

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - تكنولوجيا

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MEMOIRE

Pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème :

L'effet des dispositifs en alliages à mémoire de forme sur le comportement dynamique des structures

Présenté publiquement le 06/07/2019 par :

SEGHIR Newfel Mahmoud

HOU MAT Ahmed Mohieddine

Devant le jury composé de :

M ^{me} . Meddane N.	Maitre de conférences B	Univ. Tlemcen	Président
M. Chitaoui H.	Doctorant	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^{me} . Benadla Z.	Maitre de conférences A	Univ. Tlemcen	Encadrant
M. Benkraled M. I.	Doctorant	Univ. Tlemcen	Co- encadrant

Dédicaces

J'ai vécu sans le savoir

Comme l'herbe qui pousse

Le matin, le jour, le soir ...

Et voilà que ce jour après tant d'années de travail et de labeur

Je vais enfin cueillir la rose de mon jardin

Je dédie ce travail

A ma plus belle étoile qui puisse exister dans l'univers, ma très chère mère, celle
à qui je

Souhaite une longue vie

A mon père qui n'a pas cessé de m'encourager et de se sacrifier pour que je
puisse franchir

Tout obstacle durant toutes mes années d'étude, que le Dieu me le garde en très

Bonne santé

A mes très chères sœurs que j'aime beaucoup

Nahla et Ikram

A mon très cher frère

Oussama

A toute la famille

Seghir et Lallam

A tous mes Amis

A tous ceux qui m'aiment

SEGHIR Newfel Mahmoud

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A mes très chers parents,

Grace à dieu et à eux que je suis devant vous aujourd'hui, leur soutien sans faille, sans qui rien n'aurait été possible, tout au long de mon cursus vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse, et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour ma formation.

A mon cher frère Salaheddine et mes chères sœurs Selma, Noussaiba et Soumia

Je vous souhaite un très bon avenir, plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité,

Je dédie aussi ce travail à mes enseignants, mes amis Fehd, Omar, Salim, Riad, Imad, Nadir, Mohamed, Toufik, Islem, Racim, Abderrazek, Moncif, Lotfi, Hamid, Sofiane, Ahmed, Amine, Newfel et ceux qui m'aiment. Merci à tous.

Je rends un grand hommage à ma famille qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes choix tans professionnels que privés.

Enfin, je souhaite adresser mes remerciements à tous ceux qui par leur aide et leur soutien m'ont permis de réaliser cette étude.

HOUMAT Ahmed Mohieddine

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et de la connaissance.

Nous adressons notre vif remerciement à nos encadreurs M^{me} BENADELA.Z pour sa compréhension ; ses conseils et ses orientations efficaces et M^r BENKRALED.I pour sa gentillesse et son aide.

Nous tenons également à remercier M^{me} MEDDANE.N d'avoir accepté de présider le jury de notre projet de fin d'études

Aussi, nous remercions M^{me} MEDDANE.N et M^r CHITAOUI.H qui ont bien voulu examiné notre travail. Leur présence va valoriser, de manière certaine, le travail que nous avons effectué.

Nous adressons également nos vifs remerciements à M^r Houmat.A et à notre ami M^r DIB.R pour leur gentillesse et leur aide.

Nous adressons également notre profonde gratitude à tous les professeurs de l'université ABOUBAKR BELKAID en particulier ceux du département de GENIE CIVIL. Votre enseignement a porté ses fruits.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Merci à tous

Résumé

L'étude des matériaux intelligents tels que les alliages à mémoire de forme (AMF) dans le domaine de génie civil, plus particulièrement en parasismique a pour but d'améliorer le comportement dynamique des structures.

Dans ce travail nous avons étudié dans un premier temps un modèle d'une structure simple, de forme prismatique dans laquelle nous avons cherché à déterminer l'effet des attaches des AMF sur la structure. Deux types d'attaches ont été testés, un premier dispositif consiste à coller les alliages sur la structure à l'aide des cornières. Le second, consiste à entourer la structure par une ceinture en acier. Par la suite, nous avons choisi d'étudier l'effet de masse sur l'efficacité des AMF sur l'amélioration du comportement des structures. Pour cet effet, deux structures de même caractéristiques géométriques globales ont été considérées mais la première étant pleine et la seconde évidée.

L'inspection des résultats nous a permis de constater que le changement du type de support n'a pas d'effet significatif sur le modèle choisi. Aussi, le fait d'évider la structure, ne nécessite pas l'utilisation des AMF.

Après quoi une structure réelle a été testée, de type minaret (minaret de Dolmabahçe en Turquie) qui a montrée l'efficacité des AMF sur le comportement dynamique de la structure.

Mots clés : Matériaux intelligents, Alliage à mémoire de forme, ANSYS, Modélisation.

Abstract

The study of smart materials such as shape memory alloys (SMA) in the field of Civil Engineering, more particularly in Para-seismic, aims to improve the dynamic behavior of structures.

In this work, we first studied a simple structure model of prismatic form in which we sought to determine the effect of the SMA attachments on the structure. Two types of fasteners were tested, a first device consists in bonding the alloys to the structure using corners. The second is to surround the structure with a steel belt. Subsequently, we chose to study the mass effect on the effectiveness of SMA in improving the behavior of structures. For this purpose, two structures with the same global geometrical characteristics were considered but the first being full and the second hollowed out.

The inspection of the results allowed us to note that the change of the type of support has no significant effect on the chosen model. Also, the fact of evoking the structure, does not require the use of SMA.

After which a real structure was tested, the Dolmabahçe minaret in Turkey, which showed the effectiveness of SMA on the dynamic behavior of the structure.

Keywords: Smart materials, Shape memory alloy, ANSYS, Modeling.

ملخص

تهدف دراسة المواد الذكية مثل السبائك الحافظة لذاكرة الشكل (AMF) في مجال الهندسة المدنية، وخاصة في مجال مقاومة الزلازل، الى تحسين السلوك الديناميكي للهياكل. في هذا العمل درسنا أولاً نموذجاً لبنية بسيطة ذات الشكل المنشوري الذي من خلاله بحثنا عن تأثير دعائم (AMF) على الهيكل، اختبرنا نوعين من الدعائم، الأول يتكون من لصق السبائك بالهيكل باستخدام داعم ذات الشكل L و آخر عبارة عن تطويق الهيكل بحزام فولاذي. بعد ذلك اخترنا دراسة تأثير الكتلة على فاعلية (AMF) في تحسين سلوك الهياكل، لهذا الغرض اخترنا هيكليين لهما نفس الخصائص الهندسية بحيث أن الأول مملوء والثاني مجوف.

من خلال فحص النتائج نلاحظ أن تغيير نوع الدعائم ليس له تأثير كبير على النموذج المختار، كما نلاحظ أيضاً أن الهيكل المجوف لا يحتاج (AMF).

في الأخير قمنا باختبار هيكل حقيقي من نوع مئذنة (مئذنة Dolmabahçe في تركيا) والتي أظهرت فاعلية (AMF) على السلوك الديناميكي للهيكل.

كلمات البحث: المواد الذكية، السبائك الحافظة لذاكرة الشكل، النموذجية.

Table de matières

Dédicaces	II
Dédicaces	III
Remerciements	IV
Résumé.....	V
Abstract.....	VI
ملخص.....	VII
Table de matières	VIII
Liste des figures	XI
Liste de tableaux	XV
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les Alliage à Mémoire de Forme.....	4
I.1. Introduction	5
I.2. Historique	5
I.3. Définition des AMF	5
I.3.1. Description générale du comportement mécanique des AMF	6
I.3.2. La transformation Martensitique-Austénitique.....	7
I.4. Les propriétés thermomécaniques des AMF	8
I.4.1. Effet mémoire simple sens (ESS).....	8
I.4.2. Effet mémoire double-sens (EMDS)	9
I.4.3. Effet d’amortissement (EA).....	10
I.4.4. Effet super-élastique (SE)	10
I.4.5. Effet caoutchoutique (EC)	11
I.4.6. Effet du polycristal	12
I.5. Les familles d’AMF	12
I.5.1. Les alliages à base de nickel titan	13
I.5.2. Les alliages à base de fer.....	13
I.5.3. Les alliages à base de cuivre	14
I.6. Applications générales des AMF (entremayer, 1996)	14

I.7. Applications des AMF en génie civil	18
I.7.1. Systèmes de dissipation d'énergie : portiques contreventés	18
I.7.2. Dispositifs d'isolation basés sur les AMF	19
I.7.3. Dispositifs d'amortissement pour structures de pont.....	20
I.7.4. Raccordements structuraux basés sur AMF	22
I.7.5. Rénovation structurales de bâtiments et des ponts avec des AMF	22
I.7.6. Les AMF comme matériau d'armature dans les structures en béton	24
I.7.7. Auto-réhabilitation à l'aide d'AMF	24
I.8. Conclusion	25
Chapitre II : Revue de la littérature.....	26
II.1. Introduction	27
II.2. Dispositifs de contrôle des vibrations.....	28
II.3. Dispositifs d'atténuation sismique basés sur des AMF	29
II.3.1. Systèmes de contreventement	30
II.3.2. Système d'isolation de base	33
II.3.3 Conteneurs de charnière de pont	34
II.3.4 Connexions structurelles	38
II.3.5. Applications aux ouvrages de génie civil existants	41
II.3.6. Applications aux structures historiques.....	44
II.4. Conclusion	47
Chapitre III : Etude du comportement des AMF sur une structure simple de forme prismatique	48
III.1. Introduction	49
III.2. Les principales hypothèses	49
III.3. Caractéristiques mécaniques des structures et des AMF	49
III.3.1. Caractéristiques mécaniques des structures	49
III.3.2. Caractéristiques mécaniques des AMF	50
III.3.3. Caractéristiques du support de l'AMF	51
III.4. Modélisation numérique des AMF	52
III.5. Analyse modale.....	52
III.6. Analyse dynamique transitoire de structure pleine avec AMF avec deux attaches différents	57

III.7. Analyse dynamique transitoire des structures pleine et évidée sans et Avec AMF	59
III.8. Comparaison des résultats de la structure pleine sans et avec AMF	61
III.8.1. Comparaison des résultats de la structure évidée sans et avec AMF	63
III.8.2. Comparaison des résultats entre la Structure pleine et la structure évidée avec AMF	65
III.9. Conclusion	68
Chapitre IV : Etude du comportement des AMF sur le minaret de Dolmabahçe	69
IV.1. Introduction	70
IV.2. Historique.....	70
IV.3. Caractéristiques géométriques.....	71
IV.4. Caractéristiques mécaniques	72
IV.5. Hypothèses de modélisation	72
IV.6. Étapes de modélisation.....	73
IV.7. Etude modale du minaret	73
IV.8. Analyse transitoire du minaret.....	75
IV.8.1. Points de mesure	75
IV.8.2. Modélisation.....	75
IV.8.3. Interprétation des résultats.....	77
IV.9. Conclusion	82
Conclusions et Perspectives	83
Références bibliographiques	85

Liste des figures

Figure 0 1 : Dégâts structuraux causés par les séismes.....	2
Figure I.1 : Le fonctionnement d'un alliage classique et un alliage à mémoire de forme	6
Figure I.2 : Structures de l'austénite et de la martensite d'un alliage Ni-Ti.....	7
Figure I.3 : Diagrammes de phase selon Brinson (Brinson, 1993).	8
Figure I.4 : Principe de l'effet mémoire simple sens d'après (Patoor et Berveiller, 1994)	9
Figure I.5 : L'effet mémoire double sens des AMF (Raymond, 2000).	10
Figure I.6 Effet super-élastique (Guenin, 1996)	11
Figure I.7 : Effet caoutchoutique (Guenin, 1996)	12
Figure I.8 : AMF à base de Ni-Ti	13
Figure I.9 : AMF à base de fer	14
Figure I.10 : Barres et fils en AMF à base de Cuivre.	14
Figure I.11 : Applications pseudo-élastiques commerciales des AMF (Cadres de lunettes) (<i>Melton, 1999</i>)	17
Figure I.12 : Application Biomédicale, fil dentaire (Echchchorfi,2013).....	17
Figure I.13 : les connecteurs, la bague d'étanchéité (https://www.intrinsicdevices.com/history.html).....	17
Figure I.14 : Les actuateurs brise roche(Benafan et noebe ,2015)	17
Figure I.15 : Représentation schématique des contreventements AMF pour les portiques	19
Figure I.16 : Dispositif d'isolement de base en AMF	20
Figure I.17 : Schéma du dispositif d'isolation AMF proposé (<i>Casciati.Faravelli et al, 2007</i>).....	20
Figure I.18 : Dommages dus à la fatigue par frottement et à la corrosion de contact (Saint Pont de Nazaire, France). (Dieng .Helberet al,2013).....	21
Figure I.19 : (a) Schéma de principe d'un câble d'haubanage incliné. (b) câble d'haubanage plan avec flèche fixée avec un AMF transversalement (Ben Mekki . Auricchio et al ,2011).....	21
Figure I.20 : Détails de la connexion poutre-poteau AMF (Alam. Youssef et al, 2008).	22
Figure I.21 : Clocher de l'église de San Giorgio à Trigna en Italie renforcé par AMF (Castellano et al ,2001).	23

Figure I.22 : Schéma de précontrainte de cylindres en béton par AMF (Benallal et Chitaoui, 2015).	23
Figure I.23 : Détails de renforcement des poutres renforcées AMF (Abdulridha , Palermo et al,2013).	24
Figure I.24 : Étapes des essais de la poutre en T (Zafar,2013).	25
Figure II.1 : Prototype à armature en acier à petite échelle avec des entretoises en SMA (AMF) (adapté de Boroscheck et al., 2007).	31
Figure II.2 : Attelle de dissipation et de recentrage d'énergie à base de AMF (Dolce et al., 2005).	32
Figure II.3 : Dispositif de contrôle des vibrations adaptatif pour systèmes de contreventement (Zhang et Zu, 2007).	32
Figure II.4 : Configuration des roulements en élastomère, des roulements à pendule à friction, des fils austénitiques SE et des amortisseurs magnétorhéologiques. Roues à faible frottement pour installation de fil SMA (Shook et al., 2008).	34
Figure II.5 : Démontage du pont au niveau de la charnière d'envergure lors d'un séisme (dos santos,2011).	35
Figure II.6 : Démontage du pont à la charnière d'envergure lors du tremblement de terre de Northridge en 1994 pour un pont existant et modernisation d'un pont avec des câbles de retenue en acier traditionnels (Johnson et al., 2008).	35
Figure II.7 : Solution de retenue avec éléments AMF dans un pont à plusieurs travées simplement appuyées (dos santos,2011).	36
Figure II.8 : Schéma de configuration de l'essai et du câble de retenue AMF (Johnson et al., 2008).	37
Figure II.9 : Configuration de l'essai du limiteur AMF (Johnson et al., 2008).	37
Figure II.10 : Schéma de configuration de l'essai et du câble de retenue AMF (Padgett et al., 2009).	39
Figure II.11 : Configuration de l'essai du limiteur SMA (Padgett et al., 2009).	39
Figure II.12 : Schéma du montage de test de connexion basé sur SMA (Ocel et al., 2004).	40
Figure II.13 : Configuration de test de connexion à grande échelle basée sur SMA (Ocel et al., 2004).	40
Figure II.14 : Détails de l'armature de l'élément poutre-colonne avec coupleur (dimensions en mm) (Alam et al., 2008).	41
Figure II.15 : Basilique Saint François d'Assise en Italie (Crocì, 2001 ; Modena,et Lourenco, 2004).	42
Figure II.16 : Cathédrale Saint-Feliciano en Italie (Castellano et al., 2000 ; Modena, et Lourenco, 2004).	42
Figure II.17 : Clocher de l'église S. Giorgio en Italie (Indirli et al., 2001).	43

Figure II.18 : Pont reliant Sherman Road au-dessus de US-31, Michigan, États-Unis (Juntunen, 2000 ; Ostowari, et Souroushian, 2000).....	44
Figure II.19: Le minaret de Mansourah.....	45
Figure II.20: Le minaret d'Ajloun.....	45
Figure II.21: assemblage des AMF par cornières (Minaret de Mansourah).....	46
Figure II.22: assemblage des AMF par des ceintures polygonales (Minaret d'Ajloun)	46
(Benallal et Chitaoui, 2015).	46
Figure II.23 : Positions des 3 points de référence (Minaret Mansourah)	46
(Barka et Soussi 2013).	46
Figure II.24 : Positions des 3 points de référence (Minaret d'Ajloun).	46
(Benallal et Chitaoui, 2015)..	46
Figure III.1 : Diagramme de contrainte en onction de déformation typique du comportement super-élastique.	50
Figure III.2 : les deux supports d'AMF	51
Figure III.3 : Définitions des AMF dans ANSYS.....	52
Figure III.4 : Structure pleine	53
Figure III.5 : Structure évidée	53
Figure III.8 : L'enregistrement du séisme de Boumerdess 2003.	57
Figure III.9 : Déplacement au sommet de la structure pleine	57
Figure III.10 : Vitesse au sommet de la structure pleine	58
Figure III.11 : Accélération au sommet de la structure pleine	58
Figure III.12 : L'enregistrement du séisme de Duzce 1999.....	59
Figure III.13 : La concentration des contraintes dans la structure pleine sans AMF..	60
Figure III.14 : La concentration des contraintes dans la structure évidée sans AMF.	60
Figure III.15 : Déplacement au sommet de la structure pleine	61
Figure III.16 : vitesses au sommet de la structure pleine	61
Figure III.17 : Accélération horizontale au sommet de la structure pleine	62
Figure III.18 : Variation de la contrainte à la base de la structure pleine	62
Figure III.19 : Déplacement au sommet de la structure évidée	63
Figure III.20 : vitesses au sommet de la structure évidée.	64
Figure III.21 : Accélération horizontale au sommet de la structure évidée	64
Figure III.22 : Variation de la contrainte à la base de la structure évidée	64

Figure III.23 : comparaison des déplacements au sommet des deux structures pleine et évidée ; avec AMF.....	66
Figure III.24 : comparaison des vitesses au sommet des deux structures pleine et évidée ; avec AMF	66
Figure III.25 : comparaison des accélérations horizontales au sommet des deux structures pleine et évidée ; avec AMF.....	67
Figure III.26 : comparaison des contraintes horizontales à la base des deux structures pleine et évidée ; avec AMF	67
Figure IV.1 : la mosquée de Dolmabahçe et ses deux minarets.	70
Figure IV.2 : Propriétés géométriques du minaret (Murat, 2013).	71
Figure IV.3 : Le modèle Eléments finis du minaret	73
Figure IV.4 : Les dix premiers modes de vibration.	74
Figure IV.5 : Positions des deux points de référence.....	76
Figure IV.6 : assemblage de l'AMF par ceinture.	76
Figure IV.7 : Variation des déplacements au point A, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99.....	77
Figure IV.8 : Variation des déplacements au point B, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99.....	77
Figure IV.9 : Variation des vitesses au point A, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99.....	78
Figure IV.10 : Variation des vitesses au point B, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99.....	78
Figure IV.11 : Variation de l'accélération au point A, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99.....	79
Figure IV.12 : Variation de l'accélération au point B, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99.....	79
Figure IV.13 : Variation de la contrainte au point A, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99.....	80
Figure IV.14 : Variation de la contrainte au point B, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99.....	80
Figure IV.15 concentration des contraintes au niveau du point B du minaret de dolambahçe sans AMF.....	81

Listes des tableaux

Tableau I.1: Domaines d'applications des AMF (entermeyer ,1996).	16
Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques des matériaux de construction.....	49
Tableau III.2: Les parametres des alliages à mémoire de forme	50
Tableau III.3: Caractéristiques mécaniques de l'AMF	51
Tableau III.4 : caractéristiques mécaniques des supports d'assemblage	51
Tableau III.5 : les périodes et les fréquences de la structure des dix premiers modes	54
Tableau III.6 : Résultats de comparaison entre les grandeurs des deux structures pleine et évidée sans et avec AMF	65
Tableau IV.1 : Propriétés mécaniques du calcaire de kufeki utilisées dans l'analyse (Murat, 2013).....	72
Tableau IV.2 : Les périodes et les fréquences des dix modes.	75
Tableau IV.3 : Résultats de comparaison entre les grandeurs du minaret aux points (A) et (B) sans et avec AMF.	81

Introduction Générale

Introduction

Le séisme est l'un des phénomènes naturels les plus dangereux, selon son intensité il peut provoquer l'endommagement, l'effondrement des structures où même l'arasement des villes entières. Le secteur urbain, les anciennes constructions et notamment les monuments historiques sont les plus affichés au risque des tremblements de terre parce qu'ils sont généralement moins résistants. A titre d'exemple, on cite quelques séismes des dernières décennies comme : Northridge en 1994, Kobe en 1995, Izmit en 1999 ; Boumerdes en 2003 (figure 0.1).

De 1994 à 2004, les séismes ont fait plus de 80 000 victimes dans le monde et actuellement, 1,2 milliard de personnes vivent sur des territoires où le risque sismique est élevé. Par la suite, l'évolution dans le domaine du génie parasismique a été nécessaire. Plusieurs méthodes d'analyse et de calcul des structures soumises à des sollicitations sismiques ont été développées pour améliorer le comportement des structures contre le séisme mais malgré tout cette évolution n'a pas été suffisante pour confronter ce risque naturel et pour répondre aux besoins d'ingénierie.

A cet égard, des projets de recherche dans le cadre de renforcement des structures ont développé des matériaux composés par plusieurs combinaisons de matériaux appelés « Matériaux intelligents » qui ont révélés de nouvelles propriétés assez intéressantes.

Effectivement, ces matériaux avec leurs propriétés mécaniques remarquables peuvent améliorer les performances dynamiques des structures et d'être avantageux pour différentes applications en génie civil.



a) Un pont détruit par le séisme de de Northridge 1994



b) un immeuble effondré par le séisme de Kobe 1995



c) Deux bâtiments après le séisme d'Izmit 1999



d) un bâtiment endommagé par le séisme de Boumerdes 2003

Figure 0 1 : Dégâts structuraux causés par les séismes

Problématique

La préservation des structures importantes et des monuments historiques est une mission principale parmi les responsabilités de l'ingénieur. Dans ce mémoire, nous avons cherché à répondre aux questions suivantes :

- Est-ce que l'utilisation des AMF limite les risques sismiques ?
- Est-ce que le choix des AMF avec deux supports différents influe sur les résultats ?
- Est-ce que l'application des AMF est efficace pour une structure pleine ou une structure évidée ?
- Est-ce que l'utilisation des AMF aide à préserver les monuments historiques ?

Objectif

Ce projet a pour objectif de minimiser les dégâts des constructions engendrés par les séismes en réduisant l'effet des différents facteurs qui peuvent menacer la stabilité de la structure.

Notre approche par rapport à l'étude de ce phénomène se définit comme suit :

- Observer l'effet des AMF sur une structure, en utilisant deux différents systèmes d'attaches pour ces alliages (cornières et ceinture).
- Etude de l'efficacité des AMF sur une structure pleine ou évidée.
- Etude sismique avec et sans AMF sur une structure de type minaret (minaret de Dolmabahce en Turquie) sans provoquer des altérations de l'édifice.

Méthodologie du travail

Le logiciel d'analyse par éléments finis ANSYS version 15.0, sera utilisé pour les modélisations tridimensionnelles étudiées, en raison de la possibilité qu'il offre pour la modélisation des AMF.

En premier temps, une étude comparative sera faite d'une simple structure de forme prismatique avec AMF en utilisant deux systèmes d'attaches (cornières et ceinture) afin de voir l'influence de ces attaches sur le comportement de la structure et sur l'efficacité des AMF. Cette étude sera faite par une excitation sismique du signal enregistré du séisme de Boumerdès (Algérie), qui a eu lieu le 21 mai 2003, de magnitude 6.8 sur l'échelle de Richter.

Par la suite, une analyse dynamique sera faite d'une simple structure avec et sans utilisation des AMF face à une excitation sismique plus forte, le signal du séisme en Turquie enregistré le 17 août 1999 avec une magnitude 7,4 sur l'échelle de Richter.

Par la suite, le minaret de la mosquée de Dolmabahçe (Turquie) a été sélectionné comme exemple d'application en raison de sa position en zone sismique et sa culture islamique.

A la fin de notre simulation, les résultats (contraintes, déplacements et accélérations du minaret sans et avec AMF durant les mouvements sismiques) sont analysés et comparés.

Notre mémoire sera achevé par une conclusion générale, qui englobera tous les résultats de notre étude et énumérera les différentes recommandations.

Chapitre I

Généralités sur les Alliages à Mémoire de Forme

Contenu

I.1. Introduction	5
I.2. Historique	5
I.3. Définition des AMF	5
I.4. Les propriétés thermomécaniques des AMF	8
I.5. Les familles d'AMF	12
I.6. Applications générales des AMF (entremayer, 1996)	14
I.7. Applications des AMF en génie civil	18
I.8. Conclusion	25

I.1. Introduction

Les matériaux ont toujours été au cœur des grandes innovations technologiques dans divers secteurs industriels, Durant ces dernières décennies, les ingénieurs et les chercheurs, entraînés dans une quête constante de solutions de plus en plus innovantes, ne cessent d'œuvrer à la recherche et à l'élaboration de nouveaux matériaux toujours plus performants ; ceci dans le but d'améliorer les applications développées en termes de poids, de résistance et de qualité.

Parmi les nouveaux matériaux, les alliages à mémoire de forme (AMF) ou en anglais « Shape Memory alloys » (SMA), à couplage thermomécanique. Ces derniers sont naturellement capables de changer leurs propriétés physiques en fonction de l'environnement dans lequel ils se trouvent ou en fonction de la sollicitation à laquelle ils sont soumis.

Les Alliages à Mémoire de Forme (AMF) sont en revanche peu présents dans le domaine du génie civil. Le retard pris dans ce domaine peut s'expliquer, en partie, par le cout élevé des AMF au regard de celui des matériaux de construction usuels, mais aussi par le manque de connaissance des mécanismes impliqués dans leur association à des matériaux de construction traditionnels tels que la maçonnerie ou le béton.

I.2. Historique

C'est en 1932 que Chang et Read ont découvert la transformation de la microstructure qui provoque les caractéristiques de mémoire de forme dans un alliage or-cadmium. Il a fallu ensuite attendre trois décennies, en 1962, pour que Buehler et al. Au Naval Ordnance Laboratory découvrent un alliage nickel-titane (Ni-Ti) qui présentait également l'effet mémoire de forme (Adoum Waibaye, 2016), puis en 1963 l'effet mémoire a été mis en évidence sur un alliage nickel-titane. En 1969 la première application industrielle est apparue avec l'utilisation de manchons en alliage Ni-Ti pour raccorder des tuyauteries hydrauliques sur des chasseurs F14 (Ellouze, 2009). Après la NASA fut pionnière en la matière en utilisant largement les AMF dans différents organes des navettes et engins spatiaux.

I.3. Définition des AMF

Les alliages à mémoire de forme (AMF) se distinguent des autres alliages par leurs comportements thermomécaniques très remarquables. L'effet mémoire de forme, qui a donné son nom à cette famille d'alliages, ne représente qu'un des nombreux comportements spécifiques de ces matériaux. Ces alliages à mémoire de forme retrouvent automatiquement ou par chauffage leur forme initiale même après de fortes déformations.

Les propriétés pseudo élastiques des alliages à mémoire de forme (superplasticité, mémoire de forme) reposent sur l'existence d'une transformation de phase à l'état solide appelée transformation martensitique thermo élastique.

