 1879).

La figure (2.2) explique schématiquement le passage d'une phase à une autre « austénitique vers martensitique » d'un trombone en AMF. La transformation de la phase mère « austénite » après avoir subi une déformation à une deuxième phase « martensite » lors d'un simple chauffage. Cette propriété est désignée par l'effet mémoire de forme. C'est donc lors du retour à sa forme initiale par chauffage que l'AMF est capable de générer un travail mécanique.

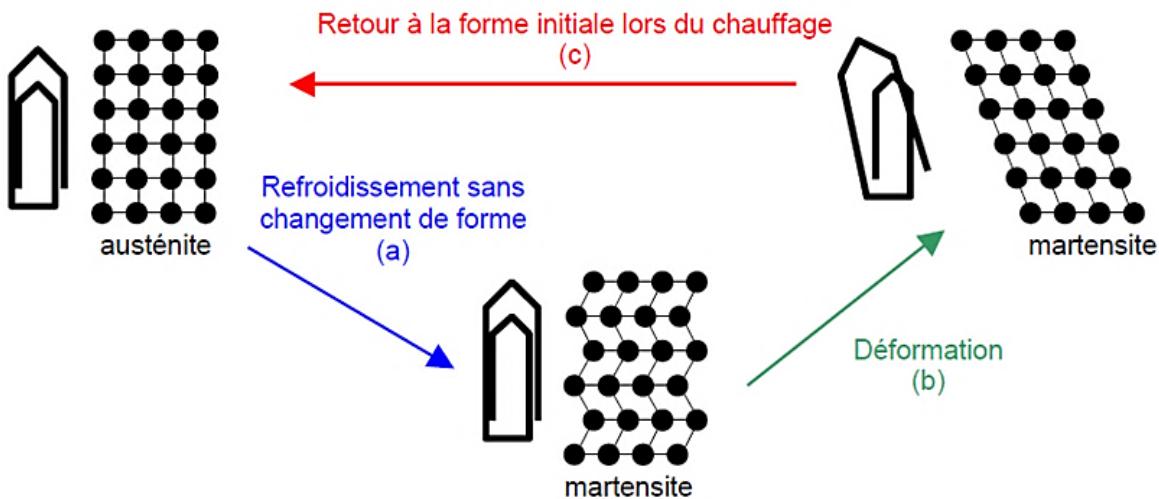


Figure 2.2 : Effet de mémoire de forme d'un trombone en AMF.

Nous allons résumer brièvement les caractéristiques qui possèdent la «transformation martensitique» qui est à l'origine des propriétés des AMF.

2.3.2. Caractéristiques générales

La « transformation martensitique » possède cinq caractéristiques principales (Vignes et al., 2001) :

1. Changement de phase à l'état solide dû à une déformation homogène du réseau cristallin.
2. L'absence de diffusion rend la transformation martensitique presque instantanée, avec des vitesses comparables à la vitesse du son dans un solide.
3. La transformation martensitique entraîne un changement de la forme (cisaillement) et du volume de l'éprouvette. Pour les alliages à mémoire de forme la variation de volume est faible et le cisaillement est important.
4. Afin de minimiser l'énergie entre la martensite formée et l'austénite encore présente, les domaines de martensite formée ont la forme de plaquettes aplatis.
5. Les variables thermodynamiques externes qui ont une action sur la « transformation martensitique » sont la température et la contrainte. Et c'est la déformation associée à la « transformation martensitique » des AMF qui permet de donner une forme haute et basse température à un matériau et de le déformer de façon réversible.

2.4. Les propriétés thermomécaniques des AMF

La « transformation martensitique » donne cinq propriétés thermomécaniques exceptionnelles :

- Effet de mémoire simple sens.
- Effet de mémoire double sens.
- Effet d'amortissement.
- Effet superélastique.
- Effet caoutchoutique.

2.4.1. Effet mémoire simple sens (EMSS)

Traduit que l'alliage est capable de retrouver sa forme initiale par chauffage après une déformation mécanique (Gotthard et Lehnert, 2001). On peut donner à une pièce de forme initiale A, par l'application d'une contrainte, la forme stable B. La propriété de l'alliage à mémoire de forme est de retrouver sa forme initiale A par simple chauffage à une température caractéristique de l'alliage. Toutefois, un abaissement de la température ne permet pas le retour à la forme B.

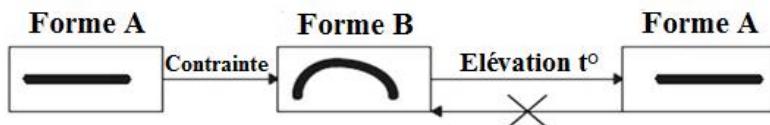


Figure 2.3 : Illustration de l'effet mémoire simple sens des AMF (Raymond, 2000).

2.4.2. Effet mémoire double sens (EMDS)

Désigne l'aptitude que l'alliage est capable après « apprentissage » d'avoir deux positions stables, l'une au-dessus d'une température dite critique et l'autre en dessous (Gotthard et Lehnert, 2001). Après, un traitement convenable de la pièce dit « éducation », il est possible de revenir à la forme B par simple abaissement de la température.

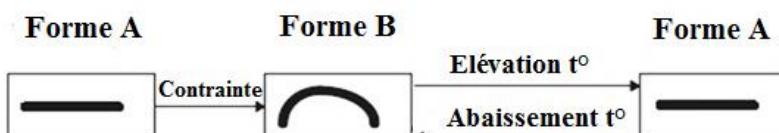


Figure 2.4 : Illustration de l'effet mémoire double sens des AMF (Raymond, 2000).

2.4.3. Effet d'amortissement (EA)

L'amortissement mécanique est le résultat d'une transformation irréversible d'énergie mécanique en énergie thermique dissipée (Vignes et al., 2001). Le frottement interne associé aux mouvements des interfaces entre les différentes variantes entraîne une dissipation d'énergie permettant par exemple d'amortir des vibrations (Liu et al., 1999).

Remarque : L'utilisation des AMF pour résoudre des problèmes d'amortissement mécanique présente plusieurs avantages, car ils ont un frottement intérieur élevé et une rigidité importante. Ces propriétés-là présentent également un grand intérêt pour des applications techniques.

2.4.4. Effet superélastique (SE)

Cet effet caractérise la capacité du matériau à se déformer de façon réversible de plusieurs pourcents. L'alliage est capable de se déformer énormément (jusqu'à 10 %) de manière réversible sous l'effet d'une contrainte (Stalmans et al., 1990).

- a) Soit par l'application d'une contrainte à une température supérieure.
- b) Soit par un refroidissement sous contrainte constante à partir d'un état austénitique.

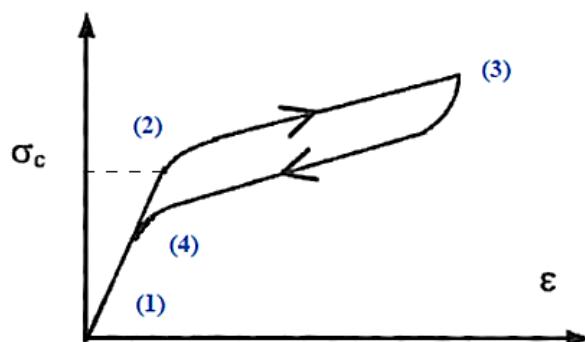


Figure 2.5 : Effet superélastique (Patoor et al., 1996a).

- (1-2) : L'application de la contrainte produit une déformation élastique de l'austénite jusqu'à une valeur critique de la contrainte σ_c .
- (2-3) : La déformation provient de la « transformation martensitique » sous contrainte de l'austénite en martensite.
- (3-4) : La transformation inverse se produit lors de la décharge en ramenant l'échantillon en phase austénitique.

2.4.5. Effet caoutchoutique (EC)

Ce phénomène est connu sous le nom de « effet caoutchoutique » et aussi « pseudo-élasticité par réorientation ». Cet effet, décrit le comportement associé aux mouvements réversibles des interfaces inter-variantes au sein de la martensite (Patoor et al., 2006b), le déplacement de ces interfaces consomme de l'énergie (Muller, 1988). Le comportement mécanique correspondant, donné par la figure (2.6) :

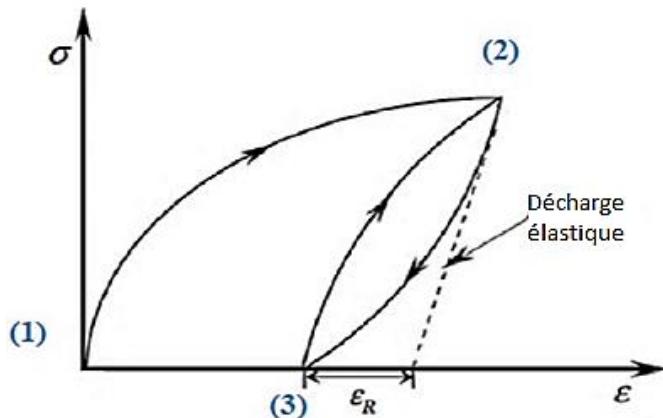


Figure 2.6 : L'effet caoutchoutique (Patoor et al, 2006b).

- (1-2) : Un domaine élastique non linéaire.
- (2-3) : Lors de la décharge, la déformation macroscopique est constituée d'une déformation réversible liée au mouvement réversible des interfaces et une déformation résiduelle due à la stabilisation de la martensite.

Remarque : Le module de rigidité est largement inférieur au module d'élasticité.

2.5. Production des AMF

L'élaboration des AMF est procédée par quatre grosses étapes (Vignes et al., 2001) :

- Matières premières.
- Fonderie.
- Mise en forme.
- Traitement de bétaturation.

Nous allons expliquer rapidement ces étapes de fabrication des AMF pour donner une idée générale sur leur production comme matériaux industriels.

2.5.1. Matières premières

Les éléments constituant l'AMF doivent avoir une pureté supérieure à (99,99 %) car les propriétés de l'alliage élaboré baissent de façon considérable avec l'augmentation du taux d'impuretés.

2.5.2. Fonderie

Les AMF sont dans un premier temps mis en fusion. Avant de procéder à la coulée, il est indispensable de s'assurer de l'exactitude de la composition du bain en fusion.

2.5.3. Mise en forme

Il apparaît de façon évidente que le procédé de mise en forme est spécifique à chaque famille du fait de leur différence de ductilité. Le choix d'une mise en forme à chaud ou à froid sera conditionné par l'aptitude de l'alliage en question à être déformé en fonction de la température.

2.5.4. Traitement de bétatisation (ou d'austénisation)

Pour conférer aux produits obtenus les propriétés mémoire de forme, les AMF doivent subir une séquence de traitement thermique.

2.6. Les familles d'AMF

Il existe de nombreux alliages susceptibles présentent l'effet de mémoire de forme. La majorité de ces alliages présente une transformation martensitique. Les principaux AMF sont regroupés dans trois grandes familles qui sont (Clément, 1993) :

- Les alliages à base Nickel-Titane.
 - Les alliages à base Fer.
 - Les alliages à base Cuivre.
-

2.6.1. *Les alliages à base Nickel-Titane*

Ces alliages se composent d'environ la moitié de Nickel et l'autre moitié de Titane, plus quelques additions. Ce système a été le plus étudié et actuellement connaît le développement le plus rapide. Bien que son coût reste élevé, il doit sa popularité à ses bonnes performances, tant en effet mémoire de forme simple sens qu'en superélasticité. C'est en 1962 que Buhler et Wiley ont mis en évidence l'effet de mémoire de forme dans un alliage de Nickel-Titane. Ses principaux avantages sont (Olier, 1995) :

- Une bonne tenue : mécanique, à la corrosion et au vieillissement.
- Une bonne résistance à la fatigue.
- La déformation de transformation est la plus importante (5 à 8 %).
- L'ordre atomique est important pour la réversibilité de la phase « martensite ».
- L'alliage possède de remarquables propriétés d'amortissement.



Figure 2.7 : AMF à base de Nickel-Titane.

2.6.2. *Les alliages à base Fer*

Grâce à trois types de « transformations martensitique » les alliages à base de Fer sont susceptibles de présenter l'effet mémoire de forme. Contrairement aux alliages à base Nickel-Titane ou à base de Cuivre, presque toutes les transformations martensitique dans l'alliage ne sont pas thermoélastiques (les phases « austénite / martensite » sont irréversible et la limite élastique est trop faible pour effectuer un chargement superélastique) (Khelfaoui, 2000). Ses principaux avantages sont (Guenin, 1996) :

- Une bonne propriété de mémoire de forme.
- Un prix d'alliages assez bas.
- La possibilité de bonne résistance à la corrosion.
- Ils appartiennent aux aciers inoxydables et les aciers à outils.

Remarque : Cet alliage est un bon candidat pour les applications de fixation.



Figure 2.8 : AMF à base de Fer.

2.6.3. *Les alliages à base Cuivre*

Les alliages de cuivre désignent un ensemble d'alliages où le cuivre est majoritaire. Ces matériaux se mettent en forme facilement. En utilisant des alliages, les performances du cuivre peuvent être étendues pour répondre à de nombreuses applications industrielles. Ses principaux avantages sont (Raymond, 2000) :

- Les alliages de cuivre font partie des métaux et alliages non ferreux.
 - Ont des propriétés mécaniques intéressantes et ont un coût de production faible.
 - Très grande capacité de déformation à froid.
 - Ils ont en général une bonne résistance à la corrosion.
 - Leur résistance à la corrosion n'est pas le seul motif de leur emploi. On peut rechercher d'autres paramètres comme les facilités au moulage ou la conduction thermique ou électrique, la masse volumique plus faible que celle des aciers...etc.
- Ce sont ces raisons qui expliquent que ce sont les alliages les plus utilisés.



Figure 2.9 : Des barres / fils en AMF à base de Cuivre.

2.7. Application générale des AMF

Les propriétés uniques des AMF en font un choix judicieux pour de nombreuses utilisations. La plupart des applications des AMF est regroupée en quatre catégories :

- **Amortisseurs** : diminution du niveau de bruit et des vibrations.
- **Superélastiques** : déformation importante et reprise de la forme initiale une fois la contrainte supprimée.
- **Connecteurs** : maintien, serrage, positionnement et attaches.
- **Actuateurs** : changement de forme et production d'un travail (ressort...), électriques et thermique.

Tableau 2.1 : Domaines d'applications des AMF (Vignes et al., 2001).

Secteurs industriels	Catégories des AMF			
	Superélastiques	Amortisseurs	Connecteurs	Actuateurs
Mécaniques	-	Amortisseur mécanique	Embouts de tuyauterie	
Biomédical	Fils dentaires	-	-	-
Vêtements	Fils superélastiques	-	-	-
Lunettes	Branches de verre superélastique industriel	-	-	-
Bâtiment, Pont	Création de précontrainte	Renforcement du béton	-	Système de détection d'incendie
Automobile, Transport	-	NOMBREUSES applications possibles	-	-
Aérospatial	-	-	Manchons d'accouplement	-
Electronique	-	-	-	Relais de sécurité

La superélasticité des AMF est utilisée pour des applications qui exigent une flexibilité et une déformation extraordinaire. Grâce à l'effet à mémoire de forme des AMF qui peuvent récupérer une forme particulière lors du chauffage au-dessus de leurs températures de transformation. La phase « martensitique » des AMF qu'on a parlée déjà, présente d'excellentes caractéristiques d'atténuation d'énergie (amortissement) et elle est remarquablement résistante à la fatigue.

La figure (2.10) montre le pourcentage des domaines d'applications des AMF.

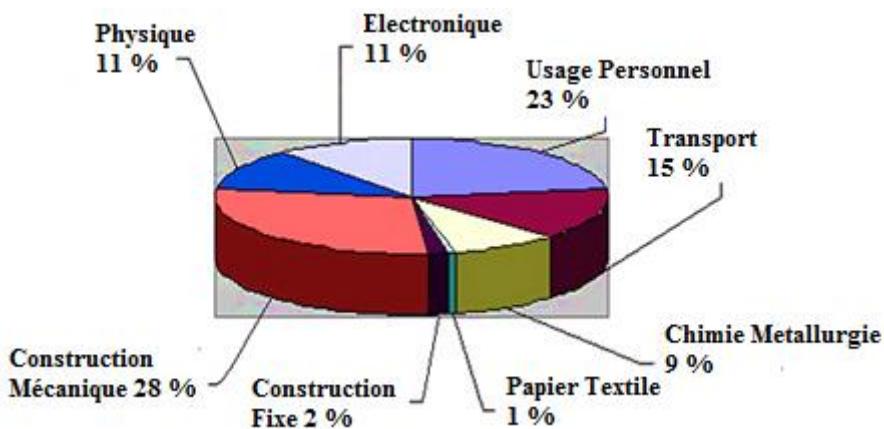


Figure 2.10 : Divers exemple d'application des AMF en pourcentage (Balandraud, 2011).

2.8. Application des AMF dans le génie civil

Dans le domaine du génie civil, l'utilisation des AMF reste très limitée, en partie à cause de leur coût, mais surtout en raison du manque actuel de connaissances sur le mécanisme complexe impliqué dans leur association avec des matériaux de construction tels que le béton. Certaines études visent à utiliser les propriétés des AMF telles que la superélasticité, l'effet de mémoire ainsi que la bonne propriété d'amortissement, pour créer des structures actives capables d'ajuster leur comportement aux conditions de chargement (Janke et al., 2005). Donc du fait de leurs propriétés exceptionnelles, les AMF pourraient révolutionner l'industrie de la construction.

Les grandes structures comme les bâtiments et les ponts peuvent être exposées à des fortes vibrations, qui peuvent présenter des tensions dangereuses. Par le placement

stratégique des AMF, les dommages structurels peuvent être minimisés lors d'un séisme. Ce principe était utilisé aussi pour maintenir le patrimoine architectural dans les zones sismiques. Les principales applications des AMF dans le génie civil sont présentées selon deux directions (Hanh, 2012) :

- L'application des AMF au renforcement des structures en béton :
 - Conception de nouvelles solutions structurelles.
 - Rénovation des structures historiques.
- L'application au contrôle dynamique et à la protection parasismique des structures :
 - Réparation des éléments de structures endommagés.
 - Amortissement des structures.
 - Sécurité de la construction.

2.8.1. Renforcement des structures en béton

Des études ont montré que l'association béton / AMF permet d'obtenir des gains significatifs en termes de résistance et de ductilité, ou retarder la fissuration. En particulier, l'effet de mémoire a été utilisé pour la création de précontraintes dans des poutrelles en béton renforcées par des fils en AMF à base de Nickel-Titane (Motavalli et al., 2009). Les résultats obtenus prouvent que l'utilisation des AMF peut changer la rigidité et la résistance des poutres en béton. De plus, ils confirment que de la précontrainte peut être créée dans des poutres par l'effet de mémoire. En outre, des tests de flexion ont faits sur des poutrelles en béton renforcées par des fils d'AMF montrent que la présence de ces fils peut améliorer la ductilité du béton. Lorsque le béton commence à s'endommager, la réorientation des AMF permet de retarder l'augmentation des fissures (Song, 2006).

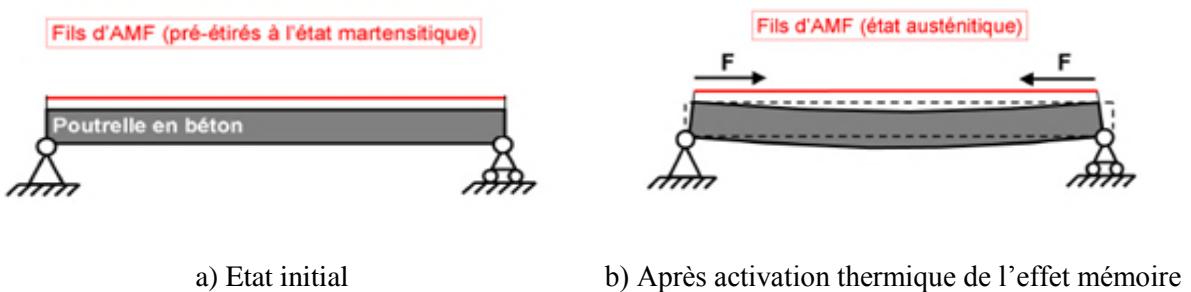


Figure 2.11 : Utilisation des barres en AMF pour créer une précontrainte de flexion dans des poutrelles en béton.

2.8.2. Protection parasismique

L'effet d'amortissement lié à la pseudoélasticité a également été utilisé pour le contrôle des effets dynamiques dans des structures en béton, ou pour la protection sismique de ponts ou de bâtiments historiques. Des dispositifs à base d'AMF spécialement mis au point pour supporter des efforts de traction-compression. Donc sous des chargements cycliques (vent par exp.), le comportement élastique linéaire de ces dispositifs correspond à de faibles déplacements dans la structure. De plus, leur comportement superélastique provoque un effet amortissant dans le cas d'un chargement cyclique pour limiter l'intensité des efforts et des déplacements (séisme par exp.) (Motavalli et al., 2008).

De même, ce principe a été utilisé dans des constructions anti-sismiques, par exemple dans « le clocher de la cathédrale San Giorgio en Italie » et dans des amortisseurs de ponts à haubans.

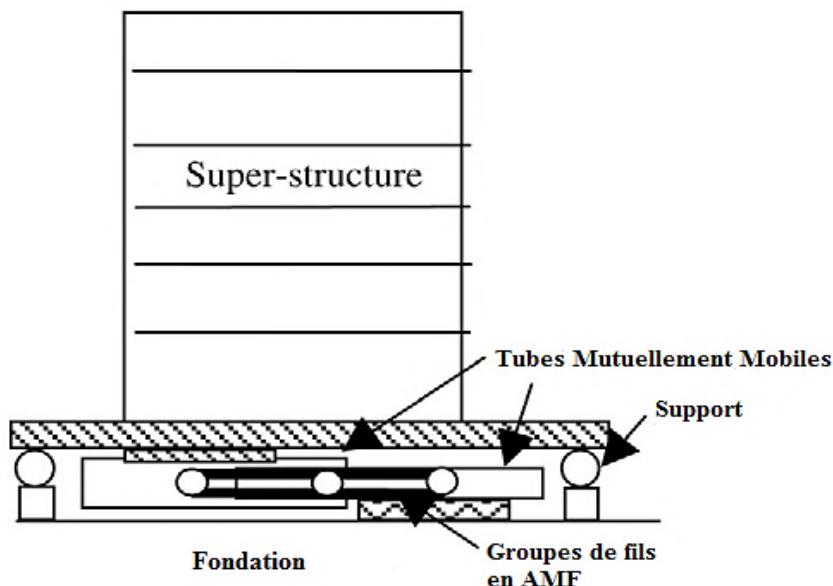


Figure 2.12 : Schématique du système d'isolation en AMF de bâtiment (Dolce et al., 2001).