La figure I.1 présente une comparaison entre un alliage classique et un alliage a mémoire de forme qui revient à sa forme initiale après échauffement.

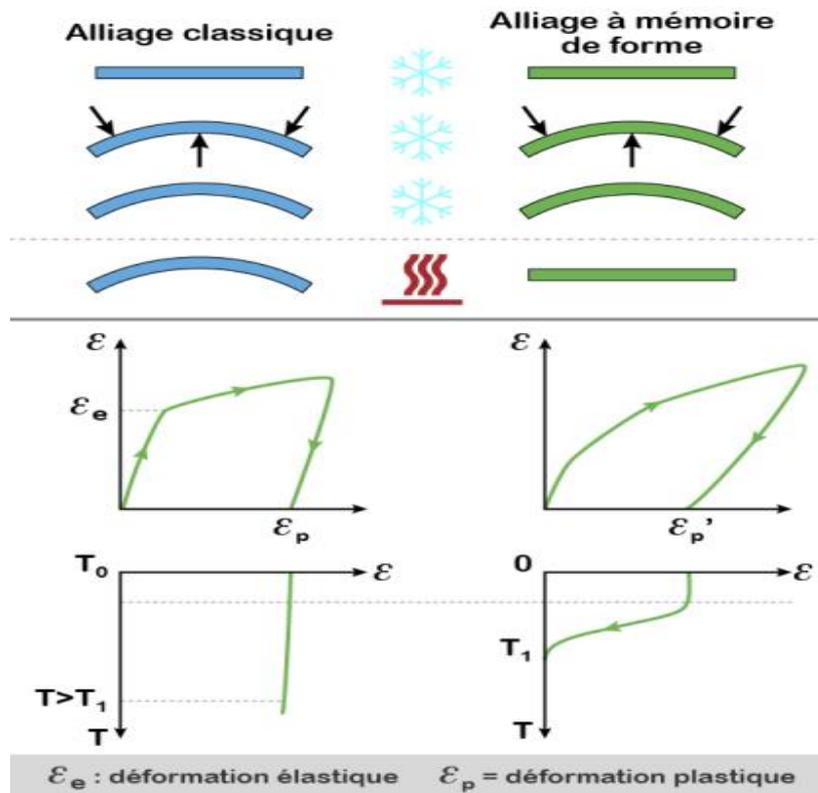


Figure I.1 : Le fonctionnement d'un alliage classique et un alliage à mémoire de forme (www.campus.mines-douai.fr)

I.3.1. Description générale du comportement mécanique des AMF

Les AMF sont généralement décrits par les déformations qu'ils subissent. Ainsi, nous allons distinguer deux sortes de comportements physiques de ces alliages :

1. les petites déformations élastiques linéaires dont sa nature physique est bien connue dans la mécanique des corps déformables.
2. les grandes déformations non linéaires qui sont induites, soit par une transformation de phase, soit par un réarrangement de la structure granulaire de la phase en présence. Dans le premier cas, il y a une transition entre deux états thermodynamiques de base: la phase à haute température dite austénite, et la phase à basse température dite martensite ; le deuxième cas

est caractérisé par un changement de la structure de la martensite présente dans le matériau (Oleg Volkov, 1999).

I.3.2. La transformation Martensitique-Austénitique

En 1897 l'allemand Adolf Martens observe que « la transformation martensitique » est associée à la **transformation** de la phase mère « l'austénite » des alliages en « martensite ».

La transformation martensitique est une transition structurale présentant une déformation homogène de réseau cristallographique, constituée essentiellement par un **cisaillement**.

Dans les AMF, l'austénite est stable à très haute température (environ 900°C), mais elle peut être maintenue à plus basse température par une trempe : on parle alors de phase métastable. La symétrie de l'austénite est de type BCC (cubique à corps centré) dans tous les AMF connus. La symétrie de la martensite dépend quant à elle de la composition chimique de l'AMF et du procédé d'élaboration du matériau. La figure I.2 montre le déplacement collectif et coopératif des atomes dans une transformation de l'austénite en martensite.

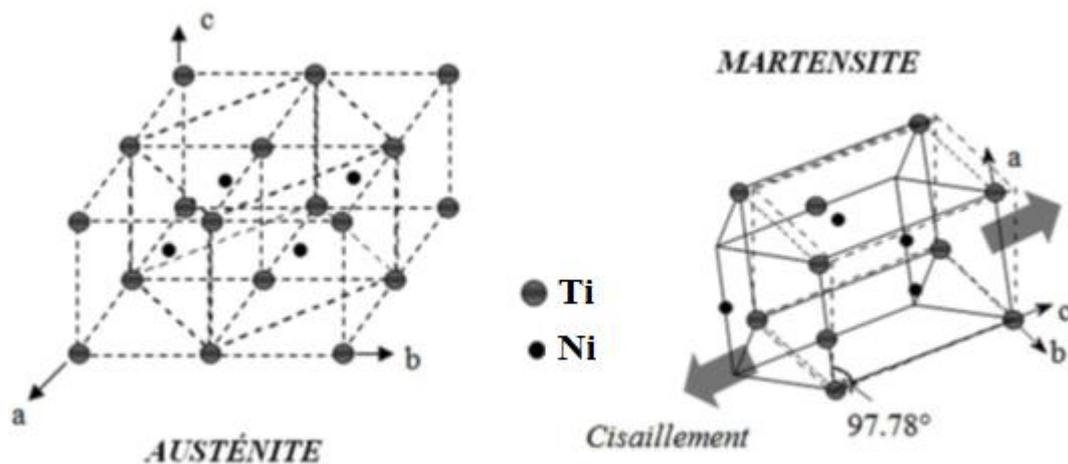


Figure I.2 : Structures de l'austénite et de la martensite d'un alliage Ni-Ti (Jordan, P. Rocher, 2009)

La martensite est obtenue à partir de l'austénite par application d'une contrainte mécanique ou par diminution de la température. Par convention, on appelle :

- Austénite (A) : la phase haute température.
- Martensite (M) : la phase basse température.

Lors du refroidissement du matériau :

La transformation directe : austénite \rightarrow martensite commence à une température M_s (Martensite Start). La transformation est complète à la température M_f (Martensite Finish) (figure 2.3) où le matériau est totalement martensitique. Entre ces deux températures les deux phases coexistent.

Lors du chauffage :

La transformation inverse : martensite \rightarrow austénite débute à une température A_s (Austenite Start) et se termine à la température A_f (Austenite Finish) (figure I.3) où le matériau est complètement austénitique (ECHCHORFI, 2013)

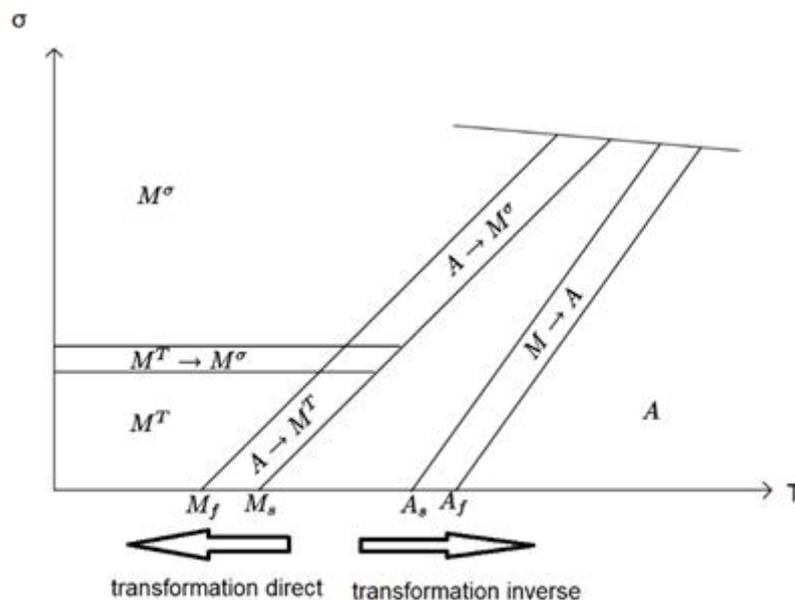


Figure I.3 : Diagrammes de phase selon Brinson (Brinson, 1993).

I.4. Les propriétés thermomécaniques des AMF

C'est la transformation martensitique qui est à l'origine des propriétés thermo-élastiques des AMF.

I.4.1. Effet mémoire simple sens (ESS)

L'effet mémoire simple sens est observé lorsqu'un échantillon d'AMF à basse température (température inférieure à M_f) donc constitué de martensite (auto-accommodante) est soumis

à un chargement mécanique (Karine TAILLARD, 2006), il est défini comme le recouvrement de forme par chauffage après déformation « pseudo-plastique » en phase martensitique (Adoum Waibaye, 2016).

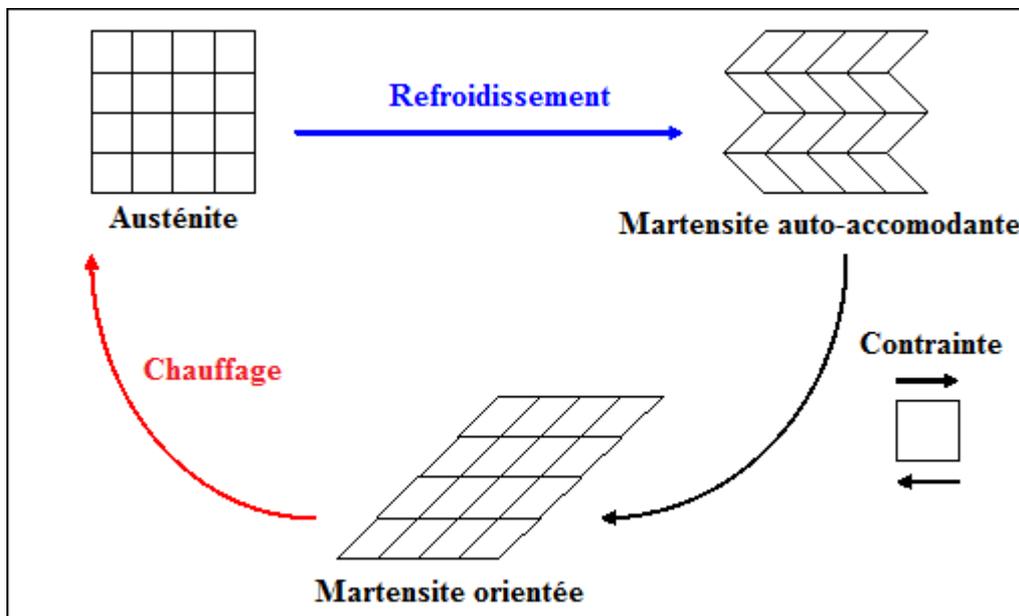


Figure I.4 : Principe de l'effet mémoire simple sens d'après (Patoor et Berveiller, 1994)

I.4.2. Effet mémoire double-sens (EMDS)

A haute température dans le domaine austénitique, une contrainte est appliquée, puis l'échantillon est refroidi à une température inférieure à M_f toujours sous contrainte. Lorsque la transformation de l'austénite vers la martensite se produit, celle-ci se fait de sorte que le matériau puisse « accommoder » la déformation appliquée sans pour autant introduire de défauts de type dislocation. Après chauffage, l'échantillon retourne à sa forme haute température car il n'y a pas eu création de défaut. La répétition de ce cycle plusieurs fois permet à l'échantillon de se « rappeler » de sa forme à basse température. On parle alors d'éducation. Ainsi, lorsque la température change, le matériau passe naturellement et sans application d'une contrainte, de sa forme haute température à sa forme à basse température (GUILLAND, 2017).

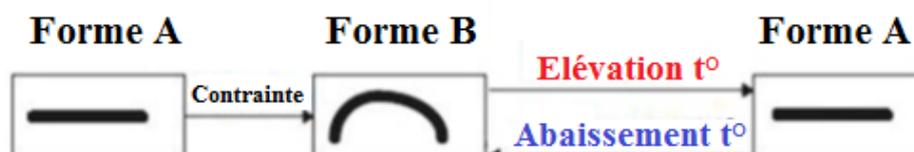


Figure I.5 : L'effet mémoire double sens des AMF (Raymond, 2000).

I.4.3. Effet d'amortissement (EA)

L'amortissement mécanique des matériaux, encore appelé frottement interne Q^{-1} , est le résultat d'une transformation irréversible d'énergie mécanique en énergie thermique dissipée. Cette propriété présente également un grand intérêt pour des applications techniques. Alliages à mémoire de forme présentés se distinguent cependant par une capacité d'amortissement largement supérieure à celle des matériaux usuels.

Le frottement interne Q^{-1} est donné par :

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

Où ΔW présente la perte d'énergie par cycle et W l'énergie mécanique du système.

I.4.4. Effet super-élastique (SE)

À température constante T_1 au-dessus de la température A_f lorsque l'on applique une contrainte croissante et que celle-ci atteint la valeur critique, la variante la plus favorisée est induite et produit une déformation importante dans le sens de la contrainte. Cette déformation disparaît à contrainte ; c'est l'effet super-élastique (Guénin, 1996).

Les alliages à mémoire de forme présentent une capacité de déformation réversible très supérieure à d'autres matériaux. En effet, elle peut atteindre jusqu'à 10 %, contre 1,2 % pour les matériaux usuels. Ce qui signifie qu'un échantillon de longueur initiale de un mètre peut être étiré de 10 centimètres et qu'il retrouvera sa forme initiale (GUILLAND, 2017).

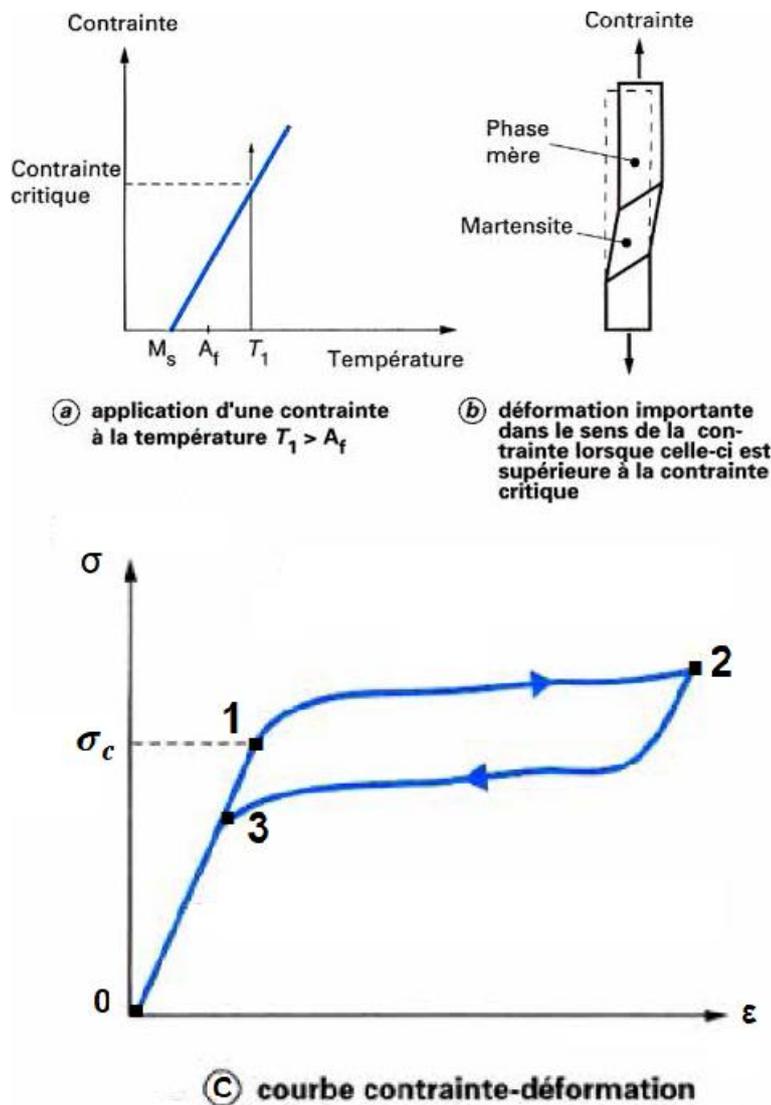


Figure I.6 Effet super-élastique (Guenin, 1996)

0-1 : Déformation élastique habituelle

1-2 : déformation élastique due à la formation de martensite

2-3 : La transformation inverse se produit lors de la décharge en ramenant l'échantillon en phase austénitique

I.4.5. Effet caoutchoutique (EC)

Cet effet est observé pour la première fois en 1932 sur un alliage or-cadmium, constitue la première manifestation étudiée de l'effet de mémoire de forme (Baidi, 2009), une partie de la déformation d'un échantillon martensitique est réversible par mouvement des interfaces entre variantes lors de l'arrêt de la contrainte. Le déplacement des interfaces des variantes de martensite consomme de l'énergie ainsi l'alliage possède de remarquables propriétés d'amortissement (Jordan et Rocher, 2010).

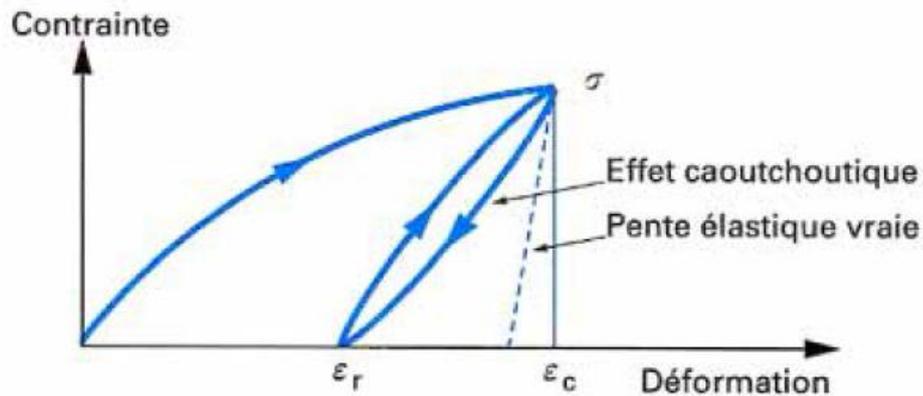


Figure I.7 : Effet caoutchoutique (Guenin, 1996)

Lorsque la contrainte disparaît, une partie de la déformation ε_c subsiste : ε_r .

La déformation réversible ε_r à ε_c par l'application ultérieure de σ correspond à l'effet caoutchoutique (pseudo-élastique) .

I.4.6. Effet du polycristal

Pour un monocristal, la déformation de transformation atteignable est supérieure à celle d'un polycristal : 10% (Vivet, 1999) contre 6% (Entemeyer, 1996) pour un alliage Cu-Al-Be. L'écroutissage associé à la transformation de phase est également plus faible pour un monocristal : on parle de "plateau de transformation". Enfin, dans un monocristal, lorsque l'on applique une contrainte, une seule variante de martensite apparaît (Vivet, 1999), contrairement à ce qui se passe dans un polycristal, où l'on observe plusieurs variantes de martensite par grain (Patoor et al, 1995). Ce phénomène est dû à l'interaction entre les grains qui provoque une hétérogénéité des contraintes. Par la suite, nous n'étudierons que des polycristaux.

I.5. Les familles d'AMF

Généralement, on dénombre trois familles majeures d'Alliages à Mémoire de Forme (AMF), les AMF à base de Nickel-Titane (NiTi), à base de Cuivre (Cu) et à base fer. Elles se distinguent par leurs compositions chimiques, leurs propriétés mécaniques et physiques, leurs comportements thermomécaniques et leurs applications industrielles.

I.5.1. Les alliages à base de nickel titan

Les alliages Ni-Ti utilisés ont une composition très proche de la composition équiatomique (50%Ni - 50%Ti) (Echchorfi, 2013). L'utilisation de cet alliage ne cesse d'augmenter du fait de leur :

- Bonne résistance à la corrosion.
- Des propriétés thermomécaniques assez remarquables (l'effet de mémoire de forme simple et double sens, l'effet super-élastique, l'amortissement ...).
- Des propriétés mécaniques excellentes (déformation de transformation importante et une bonne résistance à la fatigue).
- L'amplitude de déformation pseudo-plastique qui peut aller jusqu'à 8%.



Figure I.8 : AMF à base de Ni-Ti

I.5.2. Les alliages à base de fer

La famille des alliages ferreux, présente des avantages par rapport aux autres familles d'alliage (Khalil, 2012), parmi ces avantages :

- Faible cout ;
- Bonne usinabilité ;
- Bonne soudabilité.

Inconvénients :

- Effet de mémoire (3 à 4%) inférieure à la famille de Ni-Ti (8%) ;
- Faible résistance à la corrosion ;
- La métallurgie de ces alliages est complexe.

Utilisation :

- Connecteur (domaine pétrolier, secteur ferroviaire) ;
- Amortisseurs (génie civil).



Figure I.9 : AMF à base de fer

I.5.3. Les alliages à base de cuivre

Avantages (entermayer ,1996) :

- Faible cout par rapport au NiTi
- Facile a fabriqué et à mettre en œuvre
- Une bonne conductivité électrique et thermique

Inconvénients (entermayer ,1996) :

- Faible résistance à des températures élevées
- Limite d'élasticité faible



Figure I.10 : Barres et fils en AMF à base de Cuivre.

I.6. Applications générales des AMF

Les domaines d'application d'AMF peuvent être classés en quatre classes :

1. Actuateurs

- Changement de forme et production d'un travail (ressort, lames)
- Electriques
- Thermiques

2. Connecteurs

- Maintien, serrage, positionnement de pièces, attaches de toutes sortes

3. Super-élastiques

- Déformation importante et reprise de la forme initiale une fois la contrainte supprimée

4. Amortisseurs

- Diminution du niveau de bruit et des vibrations

Les connecteurs utilisent l'effet mémoire double sens et le retour contraint. Le but est de produire une force (de serrage par exemple) importante.

Les applications de la super-élasticité sont liées aux importantes déformations réversibles qu'il est possible d'obtenir.

Les amortisseurs s'utilisent afin de diminuer les niveaux de vibration et de bruit.

Ces différentes classes de comportement peuvent être utilisées dans tous les secteurs industriels. Les principaux succès proviennent des applications de la super-élasticité dans le secteur du textile (La qualité du maintien se trouve dans la fabrication des chapeaux...).

Le tableau I.1 présente les différents domaines d'application des AMF

SEGHIR & HOUMAT		Domaine		D'application		Chapitre I	
Secteurs industriels	Actuateurs		Connecteur	Super-élastique	Amortisseurs		
	Electriques	Thermiques					
Electrotechnique	Contrôle du déglacement des lignes de haute tension. Contrôle du fléchissement des lignes de haute tension Disjoncteur	Fusibles réarmables pour transformateur	–	–	–		
Bâtiment Pont	–	Valve anti-feu Système de détection d'incendie	–	Création de précontrainte	Renforcement du béton		
Automobile /Transport	-Activateurs dans les véhicules	–	Embouts pour cadre de vélo	–	–		
Aérospatial	–	–	Manchons d'accouplements	–	–		
Electronique	–	Relais de sécurité	Connecteurs à grand nombre d'entrées -sorties	–	–		
Agro-alimentaire	–	Thermomarqueurs	–	–	–		
Mécanique divers	–	–	Embouts de tuyauterie industrielle	–	Revêtement anti-cavitation -amortisseur mécanique -rondelles		
Lunetterie	–	–	–	Branche de lunette super-élastique	–		
Textile	–	–	–	Fils super-élastique	–		
Biomédical	–	–	–	Fils dentaires	Prothèses dentaires		

Tableau I.1: Domaines d'applications des AMF (entermeyer ,1996).

Les figures suivantes présentent quelques exemples d'application des AMF dans différents domaines.



Figure I.11 : Applications pseudo-élastiques commerciales des AMF (Cadres de lunettes) (Melton, 1999)



Figure I.12 : Application Biomédicale, fil dentaire (Echchorfi, 2013)

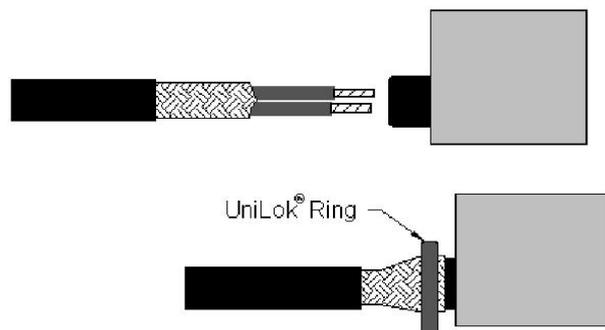


Figure I.13 : les connecteurs, la bague d'étanchéité (<https://www.intrinsicdevices.com/history.html>)



Figure I.14 : Les actuateurs brise roche(Benafan et noebe ,2015)

I.7. Applications des AMF en génie civil

L'utilisation des alliages à mémoire de forme (AMF) est de plus en plus développée au cours des dernières décennies. De nombreux chercheurs ont mené des activités intensives visant à explorer des dispositifs et des applications innovants en utilisant ces matériaux intelligents. Les AMF possèdent des caractéristiques physiques et mécaniques qui font des candidats de choix. Pour l'utilisation dans les applications d'ingénierie structurelle. Telle que L'auto-adaptation des structures. Au cours des dernières décennies, des efforts de recherche intensifs ont été déployés pour l'ingénierie des structures, pour objectif d'utiliser des techniques d'ingénierie intelligentes pour la conception et la construction de bâtiments. Dans les applications de génie civil, avec un accent particulier sur les systèmes sismiques du contrôle de la réponse des structures. Plusieurs systèmes et dispositifs innovants, utilisant principalement les AMF à base de Cu et Ni-Ti ont été développés pour absorber une partie de l'énergie sismique et réduire les forces sismiques agissant sur une structure, pour le contrôle de l'amortissement, le contrôle de la structure rénovation, etc. Les AMF ont été intégrés dans ces dispositifs sous de nombreuses formes possibles, tels que les fils simples et toronnés, les câbles, les rubans, les tubes et les barres. Un certain nombre de caractéristiques physiques et mécaniques des AMF peut être considéré comme souhaitable du point de vue de l'ingénierie structurelle.

Les propriétés des AMF peuvent être exploitées dans les applications de génie civil, telles qu'une bonne résistance à la fatigue et à la corrosion, , une bonne capacité d'amortissement et une bonne polyvalence en termes de formes et de configurations possibles.

Dans les sections suivantes, une variété d'applications AMF dans le domaine de l'ingénierie structurelle est présentée et divisée en plusieurs sections selon le domaine d'application (Iecce et concilio, 2014).

I.7.1. Systèmes de dissipation d'énergie : portiques contreventés

En raison des caractéristiques dynamiques des risques naturels, des concepts innovants et des systèmes de dissipation de l'énergie utilisés dans le cadre de la sécurité des structures, ont été proposés récemment, et ils sont actuellement à divers stades de développement. En particulier, les dispositifs passifs ont acquis une attention remarquable dans le domaine de l'ingénierie sismique. L'avantage de prévenir les dommages aux éléments non structuraux et structuraux. Dans des conditions sismiques modérées. Parmi les dispositifs passifs susceptibles d'être utilisés pour ces objectifs, les contreventements sont une solution d'ingénierie largement utilisée, en particulier dans les domaines suivants pour les structures en acier.

Les deux facteurs clés du succès de l'utilisation de ces matériaux sous forme de contreventements pour les cadres de structures sont :

- La super-élasticité.
- La dissipation d'énergie par comportement hystérétique.

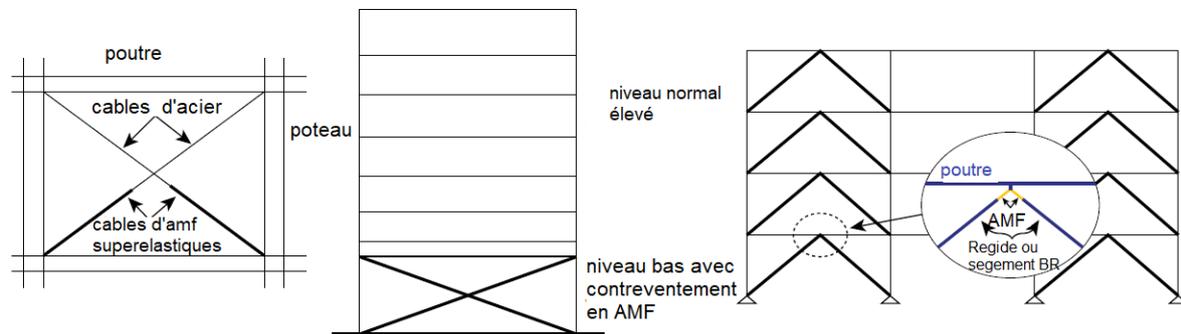


Figure I.15 : Représentation schématique des contreventements AMF pour les portiques

I.7.2. Dispositifs d'isolation basés sur les AMF

Lors des récents tremblements de terre, les systèmes d'isolation de la base se sont avérés efficaces pour atténuer la réponse sismique des structures des bâtiments et des ponts. Au cours des dernières décennies, le développement d'applications d'ingénierie dans le domaine de l'isolation sismique s'est considérablement développé, introduisant des matériaux, technologies et systèmes techniques innovants et performants parmi ces matériaux les AMF. Ces derniers présentent plusieurs avantages :

- Capacité d'auto-centrage.
- Grande rigidité pour les petits déplacements.
- Bonne capacité de dissipation d'énergie.
- D'autres propriétés importantes communes à tous les types de dispositifs basés sur l'AMF, telles que la résistance à la fatigue (Eggeler Get al, 2004) ; (DesRoches R,2004) la durabilité élevée, l'absence de dégradation due au vieillissement, une sensibilité plutôt limitée aux températures compatibles avec les applications types du génie civil.

La figure 2.15, présente un exemple de dispositif d'isolement :



Figure I.16 : 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.

La figure I.17 illustre les paramètres géométriques caractérisant l'assemblage du dispositif :

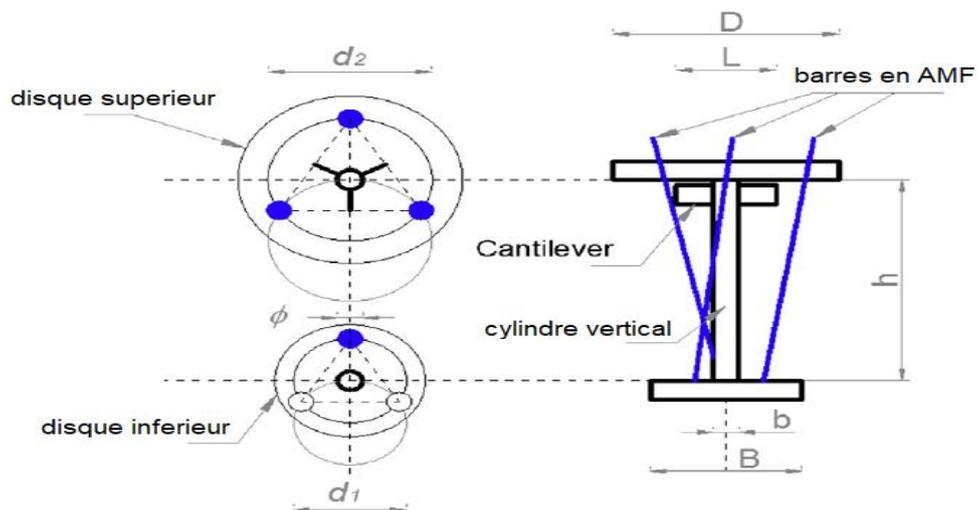


Figure I.17 : Schéma du dispositif d'isolation AMF proposé (Casciati, Faravelli et al, 2007)

I.7.3. Dispositifs d'amortissement pour structures de pont

Plusieurs études ont été menées pour étudier la possibilité d'utiliser des matériaux AMF dans les dispositifs de prévention de l'amortissement dans les ponts à travées multiples, en surmontant certaines des limitations. De dispositifs conventionnels à base d'acier, y compris les serre-câbles en acier et les tiges d'acier.

En particulier, de nombreuses infrastructures civiles impliquent l'utilisation de câbles structuraux, qui sont cruciaux. Composants de ponts à haubans, de ponts suspendus et des

ponts en béton précontraint. En raison de l'exposition environnementale et fonctionnelle pendant la durée de vie du pont, ces câbles sont sujets à deux principaux mécanismes d'endommagement :

- Le phénomène de corrosion



Figure I.18 : Dommages dus à la fatigue par frottement et à la corrosion de contact (Saint Pont de Nazaire, France). (Dieng .Helberet al,2013)

- Le phénomène de fatigue

Les amortisseurs à base d'AMF ont été utilisés comme systèmes d'amortissement externes pour obtenir une meilleure efficacité et combiner de bonnes propriétés de résistance à la corrosion. Ces matériaux sont des candidats idéaux pour faire face aux problèmes d'haubanage en raison de leurs propriétés spécifiques (super-élastique et amortissant).

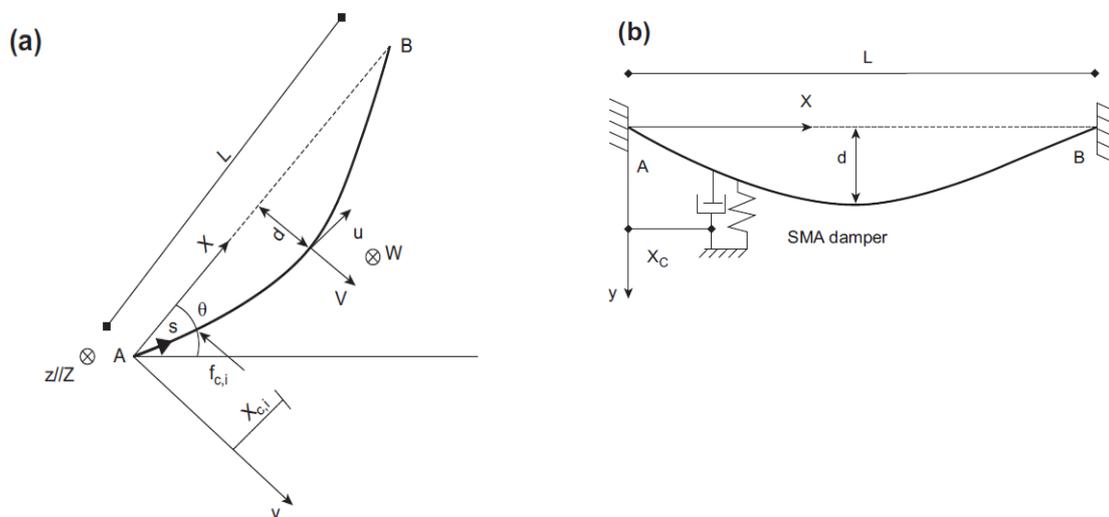


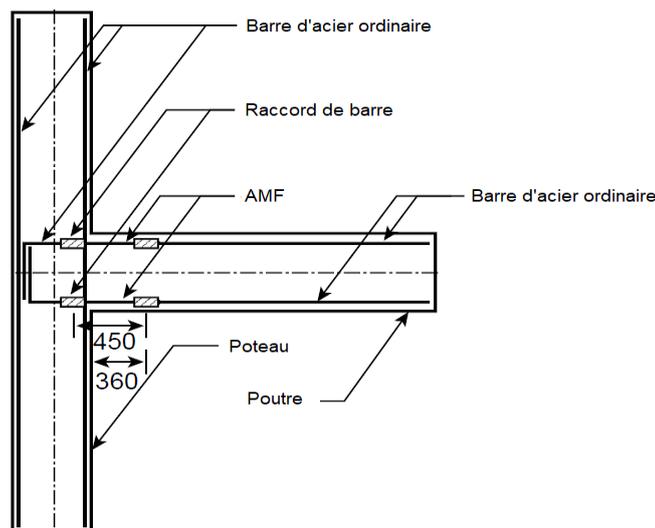
Figure I.19 : (a) Schéma de principe d'un câble d'haubanage incliné. (b) câble d'haubanage plan avec flèche fixée avec un AMF transversalement (Ben Mekki . Auricchio et al ,2011).

I.7.4. Raccordements structuraux basés sur AMF

Les connexions poutre-poteau en acier sont reconnues comme un système structural approprié contre les charges sismiques. Néanmoins, des défaillances fragiles d'un grand nombre de connexions de ce type se sont produites. Plus tard, les tremblements de terre ont poussé plusieurs initiatives de recherche à créer des liaisons qui ont pu démontrer une performance plus robuste sous des charges sismiques. Pour résoudre ce problème et réduire les procédures de réparation coûteuses et difficiles, Plusieurs chercheurs ont examiné la possibilité d'utiliser des systèmes fondés sur les AMF pour contrôler la réponse structurale des raccordements sous forte intensité sismique, en particulier dans le cas des structures métalliques.

En particulier, les connecteurs AMF ont été conçus pour fournir des propriétés d'amortissement à la structure et tolèrent efficacement des déformations relativement importantes. De plus, la superplasticité Les AMF ont le potentiel de créer un mécanisme de recentrage ductile simplifié sur l'axe de la connexion en cas de forte demande de dérive en raison de leur capacité unique à se rétablir naturellement. Jusqu'à 8% de déformation, limitant ainsi les dégâts sur les principaux éléments de structure.

Figure I.20 : Détails de la connexion poutre-poteau AMF (Alam. Youssef et al, 2008).



I.7.5. Rénovation structurales de bâtiments et des ponts avec des AMF

Seul un petit nombre de rénovations à grande échelle des structures existantes ont été réalisées grâce à la mise en œuvre de systèmes fondés sur les AMF, principalement pour la réhabilitation des structures historiques (Castellano et al ,2001) et (Indirli et al.2001) ont signalé la réhabilitation d'un clocher, à savoir S. Giorgio, située à Trignano, en Italie. Un système de modernisation innovant un dispositif de connexion super-élastique à base d'AMF

a été mis en place pour augmenter la stabilité de la tour en conservant le concept original (historique) de la structure.

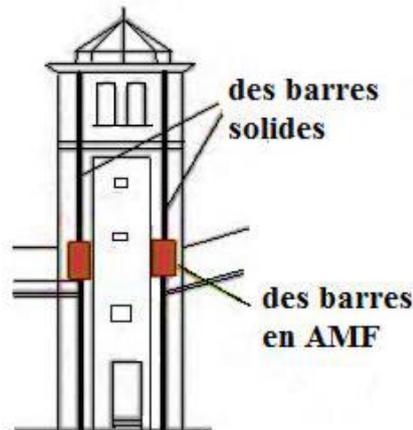


Figure I.21 : Clocher de l'église de San Giorgio à Trigna en Italie renforcé par AMF (Castellano et al ,2001).

L'absence de ductilité en flexion est un problème courant dans les piles de ponts caractérisées par rapport longueur-profondeur relativement élevé en raison de la forte demande de déplacement du mouvement du sol. En ce qui concerne les systèmes actifs, des systèmes basés sur les AMF ont été proposés avec succès, principalement en raison de leur effet de mémoire de forme. Après avoir subi de grandes déformations (6%). Puis enroulé autour de l'élément en béton dans le coffrage Shin et Andrawes sous forme des spirales. gaines en fil AMF ont augmenté la résistance maximale et la ductilité. Par rapport aux cylindres en béton ordinaire sans dégradation de la résistance à la flexion (fig. I.22).

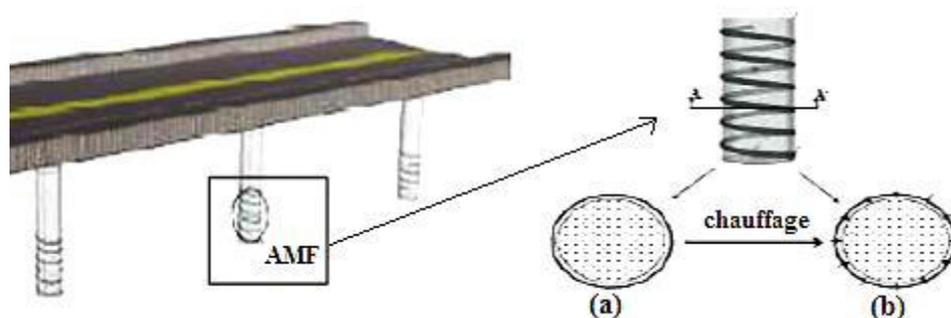


Figure I.22 : Schéma de précontrainte de cylindres en béton par AMF (Shin, 2012).

I.7.6. Les AMF comme matériau d'armature dans les structures en béton

L'utilisation d'AMF super-élastiques comme matériau d'armature dans les structures en béton suscite de plus en plus d'intérêt dans le milieu de la recherche. En effet, en raison des propriétés mécaniques particulières des AMF par rapport à l'acier ordinaire, l'utilisation de l'AMF comme armature peut modifier la réponse des structures en béton armé sous des charges sismiques et donc réduire les déformations permanentes dans les éléments de structure. De plus, la capacité de réponse avec une hystérésis stable permet aux cadres en béton armé AMF d'obtenir des propriétés de résistance et de ductilité similaires à celles du béton armé avec des barres déformées classiques.

I.7.7. Auto-réhabilitation à l'aide d'AMF

D'autres utilisations de l'AMF en génie civil sont liées à l'auto-restauration d'éléments structuraux, exploitant principalement l'effet de mémoire de forme des matériaux AMF. Li et al.67 ont étudié la relation entre le taux de récupération et la température du NiTi AMF. En chauffant à différentes intensités d'électricité, de simples poutres en béton ont été testées dans le but d'évaluer l'utilisation des fils NiTi AMF comme dispositifs de réparation d'urgence. Les résultats des essais ont montré que les fils NiTi AMF pouvaient fermer les fissures dans le béton et réduire efficacement la déformation de la poutre en béton sous chauffage électrique.

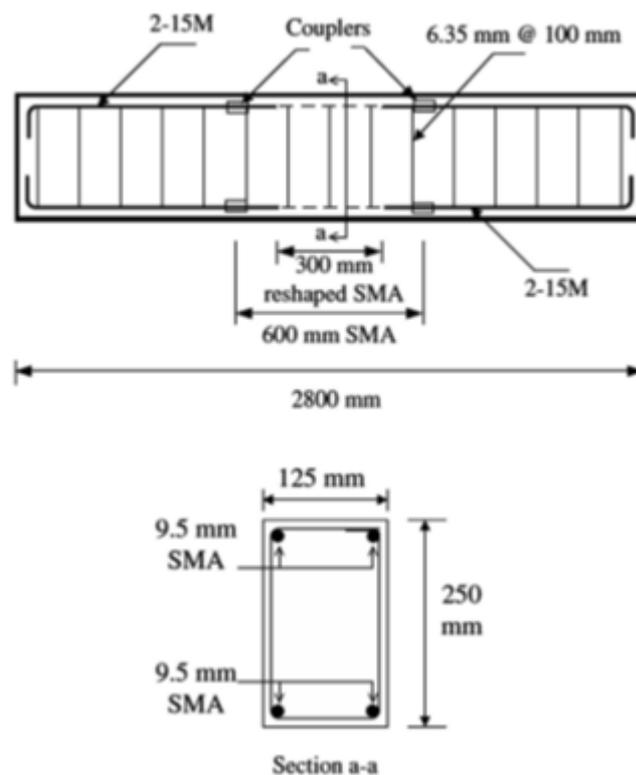


Figure I.23 : Détails de renforcement des poutres renforcées AMF (Abdulridha , Palermo et al,2013).

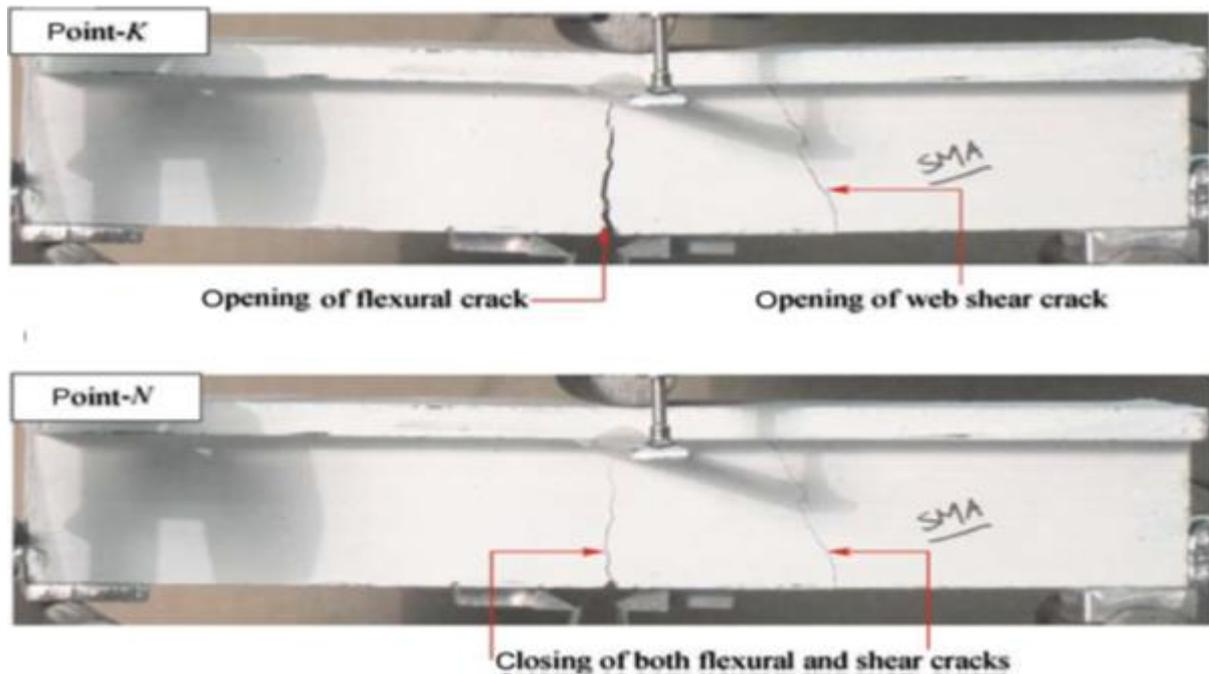


Figure I.24 : Étapes des essais de flexion de la poutre en T (Zafar,2013).

I.8. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté une vue générale sur les alliages à mémoire de forme (historique, définition, les propriétés et les familles des AMF) ainsi que leurs applications dans les différents domaines. En plus, nous avons montrés les différentes utilisations des AMF dans le génie civil, essentiellement dans le bâtiment et les ponts.

Il a été montré comment les AMF peuvent être utilisés avec succès pour la dissipation d'énergie et l'actionnement, le contrôle des vibrations et l'auto-adaptation des structures, ces AMF sont en revanche peu présents dans le domaine du Génie civil. Le retard pris dans ce domaine peut s'expliquer, en partie, par le coût élevé des AMF au regard de celui des matériaux de construction usuels, mais aussi par le manque de connaissance des mécanismes impliqués dans leur association à des matériaux de construction traditionnels tels que la maçonnerie ou le béton.

Alors, pour développer l'utilisation des AMF dans le domaine génie civil, il est préférable de disposer une norme dont le but de rassembler un certain nombre de définitions de termes pris parmi ceux qui sont le plus couramment utilisés dans le domaine des alliages à mémoire de forme et de fournir des méthodes de mesure les caractéristiques principales du matériau.

Dans le chapitre suivant, nous allons donner des exemples d'applications sur l'utilisation des AMF dans le domaine de génie civil.

Chapitre II

Revue de la littérature

Contenu

II.1. Introduction	27
II.2. Dispositifs de contrôle des vibrations.....	28
II.3. Dispositifs d'atténuation sismique basés sur des AMF	29
II.4. Conclusion	47

II.1. Introduction

L'accent actuellement mis sur la dissipation d'énergie dans la conception des structures de génie-civil rend de plus en plus attrayants les matériaux capables de réduire les vibrations. Les caractéristiques souhaitées de haute résistance, rigidité, et tolérance aux environnements défavorables sont, pour la plupart des matériaux, incompatibles avec des capacités d'amortissement élevées. Bien que les matériaux viscoélastiques puissent présenter des capacités d'amortissement élevées, ils présentent souvent une résistance insuffisante. Au cours des dernières années, un ensemble d'alliages métalliques à amortissement élevé, combinant un amortissement inhérent élevé et des propriétés de résistance relativement élevées, a été progressivement introduit dans les nouvelles applications technologiques. Ils sont appelés alliages à mémoire de forme. Deux de leurs propriétés les plus importantes sont ce que l'on appelle l'effet de mémoire de forme et la super-élasticité.

L'effet de mémoire de forme est une propriété unique de certains alliages présentant des transformations martensitiques, qui permet au matériau de retrouver sa forme d'origine après avoir été déformé par chauffage à une température critique. La super-élasticité est associée à de grandes déformations non-linéaires récupérables (jusqu'à 8%) au cours d'un cycle mécanique de chargement et de déchargement (Reynolds, 2003). Le physicien suédois Arne Olander est associé à la découverte de la super-élasticité en 1932, lorsqu'il rencontre pour la première fois le comportement du SE en utilisant un alliage AuCd (Otsuka et Wayman, 1998). Greninger et Moorandian (1938) ont observé la disparition et la réapparition d'une structure cristalline martensitique en augmentant et en diminuant la température d'un alliage CuZn. Kurdjumov et Khandros (1949) et Chang et Read (1951) ont largement décrit les propriétés thermoélastiques de la phase cristalline martensitique d'un alliage AuCd. Dans les années 1960, Buehler et Wiley découvrent les alliages NiTi alors qu'ils travaillaient au Laboratoire Naval d'Ordnance (LON). Le LON, aujourd'hui disparu, se trouvait autrefois à White Oak, dans le Maryland, et fut le théâtre de travaux considérables ayant eu un impact concret sur la technologie mondiale. En hommage à leur lieu de travail, ils ont baptisé cette famille d'alliages le Nitinol (Hodgson et Brown, 2000). Bien que les applications potentielles du Nitinol aient été réalisées immédiatement, les efforts pratiques pour commercialiser l'alliage n'ont pas eu lieu avant une décennie. Ce retard est dû en grande partie aux difficultés extraordinaires rencontrées dans la fusion, le traitement et l'usinage de l'alliage, processus technologiques qui n'ont pas vraiment été maîtrisés avant les années 90, lorsque ces difficultés pratiques ont finalement commencé à être résolues (Hodgson et Brown, 2000).

Les alliages à mémoire de forme et autres types de matériaux intelligents (par exemple, les matériaux piézoélectriques, les fluides magnétorhéologiques, etc.) sont progressivement

introduits dans les cours magistraux. De plus, au cours des dernières années, les AMF ont fait l'objet de diverses études novatrices et applications industrielles (Andrawes et DesRoches, 2007 ; Auguet et al., 2007 ; Birman, 2008 ; Boroschek, et al., 2007 ; Bosch Rexroth, 2009 ; DesRoches et Delemont, 2002 ; Dolce et al., 2005 ; Heinonen et al., 2007 ; Johnson et al., 2008 ; Li et al., 2000 ; Liang et Rogers, 1993 ; McCormick et al., 2006 ; Nae et al., 2004 ; Ocel et al., 2004 ; Ozbulut et al., 2007 ; Padgett et al., 2009 ; Shook et al., 2008 ; Tamai et al., 2003 ; Wilde et al., 2000 ; Zhang et Zu, 2007 ; Zuo et al, 2006).

II.2. Dispositifs de contrôle des vibrations

Les applications technologiques constituées de composants à mémoire de forme sont conçues pour tirer parti de l'effet de mémoire de forme et / ou de la super-élasticité. En ce qui concerne l'effet mémoire de forme, trois catégories différentes sont généralement considérées pour les applications susmentionnées, à savoir la récupération libre, la récupération sous contrainte et les actionneurs (Duerig et Pelton, 1994). La récupération libre se produit lorsqu'un composant à mémoire de forme est autorisé à récupérer librement sa forme d'origine pendant le chauffage, générant une contrainte de récupération. Si cette récupération est empêchée, en contraignant le matériau sous sa forme martensitique pendant la récupération, des contraintes importantes sont développées, bien qu'aucune contrainte ne soit récupérée. Ces applications, basées sur une récupération contrainte, comprennent des fixations et des raccords de tuyaux et constituent le type d'utilisation pratique le plus ancien et le plus répandu (Duerig et Pelton, 1994). Des travaux sont en cours dans les applications dans lesquelles une contrainte et une contrainte sont récupérées pendant le chauffage, comme dans le cas d'un ressort en nitinol chauffé pour soulever une balle. De telles applications sont souvent encore classées selon leur mode d'actionnement, c'est-à-dire électrique ou thermique.

Les applications technologiques basées sur les composants SE sont principalement conçues pour la dissipation d'énergie passive. Comme tous les systèmes de contrôle passifs, ces applications ne nécessitent pas de sources d'alimentation externes. Contrairement aux dispositifs de commande actifs, qui appliquent des forces à la structure de la manière prescrite, au moyen d'une source d'alimentation externe, ils transmettent des forces qui sont développées en réponse au mouvement de la structure elle-même. Lorsqu'un système combine l'utilisation d'un contrôle actif et passif, on parle de système de contrôle hybride. Dans un système de contrôle semi-actif, l'énergie mécanique n'est ajoutée ni au système structurel ni aux actionneurs de contrôle. Ces dispositifs sont pour la plupart des dispositifs de contrôle passifs aux propriétés contrôlables et ont donc des besoins en énergie externes d'un ordre de grandeur inférieur à ceux des systèmes de contrôle actifs ordinaires (Housner, 1997).

La dissipation d'énergie passive dans une structure vibrante se produit principalement en raison de contraintes internes, de frottements, de fissures et de déformations plastiques (Housner, 1997). Face à un événement dynamique, l'amplitude des vibrations structurelles varie inversement à la capacité de la structure à dissiper de l'énergie. Comme certaines structures présentent un très faible amortissement, elles peuvent être soumises à de fortes amplitudes de vibration, même lors de séismes modérément forts. L'augmentation de la capacité de dissipation d'énergie d'une structure est une méthode très efficace pour réduire les amplitudes de vibration. Une grande variété de dispositifs différents fournissant un amortissement supplémentaire existe et ont déjà été installés dans des structures du monde entier, améliorant leur capacité de dissipation d'énergie en convertissant l'énergie cinétique en chaleur. Ces dispositifs fonctionnent sur des principes tels que le glissement par frottement, la déformation de solides ou de fluides viscoélastiques, la production de métaux et les transformations de phase de métaux ou d'alliages. Ce dernier procédé inclut la SE, qui permet au matériau de dissiper une quantité considérable d'énergie par hystérésis, tout en récupérant de grandes déformations non linéaires (Housner, 1997).