2.8.3. Précontrainte durable des constructions en béton

Les AMF présentent des capacités pour créer des précontraintes de construction. Une nouvelle méthode pour la réparation des structures endommagées consiste à enrouler des fils en AMF dans le béton à renforcer, ce qui montre la figure (2.13). Les résultats des tests

ont montré que le renforcement latéral permet l'élimination complète des dommages causés, et d'augmenter la résistance, malgré la réduction de la rigidité (Shin, 2012).

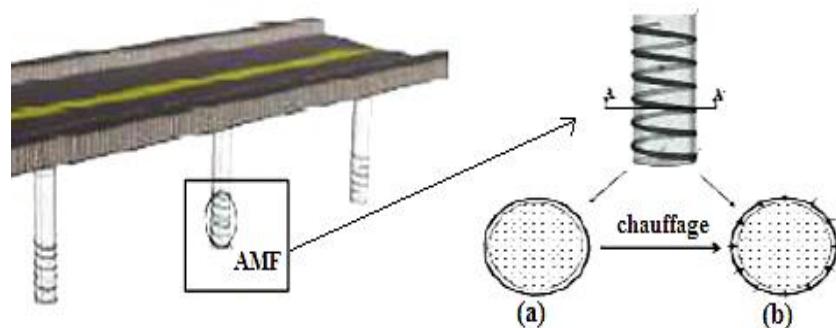


Figure 2.13 : Schéma de précontrainte de cylindres en béton par AMF :
a) Avant chauffage. b) Après chauffage.

2.8.4. Amortisseurs à base d'AMF

La structure contenant des AMF permet d'amortir les vibrations dues à un séisme et évite surtout la détérioration du bâtiment. Les amortissements en AMF sont des nouveaux systèmes en cours de développement, faits pour le déplacement de la structure. Actuellement, on les utilise comme armature des éléments de structures qui existent dans les zones sismique, isolation sismique placée entre des assemblages de structures, par exemple entre les supports d'un pont (Li et al., 2004). Les essais expérimentaux montrent que l'amortisseur en AMF permet :

- Une réduction des vibrations dans des haubans (causées par le vent).
- Une réduction efficace de l'amplitude de l'oscillation.
- Une augmentation de la fréquence.
- Une augmentation du coef. de frottement = Une diminution des risques de fatigue.

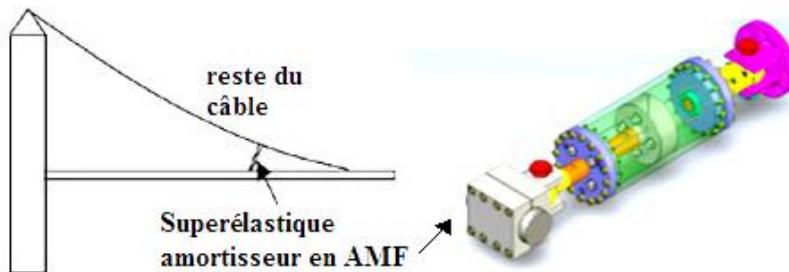


Figure 2.14 : Schéma d'amortisseur en AMF pour un pont à haubans (Li et al., 2004).

2.8.5. Capteurs / Actionneurs

Les AMF peuvent être utilisés comme des capteurs qui fournissent des informations sur une grandeur physique. Principalement les alliages à base Nickel-Titane trouvent des applications comme capteurs et actionneurs. Capteurs pour le contrôle des dommages dans les structures et actionneurs pour modifier la déformation des poutres en béton (Kotynia, 2011). Ce type de système est utilisé principalement au contrôle des vibrations transversales des câbles des ponts à haubans.



Figure 2.15 : Schéma d'installation de barre en AMF comme actionneur dans un pont.

2.8.6. Réhabilitation des monuments historiques

Les ingénieurs en charge de la réhabilitation des anciennes constructions sont souvent face aux problèmes du renforcement de la structure sans modifier ou toucher son aspect extérieur « la non destructive ». Durant ces dernières années, l'utilisation des AMF pour la réhabilitation est l'une des solutions (Dolce et al., 2000).

Un excellent exemple de mise en œuvre de cette nouvelle technologie dans le génie civil est le renforcement « le clocher de la cathédrale San Giorgio en Italie ».

On peut conclure que les AMF peuvent être utilisés pour la protection du patrimoine culturel dans le domaine du risque sismique sans toucher la structure ou la façade extérieure.

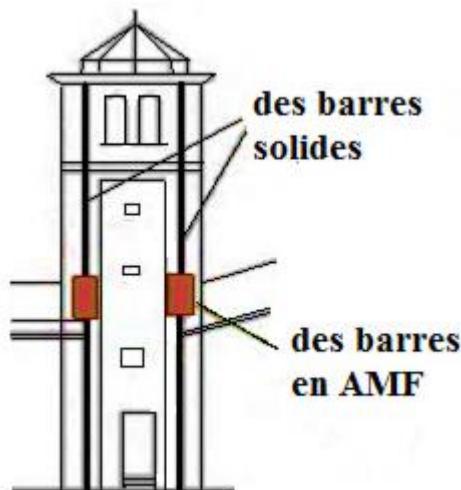


Figure 2.16 : Clocher de l'église de San Giorgio à Trigna en Italie renforcé par AMF
(Motavalli et al., 2008).

2.8.7. Application des barres en AMF comme isolateur de base

Une vaste recherche menée par les auteurs présente un nouveau et innovant dispositif d'isolement de base à base d'AMF. Les recherches pratiques ont montré que les techniques d'isolement de base en AMF sont efficaces pour réduire les réponses sismiques des structures (Jia et Shi, 2010).



Figure 2.17 : Dispositif d'isolement de base en AMF.

La géométrie du nouveau dispositif d'isolation de base est constituée de deux disques, un cylindre vertical avec un agrandissement supérieur soutenu par trois horizontal cantilevers, et au moins trois barres d'AMF inclinées. Le rôle des barres d'AMF est de limiter le rapport mouvement entre la base et la superstructure, à dissiper l'énergie par leur

loi de comportement superélastique et de garantir le recentrage du dispositif. En résumé, ces barres d'AMF ont quatre principales fonctions (Casciati et al., 2007) :

- Fournir la rigidité contre des excitations de basse intensité.
- S'opposer au déplacement très grand.
- Recentrer le dispositif.
- Absorber l'énergie pendant le mouvement.

La figure (2.18) illustre les paramètres géométriques caractérisant l'assemblage du dispositif :

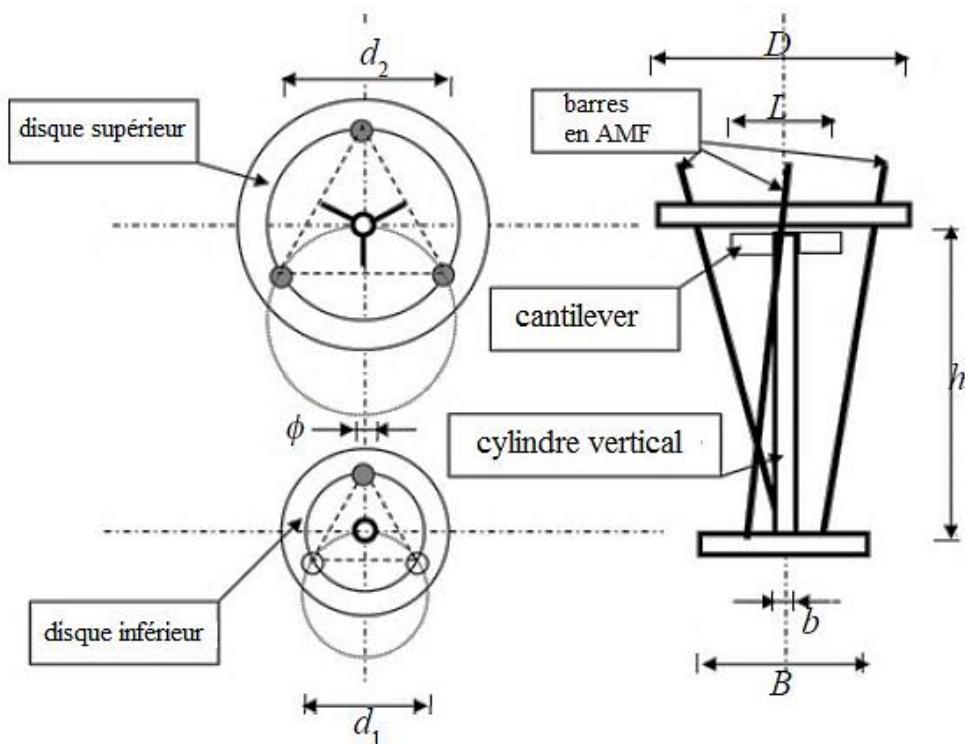


Figure 2.18 : Géométrie du dispositif proposé (Casciati et al., 2007).

2.9. Conclusion

Ce chapitre a porté sur le développement d'une base de connaissances sur les AMF. Ceux-ci présentent des propriétés spécifiques qui sont utilisées dans un grand nombre d'applications.

En revanche, leur usage en génie civil reste très limité en partie du fait de leur coût, mais également par manque de connaissances des mécanismes. Certains points restent encore à étudier pour trouver des solutions intéressantes aux problèmes rencontrés.

Donc, il apparaît essentiel de disposer d'un cahier des charges détaillé décrivant les applications qui peuvent être envisagées pour les AMF. Ce cahier permettrait de réaliser les essais mécaniques adaptés permettant de conclure quant au potentiel de ces alliages utilisés en conditions réelles.

C'est pour cela dans la suite, nous allons donner une revue de littérature afin d'estimer quantitativement et qualitativement l'utilisation des AMF dans le domaine du génie civil.

Chapitre 3 :

Revue de Littérature

3.1. Introduction

Dans le domaine de génie civil, la stabilité et la fonctionnalité des ouvrages est indispensable mais insuffisante, vis -à- vis aux exigences concernant la réduction de la masse structurelle, pour des raisons esthétiques et économiques. Ce qui rend la mission de l'ingénieur de génie civil plus importante. Cependant, le maintien des structures existantes, fait l'objet d'une mission très compliquée, surtout pour les monuments historiques qui soulève toujours beaucoup de controverses à cause de leur valeur architecturelle et l'insuffisance des techniques de réhabilitation habituelles.

Aujourd'hui, associer sismicité et monuments historiques fait le plus souvent partie d'un champ de recherche et développement (Savoie et Limoge, 2013). La réhabilitation de ces anciennes structures classées au patrimoine mondial demeure absolument primordiale, puisque ces structures sont partiellement détruites lors des séries de séismes qui les ont affectées. L'utilisation de nouvelles technologies et de stratégies avancées qui fournissent une meilleure efficacité du travail de rénovation des structures légèrement endommagées et peuvent répondre aux attentes des investisseurs. Parmi ces nouvelles technologies, l'utilisation des AMF qui sont considérés comme des matériaux intelligents. Plusieurs travaux de recherche ont été effectués ces dernières années, en s'intéressant à ces matériaux intelligents qui présentent des propriétés particulières. Plusieurs applications ou essais ont été imaginées afin de cerner ce matériau révolutionnaire.

Dans ce chapitre, nous allons donc présenter une revue de littérature décrivant les fondements d'applications des AMF dans le génie civil, mais les applications réelles restent minimes quelque soit en bâti et/ou dans les ponts.

3.2. Applications des AMF dans les structures historiques

Dans la rénovation des structures historiques en dotant les AMF pour voir leur effet, il existe des anciens minarets historiques qui ont été sélectionnés comme modèles numériques tridimensionnels en raison de leurs valeurs culturelles et de leurs importances touristiques, ils doivent être préservés pour l'avenir. L'efficacité de l'utilisation de cette

technologie de protection sismique est basée sur ces matériaux intelligents pour préserver ces minarets historiques.

3.2.1. Le minaret de Mansourah, Algérie

Le site historique de Mansourah, est l'un des monuments splendide en Algérie. Il est classé comme patrimoine culturel national.

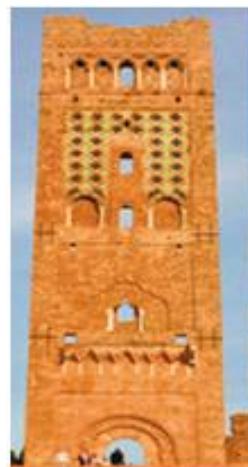


Figure 3.1 : Le minaret de la mosquée de Mansourah avec ses ruines.

Dans le cadre de la réhabilitation sismique, une étude a été publiée sur l'analyse dynamique de ce monument historique axée sur la rénovation en utilisant les fils en alliages à mémoire de forme présentée par Hamdaoui et Benadla (Hamdaoui et Benadla, 2014). Cette étude dynamique sous des excitations sismiques a été faite pour voir le comportement, sans et avec les AMF.

Dans cet effet, une recherche de la littérature liée à la mise à jour dynamique du modèle éléments finis, c-à-d une modélisation numérique tridimensionnelle du minaret, à base d'une proposition d'utiliser des fils en AMF comme amortisseurs pour la partie supérieure « partie flexible du minaret » et relier une partie des éléments de minaret par ces derniers.

Cette étude a été faite dans le but de montrer l'effet efficace de consolidation qui va produire les fils en AMF.

La figure (3.2) montre l'ajout des AMF avec le minaret. La liaison a été faite est par des cornières.

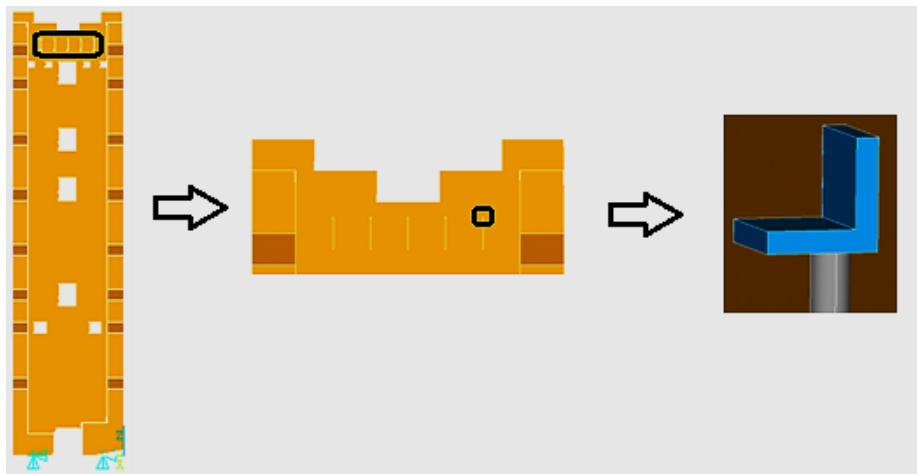


Figure 3.2 : Emplacement d'AMF sur le minaret de Mansourah (Barka et Soussi, 2013).

À travers cette étude, il a été montré que :

- Les déplacements maximums ont été réduits avec un pourcentage acceptable.
- Une réduction importante en termes d'accélération maximale.
- Un comportement différent du minaret avec les fils en AMF pourrait être observé.
- La rénovation proposée n'affecte pas sur la réponse dynamique, mais fournit la protection requise en vertu des chocs extrêmes probables.

Finalement, il a été confirmé l'efficacité du dispositif en AMF proposé pour atténuer les chocs susceptibles extrêmes et montrer la réduction des accélérations, des déplacements et des contraintes dans l'analyse dynamique.

3.2.2. *Un ancien Aqueduc, Chypre*

Un autre exemple d'application des dispositifs en AMF de précontrainte sur un aqueduc en chypre, qu'il a été présenté dans un article de Chrysostomou, Demetriou, Stassis et Hamdaoui (Stassis et al., 2007).

En raison de son importance pour le patrimoine culturel de chypre, touristique et de l'importance de la volonté de préserver pour l'avenir, l'aqueduc de Larnaka à Chypre est sélectionné comme une étude de cas monuments historiques dans le projet vaste gamme

des dispositifs non-destructif à la conservation du patrimoine historique de la région méditerranéenne.



Figure 3.3 : Aqueduc de Larnaka, Chypre.

Des tests non destructifs ont été autorisés pour les essais expérimentaux de ces structures patrimoniales. Cette étude dynamique sous des excitations sismiques est faite pour assurer la protection du monument contre les effets catastrophiques du séisme probable. Pour cette raison, il a été décidé de fixer les fils d'AMF à la base de l'une des piles à l'aide de boulons et en haut pour soutenir le fil sur une base rigide qui transfère la force sur l'aqueduc (Hamdaoui, 2009). Donc à travers la modélisation numérique tridimensionnelle de l'aqueduc, une comparaison intéressante (avec / sans AMF) qui a été faite pour montrer l'effet efficace des dispositifs en AMF de précontrainte. Ils sont mis dans des endroits spécifiques et/ou stratégiques en figure (3.4) et qui vont compenser leur poids propre, consolider et devienne une construction robuste.

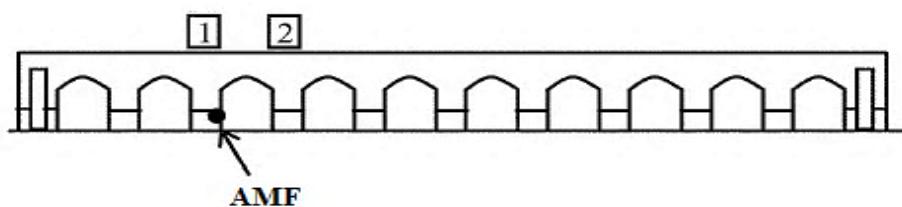


Figure 3.4 : Localisation des fils d'AMF.

Dans cet article, les résultats de l'application de dispositifs en AMF montrent que :

- L'évidence que l'application des fils AMF a un effet significatif sur le comportement dynamique de l'aqueduc.
- Un raidissement de la structure en raison de l'application d'une force de précontrainte.

- Il a été observé que l'application des fils a eu pour résultat l'importante modification du signal enregistré. Alors que pour le cas d'aucun fil le signal était assez compliqué.
- L'augmentation de la fréquence fondamentale montre une augmentation de la rigidité de la structure.

Enfin, il a été conclu à travers ces résultats que l'application des fils AMF sur ce monument a montré qu'ils changent de façon significative les caractéristiques dynamiques de la structure.

3.2.3. Mur en maçonnerie

Les fils précontraints en AMF fermes peuvent être installés entre les éléments en briques, avec les effets de limiter les déplacements relatifs dus aux vibrations et en même temps, permettant une dissipation d'énergie (Casciati et Faravelli, 2004).

Une étude expérimentale sous échelle réduit va être une solution pour les bâtiments historiques. Casciati et Hamdaoui (Casciati et Hamdaoui, 2008), ont effectué un test sur table vibrante sur un modèle réduit d'un mur en maçonnerie. Une solution innovante suggère d'exploiter les particularités des AMF et leur comportement superélastique sous excitation dynamique. Donc un prototype construit par des briques superposées pour reproduire les propriétés d'une structure monumentale a été empiriquement évalués, sans une tentative approfondie d'enquêter sur les principes mécaniques sous-tendent des données recueillies.

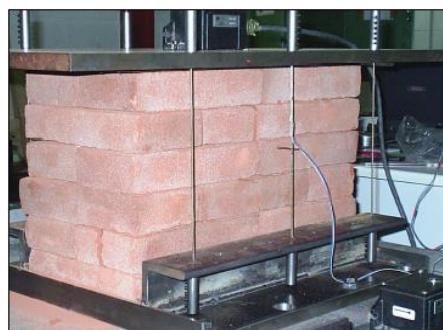


Figure 3.5 : Dispositif en AMF utilisé pour appliquer la précontrainte.

La réponse dynamique de ce prototype a été mesurée avant et après avoir renforcé 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.

3.2.4. Clocher de l'église de San Giorgio, Italie

Un excellent exemple de mise en œuvre de nouvelles technologies dans le génie civil est le renforcement du clocher de l'église de San Giorgio à Trigna en Italie qui a été gravement endommagé par un tremblement de terre en 1996 (Indirli, 2000). Donc il a fallu nécessairement mettre une protection anti-sismique après ce séisme.

Des dispositifs en AMF ont été utilisés lors de la restauration de ce monument. C'est la première fois que ce type d'alliage qui reprend sa position initiale après déformation est appliqué au domaine de l'ingénierie structurelle du patrimoine culture. Sous des sollicitations plus élevées telles que celles induites par un séisme, l'effet de plateau et d'amortissement lié au comportement superélastique du dispositif à base d'AMF permet de limiter les accélérations et les forces transmises entre les différentes parties de la construction, dans l'objectif est de limiter les dommages lors d'un futur séisme (Hanh, 2012).



Figure 3.6 : Clocher de l'église de San Giorgio à Trigna en Italie.