II.3. Dispositifs d'atténuation sismique basés sur des AMF

Des séismes récents dans des zones urbaines, tels que les séismes de Loma Prieta (1989) et de Northridge (1994) aux États-Unis, le séisme de Kobe (1995) au Japon, le séisme de Kocaeli (1999) en Turquie et le Nisqually (2001) aux États-Unis, le séisme a considérablement endommagé les infrastructures de génie civil (McCormick, 2007). Les composants structurels ont subi de grandes déformations permanentes du fait des techniques de conception conventionnelles, qui reposent sur leur réponse inélastique pour dissiper l'énergie lors d'un événement sismique. En raison de ces lacunes, la communauté des ingénieurs en structure s'est concentrée sur une approche de conception basée sur les performances, visant à atténuer les effets des tremblements de terre sur les structures. Les directives de performance pour une telle approche de conception reposent principalement sur la caractérisation de valeurs de dérive structurelles acceptables entre les étages, pour un aléa sismique donné, dans lesquelles une dérive maximale entre les étages peut être associée à des dommages plus importants (Hamburger, 2003).

Parallèlement, plusieurs dispositifs visant à limiter le comportement inélastique des éléments structurels critiques sont en cours de développement, afin de se conformer à ces directives de performance. Ces dispositifs reposent sur trois concepts principaux: dissipation d'énergie (amortissement), découplage de la structure de la fondation (isolation de la base) et limitation de la transmission de la force aux éléments porteurs critiques (Van Humbeeck et Liu, 2000).

Le développement actuel de dispositifs de contrôle des vibrations tant passifs qu'actifs basés sur ces concepts a suscité un intérêt récent pour l'utilisation de matériaux intelligents. Une définition relativement consensuelle d'un matériau intelligent est proposée dans (Michaud, 2004) : un matériau de structure qui, de manière inhérente, contient des capacités d'activation, de détection et de contrôle intégrées à sa microstructure. Ces matériaux subissent des modifications d'une ou de plusieurs de leurs propriétés (chimiques, mécaniques, électriques, magnétiques ou thermiques) en réponse directe à des stimuli externes associés à l'environnement entourant le matériau. Ces modifications sont directes et réversibles, sans nécessiter de système de contrôle externe (Addington et Schodek, 2005). Les AMF sont une classe de matériaux intelligents qui ont montré un important potentiel d'exploitation en tant que moyen rentable de contrôler la réponse des ouvrages de génie civil dans les applications nouvelles et les applications de modernisation (DesRoches et Smith, 2003 ; McCormick et al., 2007).

II.3.1. Systèmes de contreventement

La plupart des dommages structurels survenant dans les structures de bâtiment lors d'un séisme résultent de larges dérives entre les étages. L'ajout de systèmes de contreventement à dissipation d'énergie passifs, reliant deux étages consécutifs du bâtiment, s'est avéré efficace pour limiter ces dérives entre étages, en empêchant des déformations inélastiques importantes dans les éléments structurels (Dolce et al., 2005).

Les systèmes de contreventement actuellement utilisés dissipent l'énergie par la formation de métaux, le frottement de glissement entre les surfaces appropriées, le mouvement d'un piston ou d'une plaque dans un fluide visqueux, l'extrusion de fluide à travers des orifices ou, enfin, l'action viscoélastique de polymères. Récemment, les systèmes AMF sont de plus en plus utilisés pour les systèmes de renforcement des structures afin de limiter les galeries inter-étages et les galeries résiduelles en fournissant des capacités de dissipation d'énergie supplémentaires et des capacités de recentrage (Dolce et al., 2005).

L'utilisation des AMF dans les systèmes de contreventement structurels a été étudiée par plusieurs chercheurs (Aiken et al., 1993 ; Aizawa et al., 1998 ; Auricchio et al., 2006 ; Boroschek et al., 2007 ; Casciati et Faravelli, 2008 ; Han et al., 2003 ; Ma et al., 2004 ; McCormick et al., 2006 ; Motahari et al., 2007 ; Saadat et al., 2001 ; Tamai et Kitagawa, 2002). Certains de ces articles font état de tests sur table à secousses dans des prototypes à armature en acier à petite échelle, utilisés pour étudier les systèmes de contreventement à base de nitinol et de cuivre (voir la figure II.1).



Figure II.1 : Prototype à armature en acier à petite échelle avec des entretoises en SMA (AMF) (adapté de Boroscheck et al., 2007).

Ces systèmes ont montré une diminution significative des valeurs maximales de dérive entre les étages, avec l'utilisation d'accolades AMF. Les prototypes structurels n'ont pratiquement pas subi de déplacements résiduels, en raison de la capacité de recentrage du matériau AMF. De plus, dans l'étude menée par McCormick et al. (McCormick et al., 2006) une structure en acier conventionnelle à contreventement supplémentaire a été analysée, à titre de référence, et a subi une déformation et un flambement. Cela a entraîné des dérives permanentes et un contrôle moins efficace des vibrations sismiques.

Le projet « MANSIDE » (alliages de mémoire pour de nouveaux dispositifs de dissipation sismique et de dissipation d'énergie), mené par l'Union européenne, est l'une des initiatives les plus importantes concernant l'exploitation de AMF pour des applications dans des systèmes structurels. Ce projet, qui a étudié de manière approfondie le comportement mécanique des barres de martensite et des fils d'austénite SE, a mis en œuvre un vaste programme expérimental d'essais sur table à secousses sur des modèles structurels à échelle réduite. Accolades à base de AMF ; voir la figure II.2 configurée pour fournir un recentrage et / ou une dissipation d'énergie, ont été étudiés par Dolce et al. (Dolce et al., 2005) dans une structure en béton armé.

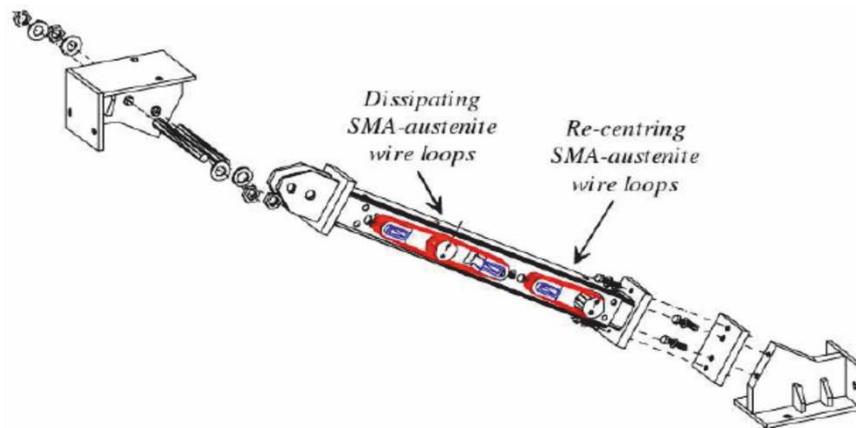


Figure II.2 : Attelle de dissipation et de recentrage d'énergie à base de AMF (Dolce et al., 2005).

Le programme expérimental visait à comparer le comportement de structures dotées de dispositifs innovants à base des AMF à celui de structures classiques et de structures dotées de systèmes de contrôle passifs actuellement utilisés.

L'ajout d'entretoises de contrôle passives dans l'ossature en béton armé s'est avéré très bénéfique pour le comportement sismique global de la structure. L'intensité sismique produisant un effondrement structurel a été considérablement augmentée et les galeries et les forces de cisaillement inter-étages dans les colonnes ont été considérablement réduites. Les résultats expérimentaux ont également montré que les nouveaux supports AMF peuvent offrir des performances au moins comparables à celles des dispositifs actuellement utilisés.

Des dispositifs adaptatifs de contrôle des vibrations pour systèmes de contreventement, basés sur des fils austénitiques SE, ont été proposés par Zhang et Zu, (2007) ; voir la figure II.3.

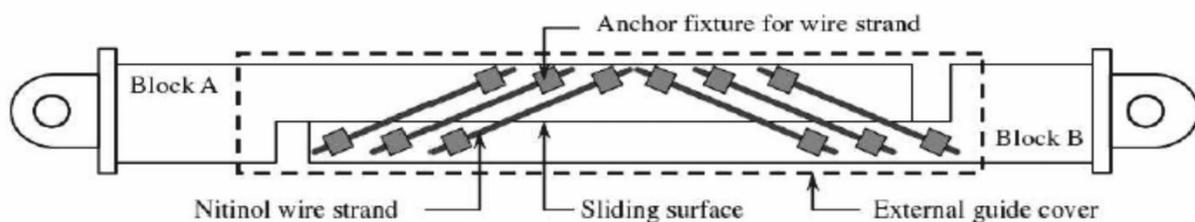


Figure II.3 : Dispositif de contrôle des vibrations adaptatif pour systèmes de contreventement (Zhang et Zu, 2007).

Ces dispositifs présentent deux caractéristiques distinctives : son comportement hystérétique ajustable et sa capacité à résister à plusieurs séismes de niveau de conception. Le comportement hystérétique des amortisseurs pourrait être modifié pour s'adapter au mieux aux applications de contrôle structurel passif, en ajustant les paramètres de conception des

amortisseurs tels que l'angle d'inclinaison des fils SE, le niveau de précontrainte et le coefficient de frottement.

II.3.2. Système d'isolation de base

Bien que les amortisseurs soient probablement l'application la plus populaire pour les AMF dans les structures, leur utilisation a également été abordée dans les applications pour les systèmes d'isolation de base. Ces systèmes sont conçus pour découpler la superstructure de sa fondation, tout en offrant des capacités supplémentaires de dissipation d'énergie et de recentrage. Ils filtrent l'énergie sismique transférée du mouvement du sol à la superstructure afin d'atténuer les dommages qui y sont causés (Song et al., 2006). Corbi (2003) a mis en œuvre un tel dispositif d'isolation dans un modèle structural élasto-plastique à plusieurs degrés de liberté (MDOF) et a démontré son efficacité pour supprimer les déformations plastiques de la superstructure. Un système d'isolation à base hybride, composé de paliers élastomériques linéaires, de paliers à pendule à friction, de fils austénitiques SE et d'amortisseurs magnétorhéologiques (MR) a été proposé par Shook et al. (2008), pour l'atténuation des mouvements sismiques. Pour gérer la réponse de la superstructure aux mouvements du sol, chaque sous-composant du système d'isolation a été conçu pour une tâche spécifique. Les fils austénitiques SE ont été utilisés pour fournir un comportement hystérétique récupérable et pour servir de force de rappel supplémentaire. Le système d'isolation comprend un ensemble de roues à faible frottement afin de réduire la longueur totale de l'installation AMF tout en garantissant la longueur effective des fils AMF.

Les résultats ont montré que le système d'isolation de base SE proposé pourrait réduire de manière significative les dérives de base, tout en maintenant une réponse favorable de la superstructure. Dolce et al. (2007) ont également proposé un système d'isolation hybride, basé à la fois sur du AMF et des composants en acier.

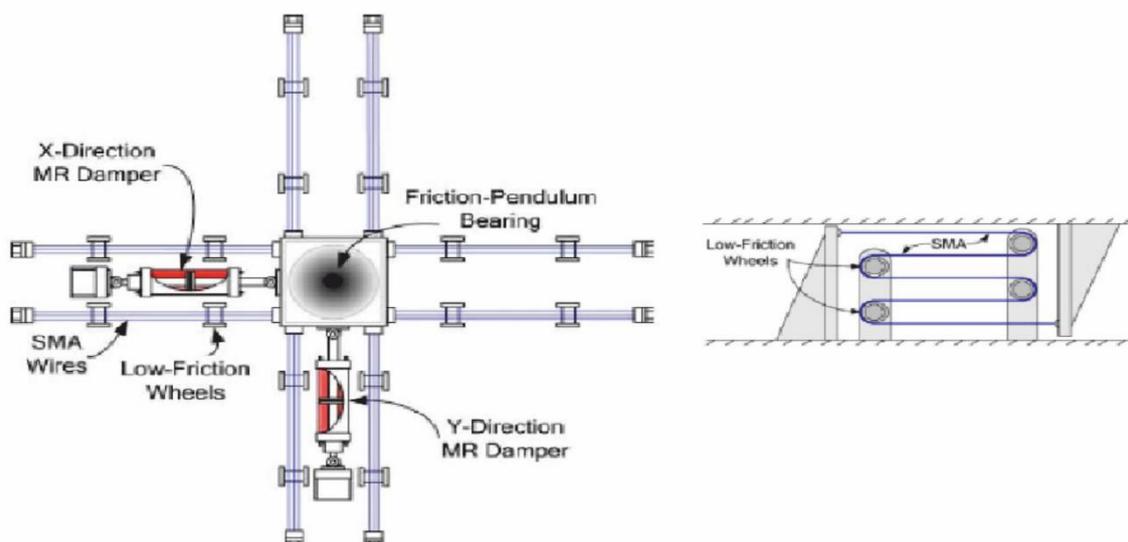


Figure II.4 : Configuration des roulements en élastomère, des roulements à pendule à friction, des fils austénitiques SE et des amortisseurs magnétorhéologiques. Roues à faible frottement pour installation de fil SMA (Shook et al., 2008).

L'isolation de la base fournit également une méthode passive très efficace de protection des ponts contre le risque de tremblements de terre. Wilde et al. (2000) ont proposé un système d'isolation associant un roulement en caoutchouc laminé à un appareil AMF. Le système d'isolation utilise les différentes réponses de l'AMF, à différents niveaux de contrainte, pour contrôler les déplacements du roulement en caoutchouc pour différents niveaux d'excitation. Il fournit une connexion rigide entre la jetée et le pont pour de petites charges externes. Pour un séisme de taille moyenne, les barres en alliage AMF augmentent la capacité d'amortissement du système d'isolation en raison de la transformation martensitique de l'alliage sous contrainte. Enfin, pour le plus grand séisme considéré, les barres AMF fournissent à la fois un amortissement hystérétique et contrôle du déplacement dû au durcissement des alliages après achèvement de la transformation de phase. Le système d'isolation basé sur AMF a également une capacité inhérente de recentrage due à la réponse SE de l'alliage.

II.3.3 Conteneurs de charnière de pont

Lors de tremblements de terre, les ponts risquent de s'effondrer et de s'effondrer en raison d'un mouvement longitudinal excessif au niveau des charnières ou des supports situés dans l'envergure. Ces dommages peuvent perturber considérablement le réseau de transport, menaçant les interventions d'urgence et le relèvement, et entraînant de graves conséquences économiques directes et indirectes. Le mécanisme de désassemblage d'un pont lors d'un séisme, associé à une charnière dans la portée, est présenté à la figure II.5.

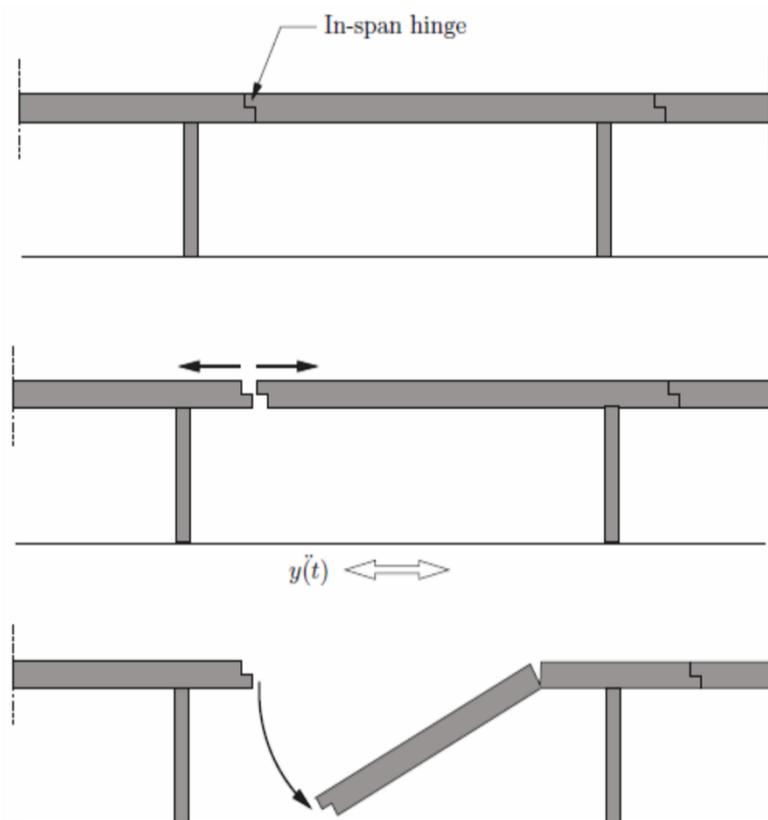


Figure II.5 : Démontage du pont au niveau de la charnière d'envergure lors d'un séisme (dos santos,2011).

Lors du tremblement de terre de 1994 à Northridge, lors du tremblement de terre de 1994, d'un pont existant et d'une modernisation de pont avec des câbles de retenue en acier traditionnels, extraits de la collection NISEE (Johnson et al., 2008), sont illustrés dans la figure II.6

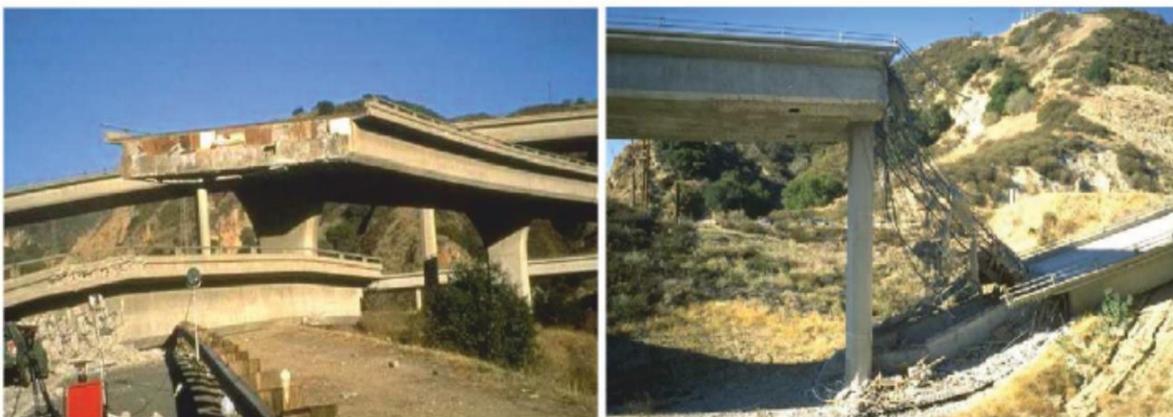


Figure II.6 : Démontage du pont à la charnière d'envergure lors du tremblement de terre de Northridge en 1994 pour un pont existant et modernisation d'un pont avec des câbles de retenue en acier traditionnels (Johnson et al., 2008).

Plusieurs auteurs ont étudié la modernisation et la réhabilitation de ponts afin de surmonter leurs vulnérabilités sismiques (Andrawes et DesRoches, 2007 ; DesRoches et Delemont, 2002, DesRoches et al., 2003). Andrawes et DesRoches (2007) et DesRoches et Delemont (2002) ont étudié l'efficacité de l'utilisation de dispositifs de retenue en AMF pour réduire la réponse des ponts à plusieurs travées simplement appuyés. Ces dispositifs d'amortissement sismique basés sur les AMF visent à concentrer la dissipation d'énergie dans des emplacements contrôlés, réduisant ainsi la demande de trames individuelles dans un pont à plusieurs trames. La figure II.7 illustre une solution de retenue avec des éléments SMA dans un pont à plusieurs travées simplement appuyées.

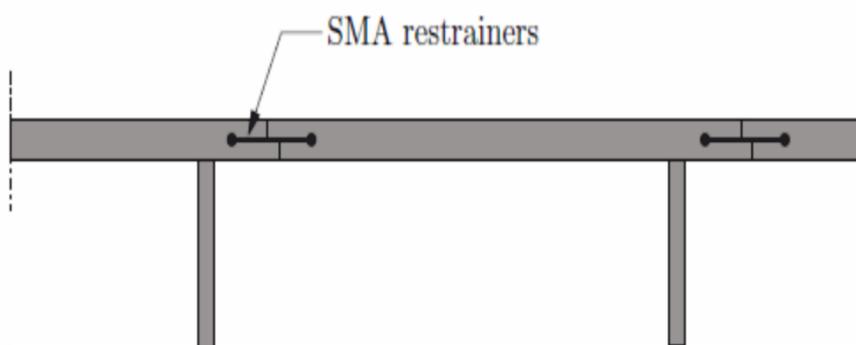


Figure II.7 : Solution de retenue avec éléments AMF dans un pont à plusieurs travées simplement appuyées (dos santos,2011).

Les modèles analytiques ont montré que les dispositifs de retenue en AMF réduisaient beaucoup plus efficacement les déplacements relatifs des charnières au niveau du pilier que les dispositifs de retenue pour câbles en acier conventionnels. La grande plage de déformation élastique présentée par les éléments de retenue en AMF leur permet de subir de grandes déformations tout en restant élastique. De plus, les propriétés SE des limiteurs AMF entraînent une dissipation d'énergie au niveau des charnières. Enfin, une évaluation du pont à plusieurs travées simplement soutenu et soumis à un mouvement du sol en champ proche a montré que les barres de retenue en AMF sont extrêmement efficaces pour limiter la réponse des tabliers de pont au mouvement du sol en champ proche. La rigidité accrue de l'AMF Les dispositifs de retenue aux fortes contraintes fournissent une contrainte supplémentaire pour limiter les ouvertures relatives dans un pont.

Un programme d'essais à grande échelle a été mené par Johnson et al. (2008), afin de déterminer les effets des câbles de retenue en AMF sur la performance sismique des charnières à travée, dans les ponts. Leur performance a été comparée à celle des dispositifs de retenue en acier traditionnels pour réduire le déplacement des charnières et la probabilité d'effondrement lors de séismes. Les figures II.8 et II.9 représentent un schéma de la

configuration de test et de la configuration de test réelle du dispositif de retenue AMF, qui comprennent un pont à poutres en caissons en béton à plusieurs cadres représentatifs et le câble de retenue AMF.

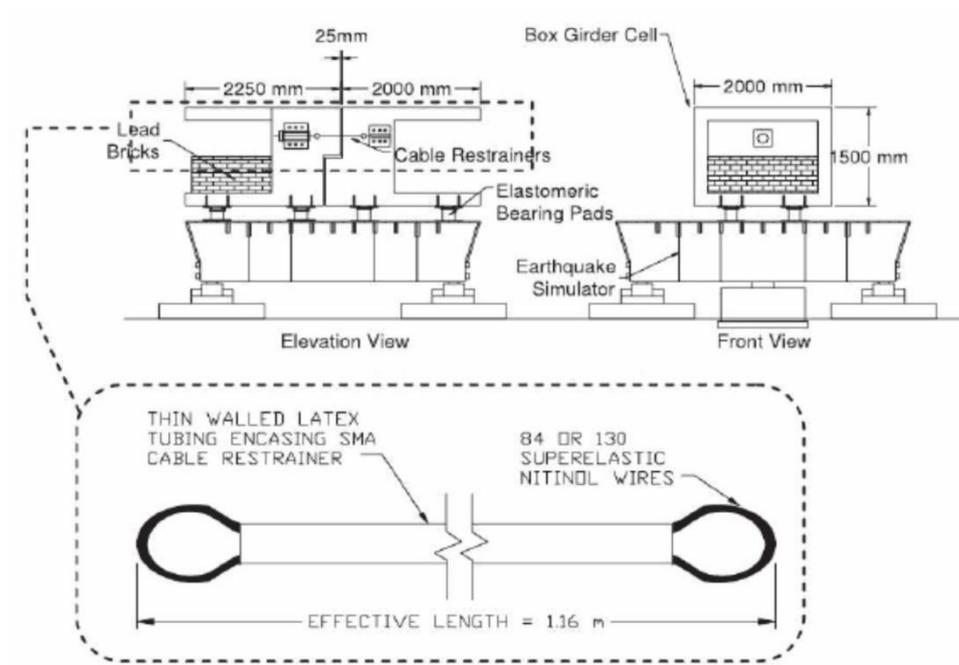


Figure II.8 : Schéma de configuration de l'essai et du câble de retenue AMF (Johnson et al., 2008).



Figure II.9 : Configuration de l'essai du limiteur AMF (Johnson et al., 2008).

Les résultats des tests ont montré que les dispositifs de retenue AMF étaient très efficaces en tant que dispositifs de retenue. Ils présentaient une contrainte résiduelle minimale après un chargement répété et une faible dégradation de la résistance et de la rigidité après de nombreux cycles. En outre, l'amortissement hystérétique observé lors des accélérations plus importantes au sol a démontré la capacité des matériaux à dissiper l'énergie. Un autre

programme d'essais à grande échelle, portant également sur l'utilisation de câbles de retenue AMF dans les ponts, a été entrepris par (Padgett et al. 2009) ; voir les figures II.10 et II.11. Il s'agissait de l'évaluation de l'efficacité des dispositifs de retenue AMF dans la limitation de l'ouverture des charnières aux interfaces pont-pilier. Les éléments de retenue AMF ont été testés sur un pont en dalle de béton à quatre travées et à l'échelle du quart. Le pont a été soumis à une série de mouvements du sol afin d'évaluer la performance des AMF sous différentes amplitudes de chargement.

Les résultats des tests expérimentaux montrent que les câbles AMF réduisaient efficacement le risque de délogement en réduisant les ouvertures à la construction. De plus, les déplacements de charnière étaient également accompagnés de réductions de la dérive des colonnes.

II.3.4 Connexions structurelles

Une autre utilisation innovante des applications AMF dans les structures est matérialisée par les ancrages de base de colonnes dans les bâtiments (Tamai et al, 2003) et les applications d'isolation dans les liaisons poutre-colonne (Alam et al., 2008 Ocel et al, 2004). Ocel et al. (2004) ont montré la faisabilité d'une nouvelle classe de connexions à base de l'AMF partiellement restreintes, sous la forme martensitique. Dans cette phase cristallographique, il est possible de récupérer de grandes déformations résiduelles en chauffant l'alliage au-dessus de sa température de transformation. La connexion proposée consistait en quatre barres AMF en Ni-Ti de grand diamètre reliant la bride du faisceau à la bride de la colonne et servant de mécanisme de transfert de moment primaire. La configuration du test schématique est illustrée à la figure II.12. La connexion à grande échelle testée est illustrée à la figure II.13.