Le renforcement de la tour de 17 mètres a été fait en couplant le haut et le bas de la tour en utilisant des tendons hybrides (Indirli et al., 2001). Des dispositifs amortissants sont conçus pour supporter des forces de traction à l'aide de 60 fils AMF en parallèles. La tension dans les fils est choisie de manière à se placer dans la zone du plateau superélastique de l'AMF. Ces amortisseurs visent à limiter les forces internes dans la structure en cas de nouveau séisme pars qu'ils dissipent de l'énergie grâce au

comportement superélastique de l'AMF, et permettent ainsi d'atténuer les vibrations. La modernisation du clocher de l'église de San Giorgio a été l'un des premiers projets avec utilisation des AMF en génie civil (Motavalli et al., 2008). La figure (3.7) montre brièvement la coupe verticale du clocher, sur elle le système anti-sismique qui a été conçu avec des barres / actionneurs en AMF, système anti-sismique en AMF utilisé dans le clocher (figure 3.7..a) et l'actionneur en AMF (figure 3.7.b) (Bongiovanni et al., 2000).

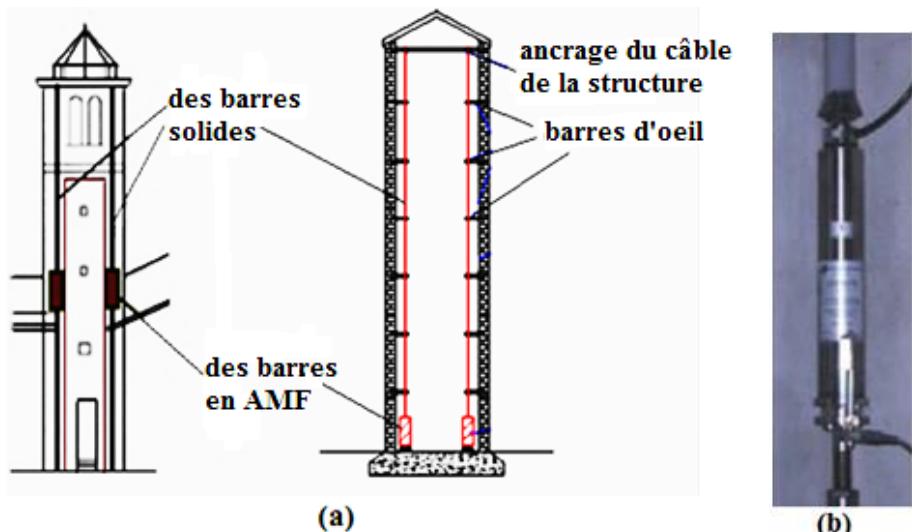


Figure 3.7 : La modernisation en AMF.

La solution décrite dans cette figure est un excellent exemple d'application des matériaux AMF en Nickel-Titane (qui coûte encore très cher) pour la protection du patrimoine culturel dans le domaine du risque sismique. L'utilisation de ce dispositif à base d'AMF dans les constructions permet la modernisation sans toucher les structures ou les façades extérieures dans les anciens bâtiments. Cela veut dire que, principe peut être utilisé par exemple dans les constructions anti-sismiques. En outre, la structure contenant des AMF permet d'amortir les vibrations dues à un tremblement de terre et évite ainsi la détérioration du bâti.

3.2.5. *La Basilique de San Francesco, Italie*

La basilique Saint François se situe à Assise en Italie. Ce monument historique est l'un des plus anciennes des trois structures dans lesquelles ont été appliqués les AMF, pour la première fois dans le monde. C'est un autre excellent exemple de mise en œuvre de nouvelles technologies dans le génie civil par le renforcement, grâce à l'utilisation

d'actionneurs passifs en AMF. Dans l'objectif est de limiter les dommages lors d'un futur séisme. Au cours des travaux de réparation, le pignon a été complètement déconnecté de la toiture et ensuite a été relié au moyen d'actionneurs en AMF. Chacun d'eux a été conçu pour supporter des forces de traction et de compression. Le fonctionnement des actionneurs utilisés est caractérisé par les propriétés suivantes (Dolce et al., 2000) :

- a) Lors de charges horizontales telles et lors de petits séisme, les actionneurs ont un comportement quasi-linéaire et élastique.
- b) Lors d'un séisme d'intensité moyenne, les contraintes critiques dans les AMF sont dépassées et les fils perdent leur rigidité. Ceci permet un déplacement plus grand.
- c) Ensuite, quand la force de vibration sismique est très grande, l'amortisseur permet l'isolement du tympan de la structure principale.



Figure 3.8 : Basilique Saint François à Assise en Italie, modernisation du tympan endommagé par l'introduction de trois groupes d'actionneurs en AMF (Pamparin, 2006).

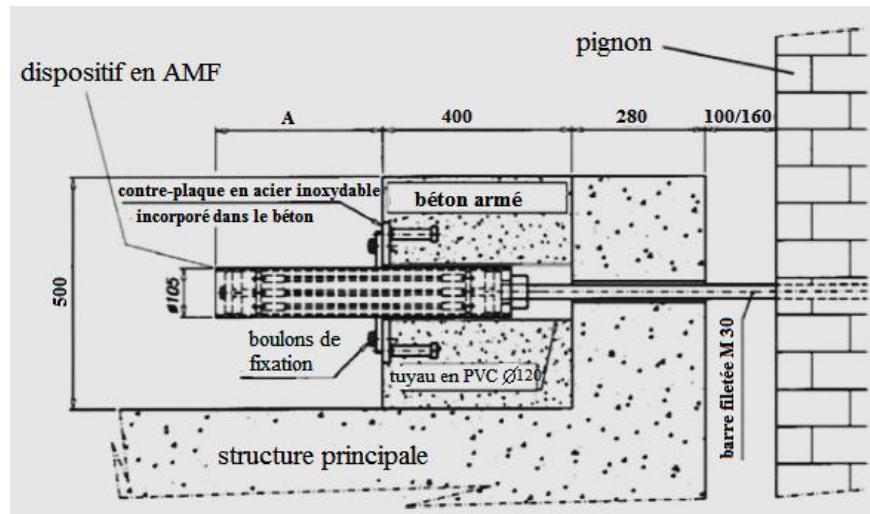


Figure 3.9 : Coupe de dispositif à base AMF utilisé pour le séisme : connexion adaptée du pignon historique et la structure principale de la basilique San Francesco à Assise, Italie (Dolce et Cardone, 2001).

Deux années de travaux de renforcement sont nécessaires pour la rendre accessible au public. Après, les observateurs ont précisé que les travaux de réhabilitation de la basilique qui sont entamés après le séisme étaient remarquables.

3.3. Intégration des AMF dans les bâtiments modernes

Les recherches pour améliorer le comportement dynamique des bâtiments se poursuivent, et les AMF présentent toujours une solution viable et efficace à ce problème. Comme exemple le comportement mécanique des structures en béton est gouverné par le processus d'endommagement du matériau. Cet endommagement consiste en des micro- et macro-fissures, qui progressent dans le matériau sous chargement mécanique. Ce processus peut être retardé en appliquant un des dispositifs d'AMF de telle façon à donner un chargement de compression, dans le but de contrer les contraintes locales de traction auxquelles le béton est peu résistant.

Dans le domaine du génie civil, certaines études récentes visent à utiliser les propriétés des AMF pour créer des structures actives, capables d'ajuster leurs comportements aux conditions de chargement (Janke et al., 2005). D'une part via le développement et la validation de modèles numériques, et d'autre part à l'aide d'essais expérimentaux sur des structures à échelle réduite. Quelques applications dans le domaine du génie civil sont rappelées dans cette section.

3.3.1. Contrôle sismique d'une structure complexe

Lafortune a effectué une simulation numérique d'une structure située dans la région de Barcelone « Espagne ». Cette structure est soumise à une excitation sismique, pour étudier sa réponse complète et comparer l'efficacité des contreventements qui sont des amortisseurs d'AMF (à base de quelques études qui ont déjà démontré l'efficacité des contreventements d'AMF à réduire les vibrations sismiques d'une structure) et d'acier installés dans un cadre d'acier (Lafortune, 2006). Le but de ce travail était de clarifier certains aspects des AMF relativement à leur utilisation en contrôle sismique des structures.

À l'aide de modèle numérique et d'expérimentation, les résultats et les conclusions tirées sont les suivants :

- L'énergie dissipée par les AMF lorsqu'ils se déforment apporte une réduction des oscillations harmoniques de la structure sur laquelle ils sont installés.
- Une démonstration fiable confirme que les AMF sont plus efficaces pour contrôler la réponse sismique du portique.
- Une deuxième démonstration montre que la dissipation d'énergie des AMF peut avoir un impact bénéfique sur la réduction des déplacements.
- Comparant des structures équipées de contreventements équivalents d'AMF et d'acier (même force d'écoulement et même rigidité), il est démontré que les contreventements d'AMF sont efficaces pour réduire les vibrations sismiques d'une structure.

Outre les aspects qui ont été étudiés dans ce travail, le comportement des AMF à long terme est sans contredit une facette qu'il faudra étudier dans les années à venir.

3.3.2. Un réservoir de vidange

Dans un article de Parulekar et al. (Parulekar et al., 2010), qui ont fait une étude analytique d'une structure de réservoir de vidange intégré dans une structure en acier encadrée de six étages avec et sans amortisseurs d'AMF soumis à un séisme.

Il est nécessaire de contrôler la réponse sismique de cette structure d'acier avec des amortisseurs d'AMF. Ces dispositifs à base de Nickel-Titane sont utilisés comme absorbeur d'énergie passive et ils sont très attrayants pour le contrôle de vibration passive car ils ont une propriété de pseudo-élastique et ils peuvent soutenir une grande quantité (jusqu'à 10% de déformation) de déformation inélastique. L'efficacité de ces amortisseurs doit être prouvée par des tests de table vibrante.

Ces chercheurs ont trouvé que l'amortisseur d'AMF donne une réduction de 30% de la réponse sismique de la structure plus une diminution supplémentaire de 7% lorsque l'effet de la contrainte résiduelle est considéré dans l'amortisseur d'AMF.

3.3.3. Structures de longue portée

Des recherches pratiques ont montré que les techniques d'isolation de base sont efficaces pour réduire les réponses sismiques des structures (Jia et Shi, 2010) ; (Panayiotis et al., 2010). Au cours des deux dernières décennies, certaines études expérimentales ont été réalisées pour examiner l'efficacité des AMF dans les isolateurs sismique.

Dolce et d'autre chercheurs d'ingénierie (Dolce et al., 2000) ont décrit deux familles de dispositifs basés sur les AMF pour le contrôle sismique passif spécial pour les structures encadrées et des dispositifs d'isolation pour les bâtiments et les ponts, et exécutées quelques tests expérimentaux pour vérifier leur performance.

Dans un article d'autres chercheurs et développeurs de cette innovation dans les nouveaux structures (Ding et al., 2011), un nouveau dispositif d'isolement composé de barres d'AMF a été développé à faire pleinement d'usage de leur superélasticité. En outre, une méthode de conception simplifiée pour les structures de longue portée installées avec isolateurs en AMF a été proposée.

La figure (3.10) montre l'isolement bas qui est un "découplage" de la structure à partir de la source de vibration. Il a été réalisé en insérant un dispositif mécanique flexible à base d'AMF, généralement situé entre la structure et sa fondation.

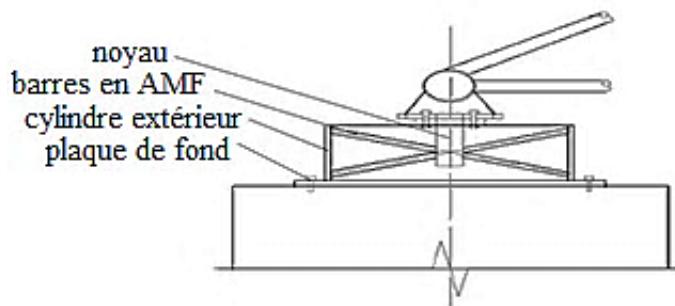


Figure 3.10 : Configuration de superélastique isolateur en AMF.

Les résultats de cette étude avancée montrent que les réponses sismiques de la structure étudiée peuvent être efficacement réduites en utilisant des isolateurs en AMF et le déplacement maximal de ces isolateurs est inférieur à la valeur admissible, ce qui est important dans des applications d'ingénierie.

3.3.4. Poutres en béton

Dans une thèse de doctorat de Hanh (Hanh, 2012) est mentionné que depuis quelques années, plusieurs études expérimentales ont visé à utiliser les AMF comme renforts externes ou internes de composants des éléments structuraux en béton. L'étude expérimentale réalisée consiste d'utiliser des fils en Nickel-Titane comme renforts extérieurs pour créer des états de précontrainte dans des poutres en béton.



Figure 3.11 : Vue d'une poutre en béton équipée de quatre fils en AMF.

Les résultats obtenus de cette étude durant un test cyclique prouvent que l'utilisation des AMF peut changer la rigidité et la résistance des poutres en béton. De plus, ils confirment que de la précontrainte peut être créée dans des poutres par effet mémoire. Ces résultats confirment aussi que l'association béton/AMF dans des applications sur des éléments porteurs ne modifie pas le comportement propre du fil droit en AMF.

3.3.5. Confinement actif de cylindres en béton

Dans la même thèse de doctorat de Hanh (Hanh, 2012) qui a fait une autre étude expérimentale basée sur les propriétés exceptionnelles des AMF. Donc diverses solutions ont été proposées pour la création d'un renforcement passif ou actif, extérieur ou intérieur, d'un composant en béton par l'utilisation des AMF comme matériau de renfort.

Cette étude préliminaire a permis de mettre en évidence le processus de création d'une contrainte de confinement sur le cylindre en béton. Le travail effectué dans le cadre de la thèse présente l'aspect d'étudier l'influence du confinement créé à l'aide du fil d'AMF sur le comportement du cylindre en béton sollicité en compression uniaxiale jusqu'à la rupture.

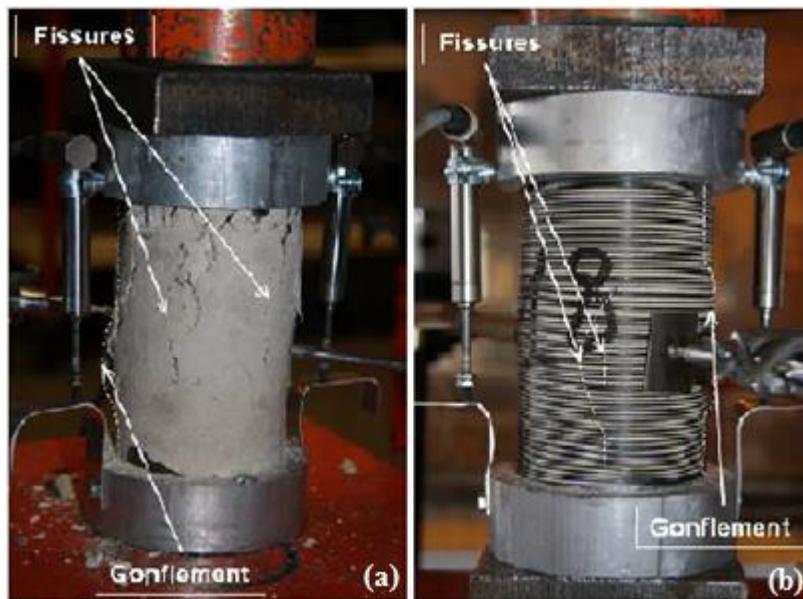


Figure 3.12 : Exemple d'endommagement du béton après les tests d'écrasement :
a) Béton non confiné. b) Béton confiné.

Les principaux résultats obtenus ont montré que :

- Le confinement à l'aide de fils d'AMF permet d'améliorer le comportement des éléments en béton de manière très significative.
- Le confinement actif est plus efficace que le confinement passif. En plus, le confinement actif peut augmenter la résistance et la ductilité du béton.

3.4. Limitation des problèmes de ponts par l'application des AMF

La construction des ponts considérés comme un défi pour les bâtisseurs, en raison de l'importance qu'ils fournissent dans la vie quotidienne. Mais ils rencontrent toujours plusieurs problèmes en termes de résistance et leurs durée de vie, en particulier ceux construits en béton armé parce qu'ils sont gouvernés par le processus d'endommagement du matériau. Ce qui peut être compensé par les AMF grâce à leurs propriétés exceptionnelles. Cette section porte sur l'utilisation d'AMF dans les composantes du béton et confirment une possibilité du champ d'application de ces matériaux intelligents dans la thématique du renforcement préventif des ponts en béton.

3.4.1. Réparation des zones fissurées dans des ponts routiers

Dans un article de Motavalli (Motavalli et al., 2009) qui donne une 1ère application des AMF pour la création de précontraintes dans des structures en béton a été faite pour la réparation de fissures locales dans un pont du Michigan aux Etats-Unis en 2001.

Des fissures ont été trouvées dans des poutres en T en béton causées par une résistance du béton au cisaillement insuffisant. Des ingénieurs ont proposé un système de barres d'AMF qui sont pré-déformées à l'état martensitique avant d'être utilisées. Ces barres sont disposées perpendiculairement aux fissures, sur les deux faces opposées des poutres endommagées. Par l'effet de mémoire de ces AMF qui a créé des forces internes et grâce à ces forces obtenues, les fissures ont réduit leurs ouvertures de 40%.

De même, dans un autre article de Sharabash et Andrawes (Sharabash et Andrawes, 2009) qui montre un exemple sur la protection parasismique dans le cas du pont à haubans, des connexions entre les pieds et les pylônes contenant des AMF permettent d'amortir les vibrations dues à un tremblement de terre et évitent ainsi la détérioration de la structure.

3.4.2. Éléments d'amortissement pour les ponts

La superélasticité que présentent les AMF peut être utilisée comme éléments d'amortissement pour les ponts. Li et autres chercheurs dans le domaine de génie civil (Li et al., 2004) ont étudié théoriquement l'atténuation des vibrations d'un système de câble en AMF comme amortisseur combiné qui peut être utilisé sur un pont à haubans. Ils ont déclaré que l'amortisseur superélastique d'AMF proposé peut supprimer les vibrations du câble.

Autre article présenté par Desroches et Delémont (Desroches et Delémont, 2002) ont rapporté leurs tests sur une barre d'AMF superélastique à grande échelle utilisée pour la réhabilitation sismique des ponts simplement soutenu avec les AMF. Les résultats ont montré que le dispositif d'AMF de retenue est plus efficacement réduit par rapport au déplacement de la charnière de la butée et il a fourni une grande déformation élastique par rapport aux câbles d'acier classiques. En outre, les AMF limitent extrêmement la réponse des tabliers de pont à champ de mouvement proche du sol.

3.4.3. Développement de résistance des ponts aux séismes

La publication d'analyse expérimentale de Torra et al. (Torra et al., 2013), résume que AMF sont de bons candidats pour amortisseurs semi-conducteurs appropriés pour les oscillations du pont haubans, en raison de leur grande déformation récupérable et la fatigue de vie raisonnable. Ce travail analyse expérimentalement les propriétés pertinentes des AMF de Nickel-Titane et effectue des mesures de l'installation, analyses fréquences et simulations des effets de ces AMF sur les haubans. Une solution complète d'amortissement pour le pont haubans a été développée à partir de ces analyses expérimentales. Ce journal détaille aussi les propriétés requises pour les AMF et analyse leur performance. Les résultats simulés étaient tout à fait cohérents avec ces expériences, les amortisseurs d'AMF ont également réduit considérablement l'amplitude d'oscillation maximum induite par l'action simulée.

Et sur un document d'Amarante (Amarante et al., 2012) qui présente un prototype physique qui simule la réponse dynamique du système équipé d'un dispositif en AMF pour contrôler des vibrations semi-active nouvelle de pont. Ce dispositif vise à prévenir les ponts tout simplement pris en charge, au cours d'une excitation sismique.

Une description détaillée des parties du prototype donne un aperçu étendu dans l'approche développée pour répondre aux exigences des ponts.

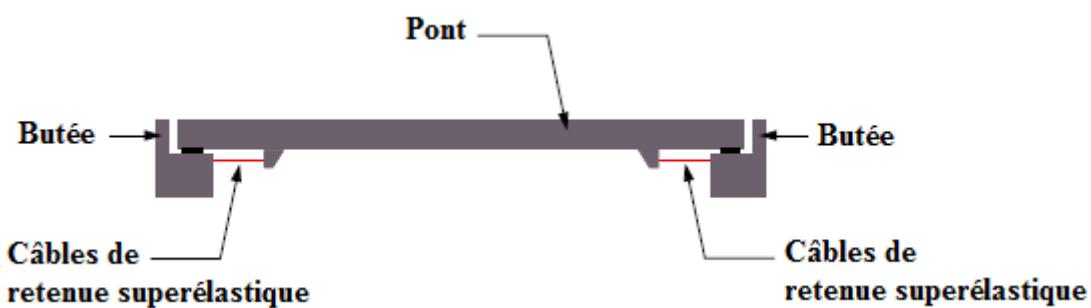


Figure 3.13 : Pont simple soutenu avec un système de retenue superélastique.

3.5. Conclusion

En conclusion de cette partie bibliographique, on confirme que les AMF ont montré un grand potentiel qui a été déclaré à travers de nombreuses applications et des exemples de recherches. De plus du fait de leurs propriétés exceptionnelles, l'efficacité et la faisabilité, les AMF ont trouvé des applications affirmatives dans l'ingénierie ou dans d'autres domaines.

Dans le domaine du génie civil, quelques études ont visé à utiliser les AMF comme renforts externes ou internes de composants en béton ou pour créer des structures actives, capables d'ajuster leur comportement aux conditions de chargement. À ce jour, seules quelques études préliminaires permettent d'entrevoir l'intérêt d'exploiter les propriétés exceptionnelles de ces alliages.

À travers ce chapitre, qui présente une revue des propriétés de base des AMF et leurs applications dans les différentes structures (structures historiques, bâtis et ponts), un modèle d'un minaret sera choisi afin d'analyser des résultats expérimentaux (modèle d'un minaret pour l'application d'AMF) dans le cadre de ce mémoire. Donc une adaptation de ce modèle sera faite dans la partie qui suit de ce document.

Chapitre 4 :

Identification des Caractéristiques

Dynamiques du Minaret d'Ajloun

4.1. Introduction

Plusieurs techniques sont utilisées pour l'identification des caractéristiques dynamiques des structures. Parmi ces techniques les tests de vibration ambiante, qui permet de capturer les vibrations naturelles.