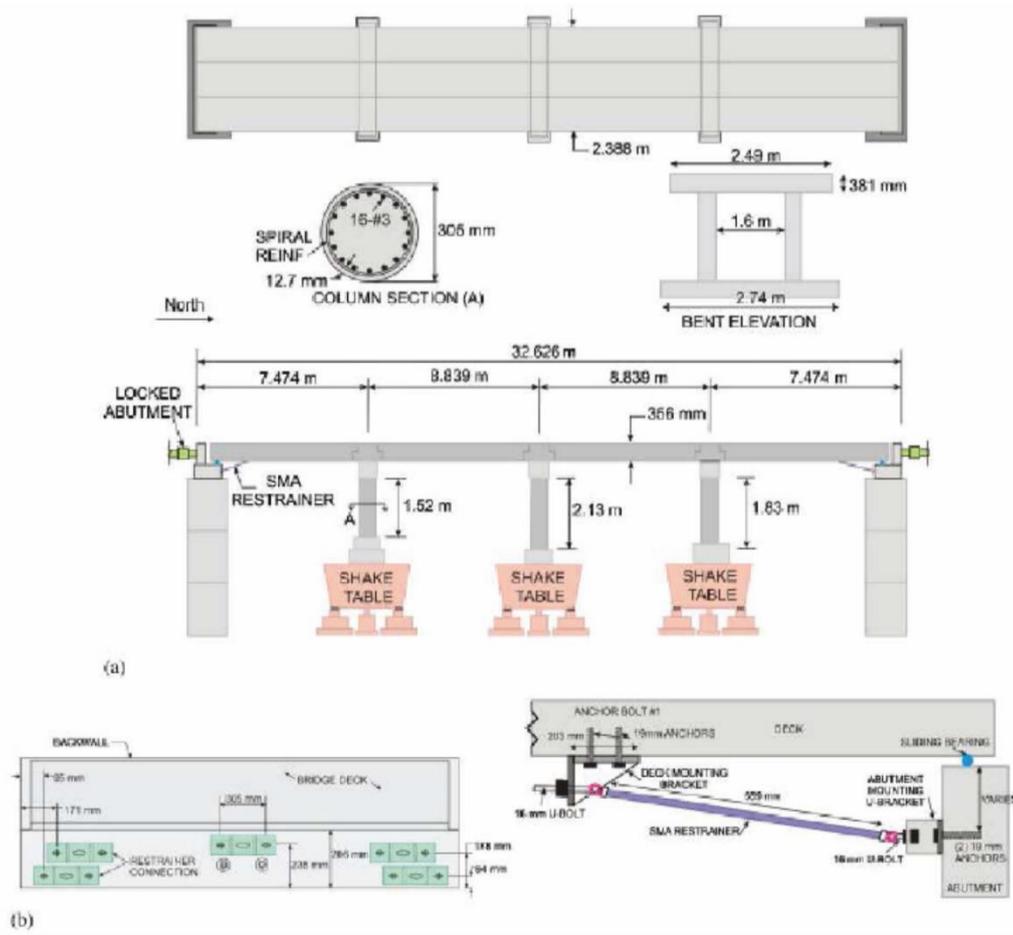


Figure II.10 : Schéma de configuration de l'essai et du câble de retenue AMF (Padgett et al, 2009).



Figure II.11 : Configuration de l'essai du limiteur SMA (Padgett et al., 2009).

Les résultats des tests expérimentaux montrent que les câbles AMF réduisaient efficacement le risque de délogement en réduisant les ouvertures à la construction. De plus, les déplacements de charnière étaient également accompagnés de réductions de la dérive des colonnes.

afin d'atténuer le problème de la déformation permanente lors de forts séismes. La figure II.14 montre un détail schématique de l'élément colonne-poutre comprenant un coupleur à verrouillage à vis à cylindre unique pour connecter une barre AMF à une barre en acier ordinaire.

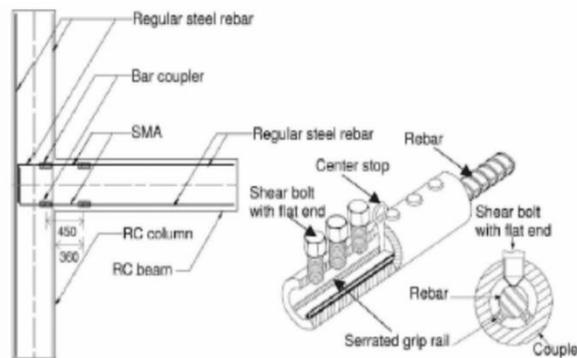


Figure II.14 : Détails de l'armature de l'élément poutre-colonne avec coupleur (dimensions en mm) (Alam et al., 2008).

II.3.5. Applications aux ouvrages de génie civil existants

Bien que des progrès considérables aient été réalisés dans le développement d'applications industrielles pour les structures de génie civil basées sur des alliages à mémoire de forme, seuls quelques dispositifs ont été mis en œuvre dans les structures existantes. Parmi les cas où de tels dispositifs ont été mis en place, citons la basilique Saint-François d'Assise (Croci, 2001), la cathédrale Saint-Feliciano (Castellano et al., 2000), le clocher de l'église Saint-Giorgio (Indirli et al., 2001), en Italie, et le pont portant Sherman Road sur l'US-31 aux États-Unis (Soroushian et al., 2001).

La première fois que les AMF ont été utilisés dans le domaine de l'ingénierie structurelle du patrimoine culturel, c'était sur la basilique Saint-François à Assise, illustrée à la figure II.15 (a). Une série de cinq tremblements de terre, survenus en septembre 1997, avait gravement endommagé la basilique et il devenait nécessaire de mettre en œuvre un programme de modernisation qui éviterait de futurs dommages à ce bâtiment historique. La solution la plus couramment utilisée traditionnellement pour renforcer la résistance sismique des structures du patrimoine culturel est l'introduction de renforts localisés, généralement des liens en acier, augmentant la stabilité structurelle et la ductilité (Indirli et al., 2001), mais souvent de manière trop invasive. Le quatrième programme-cadre de recherche et de développement technique de l'UE a financé un projet qui a permis de mettre au point une technique innovante basée sur des dispositifs en alliage à mémoire de forme sur mesure (AMFD). Ces dispositifs ont été utilisés pour relier la paroi du tympan à la structure du toit, comme illustré aux figures II.15 (b), (c) et (d).



(a) Vue Générale



(b) Application des AMFD



(c) Arrangement des AMFD

Figure II.15 : Basilique Saint François d'Assise en Italie (Croci, 2001 ; Modena, et Lourenco, 2004).

Une autre intervention réussie avec des AMFD sur des murs soumis à des forces sismiques horizontales a été réalisée dans la façade de la cathédrale S. Feliciano, à Foligno, car une connexion efficace entre des murs orthogonaux était nécessaire. En fait, un mécanisme typique d'effondrement dans les bâtiments en maçonnerie est l'effondrement hors plan des murs périphériques dû aux forces d'inertie générées par un séisme se produisant perpendiculairement aux murs (Castellano et al., 2000). Figure II.16 décrit certains aspects de l'intervention.

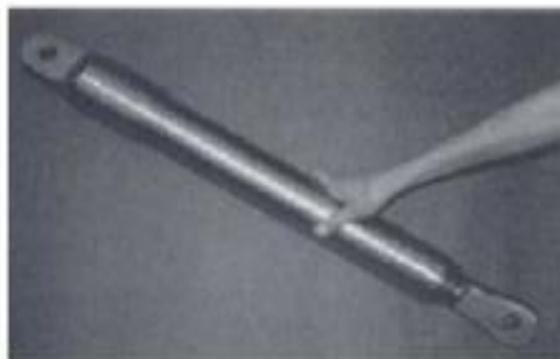


Figure II.16 : Cathédrale Saint-Feliciano en Italie (Castellano et al., 2000 ; Modena, et Lourenco, 2004).

Des essais expérimentaux ont montré que la protection sismique des monuments avec AMFD produisait des structures avec une résistance au séisme supérieure à celle des structures renforcées avec des barres en acier traditionnelles (Croci, 2001). Les AMFD étaient considérés comme une alternative puissante aux méthodes de rééducation traditionnelles, offrant une réduction de l'accélération, une limitation de la force et une dissipation d'énergie (Indirli et al., 2001).

La réhabilitation du clocher de l'église S. Giorgio, à Trignano, s'est achevée en septembre 1999; voir la figure II.17 (a). Ce bâtiment en maçonnerie a subi des dommages considérables en raison du tremblement de terre du 15 octobre 1996, qui a frappé les districts de Reggio Emilia et de Modène en Italie (magnitude de 4,8 Richter). Pour augmenter la résistance à la flexion de la tour, quatre tirants en acier de précontrainte verticaux avec quatre AMFD post-tendus connectés en série ont été ancrés au toit et les fondations aux angles internes de la structure (Indirli et al., 2001). Chaque appareil AMF comprenait 60 fils SE de 1 mm de diamètre et de 300 mm de long; voir la figure II.17 (b).



(a) Vue Générale



(b) Application des AMFD

Figure II.17 : Clocher de l'église S. Giorgio en Italie (Indirli et al., 2001).

La bonne performance du programme de réhabilitation innovant a été confirmée après que la tour eut été soumise une nouvelle fois à un autre séisme de magnitude 4,5 Richter, le 18 juin 2000 ne subissant aucun dégât (Indirli et al., 2001).

Soroushian et al. (2001) ont entrepris un programme de réhabilitation innovant utilisant des barres en alliage AMF à base de fer pour la modernisation de poutres de pont déficientes. La démonstration pratique de cette approche de réparation a été appliquée à un pont dans le Michigan, illustré à la figure II.18 (a), qui manquait de résistance au cisaillement et souffrait de fissures apparaissant dans les poutres en T et s'étendant dans le pont (Soroushian et al.,

2001) ; voir la figure II.18 (b). Les barres en martensite AMF étaient pré-allongées et ancrées à l'élément structural déficient, comme indiqué dans les détails de conception présentés à la figure II.18 (c). Lors du chauffage par résistance électrique et de la transformation en austénite, la récupération de la forme sous contrainte a provoqué le transfert des forces correctrices sur la structure (Soroushian et al., 2001) ; voir la figure II.18 (d).

Cette approche de réparation avait déjà été testée dans une installation expérimentale comprenant un faisceau à décélération réduite. Le faisceau présentait plusieurs fissures de cisaillement apparues lors de l'introduction de la charge. Le faisceau RC a ensuite été réparé par post-tension avec des tiges en alliage AMF et soumis à des essais de rupture. Les résultats ont montré que la ductilité initiale et la capacité de charge du faisceau réhabilité étaient presque entièrement retrouvés (Soroushian et al., 2001). En ce qui concerne la modernisation du pont, la post-tension locale de la zone fissurée avec des tiges en alliage AMF a permis de réduire la largeur moyenne de la fissure d'environ 40%.



Figure II.18 : Pont reliant Sherman Road au-dessus de US-31, Michigan, États-Unis (Juntunen, 2000 ; Ostowari, et Souroushian, 2000).

II.3.6. Applications aux structures historiques

Deux études ont été entretenues auparavant au sein de notre établissement qui concernent deux monuments historiques. La première, représente une structure locale, il s'agit du minaret de Mansourah (Tlemcen) (figure II.19). Et la seconde est la grande mosquée d'Ajloun située en Jordanie (figure II.20).

Ces études ont été purement numériques réalisées par le logiciel Ansys V11. Une modélisation tridimensionnelle a été considérée avec deux modes d'attaches différents pour les AMF. Pour

le minaret de Mansourah les AMF ont été attachés à travers des cornières ((figure II.21), alors que celui d'Ajloun, ils ont été rassemblés à l'aide d'une ceinture de barres en acier ordinaire (figure II.22). Les deux études ont été traitées avec les mêmes considérations (type d'éléments, chargement sismique, et de conditions aux limites.) Les éléments utilisés sont de type solide 3D (Solide 185). Les deux structures sont encastées à la base. Le minaret de Mansourah a été sollicité par deux séismes, une fraction de 33% du séisme de Boumerdès (2003) ainsi que celui d'Ain Temouchent (1999). Le minaret d'Ajloun a été sollicité par les séismes d'Alcentro(1940).



Figure II.19: Le minaret de Mansourah



Figure II.20: Le minaret d'Ajloun

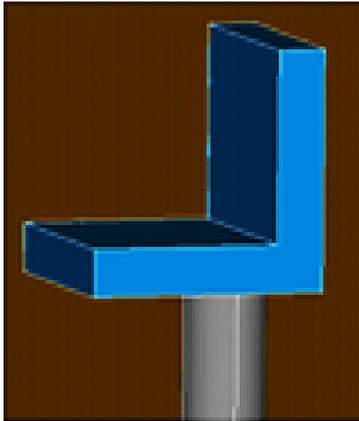


Figure II.21: assemblage des AMF par cornières (Minaret de Mansourah) (Barka et Soussi 2013)

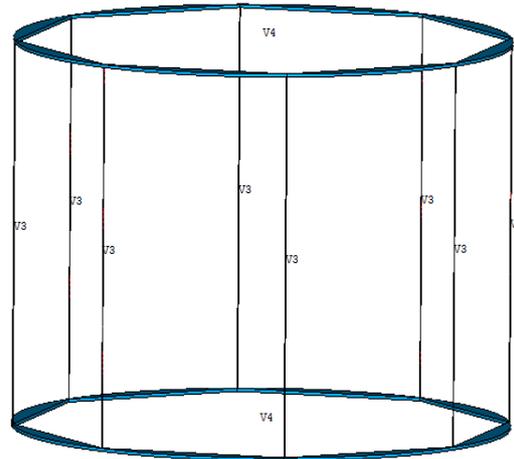


Figure II.22: assemblage des AMF par des ceintures polygonales (Minaret d'Ajloun) (Benallal et Chitaoui, 2015).

Les points de mesure qui ont été considérés sont représentés sur les figures II.23 et II.24.

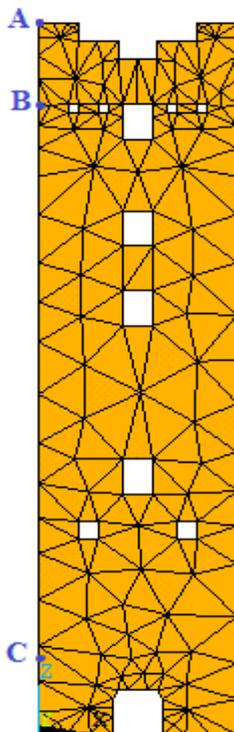


Figure II.23 : Positions des 3 points de référence (Minaret Mansourah) (Barka et Soussi 2013).

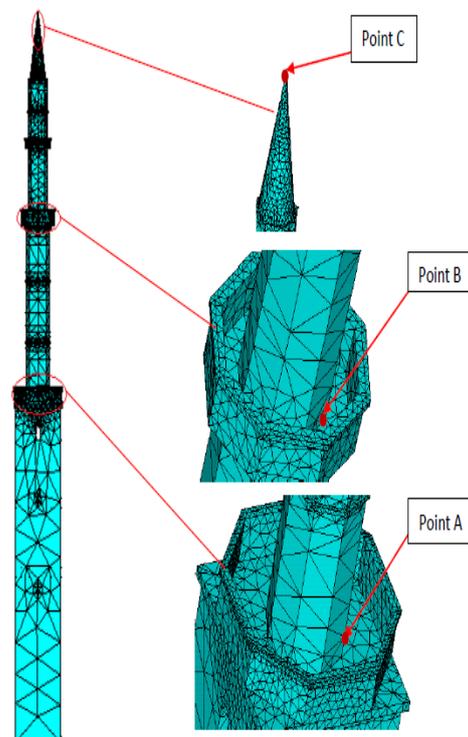


Figure II.24 : Positions des 3 points de référence (Minaret d'Ajloun). (Benallal et Chitaoui, 2015)..

Les résultats obtenus sont résumés comme suit :

- En termes de déplacements le maximum a été observé au niveau du sommet des deux minarets avec une réduction acceptable.
- Une réduction importante en termes d'accélération maximale a été constatée
- L'emplacement des AMF joue un rôle important, pour la réduction des contraintes, où une réduction de plus de 70% a été relevée pour le cas du minaret d'Ajloun en fixant les AMF à une hauteur de 22,55m. Aussi, une concentration de contraintes a été constaté au voisinage des points de mesure A et B
- Le nombre des AMF n'influe pas sur les résultats trouvés.

II.4. Conclusion

Sur la base de l'effet super-élastique, plusieurs applications technologiques ont été conçues pour la dissipation d'énergie passive dans les dispositifs de contrôle des vibrations. Un examen de l'état actuel des connaissances concernant ces applications montre le potentiel que présentent les alliages à mémoire de forme pour réduire les risques sismiques. Plusieurs dispositifs de contrôle des vibrations sont analysés, notamment des systèmes de contreventement, des systèmes d'isolation de la base, des dispositifs de retenue pour charnière de pont et des connexions structurelles.

Certaines applications construites utilisant des AMF ont été présentées, principalement utilisées pour améliorer la résistance sismique des structures du patrimoine culturel. Un programme novateur de réhabilitation utilisant des barres en AMF à base de fer pour la modernisation des poutres de pont déficientes en cisaillement a été également présenté. Les contraintes liées à l'utilisation des AMF dans l'industrie du génie civil ont été analysées.

Dans le chapitre suivant, nous allons choisir des modèles de structure afin de les analyser par rapport à leur comportement dynamique. Et à la fin, nous discutons en détail les différents résultats du programme réalisé.

Chapitre III

Etude du comportement des AMF sur une structure simple de forme prismatique

Contenu

III.1. Introduction	49
III.2. Les principales hypothèses	49
III.3. Caractéristiques mécaniques des structures et des AMF	49
III.4. Modélisation numérique des AMF	52
III.5. Analyse modale	52
III.6. Analyse dynamique transitoire de structure pleine sans et Avec AMF avec deux attaches différents	57
III.7. Analyse dynamique transitoire des structures pleine et évidée Avec AMF	59
III.8. Comparaison des résultats de la structure pleine sans et avec AMF	61
III.9. Conclusion	68

III.1. Introduction

Un cas de figure a été retenu à savoir la fixation d'un fil d'AMF en cuivre sur une structure de 40m de hauteur par un support en forme de ceinture a une élévation de 38m , Sous une excitation du signal enregistré du séisme de duzce 1999,cette étude dynamique a été faite dans le but d'analyser les fréquences et les périodes propres, par la suite nous avons étudié le comportement dynamique d'une structure d'une hauteur de 20 m avec les deux types de support (cornières et ceinture) Sous une excitation du signal enregistré du séisme de Boumerdès 2003, la comparaison des résultats sera présentée dans ce chapitre tel que les déplacements, les accélérations, vitesses. Apres nous avons fait une analyse transitoire de deux structure pleine et évidée et avons présenté les résultats de calcul des déplacements, accélérations et la distribution des contraintes sans et avec un fil en AMF.

III.2. Les principales hypothèses

Les hypothèses retenues dans la modélisation sont :

- Le comportement du matériau des trois structures est supposé être linéaire, élastique, isotrope
- Le modèle est tridimensionnel, donc on a été amené à utiliser l'élément de type « solide 185 » pour modéliser les structures et les cornières et la ceinture d'assemblage et AMF.
- Le modèle numérique est supposé être encastré à sa base.
- L'épaisseur de la structure évidée est de 0.5m.
- Le poids propre des structures est négligé

III.3. Caractéristiques mécaniques des structures et des AMF

III.3.1. Caractéristiques mécaniques des structures

Les caractéristiques mécaniques des deux structures sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques des matériaux de construction

Module d'élasticité (MPA)	2000
Masse volumique (kg/m3)	2500
Coefficient de Poisson	0,2

III.3.2. Caractéristiques mécaniques des AMF

Afin de renforcer la structure, on va utiliser un fil en AMF à base de cuivre de 3,5mm de diamètre et de 1m de hauteur, En plus de leur Caractéristiques mécaniques mentionnées dans le tableau III.3, les AMF sont caractérisés Par six paramètres qui définissent leur loi de comportement (figure III.1), Les six paramètres des AMF adoptés pour une température ambiante sont regroupés dans le tableau III.2.

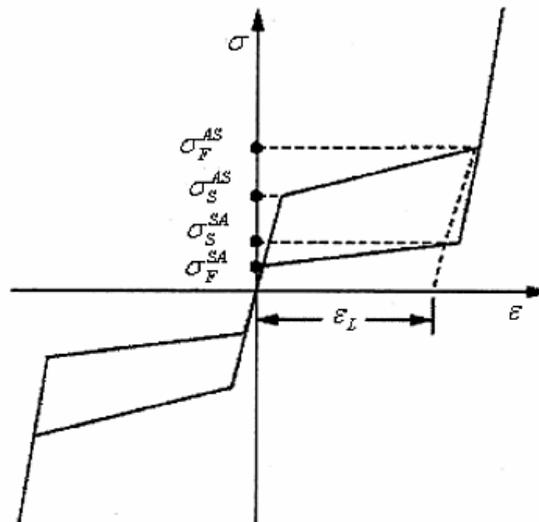


Figure III.1 : Diagramme de contrainte en onction de déformation typique du comportement super-élastique.

Tableau III.2: Les parametres des alliages à mémoire de forme

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

Avec :

σ_S^{AS} : Valeur de contrainte initiale du chargement,

σ_F^{AS} : Valeur de contrainte finale du chargement,

σ_S^{SA} : Valeur de contrainte initiale de déchargement,

σ_F^{SA} : Valeur de contrainte finale de déchargement,

ϵ_L : Déformation résiduelle maximale,

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

Tableau III.3: Caractéristiques mécaniques de l'AMF

Module d'élasticité (MPa)	70 000
Coefficient de poisson	0,33

III.3.3. Caractéristiques du support d'assemblage des AMF

Afin de fixer les AMF sur la structure, des cornières sous forme de « L » et ceinture de forme prismatique ont été rajoutées Selon le schéma de la figure III.2. Ces éléments ont été choisis de telle sorte qu'ils ne modifient, ni les caractéristiques de la structure, ni celles des AMF, Il s'agit d'un acier ordinaire dont ses caractéristiques sont représentées dans le tableau III.4.

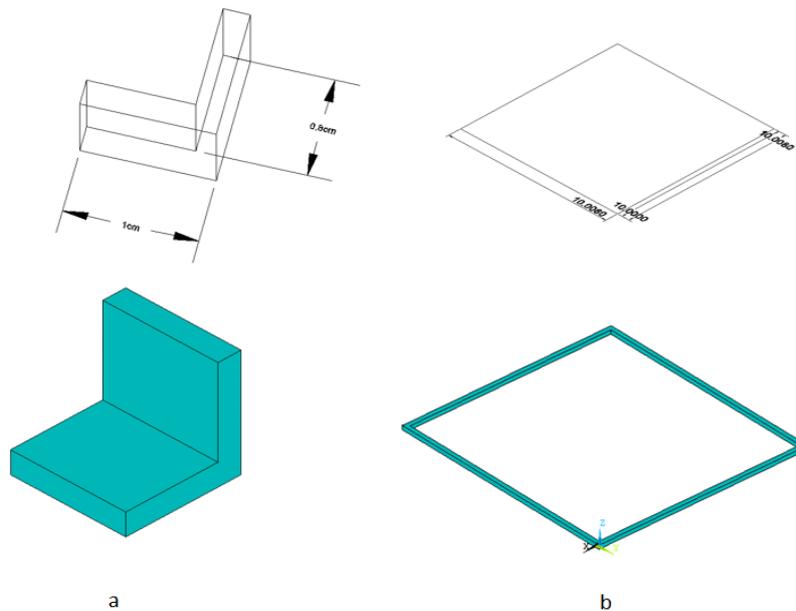


Figure III.2 : les deux supports d'assemblage des AMF

Tableau III.4 : caractéristiques mécaniques des supports d'assemblage

Module d'élasticité (MPa)	210 000
Poids volumique (KN /m³)	78,50
Coefficient de poisson	0,28

III.4. Modélisation numérique des AMF

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations. Celles-ci peuvent par exemple, représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques. Le logiciel Ansys 15.0 est choisi comme logiciel dans notre travail en raison de sa facilité d'introduire les six paramètres caractéristiques des AMF. La figure III.3 représente la fenêtre prévue pour cet effet.

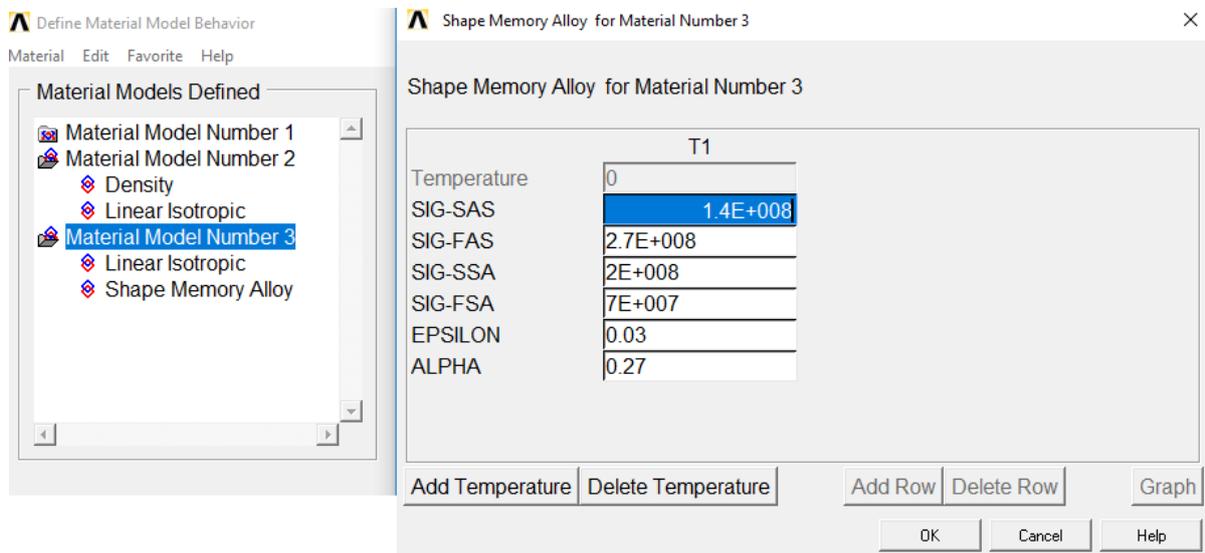


Figure III.3 : Définition des AMF dans ANSYS

III.5. Analyse modale

Une comparaison entre deux structures simples est réalisée dans cette section. La première est une structure pleine de dimensions $(40*10*10) \text{ m}^3$ et la deuxième est évidée avec les mêmes dimensions et un vide intérieur réalisé en supposant une paroi de 0,5m. Ces dimensions, ont été inspirées du minaret de Mansourah (Barka et Soussi 2013) afin de garder le même ordre de grandeur.

La modélisation a été faite selon les étapes suivantes :

- Définir le type d'éléments utilisés « solide 185 », ainsi que les caractéristiques des matériaux.
- Créer la géométrie.
- Passage en modèle en éléments finis en maillant les deux structures modélisées.
- Introduction des conditions aux limites, qui correspondent à un encastrement à la base.

- Faire une analyse modale.
- Déterminer des 10 premières modes.

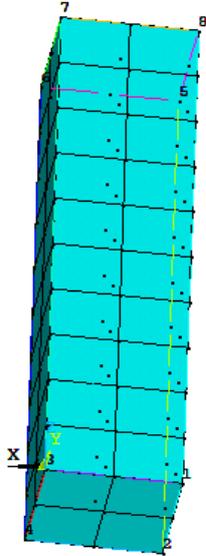


Figure III.4 : Modèle numérique d'une structure pleine

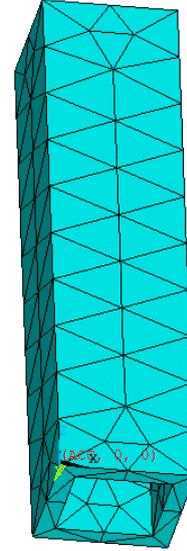


Figure III.5 : Modèle numérique d'une structure évidée

Les résultats de l'analyse modale sont représentés dans le tableau III.5.