La Jordanie est riche en monuments historiques. Ces monuments ont une valeur touristique, économique et surtout historique. Le minaret de la grande mosquée d'Ajloun est choisi pour cette étude. L'identification de ses caractéristiques dynamiques a été obtenue par des tests de vibration ambiante réalisés par Hamdaoui (Hamdaoui, 2006). Ces tests consistaient à enregistrer des accélérations à des endroits stratégiques du minaret par l'intermédiaire des accéléromètres sensibles.

Pour notre contribution, un modèle éléments finis est construit et calibré selon les paramètres modaux obtenus expérimentalement.

4.2. Identification des caractéristiques dynamiques du minaret

4.2.1. *Les tests de vibration ambiante*

Plusieurs techniques d'excitation artificielle ont été utilisées, tels que les tests de vibration forcée, les vibrations libre ou même ambiante. Les excitations artificielles sont pratiquement impossibles dans le domaine de génie civil, car les structures sont lourdes et volumineuses (bâtiment, pont).

Une nouvelle technologie de chargement dynamique est utilisée, il s'agit des vibrations ambiantes. Ces vibrations sont en fonction des charges du trafic pour les ponts, des charges de houle pour les structures offshores, et en fonction du vent ou même du bruit environnant pour les bâtiments (Hamdaoui, 2006). Les essais de vibration ambiante visent à capturer les vibrations à peine ressentis par le sens humain. Cette technique permet d'identifier les caractéristiques dynamiques des structures en utilisant les vibrations naturelles seulement « output only » (Wenzel et Pichler, 2005).

4.2.2. Le système de technique globale

Afin de capturer les vibrations ambiantes, la technique basée sur les signaux de vibration (dite aussi technique globale) est utilisée. Cette technique s'appuie sur la théorie, disant chaque structure à son comportement dynamique propre (signature vibratoire) (Zonta, 2000), et chaque dommage subit par la structure diminue sa capacité portante, et par conséquent, des changements dans les propriétés physiques (masse raideur ou amortissement), ce qui influe sur le comportement global de la structure.

Le système de technique globale, est un ensemble de capteurs (accéléromètres, capteurs de déplacement, capteurs de température, des jauge de contraintes...), repartis sur des endroits stratégiques de la structure. Les accéléromètres sont communiqués à un système d'acquisition des données qui est relié à une unité centrale de traitement (figure 4.1). Cette méthode est très avantageuse pour l'ingénieur de génie civil, car elle permet d'obtenir des informations réelles sur l'état de la structure, par des simples mesures limitées à des endroits spécifiques, sans avoir aucune information préalable sur la structure. En plus le temps et le coût d'identification de la structure sera réduit.

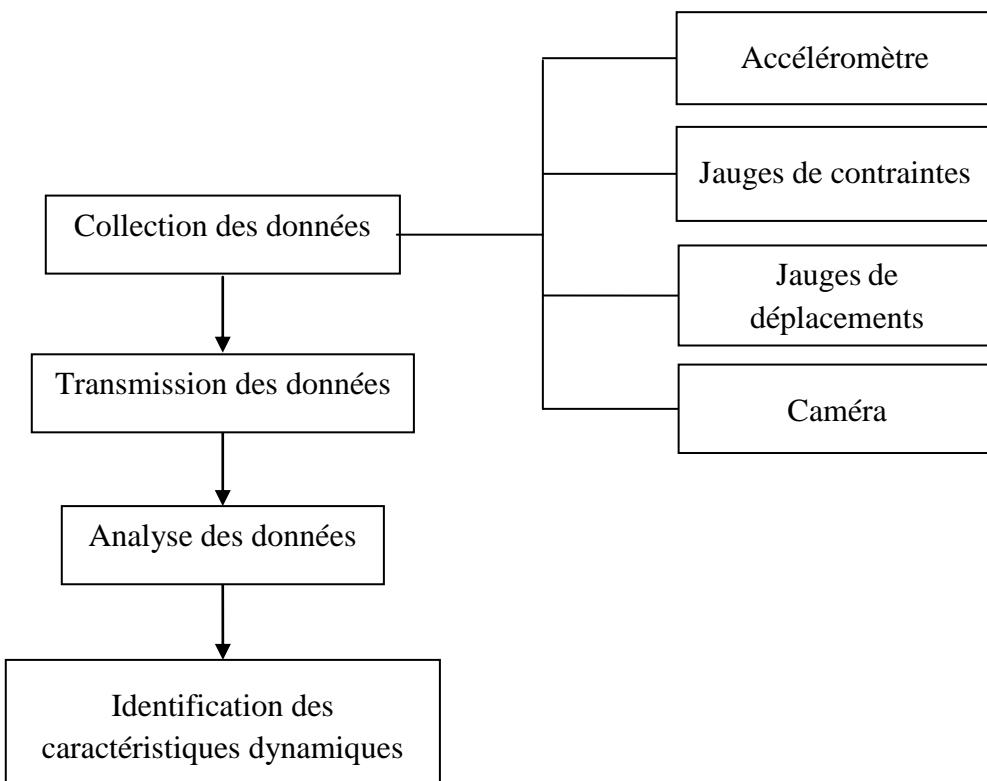


Figure 4.1 : Diagramme du processus de la technique globale.

4.2.3. Méthodologie

Après l'évaluation pathologique de la structure et la détermination des caractéristiques des matériaux de construction ainsi que les dimensions de l'édifice. À l'aide des capteurs sensibles appelés accéléromètres, des accélérations sont captées suite à des essais de vibration ambiante. La modélisation de la structure en éléments finis est développée, en utilisant les caractéristiques des matériaux de construction, ainsi que les caractéristiques dynamiques de la structure, extraites en appliquant la technique d'identification modale dite « output only ».

4.3. Description de cas d'étude

4.3.1. Historique

La grande mosquée d'Ajloun, construite en 1247 à l'époque Ayoubi et Mamlouki par le Sultan « Najm Aldine Ayou » est l'une des plus anciennes mosquées en Jordanie. Cette mosquée est caractérisée par son minaret qui se situe près de la porte nord, à l'angle nord-est de la salle de prières. La partie originale de minaret de cette mosquée, a été construite par le Sultan « Addaheir Beber » 16 ans après la construction de la mosquée (1263). Le minaret avait une partie supérieure « casquette » (la « Mabkhara ») au sommet de son pièce d'origine, mais il a été démolie pour introduire la nouvelle extension orthogonale, qui a été construite il y a soixante ans seulement (Ghawamna, 1986).



Figure 4.2 : Vue générale de la ville d'Ajloun avec la situation de la mosquée.

4.3.2. Caractéristiques géométriques

Le minaret est composé de deux parties, une originale réalisée par des pierres volumineuses, et une nouvelle extension faite de même matériau que la mosquée. Le minaret a une hauteur maximale de (45,90m), dont la partie inférieure est attachée jusqu'à une hauteur de 6,00m à la mosquée. La section transversale est un carré de 4,50m de côté dans la partie originale, et elle prendra la forme orthogonale dans la nouvelle extension (figure 4.3 et 4.4). De l'intérieur, une colonne verticale de forme cylindrique avec un diamètre constant de 1,60m est étendu du niveau (+6,00m) jusqu'à la fin de la partie originale (+21,00m). Cette colonne continue à s'étendre mais avec un diamètre différent de 1,40m jusqu'au balcon supérieur dans l'extension, du niveau (21,00m) à (32,45m), Puis avec un diamètre de 1,30m à partir du niveau (32,45m) jusqu'au (39,90m) (Ghawamna, 1986).

Un escalier hélicoïdal en pierre commence du niveau (+6,00m). Il repose sur une colonne de pierre de 25 cm de diamètre situé au centre du minaret. Puis un escalier similaire est ajouté pour monter à la nouvelle extension, et il se termine dans un balcon qui est supporté par cinq poutres en pierres de chaque côté, en plus d'une poutre à chaque coin.

Le minaret a un petit accès de forme rectangulaire de 1,35*0,72 situé dans le côté ouest, en plus de trois fenêtres de chaque côté. Les dimensions des fenêtres sont larges à l'extérieur et étroites à l'intérieur, pour permettre la surveillance et un bon éclairage en même temps. La troisième fenêtre est grande et voutée, elle se situe à la fin de minaret.

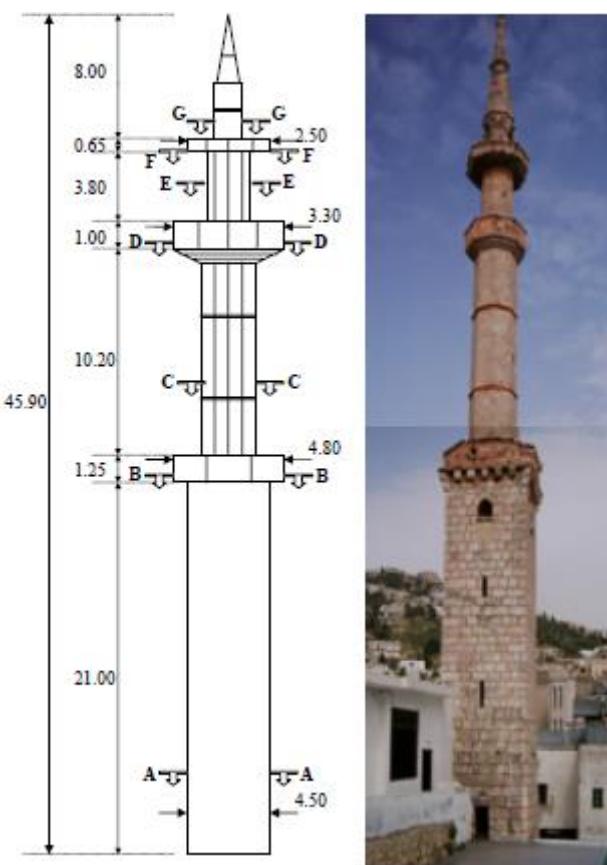


Figure 4.3 : Le minaret d'Ajloun (Hamdaoui et al., 2007).

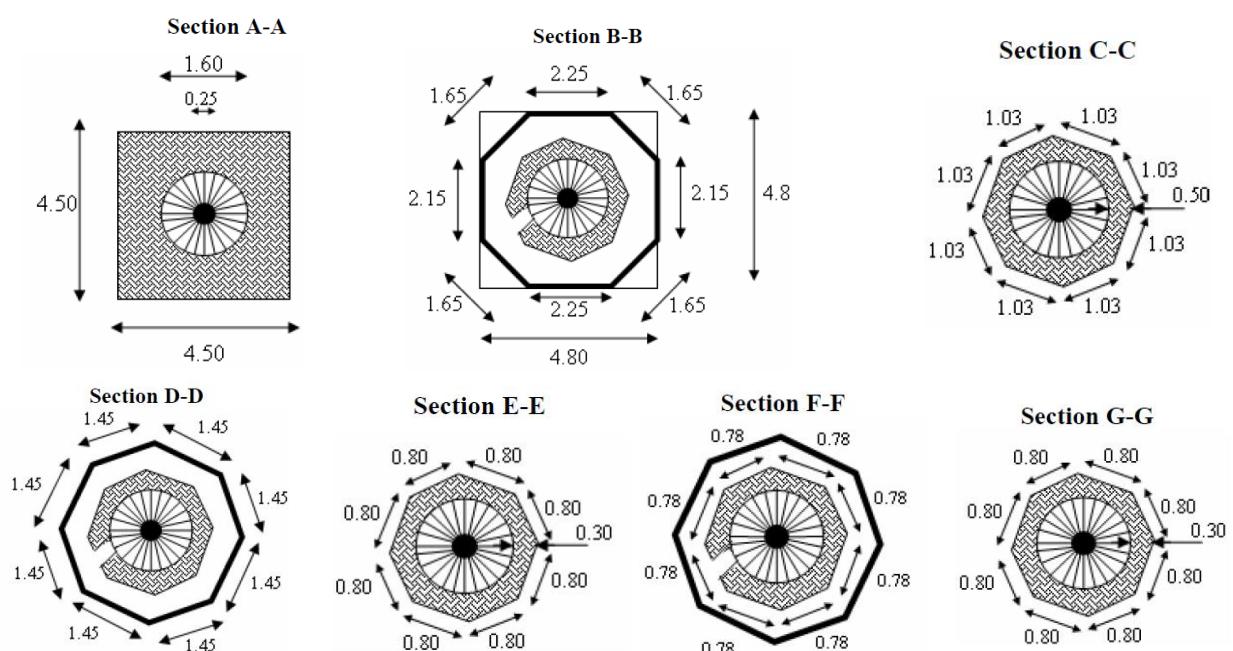


Figure 4.4 : Différentes coupes transversales du minaret (Hamdaoui et al., 2007).

4.3.3. Caractéristiques mécaniques

Les propriétés des matériaux de construction du minaret ont été déterminées expérimentalement par Hamdaoui (Hamdaoui, 2006). Vu la valeur historique de ce monument l'échantillonnage est une tâche très difficile, en plus il est permis que dans les endroits qui ne touchent pas le comportement structurel du minaret. Comme il est mentionné précédemment le minaret est construit par deux matériaux différents, le premier correspond à l'ancienne partie et le deuxième à la nouvelle extension.

Les échantillons utilisés dans la détermination des caractéristiques mécaniques de minaret sont pris de débris des pierres trouvés près des fenêtres (figure 4.5). Ces échantillons ont été soumis à des tests de compression pour déterminer leur résistance à la compression ainsi que leurs modules d'élasticité (figure 4.6). Les résultats trouvés sont résumés dans le tableau (4.1).



Figure 4.5 : Pierres utilisées pour l'extraction des échantillons (Hamdaoui, 2006).



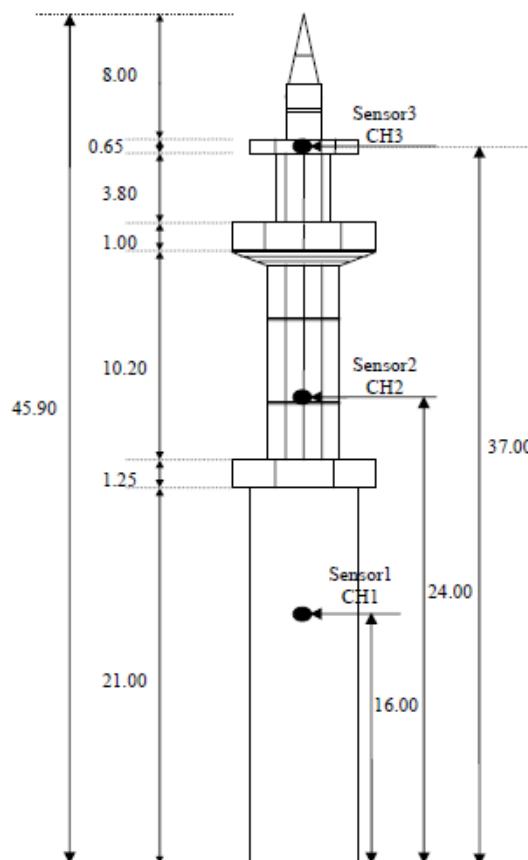
Figure 4.6 : Les échantillons pris de l'ancienne et la nouvelle extension (Hamdaoui, 2006).

Tableau 4.1 : Propriétés mécaniques des pierres.

Propriétés	Ancien matériau	Nouveaux matériau
Module d'élasticité (MPa)	2100	1700
Poids volumique (KN/m³)	26,6	22,3
Résistance à la compression (MPa)	19	17
Coefficient de Poisson	0,2	0,2

4.3.4. Caractéristiques dynamiques

Le minaret d'Ajloun a été soumis à des tests de vibration ambiante, afin de capturer les vibrations naturelles. Trois accéléromètres ont été placés dans des endroits bien choisis, en fonction des modes propres extraits d'un modèle éléments finis préliminaire, calibré selon les caractéristiques des matériaux de construction (figure 4.7).

**Figure 4.7 :** Positionnement des capteurs (Hamdaoui, 2006).

Des mesures uni-axiales ont été appliquées (sens ‘x’) vu la symétrie du minaret, donc les fréquences dans le sens x et y sont forcément les même. Les fréquences mesurées sont rapportées dans le tableau (4.2).

Tableau 4.2 : Fréquences mesuré expérimentalement à partir des trois accéléromètres.

accéléromètre	1 ^{er} et 2 ^{ème} modes	3 ^{ème} et 4 ^{ème} modes	5 ^{ème} et 6 ^{ème} modes	7 ^{ème} mode	8 ^{ème} et 9 ^{ème} modes
1	1,283	3,369	6,585	9,289	10,968
2	1,285	3,354	6,558	Non détecté	10,783
3	1,287	3,356	6,538	9,414	10,861

4.4. Etude modale du minaret

Pour mieux comprendre le comportement dynamique du minaret. Un modèle tridimensionnel en éléments finis est mis en évidence, à l'aide du logiciel Ansys version 11.0 (figure 4.8). Le modèle est construit selon les caractéristiques mécaniques des matériaux de construction déterminées expérimentalement. Le modèle géométrique en 3-D a été exposé en §4.3 avec une hauteur de 45,90 m et des sections transversales variables en fonction de la hauteur du minaret.

4.4.1. Hypothèses

- Le comportement des matériaux de construction du minaret est linéaire, élastique et isotrope.
- Le minaret est encastré à la base.
- Le modèle numérique est en 3-D, les éléments utilisés sont de type « SOLID 45 ». C'est un élément parallélépipédique à 8 nœuds.
- Seulement les ouvertures symétriques sont prises en considération, car les essais expérimentaux sont dans un seul sens.
- Le poids du minaret est pris en considération.
- L'effet des escaliers est négligé. Ces derniers ont été modélisés dans un premier temps mais les résultats obtenus ne sont pas très différents avec le cas sans escaliers. Donc, leur élimination réduira le temps de calcul.

4.4.2. Étapes de modélisation

La modélisation est faite selon les étapes suivantes :

- Définir les caractéristiques des matériaux, ainsi que le type d'éléments utilisés « solide 45 ».
- Créer la géométrie avec tous les détails tels que les ouvertures et les balcons.
- Introduction des conditions aux limites, qui correspondent à un encastrement à la base dans notre cas.
- L'affectation des matériaux à chaque partie du minaret, ensuite en introduit l'accélération de pesanteur « G », et pour assurer la continuité du maillage on procède à l'assemblage des différentes parties.
- Passage en modèle en éléments finis en maillant le minaret modélisé.
- Faire une analyse modale afin de trouver les fréquences propres.

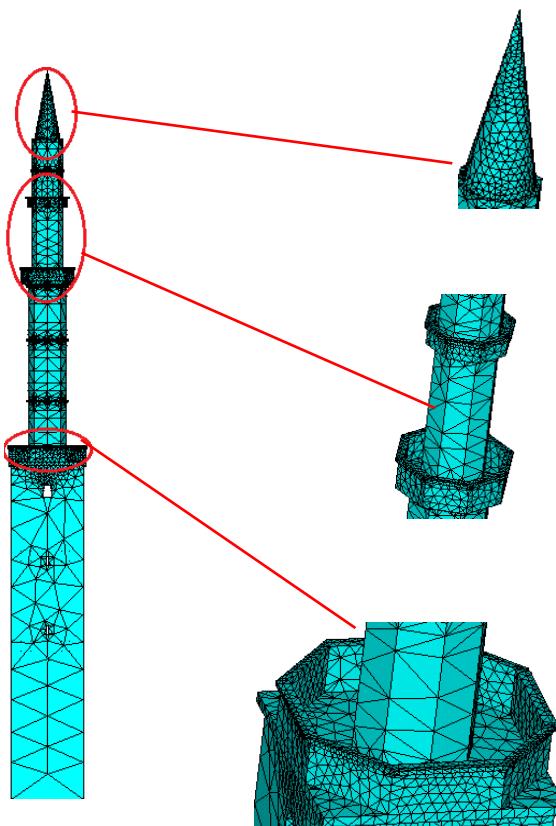
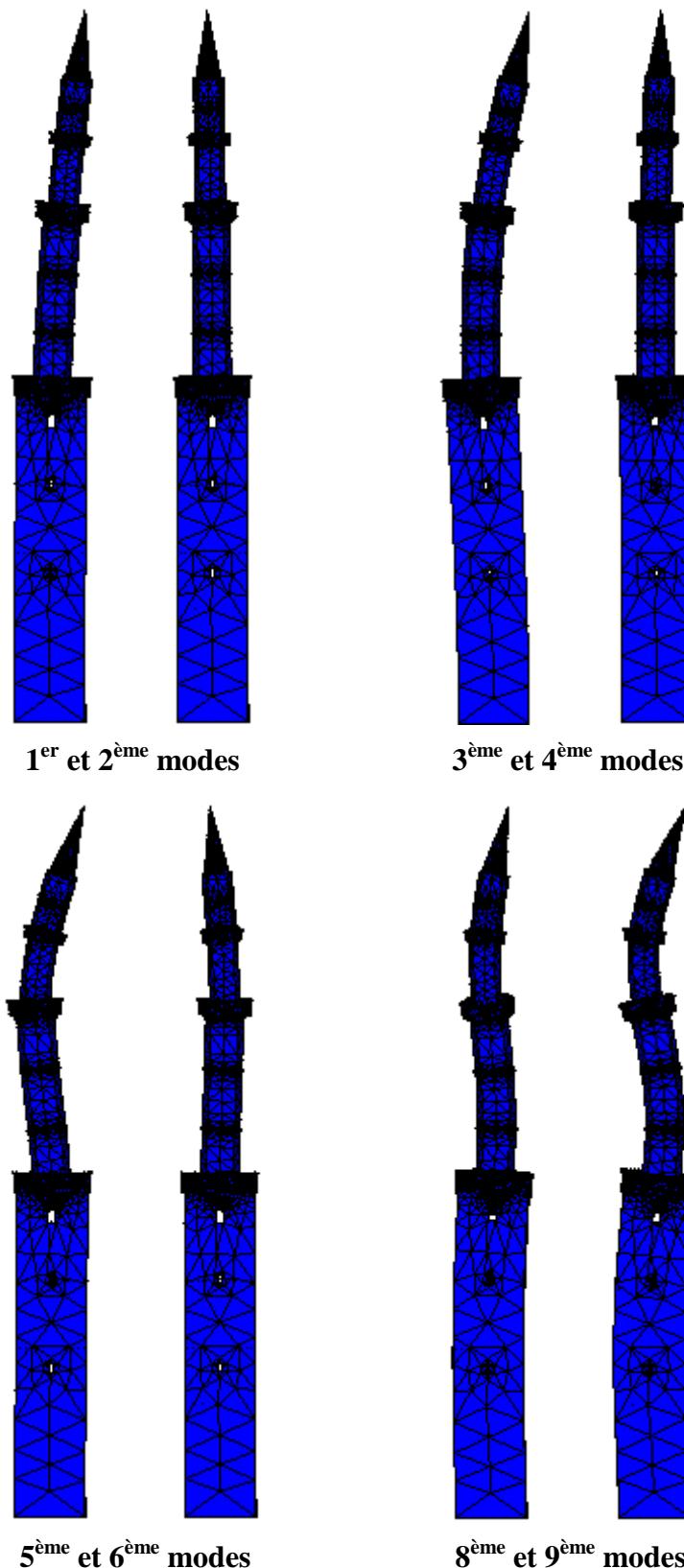


Figure 4.8 : Le modèle de minaret en 3-D.

En prenant en considération douze modes de vibration, dans un intervalle de fréquence [0,25] Hz. Les résultats trouvés sont illustrés en figure (4.9) :



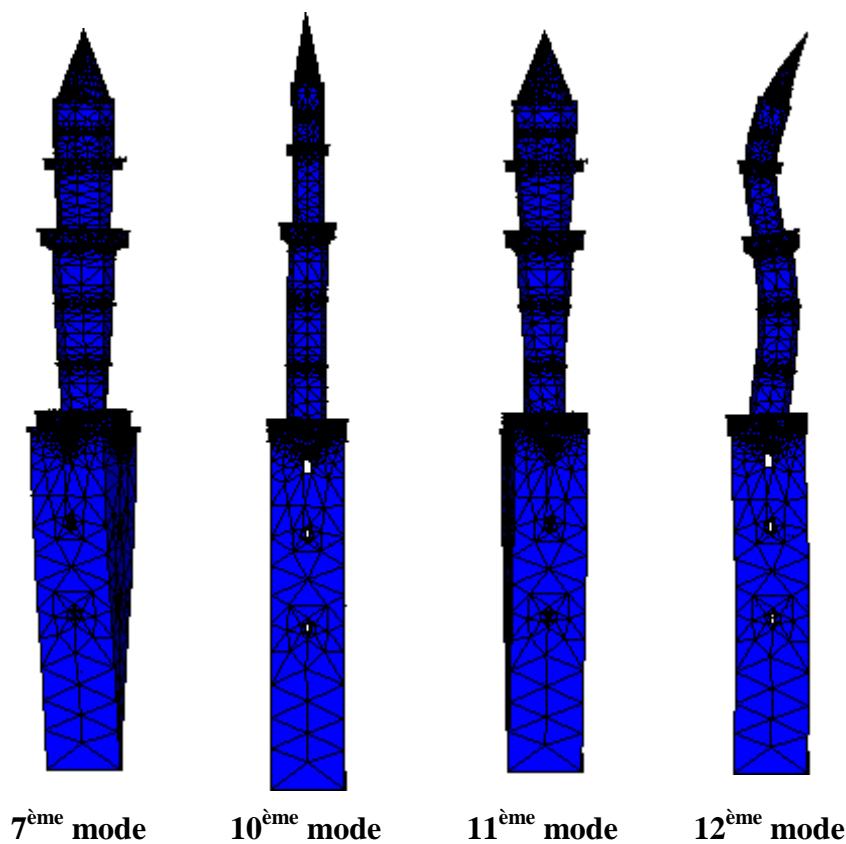


Figure 4.9 : La forme des douze premiers modes.

Tableau 4.3 : Les périodes et les fréquences des douze premiers modes.

Modes	Fréquence Hz	Période (secondes)	Direction de mode
1^{er} mode	1,286	0,777	x
2^{ème} mode	1,290	0,775	y
3^{ème} mode	3,212	0,311	x
4^{ème} mode	3,222	0,310	y
5^{ème} mode	7,181	0,139	x
6^{ème} mode	7,201	0,138	y
7^{ème} mode	14,033	0,071	torsion
8^{ème} mode	15,365	0,065	y
9^{ème} mode	15,398	0,064	x
10^{ème} mode	16,533	0,06	z
11^{ème} mode	18,309	0,054	torsion
12^{ème} mode	20,451	0,048	x

4.5. Comparaison et interprétation des résultats

Une comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus numériquement est faite (tableau 4.4). D'après cette comparaison on peut juger que le modèle est relativement représentatif, car le taux d'erreur est faible surtout pour les quatre premiers modes où la contribution des modes est majeure pour les structures cylindriques élancées.

Tableau 4.4 : Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux.

Modes	Fréquences (HZ)		Erreur (%)
	Mesuré	M.E.F	
1^{er} et 2^{ème} mode	1,285	1,286	0,078
3^{ème} et 4^{ème} mode	3,360	3,212	-4,41
5^{ème} et 6^{ème} mode	6,560	7,181	9,47
7^{ème} modes	9,352	14,033	50,05
8^{ème} et 9^{ème} mode	10,871	15,366	41,35

4.6. Conclusion

Afin de déterminer les caractéristiques dynamiques du minaret, un modèle tridimensionnel en éléments finis est construit dans le but de représenter correctement la structure. Les fréquences ont été comparées aux résultats expérimentaux. Le modèle est jugé représentatif du cas réel, ce qui nous permettra de le soumettre à un cas réel de séisme et voir son comportement dynamique. Ensuite, on va essayer d'améliorer ce comportement en utilisant les AMF. Ceci fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 5 :

Renforcement du Minaret par les

Alliages à Mémoire de Forme

5.1. Introduction

Plusieurs méthodes sont utilisées afin de renforcer et préserver les structures contre les évènements destructifs, tels que les murs voiles et les amortisseurs à masse accordée. Ces méthodes sont généralement utilisées pour les nouvelles structures et les structures à grandes hauteurs, mais lorsqu'il s'agit d'un monument historique l'opération de renforcement devient très difficile à cause de leur valeur architecturale et historique.

Dans ce travail, les alliages à mémoire de forme disponibles sous forme des fils hyper-élastiques, seront utilisées pour le renforcement du minaret, en profitant de leurs caractéristiques mécaniques, notamment leur mémoire de forme d'origine. Les fils en AMF seront fixés sur le minaret dans les endroits où les contraintes sont relativement importantes sans aucune modification sur la structure. Les résultats de calcul sans et avec AMF menés par logiciel Ansys version 11.0 seront présentés dans ce chapitre, tels que les déplacements, les accélérations et la distribution des contraintes.

5.2. Caractéristiques des matériaux utilisés pour le renforcement

5.2.1. Caractéristiques mécaniques des AMF

Afin de renforcer le minaret de la grande mosquée d'Ajloun, on va utiliser des fils en AMF à base de cuivre de 3.5mm de diamètre et de 1.2m de hauteur. En plus de leurs caractéristiques mécaniques mentionnées dans le tableau (5.2), les AMF sont caractérisés par six paramètres qui définissent leur loi de comportement (figure 5.1). Les six paramètres des AMF adoptés pour une température ambiante sont regroupés dans le tableau (5.1).

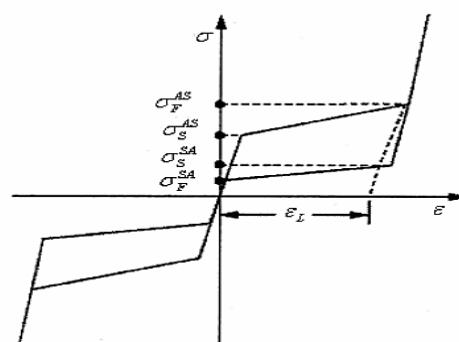


Figure 5.1 : Comportement super-élastique typique des AMF.

Tableau 5.1 : Propriétés caractéristiques des AMF.

σ_S^{AS} (MPa)	σ_F^{AS} (MPa)	σ_S^{SA} (MPa)	σ_F^{SA} (MPa)	ε_L (MPa)	α (MPa)
140	270	200	70	0,03	0,27

Avec :

SIG-SAS σ_S^{AS} : valeur initiale de contrainte de chargement.

SIG-FAS σ_F^{AS} : valeur finale de contrainte de chargement.

SIG-SSA σ_S^{SA} : valeur initiale de contrainte de déchargement.

SIG-FSA σ_F^{SA} : valeur finale de contrainte de déchargement.

EPSILON ε_L : déformation résiduelle maximale.

ALPHA α : paramètre de compatibilité des réponses matérielles en traction et en compression.

Tableau 5.2 : Caractéristiques mécaniques des AMF.

Module d'élasticité (MPa)	60000
Coefficient de poisson	0,3

5.2.2. Caractéristiques mécaniques du support des AMF

Afin de fixer les AMF sur le minaret, des ceintures de forme polygonale (même forme géométrique du minaret) ont été modélisées (figure 4.2). Ces éléments sont en acier (rigide) dont les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le tableau 4.3. Les ceintures ont été modélisées pour ne pas toucher, ni le comportement dynamique de minaret, ni celles des AMF.

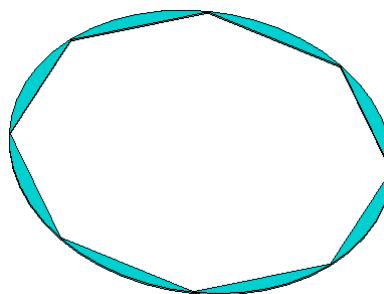


Figure 5.2 : Ceinture d'assemblage des AMF.

Tableau 5.3 : Caractéristiques mécaniques des ceintures d'assemblage.

Module d'élasticité (MPa)	210000
Coefficient de poisson	0,3

5.3. Modélisation numérique des AMF

La résolution de certains problèmes complexes nécessite l'utilisation des outils plus sophistiqués. La méthode des éléments finis vient de résoudre ces problèmes à travers des logiciels développés. Dans ce travail on a choisi le logiciel éléments finis Ansys version 11.0, car il permet la définition des AMF par l'introduction directe de leurs six paramètres caractéristiques (figure 5.3), ainsi que leur module d'élasticité et leur coefficient de poisson.

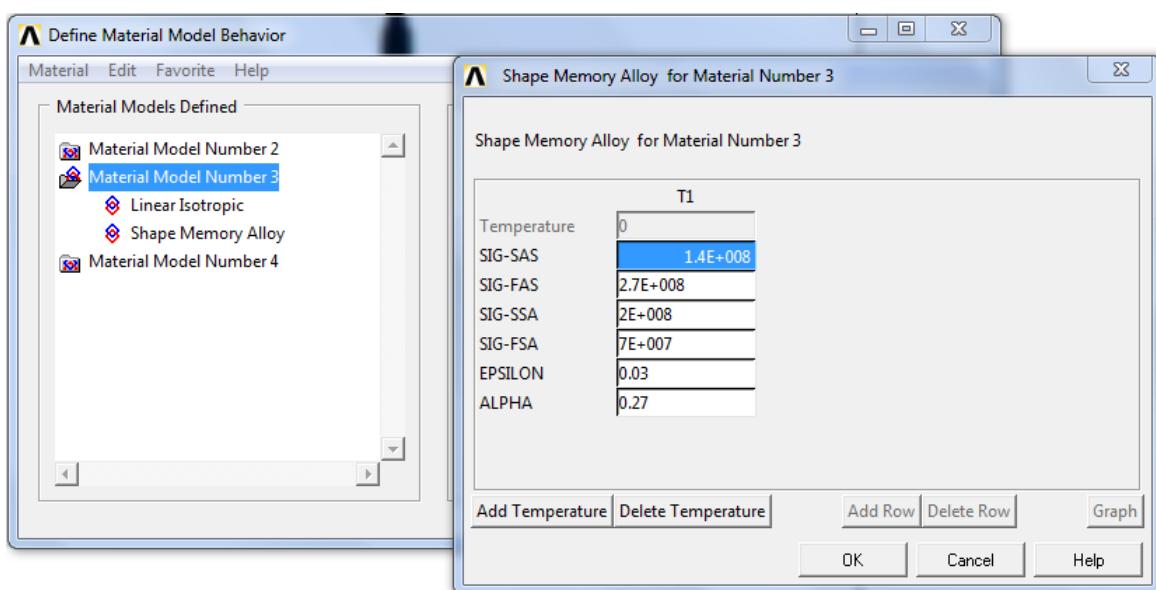


Figure 5.3 : Définition des AMF dans Ansys.

Les AMF peuvent être modélisés dans Ansys comme étant des éléments coques, planes ou même tridimensionnel. Les éléments référenciés adaptés à ce type de matériaux sont : (PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187, et SOLSH190). Dans notre cas les AMF sont modélisés en 3D avec un élément à 8-nœud SOLID 185 (figure 5.4). Ce dernier est adopté à la loi de comportement des AMF « Annex 2 ».

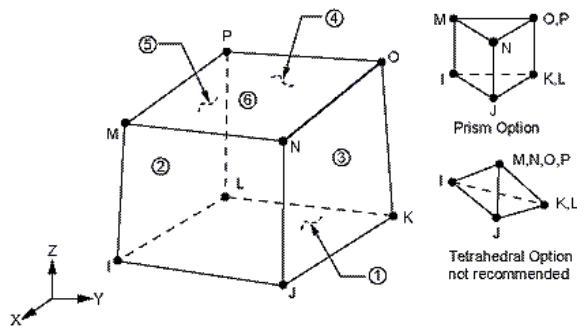


Figure 5.4 : Structure géométrique du SOLID 185.

5.4. Analyse transitoire du minaret

Le comportement dynamique d'une structure dépend de la géométrie et des caractéristiques de matériaux de construction d'une part, et de la nature de chargement d'autre part. L'analyse dynamique devient nécessaire si la charge varie rapidement en fonction du temps (séisme, vent, chocs), car l'inertie devient significatif (Aldaaami, 2000). Afin de voir le comportement dynamique du minaret sans et avec alliages, une analyse temporelle a été faite en appliquant le séisme d'El-Centro. On note que le séisme est appliqué suivant la direction horizontale x (figure 5.5).

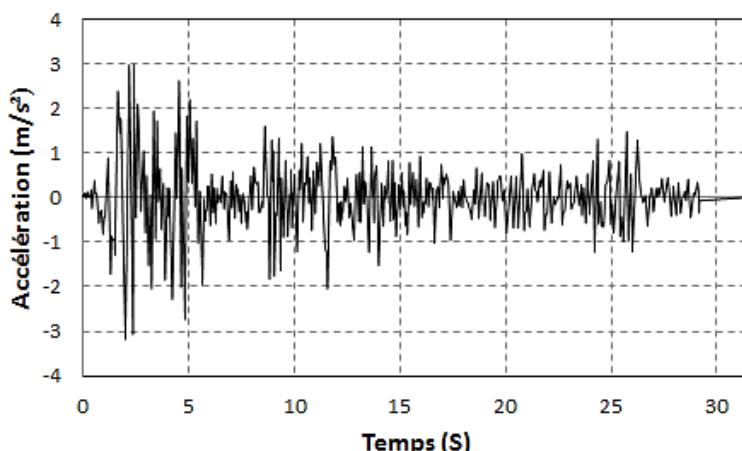


Figure 5.5 : L'enregistrement du séisme d'El-Centro 1940.

5.4.1. Analyse dynamique du minaret sans AMF

Dans le but de connaitre le comportement dynamique du minaret avant insertion des AMF, trois points de référence (A, B, C) sont choisis pour calculer les déplacements, les accélérations (figure 5.7) et la distribution des contraintes (figure 5.8). Ces points sont choisis comme étant les endroits où les contraintes sont importantes. Ces trois points sont situé à 21,21(A), 32.72 (B) et à 45.9 (C) mètres sur le minaret (figure 5.6). Les résultats obtenus sont montrés dans les figures ci-dessous :

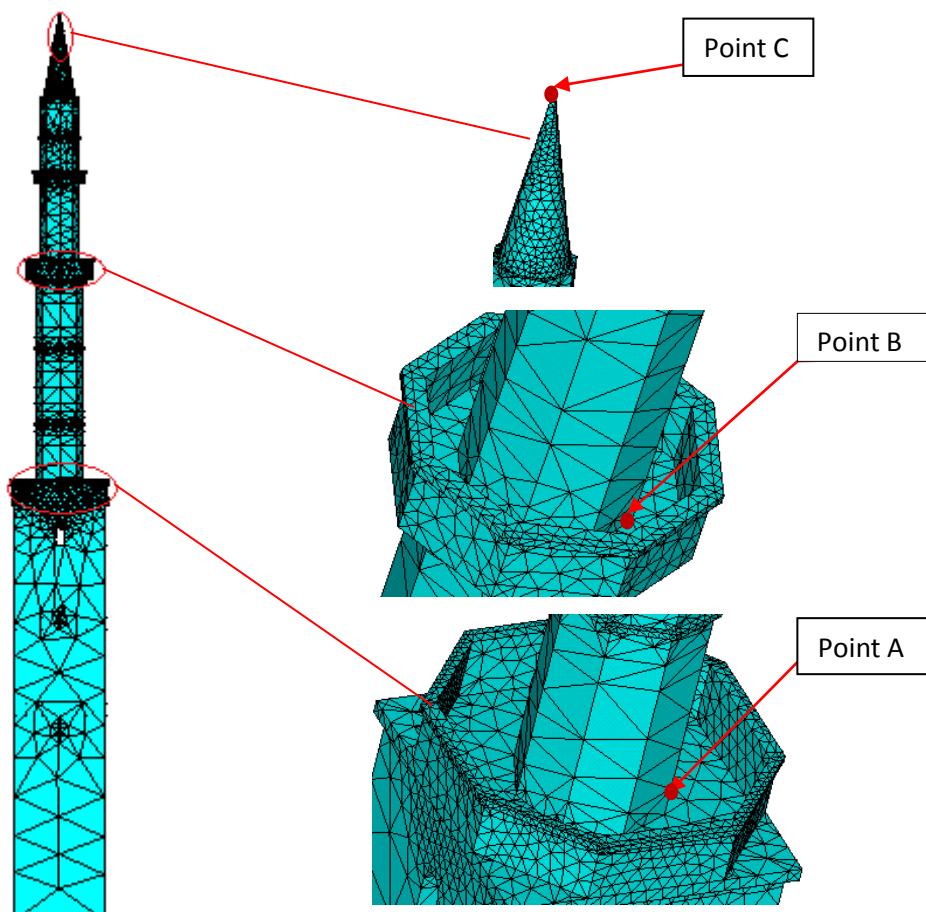


Figure 5.6 : Positions des 3 points de référence.

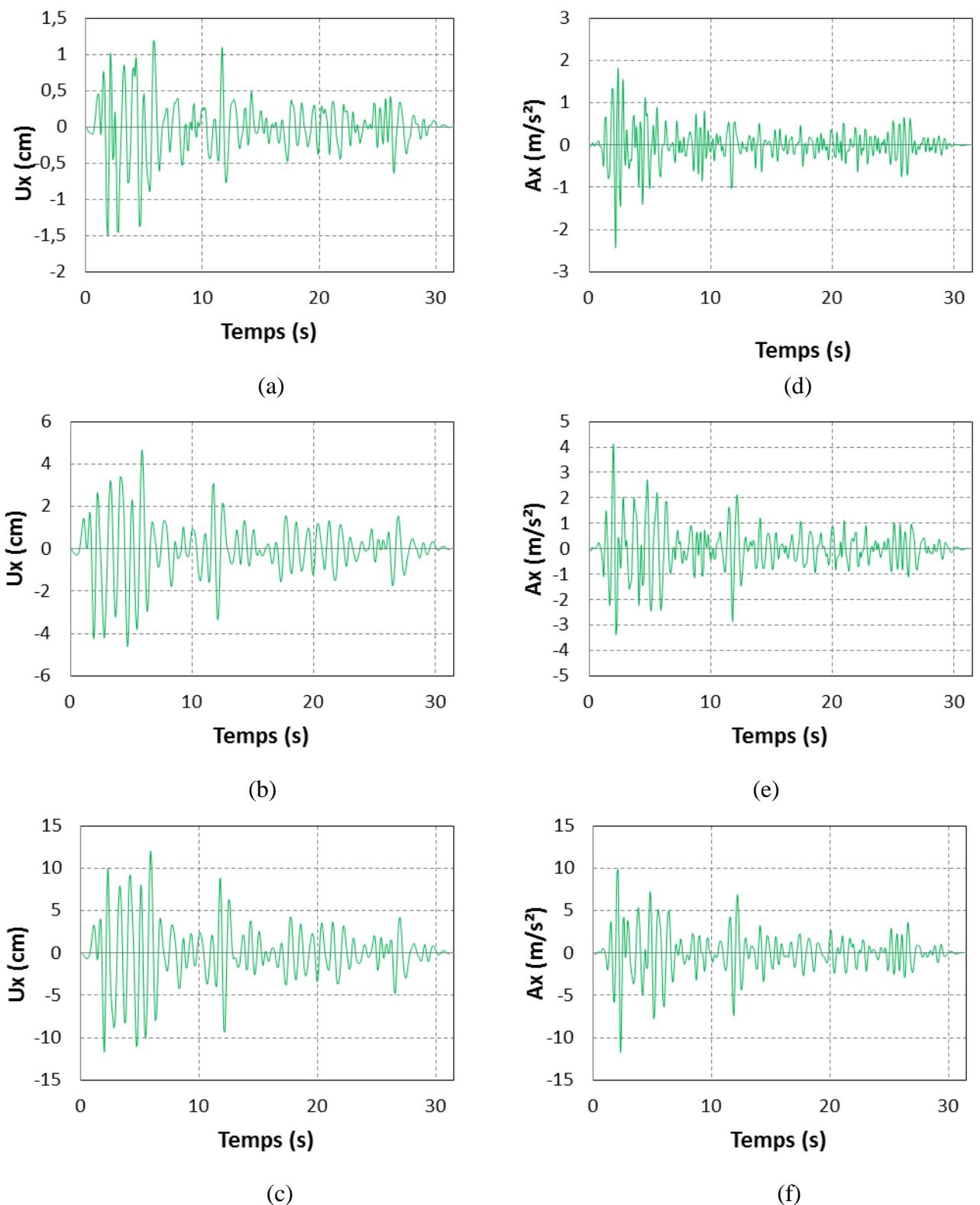


Figure 5.7 : (a), (b), (c) les déplacements et (d), (e), (f) les accélérations aux points A, B, C sans AMF sous l'action d'El-Centro.