Tableau III.5 : les périodes et les fréquences de la structure des dix premiers modes

Mode	Fréquence propres (Hz)	Période (s)	Direction
Structure pleine			
1	0.863659	1.1579	Translation X
2	0.863659	1.1579	Translation Y
3	3.61215	0.27684	Torsion Z
4	4.58201	0.21824	Translation Y
5	4.58201	0.21824	Translation X
6	5.61649	0.17805	Translation Z
7	10.9257	0.91527E-01	Torsion Z
8	10.9440	0.91375E-01	Translation X
9	10.9440	0.91375E-01	Translation Y
10	16.9292	0.59070E-01	Translation Z
Structure évidée			
1	1.09303	0.91489	Translation Y
2	1.09349	0.91451	Translation X
3	4.06685	0.24589	Torsion Z
4	5.03663	0.19855	Translation X
5	5.03841	0.19848	Translation Y
6	5.33211	0.18754	Translation Z
7	11.4056	0.87676E-01	Translation X
8	11.4087	0.87653E-01	Translation Y
9	12.6858	0.78828E-01	Torsion Z
10	15.9326	0.62764E-01	Translation Z

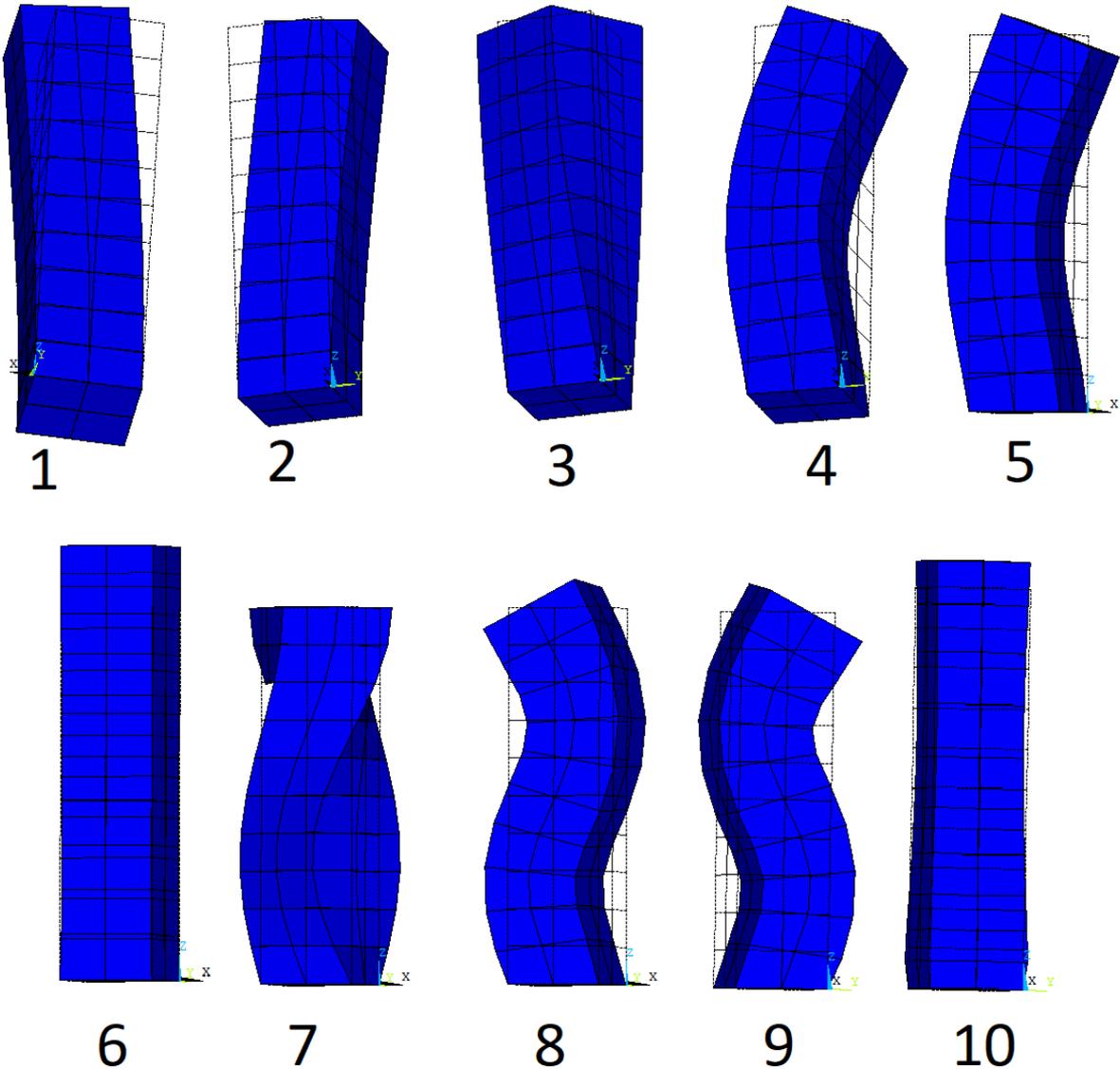


Figure III.6 : modes propres de la structure pleine

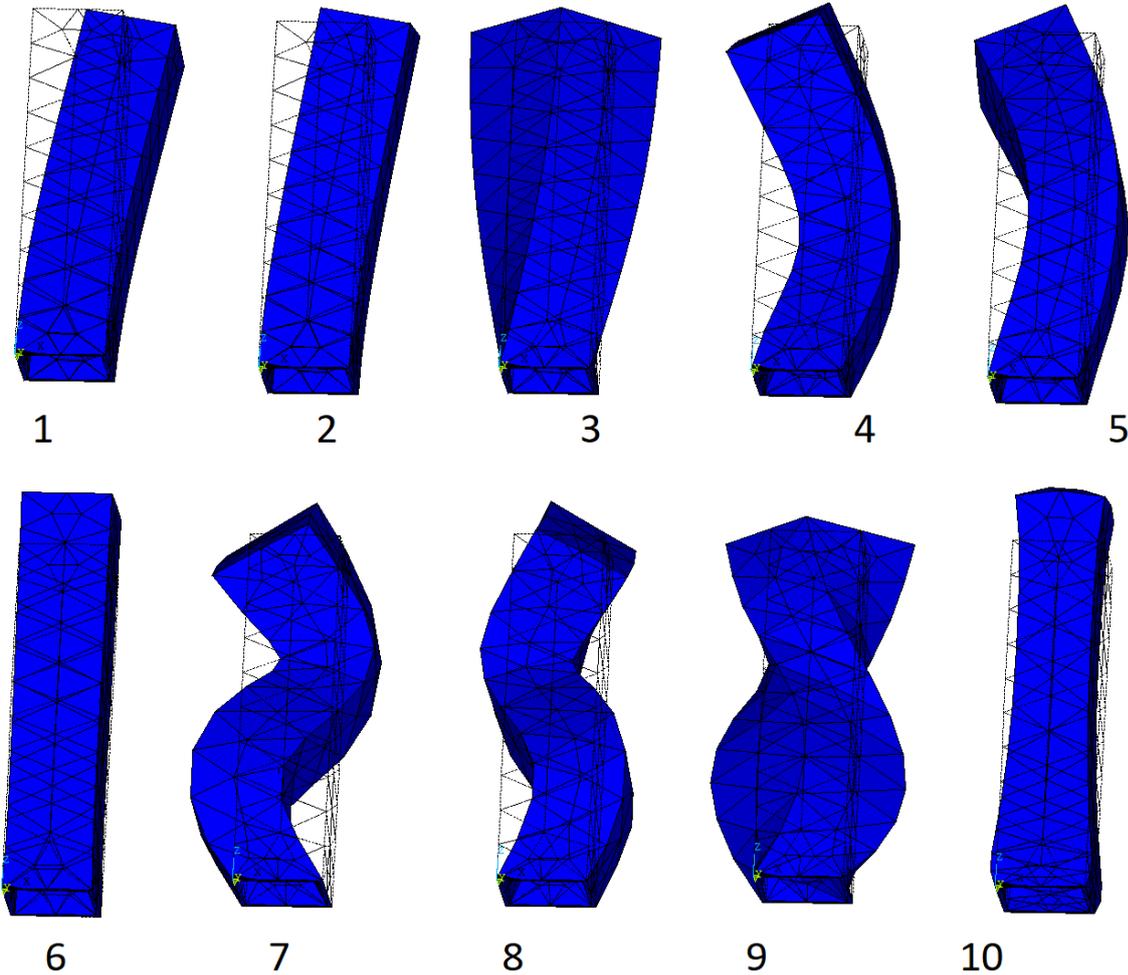


Figure III.7 : modes propres de la structure évidée

III.6. Analyse dynamique transitoire de structure pleine avec AMF avec deux attaches différentes

Afin de voir le meilleur assemblage des AMF avec les structures, nous avons fixé un fil d'AMF sur une simple structure de 20m de hauteur avec deux supports différents (cornière et ceinture) et faire une analyse transitoire sous le signal sismique de Boumerdes 2003 représenté sur la figure III.8.

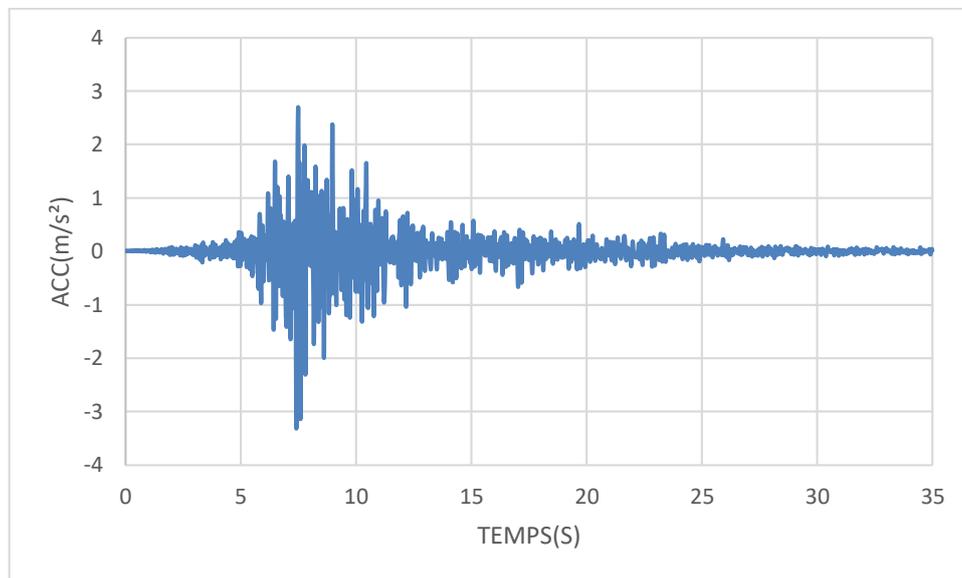


Figure III.8 : L'enregistrement du séisme de Boumerdes 2003.

La comparaison des résultats obtenus est représentée dans les figures de III.9 à III.11 :

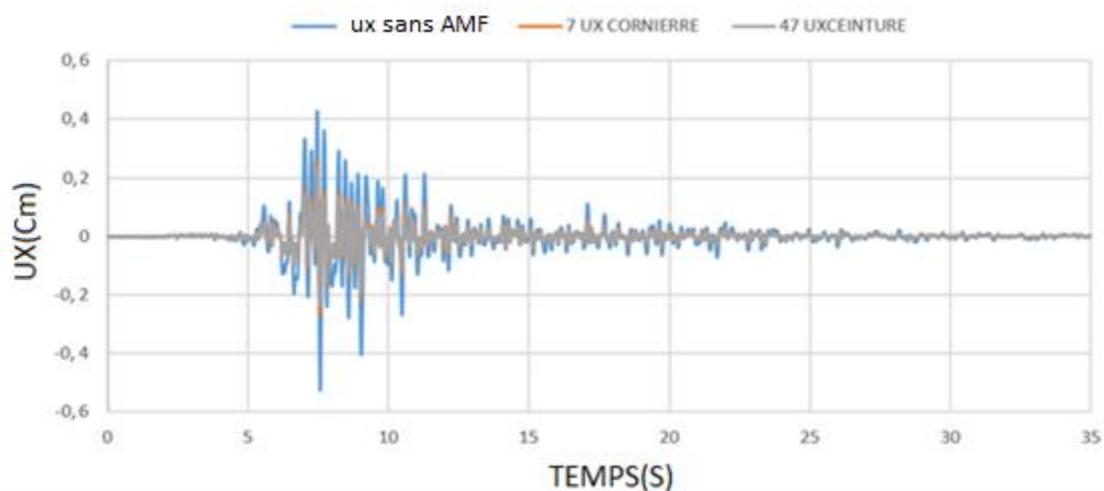


Figure III.9 : Déplacement au sommet de la structure pleine

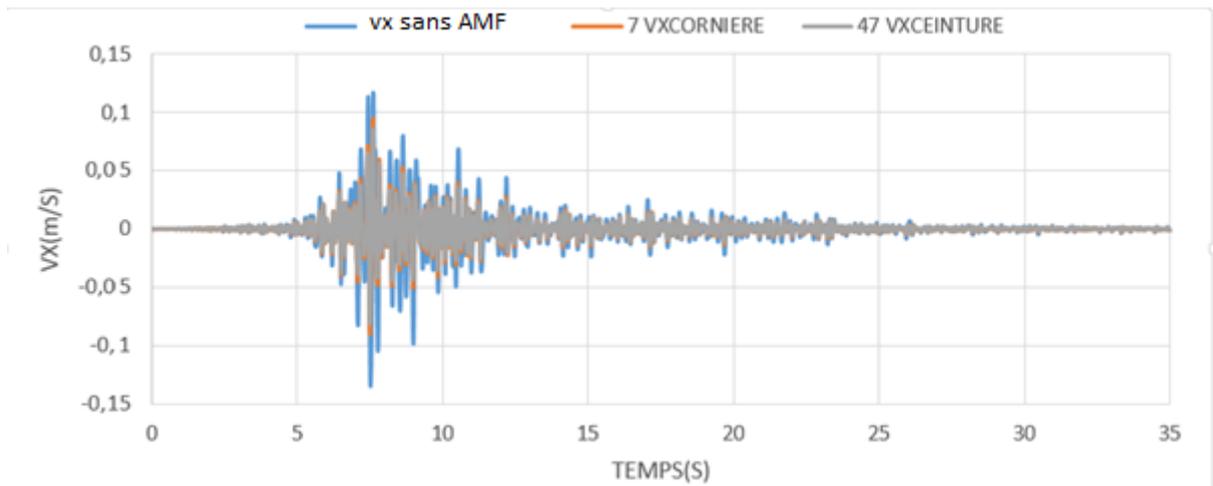


Figure III.10 : Vitesse au sommet de la structure pleine

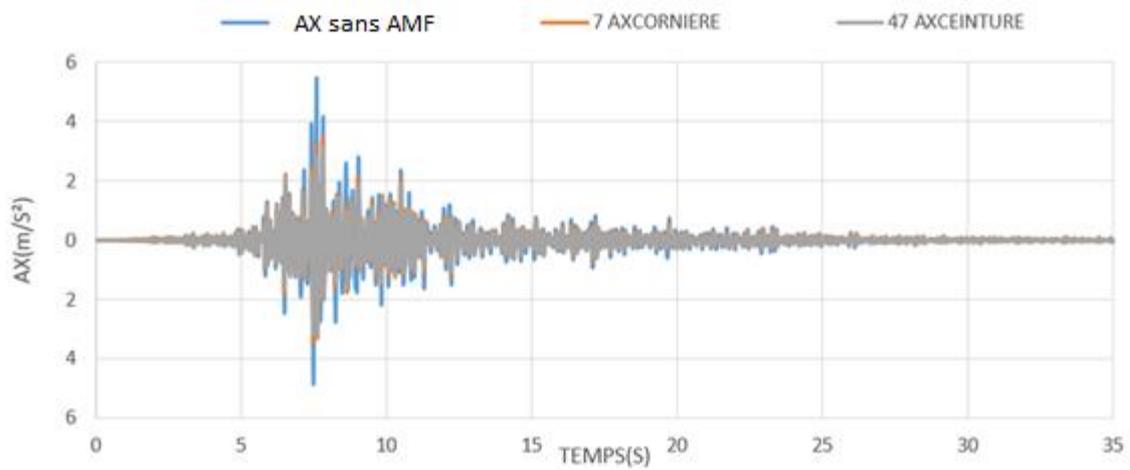


Figure III.11 : Accélération au sommet de la structure pleine

D'après les figures, nous avons remarquée qu'il n'y a pas une différence en termes de déplacement, vitesse et accélération pour les deux supports différents.

III.7. Analyse dynamique transitoire des structures pleine et évidée sans et Avec AMF

L'objectif de cette analyse est d'étudier le comportement dynamique des deux structures pleine et évidée sans et avec renforcement par les AMF afin de déterminer le comportement des structures. L'excitation dynamique utilisée est celle du séisme de Duzce 1999 dont son signal est représenté sur la figure III.12. Les comparaisons déplacements, les vitesses, les accélérations et la distribution des contraintes consisteront à voir l'influence de la masse de la structure vis-à-vis du comportement global de la structure. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures ci-dessous. Les figures III.19 à III.22 concernent la structure pleine, alors que les figures III.15 à III.18 concernent la structure évidée.

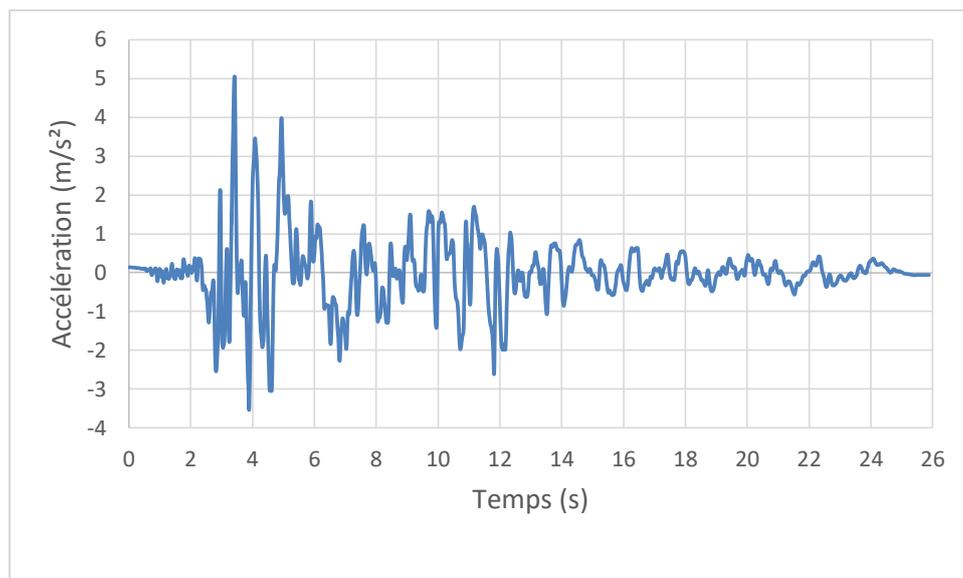


Figure III.12 : L'enregistrement du séisme de Duzce 1999.

De très fortes concentrations de contraintes ont été constatées à la base de la structure pour les deux cas de structures testés (figures III.13 et III.14).

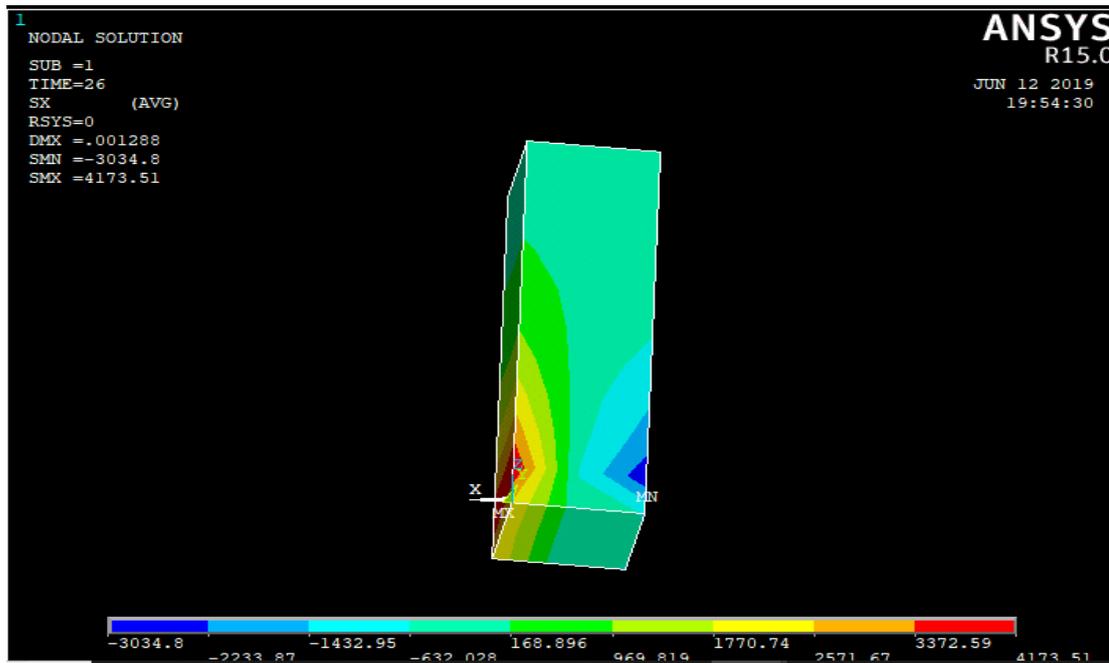


Figure III.13 : La concentration des contraintes dans la structure pleine sans AMF.

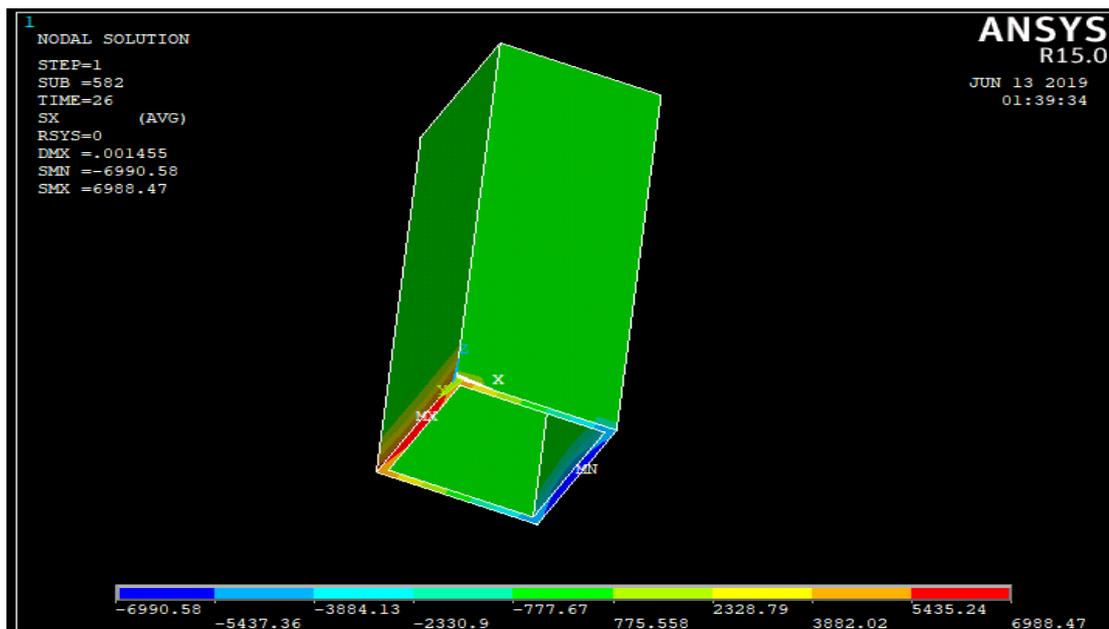


Figure III.14 : La concentration des contraintes dans la structure évidée sans AMF.

Remarque : Nous avons choisi la ceinture comme moyen de d’assemblage de la structure avec l’AMF à 38m de hauteur.

III.8. Comparaison des résultats de la structure pleine sans et avec AMF

La figure III.15 représente le déplacement au sommet de la structure pleine. Les graphes montrent qu'entre 2s et 6s, où le séisme était à son maximum, les deux courbes correspondant à la structure sans et avec AMF sont comparables. Autour de 4,5s les déplacements du cas avec AMF dépasse largement celui du cas sans AMF. En revanche, lorsque nous dépassons les 6s, la différence est flagrante. Les déplacements restent importants pour le cas sans AMF, alors qu'ils sont minimums pour le cas avec AMF.

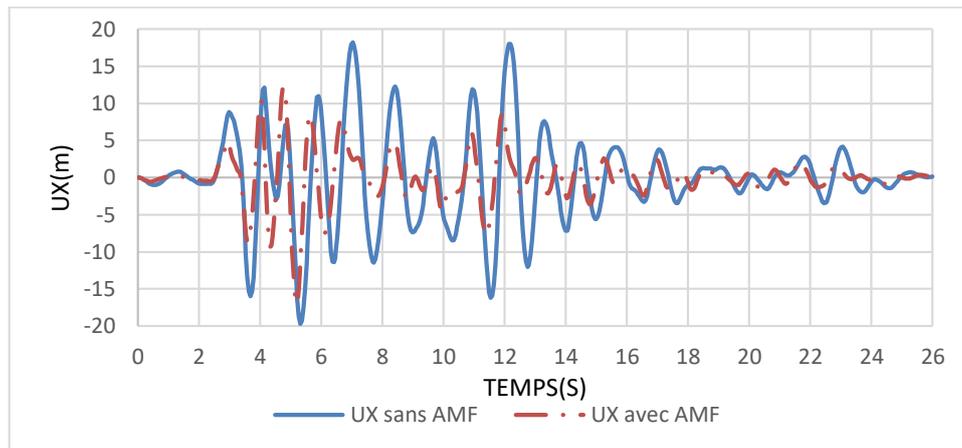


Figure III.15 : Déplacement au sommet de la structure pleine

La figure III.16 représente la variation de la vitesse au sommet de la structure. On constate les mêmes résultats que pour les déplacements. Entre 2s et 6s les valeurs sont comparables. Après les 6s et en absence de l'AMF, la vitesse reste importante et elle est atténuée en sa présence.

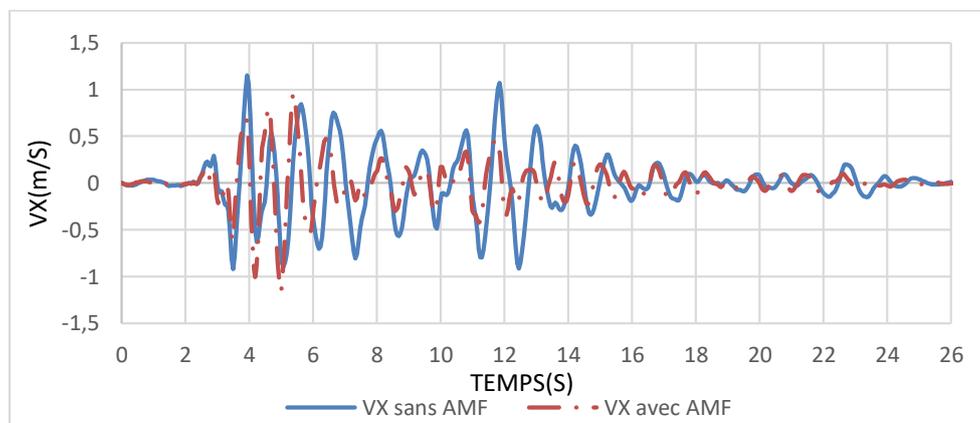


Figure III.16 : vitesses au sommet de la structure pleine

La figure III.17 représente la variation de l'accélération au niveau du sommet de la structure. Nous remarquons que les deux courbes correspondantes aux cas, sans et avec AMF sont similaires, avec une légère augmentation de l'accélération dans le cas avec AMF autour de 4,5s et son augmentation autour de 12s du cas sans AMF vis-à-vis du cas avec AMF.