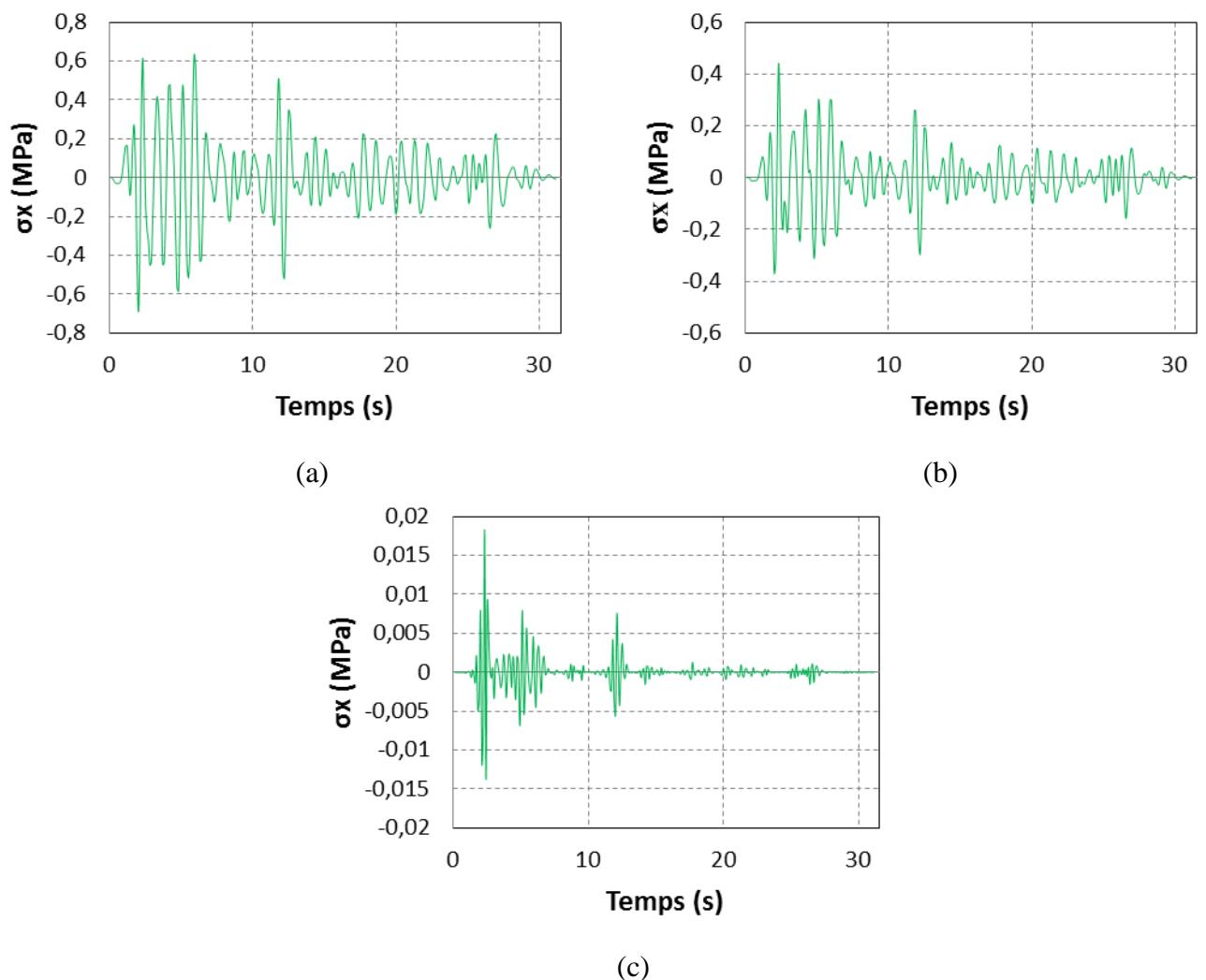


Figure 5.8 : (a), (b), (c) la variation de la contrainte S_x aux points A, B, C sans AMF sous l'action d'El-Centro.

D'après les résultats trouvés, on remarque que le déplacement est maximal au niveau du point C, et c'est logique parce que la flèche est toujours maximale au sommet.

En ce qui concerne les contraintes, on remarque qu'il y a une concentration au niveau des points A et B (figure 5.9), donc il faut renforcer ces endroits pour lutter contre le séisme.

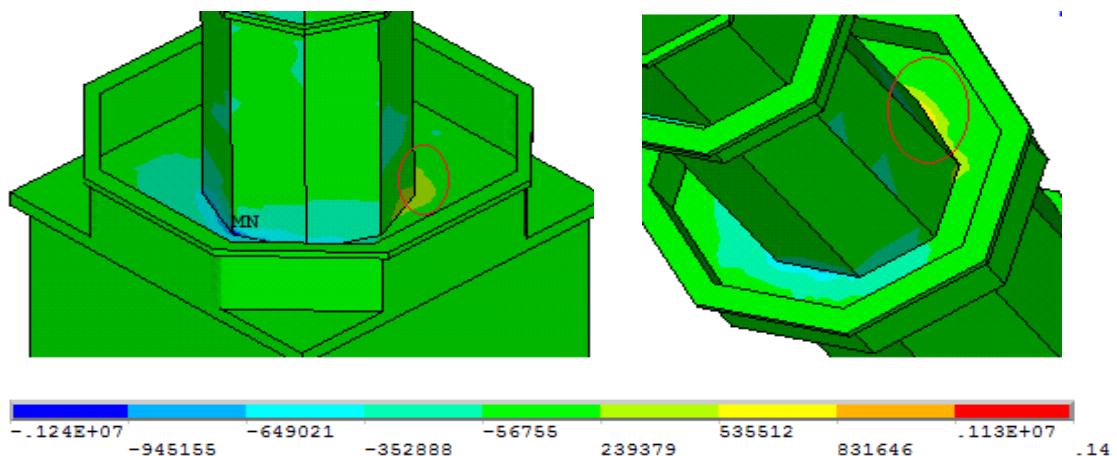


Figure 5.9 : Concentration des contraintes au niveau des points A et B.

5.4.2. Analyse dynamique du minaret avec AMF

Afin de renforcer le minaret par les AMF, plusieurs combinaisons de disposition des AMF sont utilisées, dans le but de trouver la combinaison qui donne les meilleurs résultats. En premier lieu, et en s'inspirant d'un travail déjà réalisé, cité en chapitre 3 (Barka et Soussi, 2013), les AMF ont été fixés sur le minaret à l'aide des cornières (figure 5.10.a).

Nous avons rencontré beaucoup de problèmes numériques qui nous ont obligés à réfléchir à d'autres alternatives. Egalement, ces cornières simulées sont en réalité fixées sur le minaret, chose qui est imaginable, de point de vue « conservation de monuments ». Nous avons donc, proposé un dispositif plus réaliste qui finalement nous a donné de meilleurs résultats. Celui-ci consiste à fixer les AMF sur le minaret par l'intermédiaire des ceintures polygonale en acier (figure 5.10.b). Réellement, nous pouvons entourer le minaret par des fils en acier sur lesquels sont accrochés les AMF.

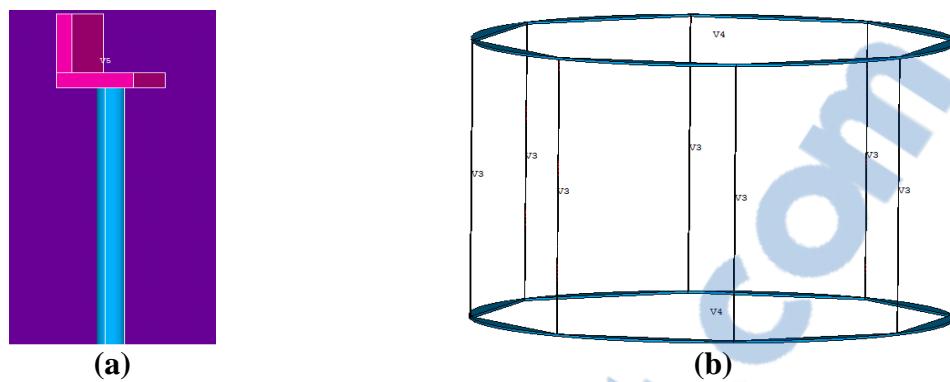


Figure 5.10 : (a) assemblage des AMF par des cornière et (b) assemblage des AMF par des ceinture polygonale.

Après avoir choisi le meilleur dispositif, plusieurs analyses ont été faites dont l'objectif principal est :

- Trouver le nombre nécessaire des AMF qui contribuent à améliorer le comportement de la structure
- Quelle serait la position idéale de ces AMF, qui même avec un nombre minimal donne de meilleurs résultats ?

D'après l'analyse dynamique effectuée sur le modèle sans AMF, nous avons choisi deux endroits pour placer les AMF :

- Le premier est situé à une hauteur de 40,46m, il est choisi parce que les déplacements sont maximaux au sommet de minaret.
- Le deuxième est situé à une hauteur de 22,55m, il est choisi parce qu'il Ya une concentration de contrainte à ce niveau.

Ensuite des analyses transitoires ont été effectuées avec quatre et huit AMF dans chaque emplacement. Les résultats sont montrés dans les figures ci-dessous :

5.4.2.a. 1^{er} emplacement (40,46m)

Selon les résultats montrés sur les figures ci-dessous et mentionnés dans le tableau (5.4), nous constatons qu'il n'y a pas une grande différence en termes de déplacements, accélérations et contraintes entre les deux dispositions. On conclut que la disposition avec quatre AMF est préférable que celle composé de huit AMF, puisque les valeurs n'ont pas réellement changé.

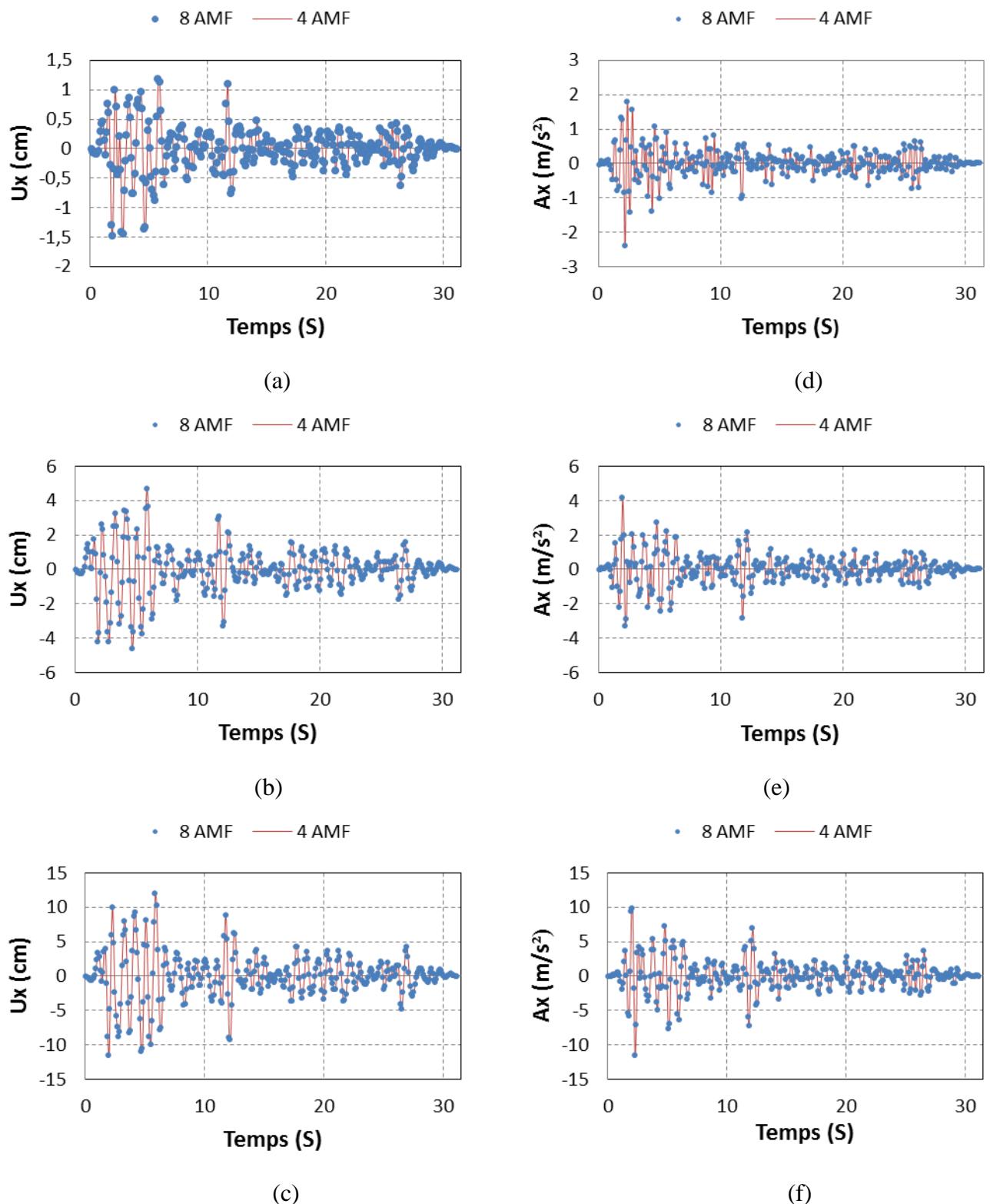


Figure 5.11 : (a), (b), (c) les déplacements et (d), (e), (f) les accélérations aux points A, B, C avec AMF sous l'action d'El-Centro.

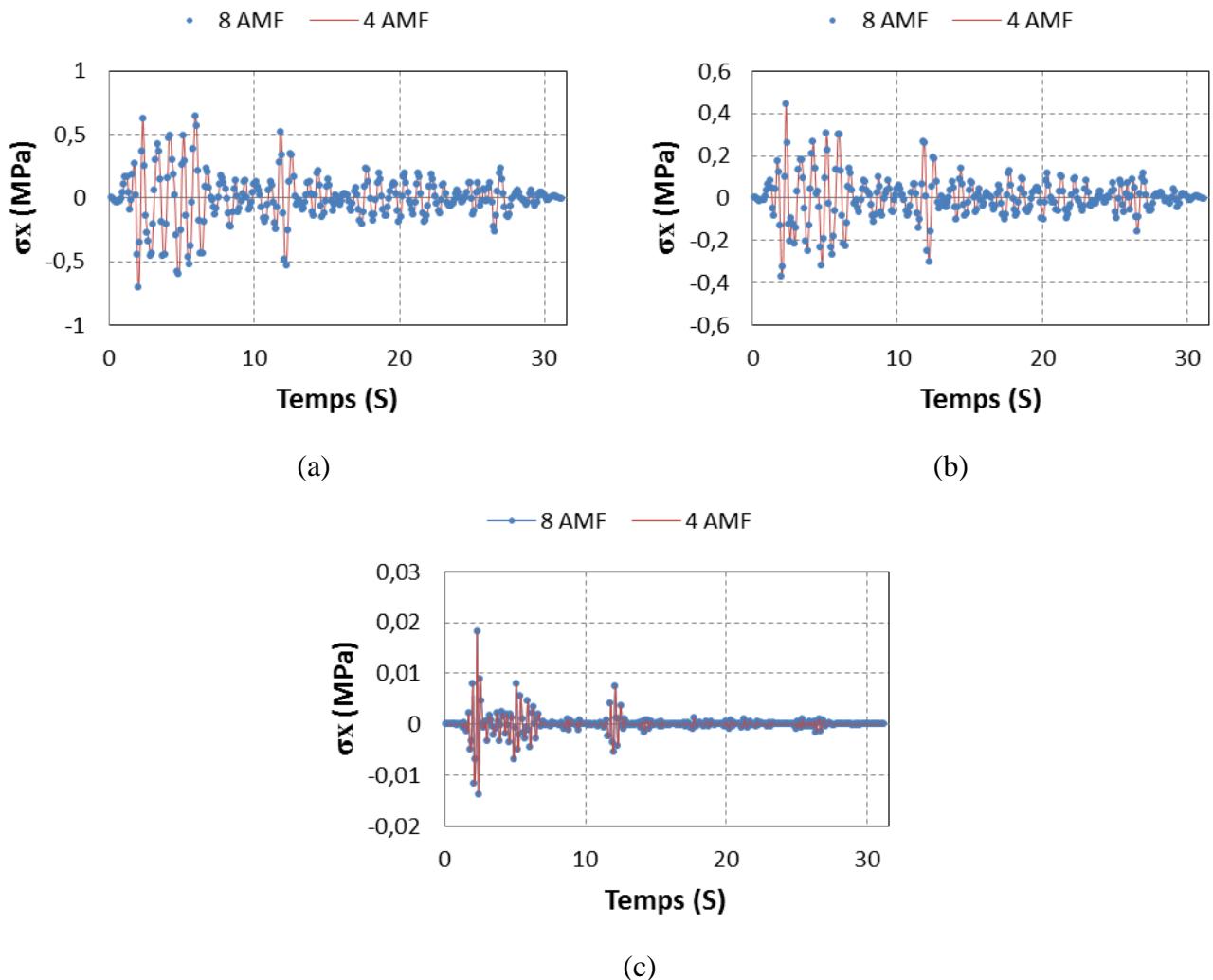


Figure 5.12 : (a), (b), (c) la variation de la contrainte S_x aux points A, B, C avec AMF sous l'action d'El-Centro.

Tableau 5.4 : Résultats de renforcement dans le premier endroit.

Nombre d'AMF		4 AMF	8 AMF	Différence (%)
Points	Grandeurs			
A	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	1,47536	1,47554	-0,01
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	2,40015	2,39887	0,05
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,701905	0,702758	-0,12
B	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	4,66116	4,66501	-0,08
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	4,12132	4,12389	-0,06
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,427192	0,443128	-3,73
C	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	11,9822	11,9767	0,04
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	11,5844	11,5835	0,007
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,0184011	0,0182883	0,61

5.4.2.b. 2^{ème} emplacement (22,55m)

D'après les résultats montrés sur les figures ci-dessous, et regroupés dans le tableau (5.5), nous remarquons que la différence en termes de déplacements, accélération et contraintes aux trois points et pour les deux configurations, quatre et huit AMF est négligeable. Donc, utiliser quatre ou huit fils n'a pas changé le comportement de la structure en cet emplacement. Ce qui veut dire, il est préférable de considérer quatre fils au lieu de huit.

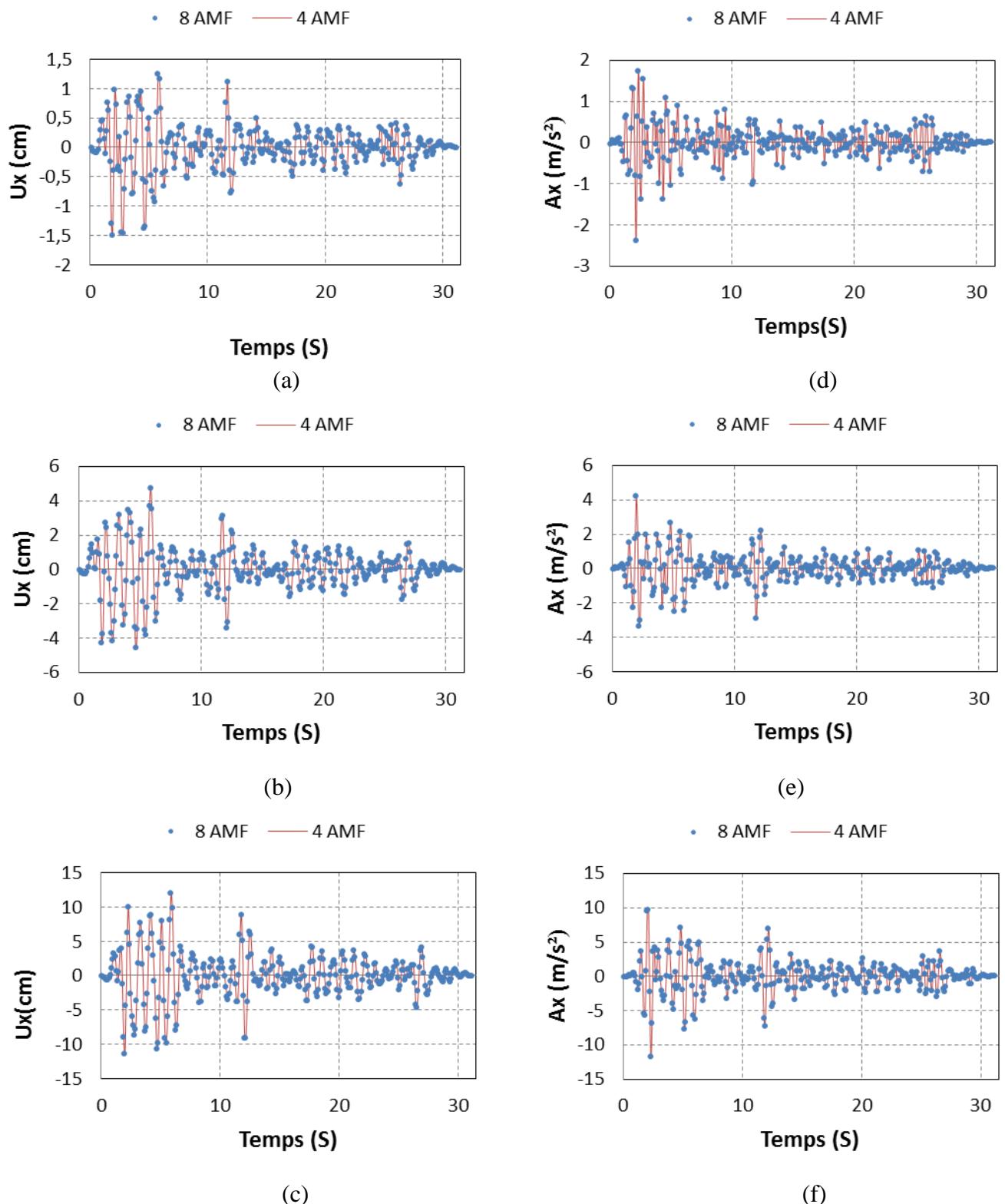


Figure 5.13 : (a), (b), (c) les déplacements et (d), (e), (f) les accélérations aux points A, B, C avec AMF sous l'action d'El-Centro.

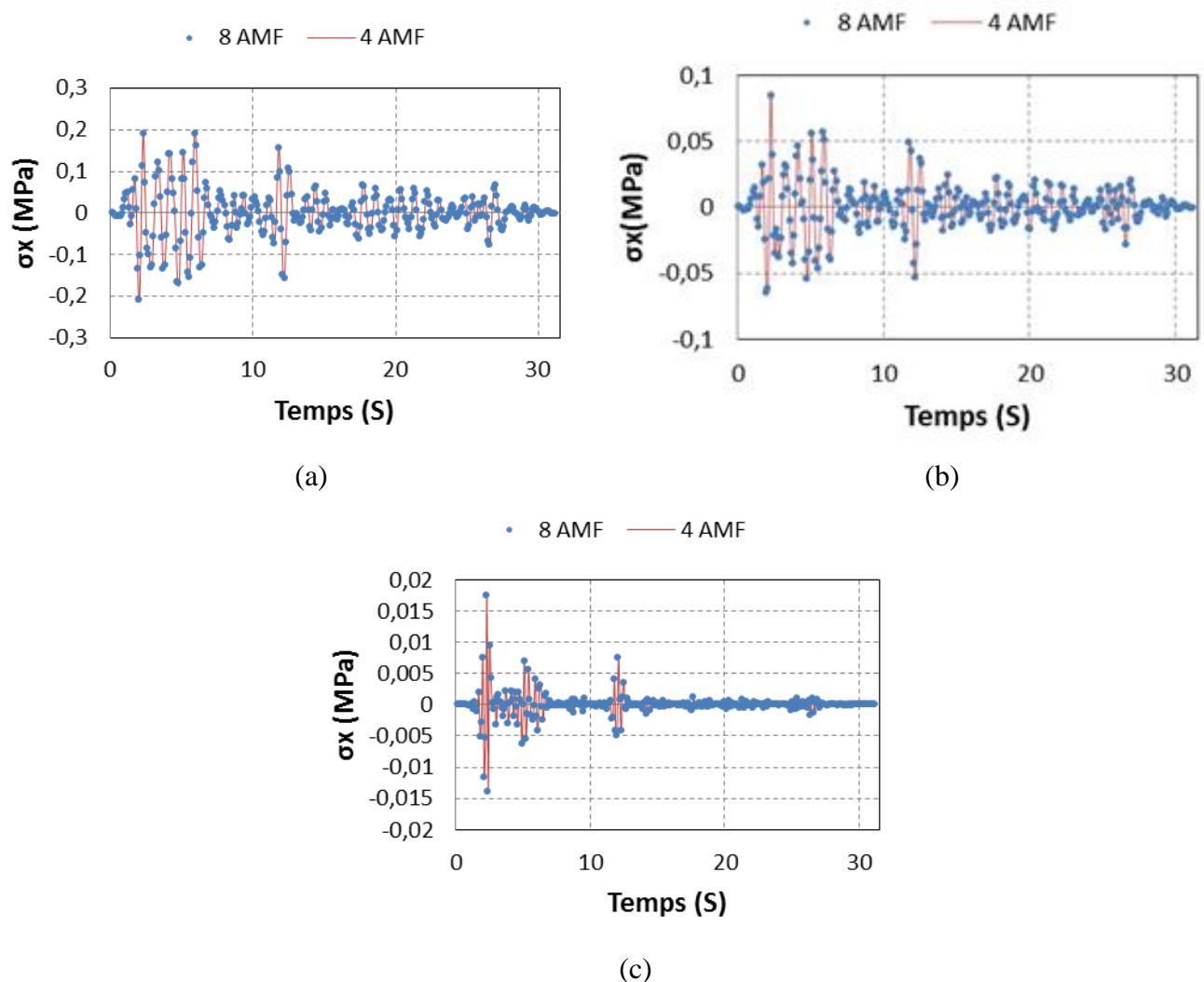


Figure 5.14 : (a), (b), (c) la variation de la contrainte S_x aux points A, B, C avec AMF sous l'action d'El-Centro.

Tableau 5.5 : Résultats de renforcement dans le deuxième endroit.

Nombre d'AMF		4 AMF	8 AMF	Différence (%)
Points	Grandeurs			
A	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	1,49621	1,50014	-0,26
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	2,38898	2,38778	0,05
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,213005	0,208043	2,33
B	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	4,71774	4,71353	0,08
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	4,18589	4,20078	-0,35
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,0856378	0,0845453	1,27
C	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	11,9321	11,9111	0,17
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	11,714	11,7803	-0,57
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,017617	0,0174435	0,98

D'après les deux comparaisons précédentes, nous avons vu que quatre ou huit AMF ne changent pas grandes choses aux résultats trouvés. Donc, de préférence, utiliser un nombre minimal, c'est-à-dire quatre AMF semble prodigieux.

Maintenant concernant les deux emplacements, la différence de déplacement et d'accélération est toujours négligeable, vu que les valeurs du premier emplacement sont de l'ordre de 1, 5% maximum vis-à-vis du deuxième emplacement (tableau 5.6)

La différence est clairement visible pour la contrainte σ_x , où nous trouvons que la deuxième disposition minimise d'une manière extraordinaire les contraintes maximales par rapport à la première disposition. Notamment pour les premiers points (A et B). Cette différence n'est pas autant visible en ce qui concerne le troisième point. Donc le meilleur dispositif de renforcement du minaret est celui composé de quatre AMF situé à 22,55 m de hauteur.

Tableau 5.6 : Comparaison entre les deux emplacements.

Emplacement des AMF		1 ^{er} (40,46m)	2 ^{ème} (22,55m)	Différence (%)
Points	Grandeurs			
A	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	1,47536	1,49621	1,4
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	2,40015	2,38898	- 0,47
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,701905	0,213005	- 230
B	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	4,66116	4,71774	1,2
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	4,12132	4,18589	1,5
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,427192	0,0856378	- 399
C	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	11,9822	11,9321	-0,42
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	11,5844	11,714	1,11
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,0184011	0,017617	- 4,45

5.4.3. Résultat du renforcement de minaret

Afin de voir le comportement dynamique du minaret sans et avec AMF une comparaison des déplacements, des accélérations et des contraintes dans les trois points A, B et C a été faite. Les résultats sont montrés dans les figures suivantes :

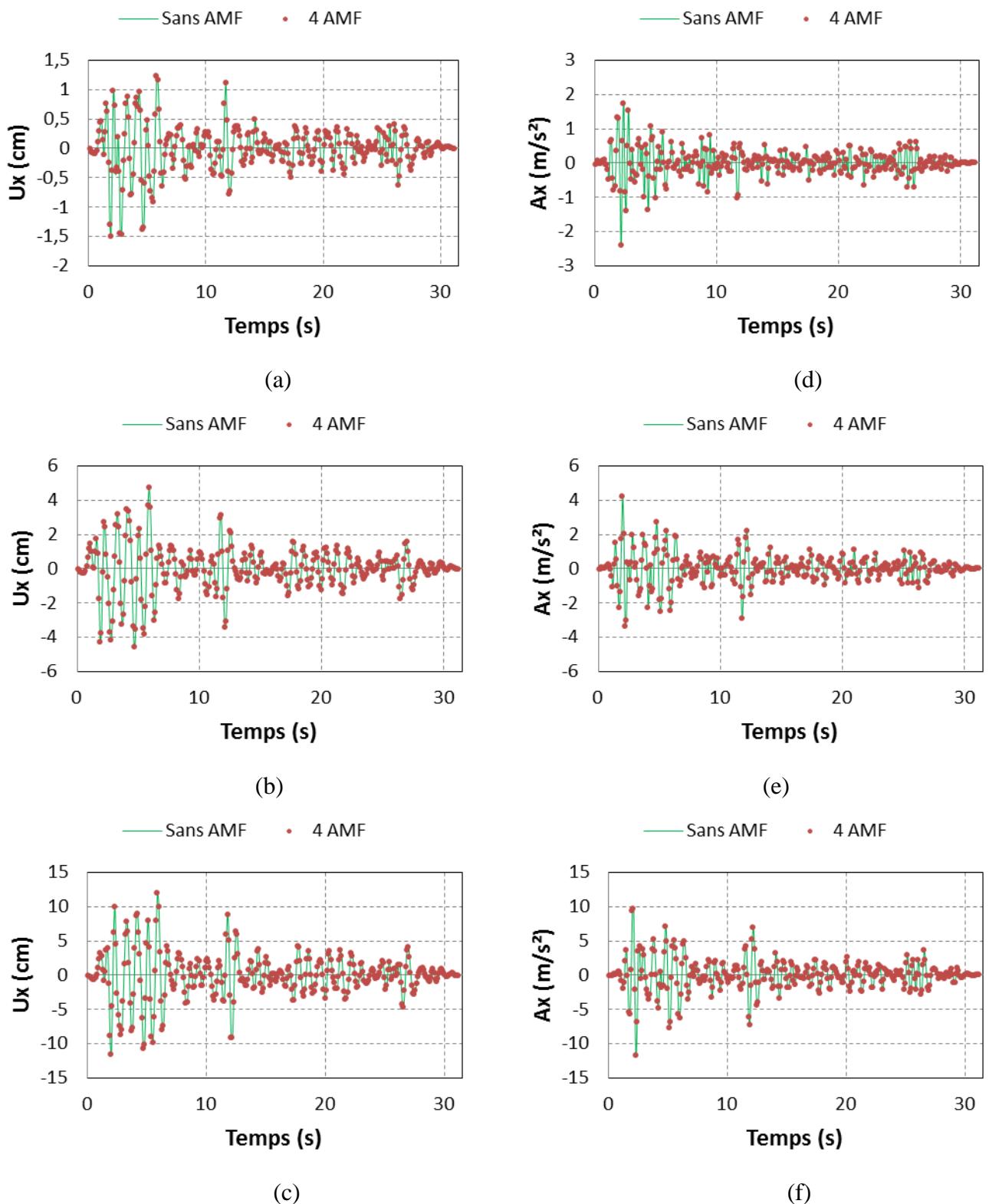


Figure 5.15 : (a), (b), (c) les déplacements et (d), (e), (f) les accélérations aux points A, B, C sans et avec AMF sous l'action d'El-Centro.

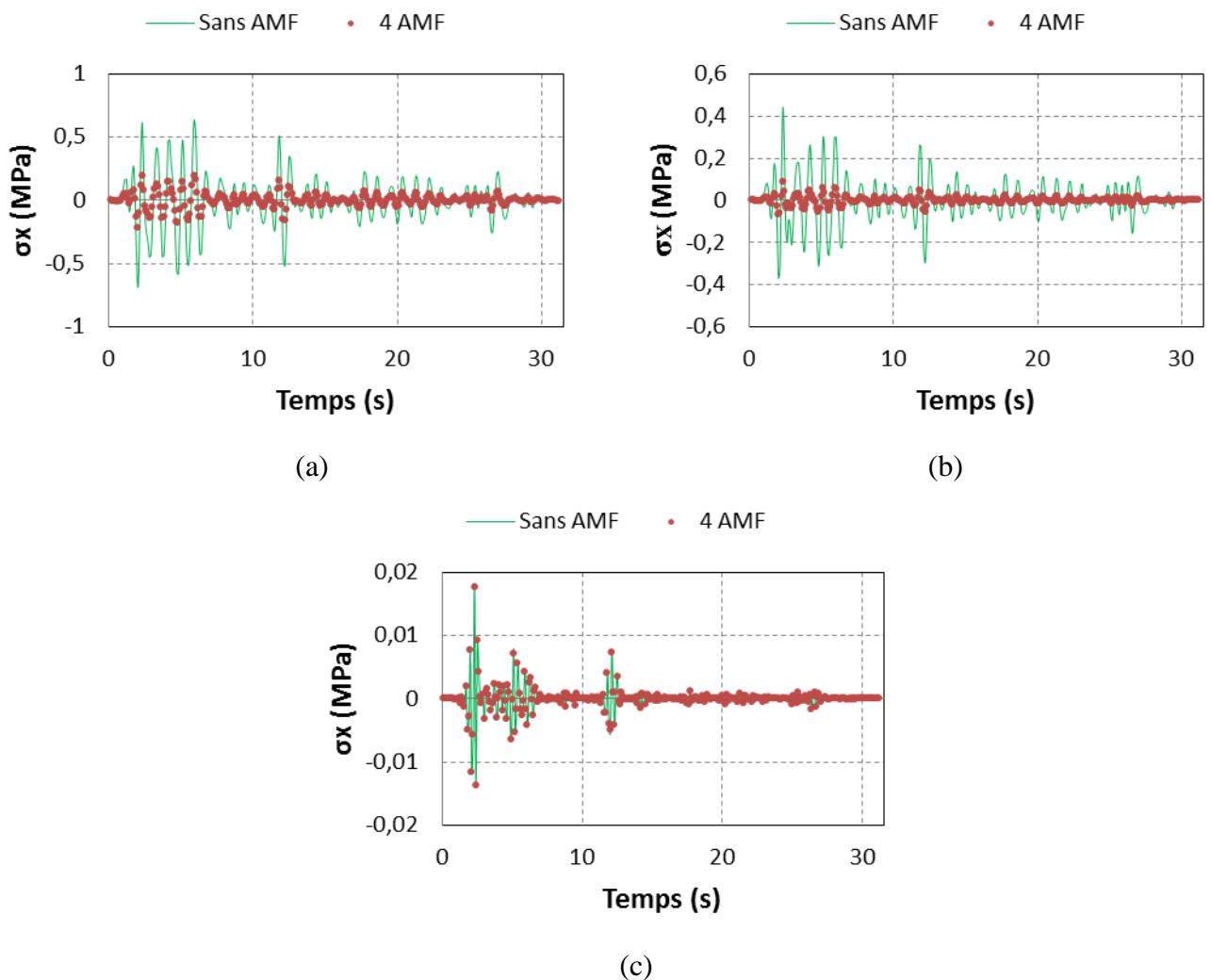


Figure 5.16 : (a), (b), (c) la variation de la contrainte S_x aux points A, B, C sans et avec AMF sous l'action d'El-Centro.

Tableau 5.7 : Résultats de renforcement du minaret par les AMF.

Nombre d'AMF		Sans AMF	4 AMF	Réduction (%)
Points	Grandeurs			
A	$U_{x_{\max}} \text{ (cm)}$	1,4763	1,49621	-1,34
	$A_{x_{\max}} \text{ (m/s}^2)$	2,39892	2,38898	0,41
	$\sigma_{x_{\max}} \text{ (MPa)}$	0,688481	0,213005	69,06
B	$U_{x_{\max}} \text{ (cm)}$	4,66844	4,71774	-0,22
	$A_{x_{\max}} \text{ (m/s}^2)$	4,12924	4,18589	-1,37
	$\sigma_{x_{\max}} \text{ (MPa)}$	0,438873	0,0856378	80,49
C	$U_{x_{\max}} \text{ (cm)}$	11,9785	11,9321	0,38
	$A_{x_{\max}} \text{ (m/s}^2)$	11,6019	11,714	-0,97
	$\sigma_{x_{\max}} \text{ (MPa)}$	0,0182565	0,017617	3,5

Selon les résultats trouvés, on remarque qu'il n'y a pas un grand changement en termes de déplacement et d'accélération. Concernant la réduction en termes de contraintes, nous remarquons que pour les points A et B, la réduction est considérable, alors qu'elle n'est pas importante pour le point C.

5.4.4. Renforcement du minaret par les AMF et les bars d'acier

Après avoir essayé plusieurs emplacements des AMF. Par curiosité, on veut savoir le comportement dynamique de minaret, en utilisant quatre AMF positionnés à une hauteur de 40,46m, en plus de quatre barres d'acier de mêmes caractéristiques des ceintures utilisées pour fixer les AMF, définies précédemment. Ces barres sont fixées au voisinage des endroits où nous avons constaté une concentration de contrainte les résultats sont montrés dans les figures suivantes :

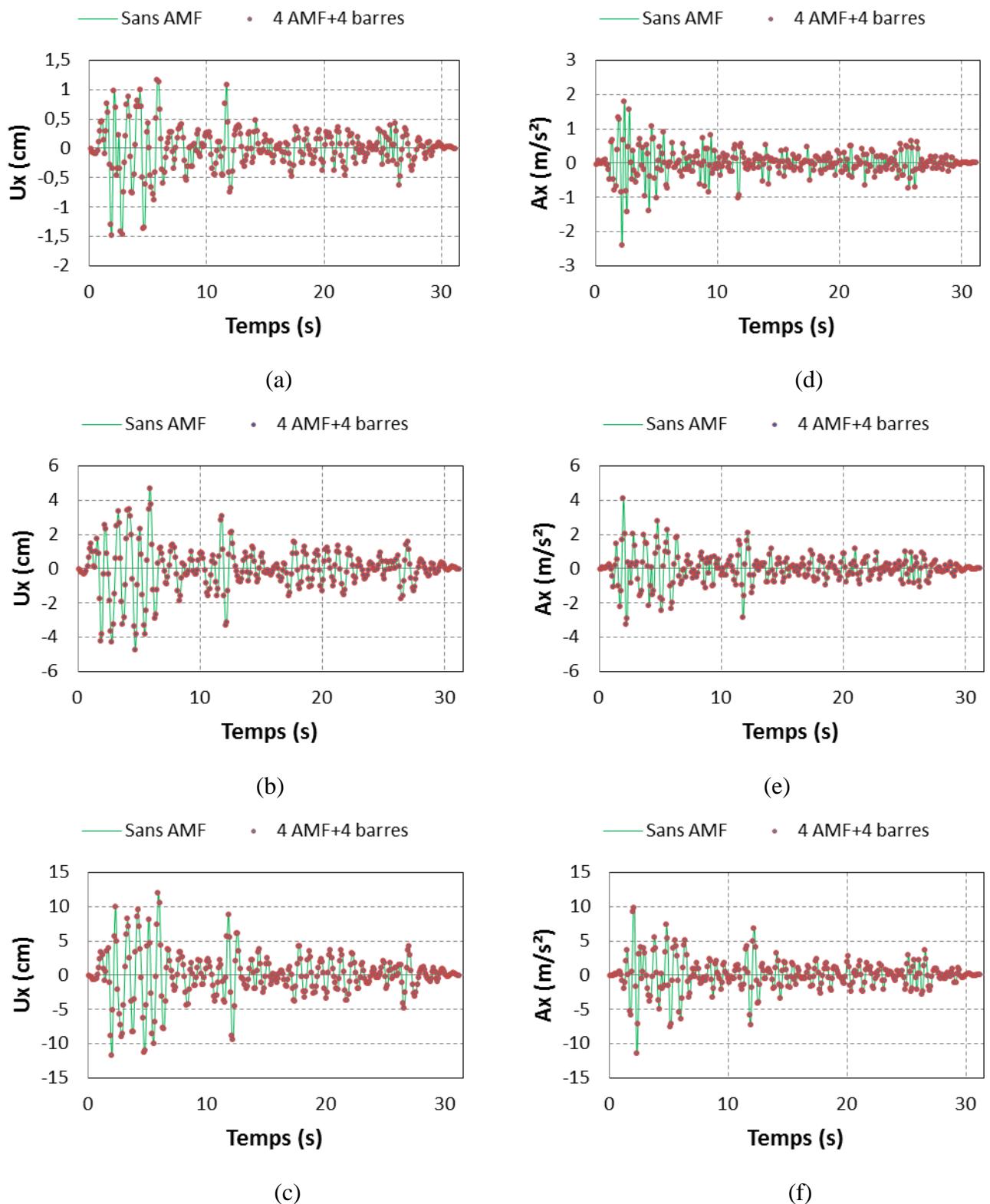


Figure 5.17 : (a), (b), (c) les déplacements et (d), (e), (f) les accélérations aux points A, B, C avec AMF et bars d'acier sous l'action d'El-Centro.