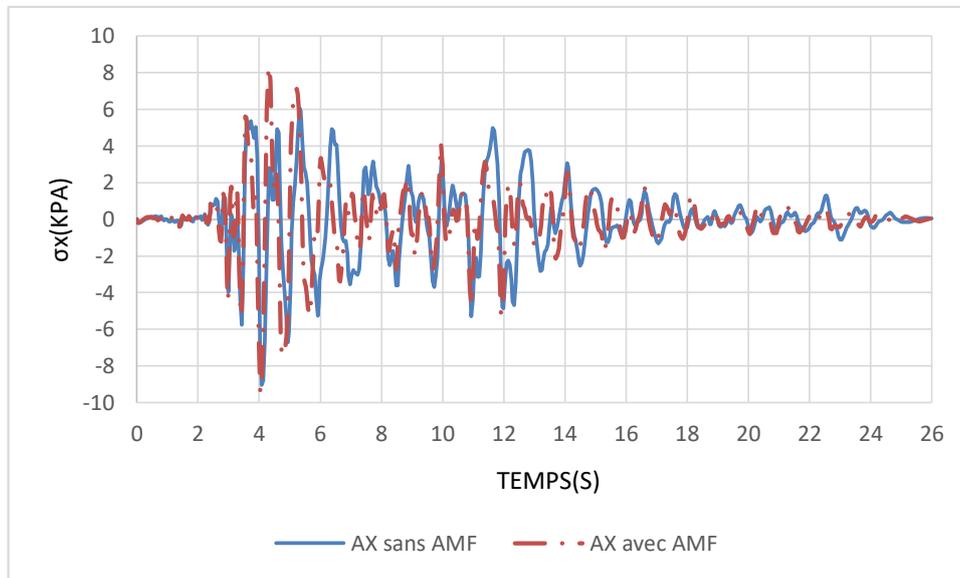


Figure III.17 : Accélération horizontale au sommet de la structure pleine

La figure III.18 représente la variation de la contrainte à la base de la structure pleine. Ces résultats montrent une forte intensité de contraintes dans le cas sans AMF, avec des valeurs maximales qui dépassent les 1200 MPa. Alors, le fait d'introduire un fil d'AMF, réduit ces valeurs vers les 200MPa, soit une réduction de **83%**.

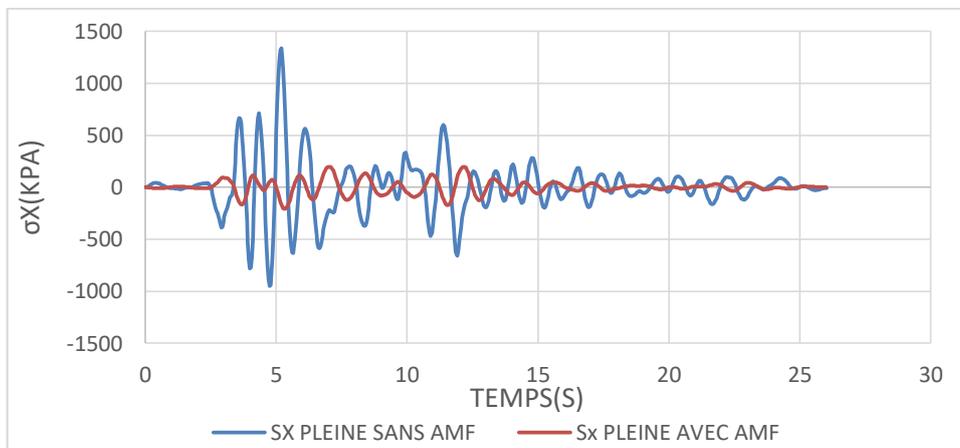


Figure III.18 : Variation de la contrainte à la base de la structure pleine

III.8.1. Comparaison des résultats de la structure évidée sans et avec AMF

La figure III.19 représente la comparaison du cas sans AMF et avec AMF dans le cas d'une structure évidée. Nous remarquons que le fait de diminuer la masse de la structure, les déplacements sont comparables au cas avec AMF. C'est-à-dire que dans ce cas-là l'introduction d'AMF n'a pas vraiment d'effet sur les déplacements. Les figures III.20 et III.21 représentent respectivement les variations des vitesses et accélérations au sommet de la structure. Les mêmes remarques ont été constatées que pour le cas des déplacements. En revanche, une légère amélioration a été relevée au niveau de la variation des contraintes en introduisant l'AMF (figure III.22).

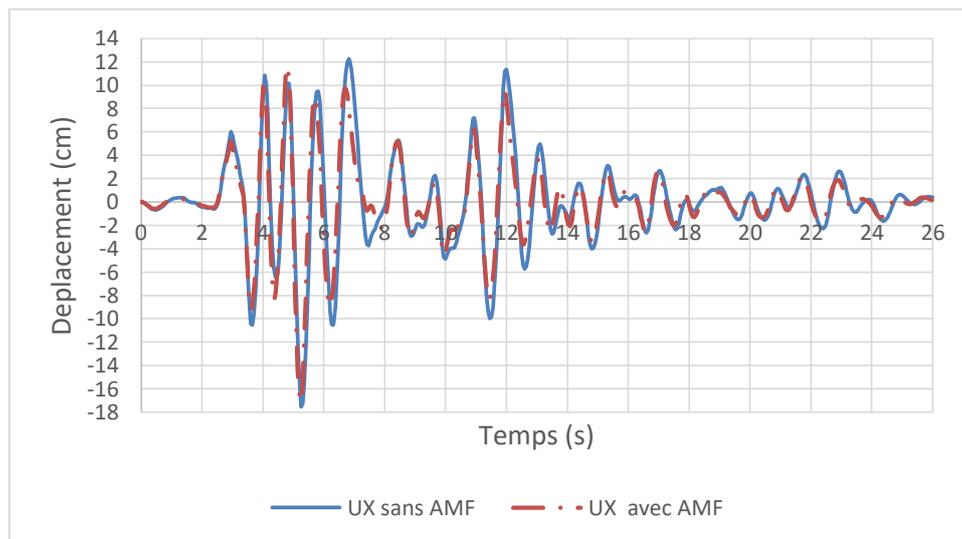


Figure III.19 : Déplacement au sommet de la structure évidée

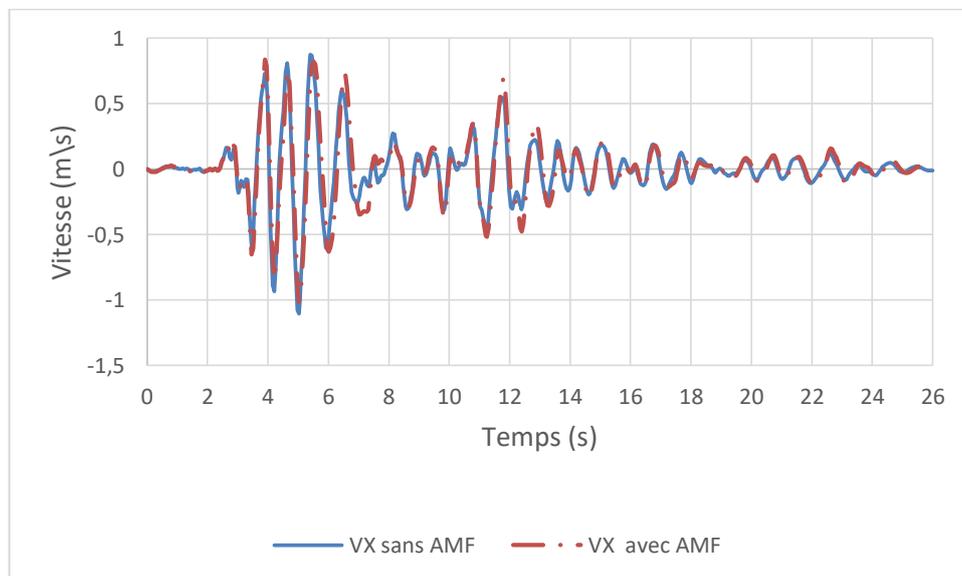


Figure III.20 : vitesses au sommet de la structure évidée.

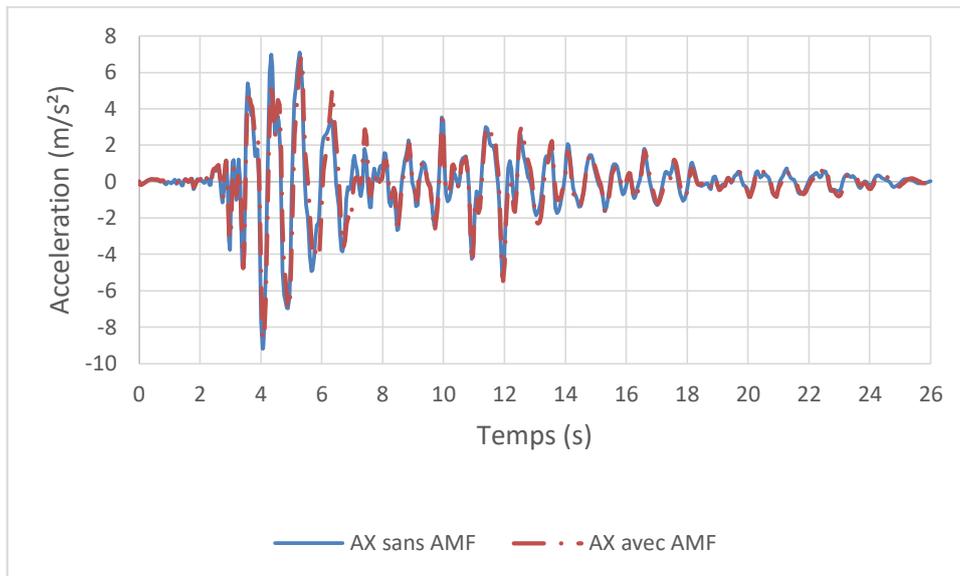


Figure III.21 : Accélération horizontale au sommet de la structure évidée

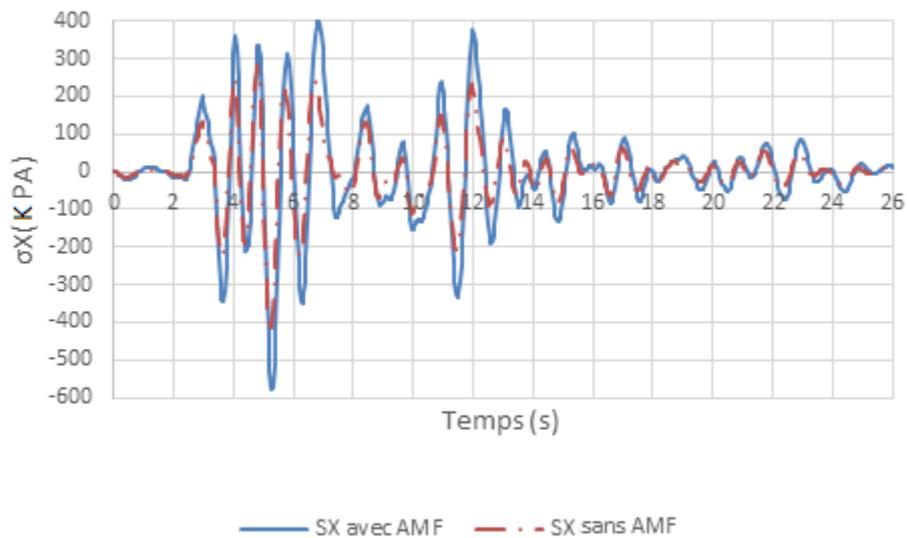


Figure III.22 : Variation de la contrainte à la base de la structure évidée

Les résultats de comparaison entre les 2 structures sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau III.6 : Résultats de comparaison entre les grandeurs des deux structures pleine et évidée sans et avec AMF

Structure	Grandeurs	Sans AMF	Avec AMF	Différence (%)
Pleine	UX Max (cm)	19	17,05	10,26
	VX Max (m/s)	1,14	1,16	-1,75
	AX Max (m/s ²)	9,40	9,03	4
	σ X Max (Mpa)	1,28	-0,209	116
Evidée	UX Max (cm)	17,5	17,12	2,17
	VX Max (m/s)	1,10	1,01	8,18
	AX Max (m/s ²)	9,20	8,71	5,33
	σ X Max (Mpa)	-0,518	-0,570	10

D'après les résultats de ce tableau, les pourcentages de différences entre le calcul sans AMF et avec AMF ne sont pas très marquants pour les valeurs maximales, notamment pour une structure évidée. Mais, nous avons constaté auparavant, dans les figures III.15 à III.16, que l'efficacité de l'AMF est remarquable dans l'intervalle [6s, 14s] où l'amélioration des valeurs dépasse les 50% en introduisant l'AMF.

III.8.2. Comparaison des résultats entre la Structure pleine et la structure évidée avec AMF

Les figures III.23 à III.26 présentent les graphes des variations des déplacements, vitesses, accélérations et contraintes pour les deux structures, pleine et évidée. Les mêmes courbes sont remarquées pour les deux cas étudiés. Nous pouvons constater que dans ce là, le fait d'introduire l'AMF n'a pas changé le comportement de la structure évidée, en revanche une amélioration dans le comportement de la structure pleine, qui s'est rapproché de celui de la structure évidée sans AMF. Dans ce dernier cas, nous pouvons dire que peut-être qu'un alliage est insuffisant pour atténuer les réponses sismiques ? Malheureusement, pour des raisons numériques, nous n'avons pas pu rajouter plus de fils en AMF. Avec un seul AMF, le calcul nous a coûté cher en temps de calcul et en espace mémoire.

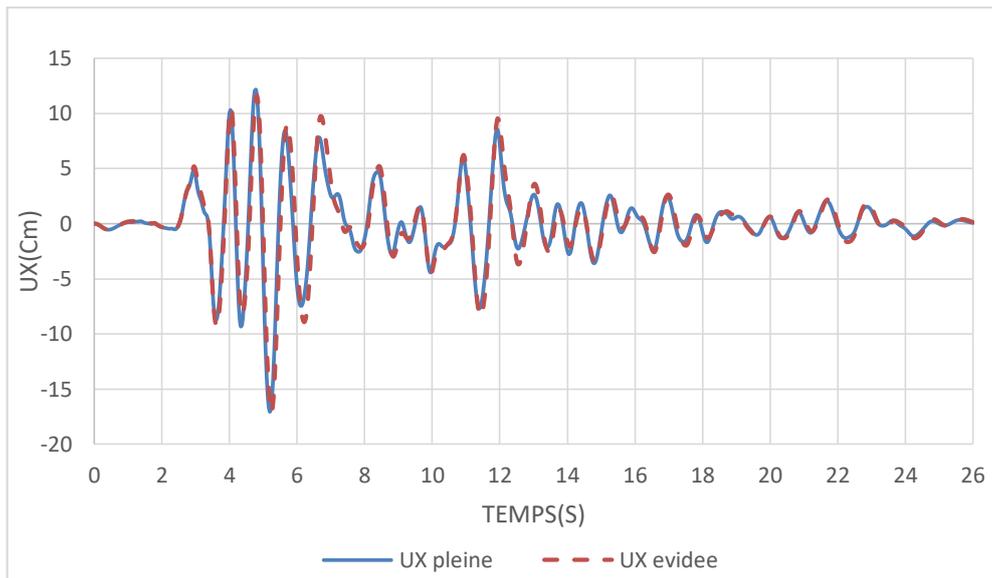


Figure III.23 : comparaison des déplacements au sommet des deux structures pleine et évidée ; avec AMF

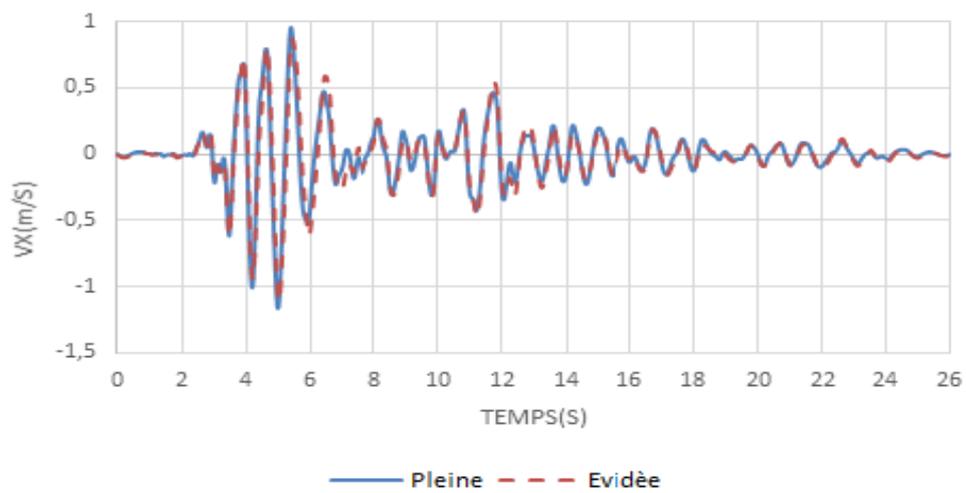


Figure III.24 : comparaison des vitesses au sommet des deux structures pleine et évidée ; avec AMF

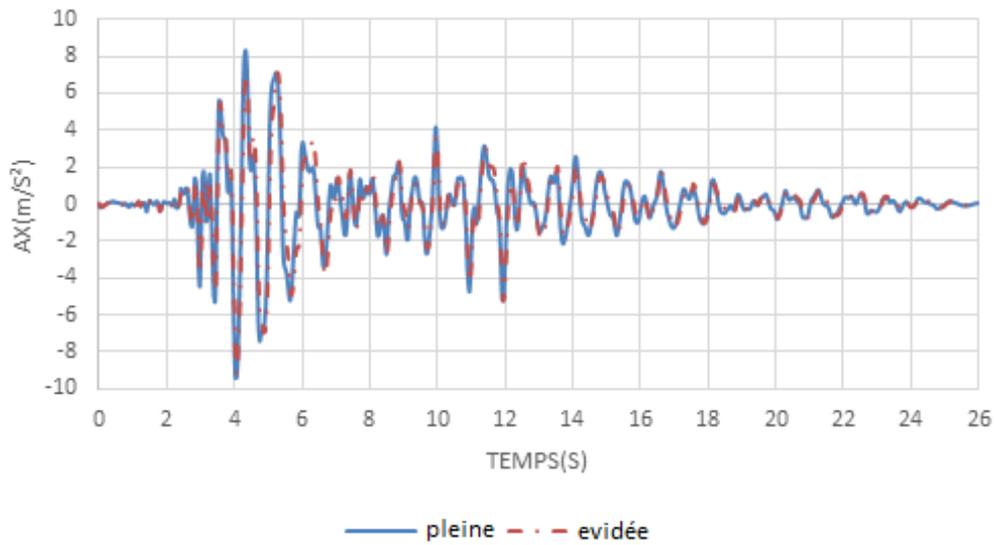


Figure III.25 : comparaison des accélérations horizontales au sommet des deux structures pleine et évidée ; avec AMF

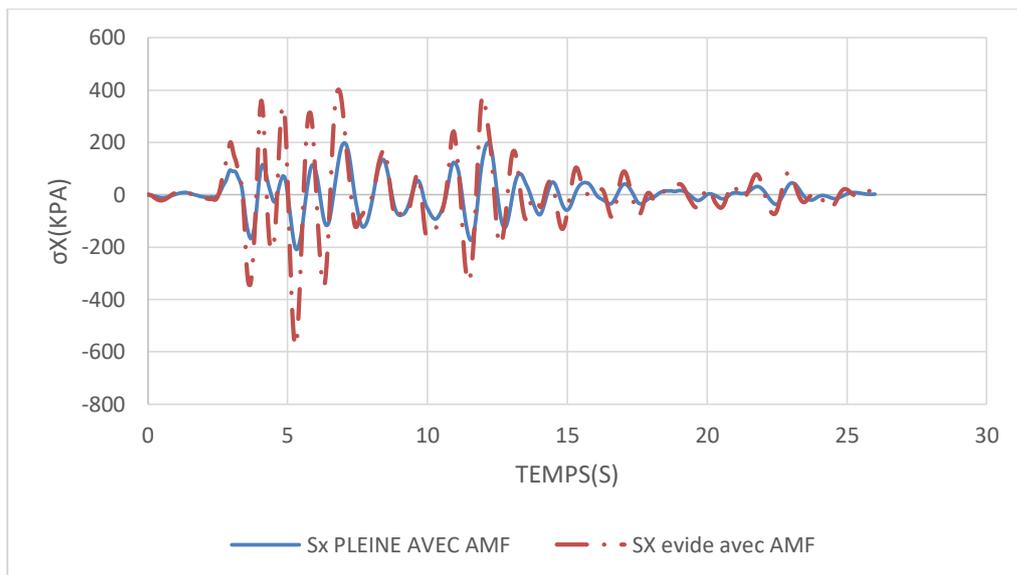


Figure III.26 : comparaison des contraintes horizontales à la base des deux structures pleine et évidée ; avec AMF

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons testé en premier lieu, l'effet des systèmes d'attaches des AMF sur une structure simple. Deux types d'attaches ont été considérés (avec cornières et avec ceinture). Les résultats ont montré que le type de support n'influe pas sur les comportements, de la structure avec AMF.

Aussi, l'effet de la masse sur le comportement de la structure vis-à-vis du rajout de l'AMF a été examiné. Pour cela, deux structures de mêmes dimensions ont été considérées. Une pleine et une évidée avec une paroi de 0,5 m. L'étude dynamique transitoire sous l'effet du séisme de Duzce99, a montré que le fait de diminuer la masse de la structure diminuera l'effet de l'AMF. En effet, pour la structure évidée l'introduction de l'AMF n'a pas montré un effet exceptionnel sur le comportement de la structure. En revanche, pour la structure pleine l'atténuation des réponses dynamiques a été remarquable.

A la suite de ces résultats, un exemple d'application sera considéré dans le chapitre suivant. Il s'agit du minaret de Dolmabahçe en Turquie.

Chapitre IV

Etude du comportement des AMF sur le minaret de Dolmabahçe

Contenu

IV.1. Introduction	70
IV.2. Historique.....	70
IV.3. Caractéristiques géométriques.....	71
IV.4. Caractéristiques mécaniques	72
IV.5. Hypothèses de modélisation	72
IV.6. Étapes de modélisation	73
IV.7. Etude modale du minaret	73
IV.8. Analyse transitoire du minaret.....	75
IV.9. Conclusion	82

IV.1. Introduction

Après avoir interpréter les résultats trouvés au chapitre 3 sur une structure simple, nous allons dans ce chapitre faire un exemple réel d'application et de voir l'influence d'un rajout d'un AMF sur la structure. Pour cette application, nous avons choisi un minaret appartenant à la mosquée de Dolmabahçe en Turquie, qui est un lieu très visité à cause de sa valeur historique et culturelle, de style baroque (Murat, 2013). Cette mosquée est renommée par ses deux minarets en forme de colonnes corinthiennes et d'une finesse dont on retrouve peu dans les autres mosquées d'Istanbul (figure IV.1).

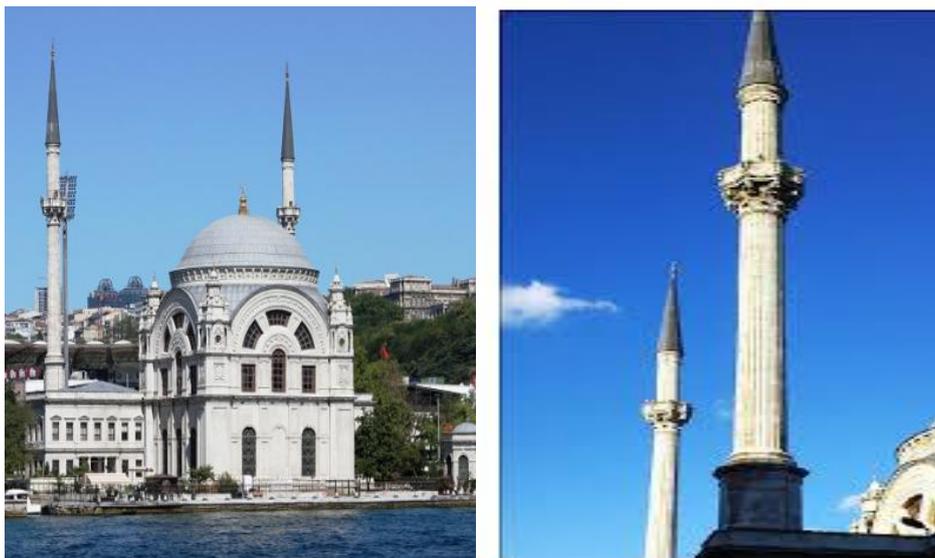


Figure IV.1 : la mosquée de Dolmabahçe et ses deux minarets.

IV.2. Historique

La mosquée de Dolmabahçe, également appelée mosquée du sultan Bezmiâlem Vâlide, a été construite avec le palais de Dolmabahçe dans le style néo-classique et impérial, et située au sud du palais de Dolmabahçe. A l'origine, le sultan Bezmiâlem Vâlide Sultan, mère du sultan Abdülmecid Ier, avait commandé cette mosquée, mais après sa mort, elle fut reprise par le sultan Abdülmecid I. Son architecte était Garabet Balyan et il l'acheva en 1855. La mosquée a une section rectangulaire de deux étages de forme royale et une structure géométrique évidente avec sa base de 25 x 25 mètres. Comme c'était la partie du complexe du palais, il contient une partie avant, dans laquelle les fonctionnaires de l'Etat et le souverain pouvaient adorer et une partie à deux étages pour le souverain convenable pour la procession publique du Sultan à la mosquée le vendredi. La mosquée de Dolmabahçe possède deux minarets avec un seul balcon et une seule coupole reposant sur un étage carré. La partie intérieure est

décorée d'un mélange d'ampère et de style baroque. Mimbar (chaire) et Mihrab (niche) sont faits de porphyre rouge et décorés de motifs européens. La lumière des grandes fenêtres contribue à la beauté de la décoration intérieure en marbre color (www.fr.wikipedia.org).

IV.3. Caractéristiques géométriques

Dans cette étude le minaret ouest de la mosquée de Dolmabahçe a été considéré comme un cas d'étude. Les dimensions du minaret sont données dans la figure IV.2 (Murat, 2013).

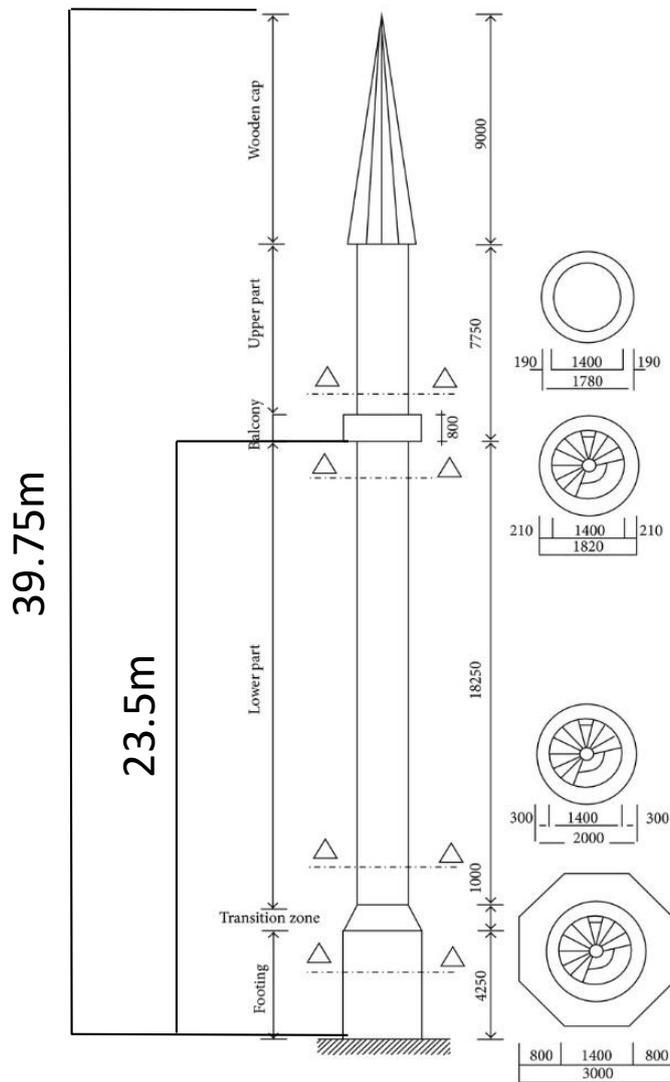


Figure IV.2 : Propriétés géométriques du minaret (Murat, 2013).