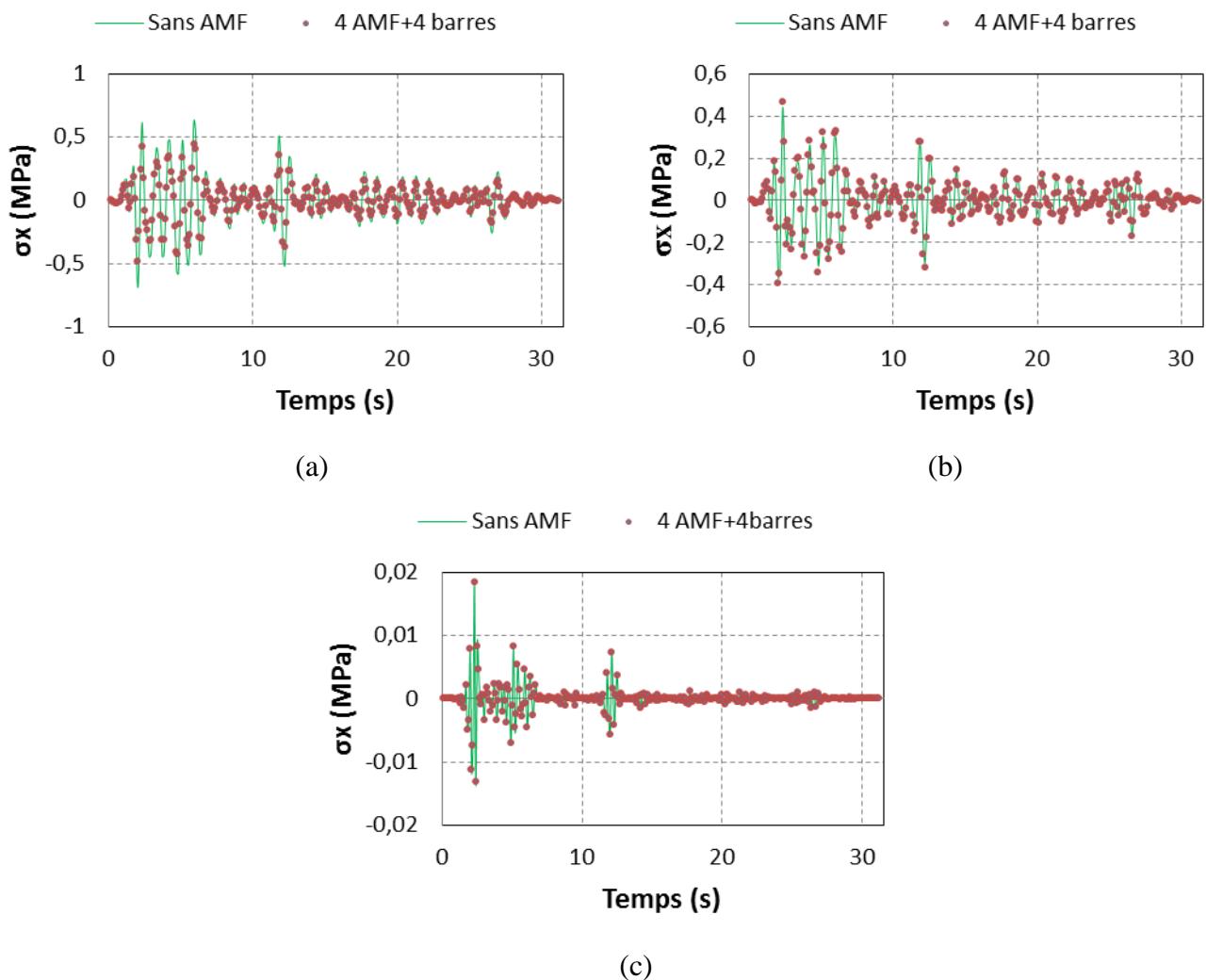


Figure 5.18 : (a), (b), (c) la variation de la contrainte S_x aux points A, B, C avec AMF et bars d'acier sous l'action d'El-Centro.

Tableau 5.8 : Résultats de renforcement du minaret par les AMF et les barres d'acier.

Nombre d'AMF		4 AMF (haut) + 4Acier (bas)	Sans AMF	Différence %
Points	Grandeur			
A	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	1,157	1,4763	21,62
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	2,39527	2,39892	0,15
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,484835	0,688481	29,5
B	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	4,75808	4,66844	-1,92
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	4,11565	4,12924	0,32
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,464605	0,438873	-5,86
C	$U_{x_{\max}} (\text{cm})$	11,9625	11,9785	0,13
	$A_{x_{\max}} (\text{m/s}^2)$	11,4168	11,6019	1,6
	$\sigma_{x_{\max}} (\text{MPa})$	0,0183619	0,0182565	-0,6

Les résultats trouvés montrent une réduction en termes de contraintes et de déplacements au point A, mais le taux de réduction pour les autres positions reste négligeable. En comparant cette disposition avec celle composée de quatre fils en AMF situé à 22,55m, la deuxième donne toujours des très bons résultats.

5.5. Interprétation des résultats

- **Avant renforcement**

Le déplacement maximal trouvé en appliquant le signal sismique d'El-Centro sur le minaret est de 10 cm. Donc, nous pouvons conclure que la structure est rigide. Le déplacement reste dans l'intervalle de sécurité.

D'après la distribution des contraintes trouvées avant l'insertion des AMF, on remarque qu'il y a une concentration des contraintes au niveau des balcons.

- **Après renforcement**

L'analyse transitoire de minaret renforcé par quatre AMF au niveau du balcon, montre une légère augmentation en termes de déplacements et d'accélérations, parce que le signal sismique est fort, donc les AMF travaillent dans le domaine non-linéaire.

En revanche les contraintes sont réduites d'une manière remarquable pour le point A et B, grâce aux AMF qui ont permis la dissipation d'énergie.

- **Après renforcement par les AMF et les barres d'acier**

Les résultats trouvés par l'insertion des AMF à 22,55m, montrent l'efficacité de ces matériaux dans l'atténuation du risque sismique. Afin de trouver une disposition optimale, les AMF sont fixés à une hauteur de 40,46m, et pour éviter le problème de concentration des contraintes, on a ajouté des barres d'acier au voisinage du point A, ce qui permet à réduire les contraintes dans cette zone. Concernant les points B et C il n'y a pas un grand changement. Donc, il est préférable d'utiliser la disposition composée de quatre AMF situés à 22,55m parce qu'elle donne de meilleurs résultats.

5.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé des AMF afin de renforcer le minaret. Une analyse transitoire a été faite avant et après renforcement sous l'action du signal sismique d'El-Centro, dans le but de voir l'effet de ces matériaux sur le comportement dynamique du minaret.

Les résultats trouvés montrent l'efficacité des AMF dans l'atténuation de risque sismique. A travers l'insertion de ces matériaux sur le minaret, les contraintes ont été réduites de 70% dans les endroits critiques de l'édifice.

Conclusions et Perspectives

Dans ce mémoire, nous avons utilisé une nouvelle technologie de renforcement de structures anciennes, il s'agit d'amortisseur en matériaux intelligents AMF. Pour voir le comportement dynamique du minaret avant et après insertion des AMF. Nous avons choisi le signal sismique d'El-Centro comme charge dynamique, et nous avons comparé les déplacements, les accélérations et les contraintes dans des points critiques du minaret.

On conclue que :

- Le déplacement est maximal au niveau du point C situé au sommet du minaret.
- Une concentration des contraintes est constaté au voisinage des points A et B.
- Le nombre des AMF n'influe pas sur les résultats trouvés.
- L'emplacement des AMF joue un rôle important, notamment pour la réduction des contraintes, ou on a trouvé une réduction de plus de 70% en fixant les AMF à une hauteur de 22,55m.
- L'insertion des AMF dans le premier emplacement (40,46m) en plus de quatre barres d'acier à une hauteur de 22,55m permet de réduire les contraintes au niveau du point A seulement, contrairement au deuxième cas (AMF à 22,55m) où on a trouvé une réduction de contraintes à tous les points.

On note que durant l'élaboration de ce travail, on s'est trouvé face aux obstacles suivants :

- Le temps de l'analyse est très élevé, surtout après renforcement du minaret (en moyenne 12 heures pour une seule analyse).
- Le dispositif adéquat est trouvé après avoir essayé plusieurs scénarii de combinaisons en nombre et position.
- Le maillage des AMF n'était pas facile à faire, et générait des problèmes numériques de convergence. Il fallait choisir un maillage : ni trop fin, qui fait qu'augmenter le temps des calculs et la capacité mémoire des machines ; ni trop gros qui influera sur la convergence et la qualité de la solution. La manière d'accrocher les fils d'AMF sur la structure, (cornières, ceintures...etc.) et choisir la solution la plus réelle qui peut être réalisée sur terrain et au même temps facile à réaliser numériquement, vu la complexité de la géométrie du minaret.

- La modélisation complexe des escaliers tournants qui se retrouvent à l'intérieur du minaret et leurs assemblages au reste de la structure.

Comme perspectives :

- Nous proposons tout d'abord d'appliquer d'autres signaux sismiques sur le minaret d'Ajloun afin de voir leurs impacts sur les différentes grandeurs (déplacements, accélérations et contraintes).
- Remplacer les AMF par de l'acier ordinaire au meilleur positionnement trouvé ($h=22,55$ m) et voir l'impact et l'intérêt d'utiliser les AMF.
- Utiliser les AMF sur d'autres types de structures, tels que les ponts suspendus et les ouvrages précontraints.
- Utiliser ces matériaux comme isolateur de base des structures à grande importance.

Références Bibliographiques

1. Aldaami HH., Linear and nonlinear static and free vibration analysis of thin-walled cellular and ribbed spherical domes by spherical grillage analogy, Ph.D. Dissertation. University of Baghdad. Iraq, 2000.
2. Amarante F., Cismașiu C. and Pamies J., Semi-active vibration control device based on superelastic NiTi wires, Structural Control and Health Monitoring. Control Health Monit, 2012; Vol. 20 : 890–902.
3. Balandraud X., Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Renforcement préventif de structures métalliques et en béton, approches thermomécaniques expérimentales, 2011, Université Blaise Pascal – Clermont II, U.F.R Sciences et Technologies.
4. Barka H., Soussi I., Atténuation des Risques Sismiques des Structures par des Amortisseurs en AMF, (Application sur le minaret de la mosquée de Mansourah), mémoire de master GC, soutenu 23 Juin 2013, Tlemcen.
5. Bongiovanni G., Clemente P. and Buffarini G., Analysis of the Seismic Response of a Damaged Masonry Bell Tower, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
6. Casciati F. and Faravelli L., Experimental characterisation of a Cubased shape memory alloy toward its exploitation in passive control devices, Journal de Physique IV, 2004, vol. 115, 299-306.
7. Casciati F., Faravelli L. and Hamdaoui K., Dept. of Structural Mechanics, University of Pavia, Pavia, Italy, Performance of a base isolator with shape memory alloy bars, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, December 2007.
8. Casciati S. and Hamdaoui K., Experimental and numerical studies toward the implementation of shape memory alloy ties in masonry structures, Smart Structures and Systems, 8 AOUT 2008, pp: 153 - 169.
9. Chang L.C., Read T.A., Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals the gold-cadmium beta phase, Trans AIME, 189, 47-52, 1951.
10. Clément G., Naudot P., Welter, Les alliages à mémoire de formes. Matériaux et Techniques, 1993, p. 6-7, p. 65-75.
11. Desroches R., Delemont M., Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. Engineering Structures, 2002, Vol. 24: 325–32.
12. Ding Y., Chen X., Li A. and Zuo X., A new isolation device using shape memory alloy and its application for long-span structures, Vol. 10, No.2 ; Earthquake Engineering and Engineering Vibration, June, 2011 : 239-252.

13. Dolce M. and Cardone D., Mechanical behavior of shape memory alloys for seismic applications, 2. Austenite NiTi wires subjected to tension, Int. J. Mech. Sci. 43 (11), 2001: 2657-2677.
 14. Dolce M., Cardone D., Marnetto R., SMA re-centering devices for seismic isolation of civil structures, Proceedings of SPIE, 2001; 4330:238–49.
 15. Dolce M., Donatello Cardone, and Roberto M., Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Earthquake Engng Struct. Dyn, 2000; Vol. 29: 945-968.
 16. Filiatrault A., Elements of Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Montreal, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 2002.
 17. Georces T., thèse par articles présentée à l'école de technologie supérieure, développement d'un outil de conception pour les actionneurs AMF à rappel passif et actif prenant en compte l'influence des traitements thermomécaniques Montréal, 04 janvier 2012.
 18. Ghawamna Y., Ancient Islamic Mosques in Ajloun. Irbid. Jordan Center Studies Publications, Al-Yarmouk University, 1986 (In Arabic).
 19. Gotthard R., Lehnert T., AMF, Traité des matériaux n°19, Matériaux émergents, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001 : 81-105.
 20. Guenin G., Technique de l'ingénieur, M530, 1996.
 21. Hamdaoui K. and Benadla Z., Dynamic analysis of a historical monument, retrofit using shape memory alloy wires, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, Tlemcen, Algeria, Smart Structures and Systems, Vol.13, No.3, 2014 : 375-388 DOI : <http://dx.doi.org/10.12989/sss.2014.13.3.375>.
 22. Hamdaoui K., Experimental Applications on Cu-based Shape Memory Alloys, Retrofitting of Historical Monuments and Base Isolation, thèse de Doctorat, Pavia, February 2009.
 23. Hamdaoui K., Hazem S., Zibdeh, Khaldoon A., Bani H., Health monitoring of a historical monument in Jordan based on ambient vibration test, Smart Structures and Systems, Vol.4, No.2, 2007.
 24. Hamdaoui K., Historical Monument Health Monitoring Based on Ambient Vibrations; Thèse de Magister, Jordan University of Science and Technology, 2006.
 25. Hanh T., Crédit d'états de précontrainte dans des composants en béton par alliages à mémoire de forme, thèse de Doctorat. Other. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2012.
-

26. Hough, S.E., Finding fault in California: an earthquake tourist's guide, Mountain Press Publishing. 2004; p. 185. ISBN 978-0-87842-495-5.
27. Indirli M., Martelli A., Arato, Forni M. and Spadonieds B., Seismic Protection of Cultural Heritage, Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures, article, Proceedings of the 7th International Seminar, Assisi, Italy, October 2-5, 2001.
28. Indirli M., The Demo-Intervention of the ISTECH Project, The Bell-Tower of S. Giorgio in Trignano, article, In Final Workshop of ISTECH Project, Ispra, Italy, 2000.
29. Janke L., Czaderski C., Motavalli M., Ruth J., Applications of shape memory alloys in civil engineering structures – Overview, limits and new ideas, 2005, Materials and Structures 38, p: 578-592.
30. Jia G.F. and Shi Z.F., A New Seismic Isolation System and Its Feasibility Study, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9(1): 75–82.
31. Khelfaoui F., Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon 2000.
32. Kotynia R., Shear streng thening of RC beams with polymer composites, Associate Professor Thesis, article, Łódź, 2011.
33. Lafourture P., Utilisation des alliages à mémoire de forme en control sismique des structures, Ecole technologie supérieure université de Québec, Décembre 2006.
34. Li H., Liu M., Ou JP., Vibration mitigation of stay cable with one shape memory damper, Journal Structural Control and Health Monitoring, 2004, 11:1-36.
35. Liu Y., Xieet Z. J., Humbeeck V., Cyclic deformation of NiTi shape memory alloys. Materials Science and Engineering, article, 273–275: 673–678, 1999.
36. Motavalli M., Czaderski C., Bergamini A., Janke L., Application of shape memory alloys in civil engineering, past, present and future, article, ACEE 2009, p: 81-94.
37. Motavalli M., Czaderski C., Bergamini A., Shape memory alloys for civil engineering structures –On the way from vision to reality, 2008, article, Poland, p: 91-108.
38. Muller J., AMF, article, Matériaux et Techniques, 1988, 7(8):7-16.
39. Olier P., Thèse d'état, Université de Paris sud UFR scientifique d'Orsay, 1995.
40. Pampanin S., Controversial aspects in seismic assessment and retrofit of structures in modern times, implementing lessons from ancien the ritage, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 39, No. 2, June 2006.

41. Panayiotis C.R., Panos C.T. and Michael C.C., Non linear Dynamic Analysis of Multi-base Seismically Isolated Structures with Uplift Potential II, Thèse de doctorat, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010 ; 9(1): 83–92.
 42. Parulekar Y., Reddy G., Vaze K., Guha S., Gupta C., Muthumani K. and Sreekala R., Seismic response attenuation of structures using shape memory alloy dampers, Structural Control and Health Monitoring, 7 December 2010 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).
 43. Patoor E., Berveiller M., Les alliages à mémoire de forme, Paris, Hermès, 1990, 63p.
 44. Patoor E., Eberhardt A., Berveiller M., Micromechanical modeling of superelasticity in shape memory alloy, Journal de Physique IV 1, (1996a), 277-292.
 45. Patoor E., Lagoudas D.C., Entchev P.B., Brinson L.C., Gao X., Shape memory alloys. Part I, General properties and modeling of single crystals, Mechanics of materials 38, 2006b, 391–429.
 46. Raymond L., technologie, Les alliages à mémoire de forme, article, 2000.
 47. Réol, Sylvie, Arcade centrale, article, Monuments historiques, 2001.
 48. Savoie C., Limoge S., Mémoire d'ingénieur Etudier le comportement d'un monument historique en Maçonnerie sous sollicitations sismiques, La chapelle du hameau de boudin a Arches-Beaufort, EICNAM, 2013.
 49. Sharabash A., Andrawes B., Application of shape memory alloy dampers in the seismic control of cable-stayed bridges, 2009, Engineering Structures 31, p: 607-616.
 50. Shin M., Seismic retrofit of repair of reinforced concrete bridge columns using shape memory alloys spirals, Univeristy of Illinois at Urban – Champaing, 2012.
 51. Song G., Otero K., Gu H., Health monitoring and rehabilitation of a concrete structure using intelligent materials, 2006, Smart Mater. Struct. 15, p: 309-314.
 52. Stalmans R., Humbeeck V., Chandrasekaran M., Delaey L., On the stability of shape memory alloys In, Engineering aspects of shape memory alloys, London: Butterworth-Heinemann, 1990: 96-105.
 53. Stassis A., Christis Z., Chrysostomou and Hamdaoui K., Application of shape memory alloy prestressing devices on an ancient aqueduct, University of Pavia, Italy, Smart Structures and Systems, Vol.4, No.2, October 4, 2007.
 54. Torra V., Auguet C., Isalgue A., Carreras G., Terriault P., Lovey F., Built in dampers for stayed cables in bridges via SMA, The SMART R-ESF project: A mesoscopic and macroscopic experimental analysis with numerical simulations, Engineering Structures 49, 2013, 43–57.
-

55. Vignes J., Andre G. & Kapala F., 2001, Alliage à Mémoire de Forme, France, C.A.R.M.A. (Centre d'Animation Régional en Matériaux Avances).
56. Vincent D., Contributions à l'étude thermomécanique des alliages à mémoire de forme NiTi et à la réalisation par soudage de matériaux architectures NiTi, Thèse de Doctorat, Universite de Grenoble, 2012, France.
57. Wenzel H., Pichler D., Ambient Vibration Monitoring, England, 2005.
58. Zonta D., Structural Damage Detection and Localization by Using Vibrational Measurements, Ph.D, Dissertation, University of Bologna, Bologna, Italy, 2000.

Annexes

Annexe 1 : L'échelle de Mercalli

L'échelle de Mercalli est une échelle de mesure de l'intensité d'un séisme, qui se fonde sur l'observation des effets et des conséquences du séisme en un lieu donné. Il est important de distinguer l'intensité d'un séisme de sa magnitude, laquelle mesure l'énergie libérée par le séisme à son foyer.

Degrés	Étendue des dégâts observés
I	Aucun mouvement n'est perçu. Le séisme n'est détecté que par des instruments sensibles et quelques personnes dans des conditions particulières.
II	Quelques personnes peuvent sentir un mouvement si elles sont au repos et/ou dans les étages élevés de grands immeubles.
III	À l'intérieur de bâtisses, beaucoup de gens sentent un léger mouvement. Les objets suspendus bougent. En revanche, à l'extérieur, rien n'est ressenti.
IV	À l'intérieur, la plupart des gens ressentent un mouvement. Les objets suspendus bougent, mais aussi les fenêtres, plats, assiettes, loquets de porte.
V	La plupart des gens ressentent le mouvement. Les personnes sommeillant sont réveillées. Les portes claquent, la vaisselle se casse, les tableaux bougent, les petits objets se déplacent, les arbres oscillent, les liquides peuvent déborder de récipients ouverts.
VI	Tout le monde sent le tremblement de terre. Les gens ont la marche troublée, les objets et tableaux tombent, le plâtre des murs peut se fendre, les arbres et les buissons sont secoués. Des dommages légers peuvent se produire dans des bâtiments mal construits, mais aucun dommage structural.
VII	Les gens ont du mal à tenir debout. Les conducteurs sentent leur voiture secouée. Quelques meubles peuvent se briser. Des briques peuvent tomber des immeubles. Les dommages sont modérés dans les bâtiments bien construits, mais peuvent être considérables dans les autres.
VIII	Les chauffeurs ont du mal à conduire. Les maisons avec de faibles fondations bougent. De grandes structures telles que des cheminées ou des immeubles, peuvent se tordre et se briser. Les bâtiments bien construits subissent de légers dommages, contrairement aux autres qui en subissent de sévères. Les branches des arbres se cassent. Les collines peuvent se fissurer si la terre est humide. Le niveau de l'eau dans les puits peut changer.
IX	Tous les immeubles subissent de gros dommages. Les maisons sans fondations se déplacent. Quelques conduits souterrains se brisent. La terre se fissure.
X	La plupart des bâtiments et leurs fondations sont détruites. Il en est de même pour quelques ponts. Des barrages sont sérieusement endommagés. Des éboulements se produisent. L'eau est détournée de son lit. De larges fissures apparaissent sur le sol. Les rails de chemin de fer se courbent.

XI	La plupart des constructions s'effondrent. Des ponts sont détruits. Les conduits souterrains sont détruits.
XII	Presque tout est détruit. Le sol bouge en ondulant. De grands pans de roches peuvent se déplacer.

Annexe 2 : Solide 185

SOLID185 est utilisé pour la modélisation en 3-D des structures solides. Il est défini par huit nœuds avec trois degrés de liberté à chaque nœud. Les translations sont suivant les directions x, y et z. L'élément peut être utilisé dans plusieurs domaines tels que la plasticité, hyper élasticité, déformation importante et les applications du fluage. Il a également la capacité de formulation mixte pour la simulation des déformations des matériaux élasto-plastiques presque incompressibles, et matériaux hyper élastique entièrement incompressibles (Ansys, 2003).