IV.4. Caractéristiques mécaniques

Le soubassement du minaret est réalisé en utilisant des blocs de pierres très épais et reliés au mur extérieur lourd de la mosquée. Le minaret est une structure en porte-à-faux mince en forme de tour. La partie inférieure, du bas vers la galerie, est constituée par le mur, l'escalier et le noyau. L'épaisseur du mur de maçonnerie de cette partie diminue avec la longueur. A l'intérieur de la partie supérieure de la galerie au sommet du minaret est vide qui n'a aucune utilité. Les balcons sont surtout utilisés pour les prières qui créent une concentration de masse le long de la hauteur du minaret, Le diamètre et l'épaisseur de la section de la partie supérieure sont plus petits que le corps principal et la botte. La partie conique du minaret a été construite avec une charpente en bois montée recouverte de feuilles de plomb.

Tableau IV.1 : Propriétés mécaniques du calcaire de kufeki utilisées dans l'analyse (Murat, 2013).

Propriété	Valeur
Module d'élasticité (MPA)	8856
Poids volumique (KN/m ³)	22,55
Résistance à la compression (MPA)	19,2
Coefficient de Poisson	0,24
Densité (kg/m ³)	2300

IV.5. Hypothèses de modélisation

- Le matériau du minaret est supposé être linéaire, élastique et isotrope.
- Pour la modélisation tridimensionnelle en éléments finis du minaret et de l'AMF, des éléments solides de type « SOLID 185 » ont été utilisés.
- Le minaret est supposé être encasté à sa base.
- La partie conique du minaret en bois a été négligée pendant l'étude en raison de sa structure de jauge légère différente de celle de la maçonnerie.
- Les caractéristiques du calcaire (appelé également pierre de Kufeki ou calcaire de Maktarali) sont utilisées.
- Le pied du minaret, réalisé initialement en blocs de pierres très épais a été modélisé avec le même matériau que le reste de la structure (en calcaire de Kufeki), dont les caractéristiques sont données dans le tableau IV.1.
- Les escaliers ne sont pas modélisés dans cette étude.

IV.6. Étapes de modélisation

Afin de modéliser le minaret, on est passé par les étapes suivantes :

- Introduire le type d'élément Solid 185 et caractériser les caractéristiques des matériaux.
- Créer la géométrie du minaret.
- Transformer le modèle géométrique du minaret en modèle en éléments finis.
- Définir les conditions aux limites d'encastrement à la base du minaret.
- Le séisme de duzce 99 (figure III.8) est utilisé dans l'analyse transitoire, et il est appliqué suivant la direction horizontale X.

La figure IV.3 représente le modèle en éléments finis du minaret réalisé avec le logiciel de calcul Ansys V15.0.



Figure IV.3 : Le modèle Eléments finis du minaret

IV.7. Etude modale du minaret

Dans cette partie, nous allons chercher les modes fondamentaux du minaret en considérant les hypothèses citées précédemment. Nous avons relevé les dix premiers modes de vibration qui sont représentés sur la figure IV.4. Quant aux valeurs des fréquences et périodes propres, elles sont données dans le tableau IV.2.

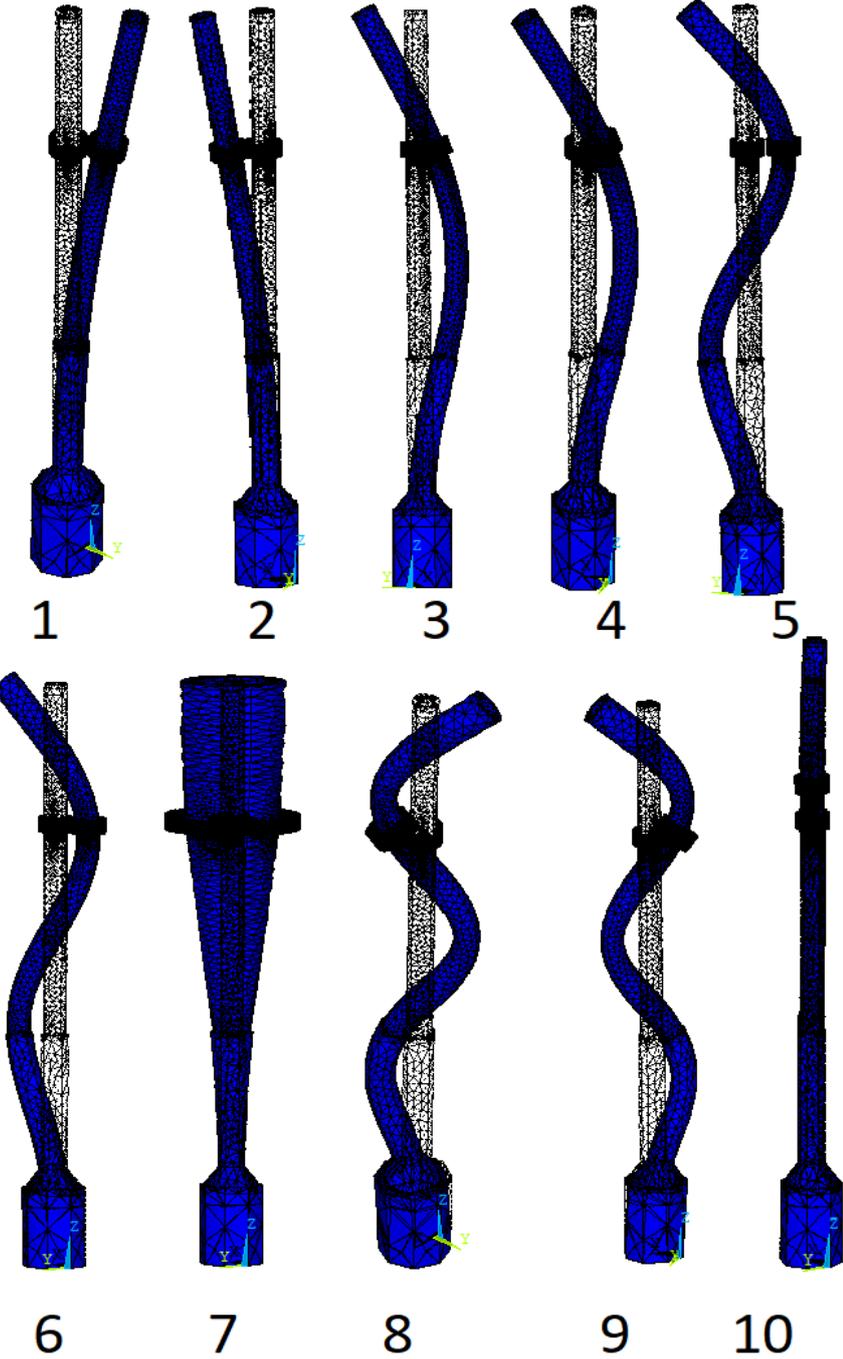


Figure IV.4 : Les dix premiers modes de vibration.

Tableau IV.2 : Les périodes et les fréquences des dix modes.

MODE	FREQUANCE	PERIODE	DIRECTION
1	0.705875	1.4167	Translation Y
2	0.710285	1.4079	Translation X
3	3.82068	0.26173	Translation Y
4	3.84500	0.26008	Translation X
5	9.87324	0.10128	Translation Y
6	9.88342	0.10118	Translation X
7	14.0899	0.70973E-01	Torsion Z
8	18.5867	0.53802E-01	Translation Y
9	18.6402	0.53647E-01	Translation X
10	19.6479	0.50896E-01	Translation Z

IV.8. Analyse transitoire du minaret

Afin de réduire les risques sismiques et améliorer le comportement dynamique des structures, la première des choses est de passer par la modélisation en appliquant une force sismique sur la structure avec et sans renforcement suivant une direction et voir l'influence du renforcement sur le comportement dynamique de la structure.

Dans notre travail, nous allons appliquer le séisme de duzce 99 (Figure III.8) sur le minaret En regardant l'effet de rajouter un AMF sur le comportement de la structure.

IV.8.1. Points de mesure

Dans l'analyse, Nous avons choisi 2 points critiques sur le minaret afin d'analyser les résultats (figure IV.5). Nous allons relever les entités suivantes : déplacements, accélérations ainsi que la distribution des contraintes afin de connaître le comportement dynamique du minaret sans et avec fil d'AMF.

IV.8.2. Modélisation

Suite aux conclusions présentées dans le chapitre 3, et pour le renforcement avec AMF, nous avons placé un fil d'AMF sur le balcon du minaret qui est situé à 27 m de la base. Ce placement se justifie par la possibilité d'accès à cet endroit par l'opérateur. Aussi concernant le système d'attaches de l'AMF au minaret, nous avons montré dans le chapitre précédent que celui-ci n'a pas d'effets sur le comportement global de la structure. Nous avons donc opté pour un système d'attaches en ceinture (figure IV.6).

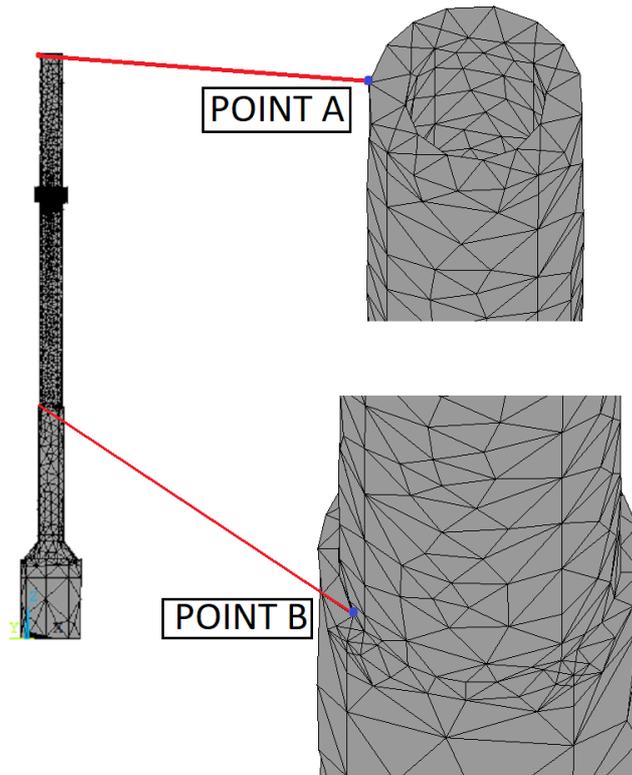


Figure IV.5 : Positions des deux points de référence.

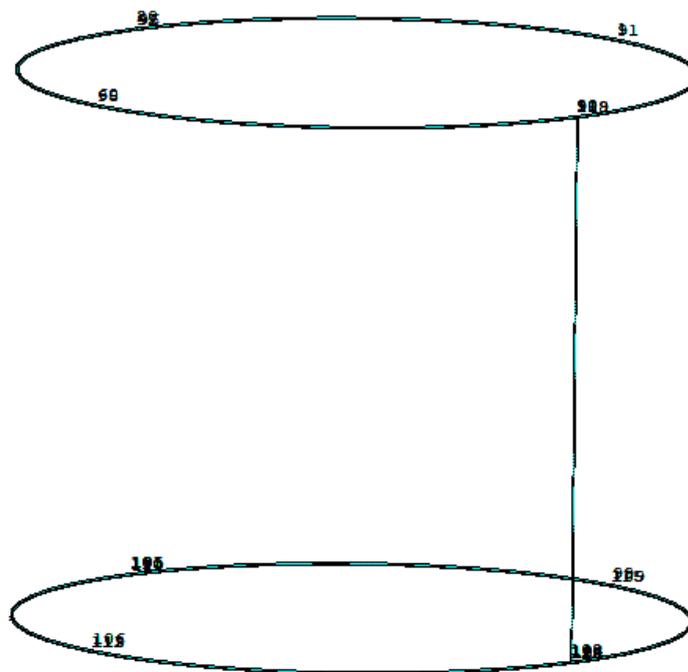


Figure IV.6 : assemblage de l'AMF par ceinture.

IV.8.3. Interprétation des résultats

D'après l'analyse dynamique transitoire effectuée sur le minaret, sans et avec fil d'AMF, nous avons réalisé les comparaisons représentées sur les figures suivantes. La figure IV.7 représente la variation du déplacement au point A au cours du chargement sismique. Le fait d'introduire l'AMF minimise les déplacements, notamment où l'excitation est à son maximum. Le déplacement maximum du cas sans AMF est de plus de 33 cm alors que pour le cas avec AMF, la valeur est de 18 cm, soit une réduction de plus de **45%**. Quant au point B représenté par la figure IV.8, la réduction de déplacement n'est pas remarquable. Les valeurs sont pratiquement les mêmes pour les deux cas étudiés.

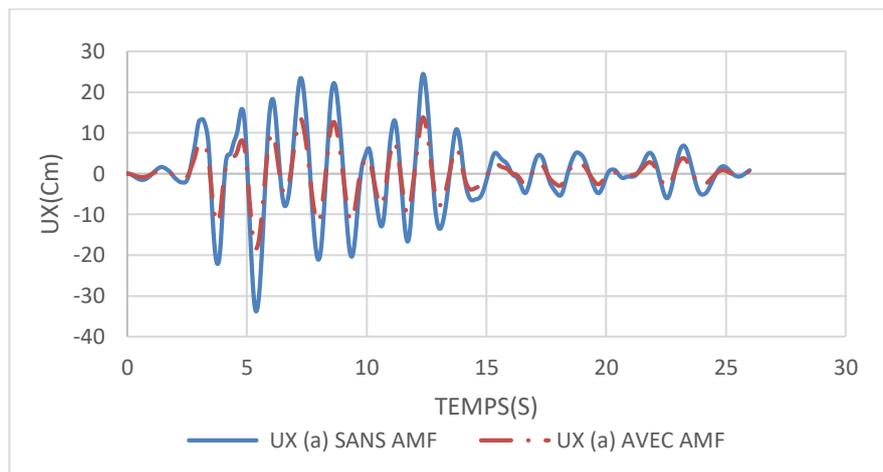


Figure IV.7 : Variation des déplacements au point A, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99

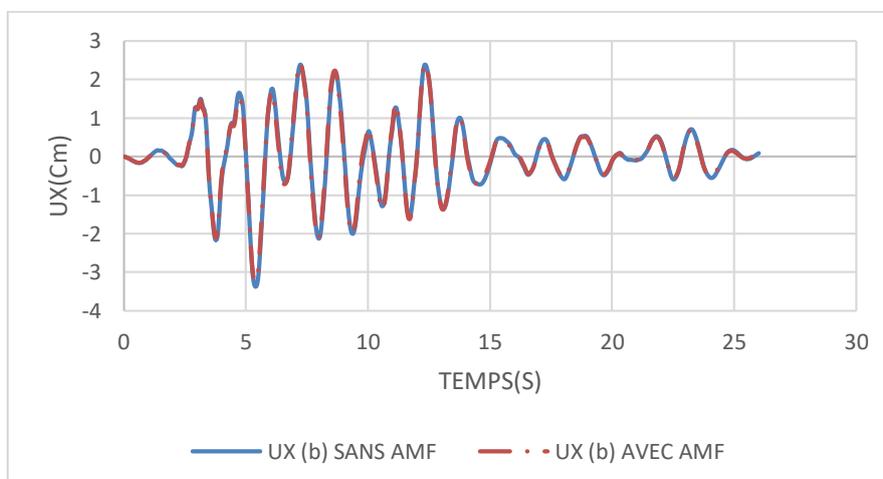


Figure IV.8 : Variation des déplacements au point B, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99

Les figures IV.9 et IV.10 représentent la variation de la vitesse aux points A et B. la même remarque que pour les déplacements, la variation est nettement remarquable au point le plus haut du minaret « le point A », alors qu'il est moins au point B. La différence de vitesses maximales relevée au point A est de **47%**. Au point B, les deux courbes sont quasiment identiques.

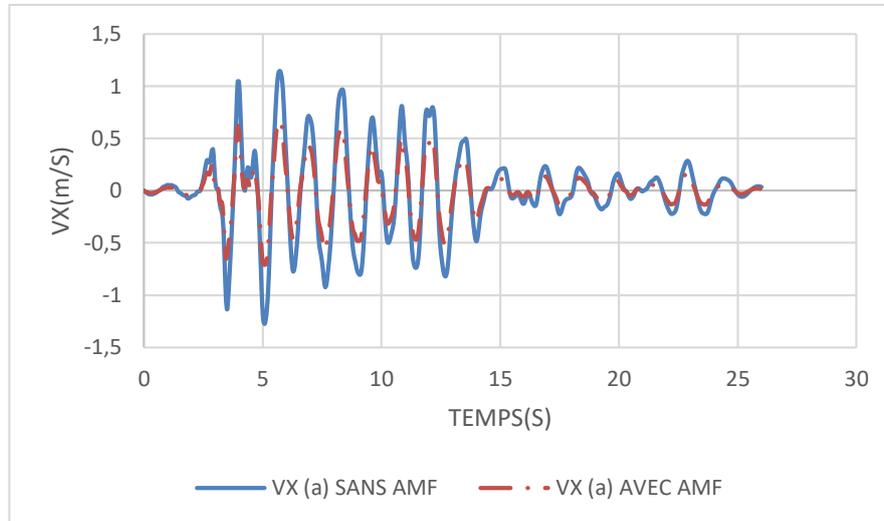


Figure IV.9 : Variation des vitesses au point A, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99

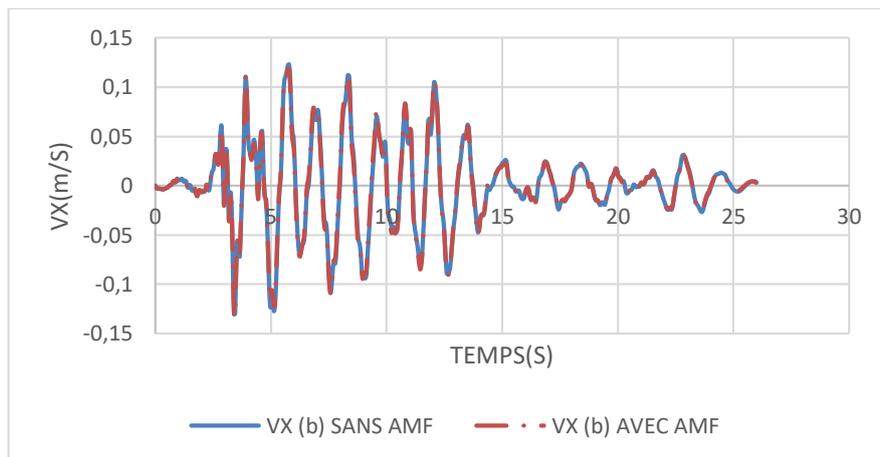


Figure IV.10 : Variation des vitesses au point B, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99

Les figures IV.11 et IV.12 représentent la variation de l'accélération aux points A et B. La réduction des accélérations a été bien lisible au point A, alors qu'elle l'est moins au point B. La réduction des accélérations maximum est de **42%** au point A.

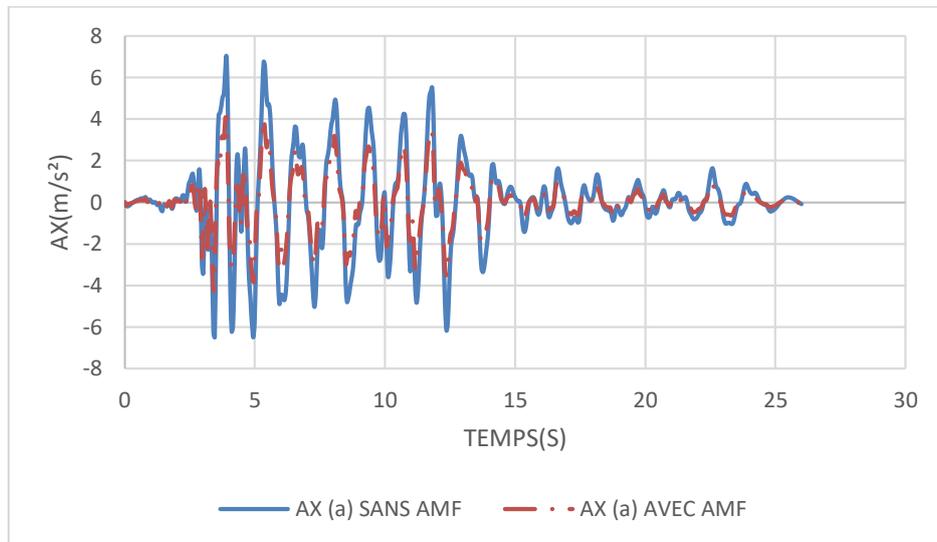


Figure IV.11 : Variation de l'accélération au point A, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99

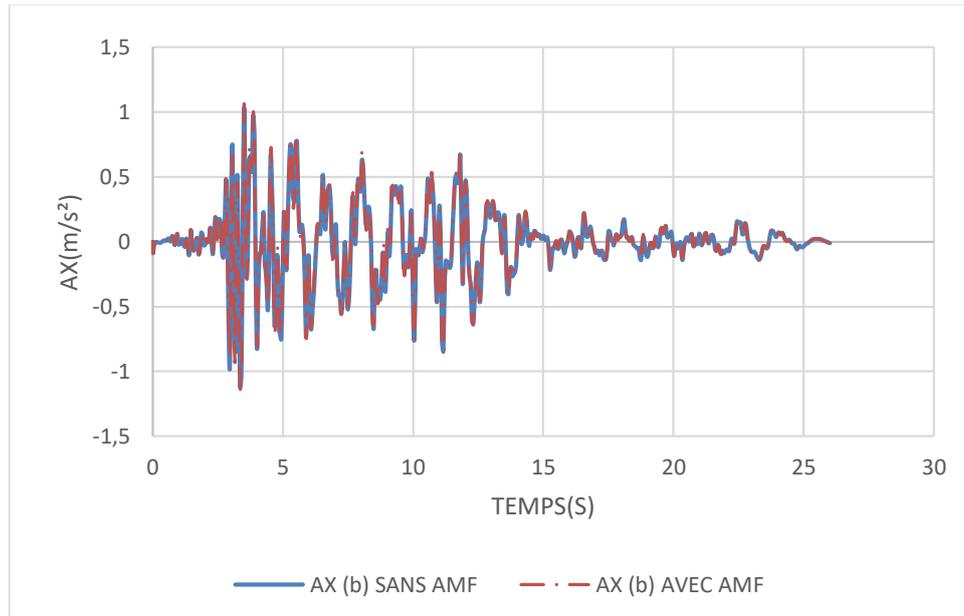


Figure IV.12 : Variation de l'accélération au point B, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99

Les figures IV.13 et IV.14 représentent la variation des contraintes aux points A et B. La variation des contraintes est significative au point B qu'au point A. En effet, on signale une réduction de **78%** de contraintes maximales au point B. Alors qu'au point A les contraintes augmentent avec l'ajout de AMF. Ceci dit, l'augmentation des contraintes en ce point, ne va pas agir sur la stabilité du minaret, vu son emplacement. La figure IV.15 montre la concentration des contraintes au niveau du point B. Chose qui peut s'expliquer par le changement brusque de section qui se trouve à ce niveau-là. En effet, on passe d'une section hexagonale de diamètre de 3,00m à une section circulaire de 2,00m de diamètre (figure IV.2).

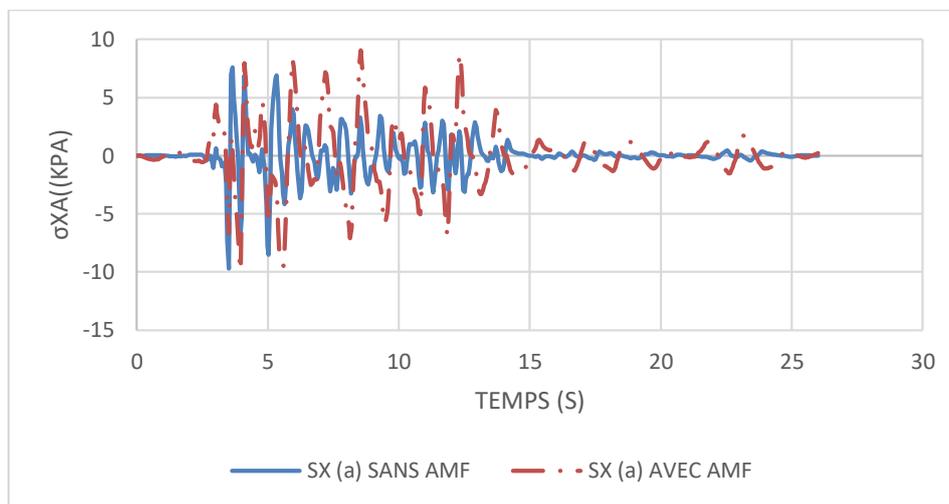


Figure IV.13 : Variation de la contrainte au point A, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99.

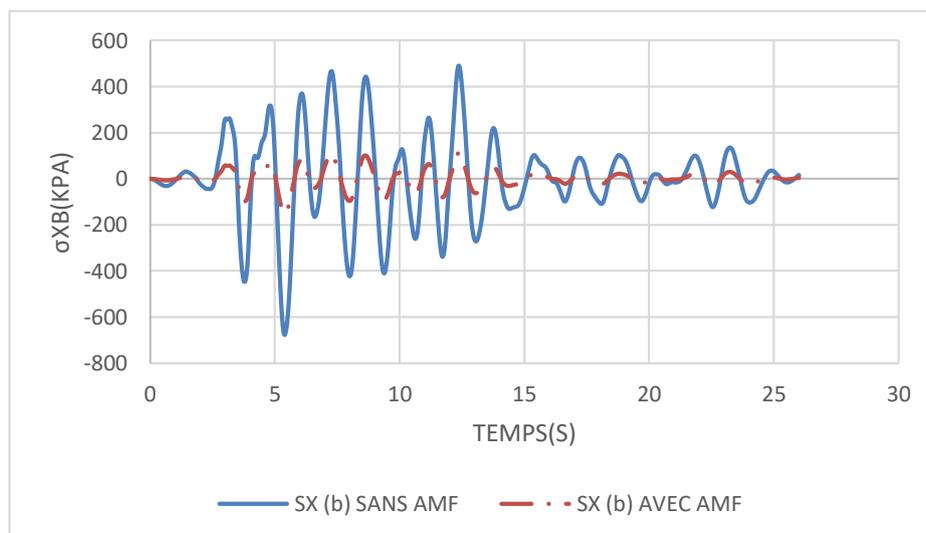


Figure IV.14 : Variation de la contrainte au point B, sans et avec AMF sous l'action du séisme Duzce99.

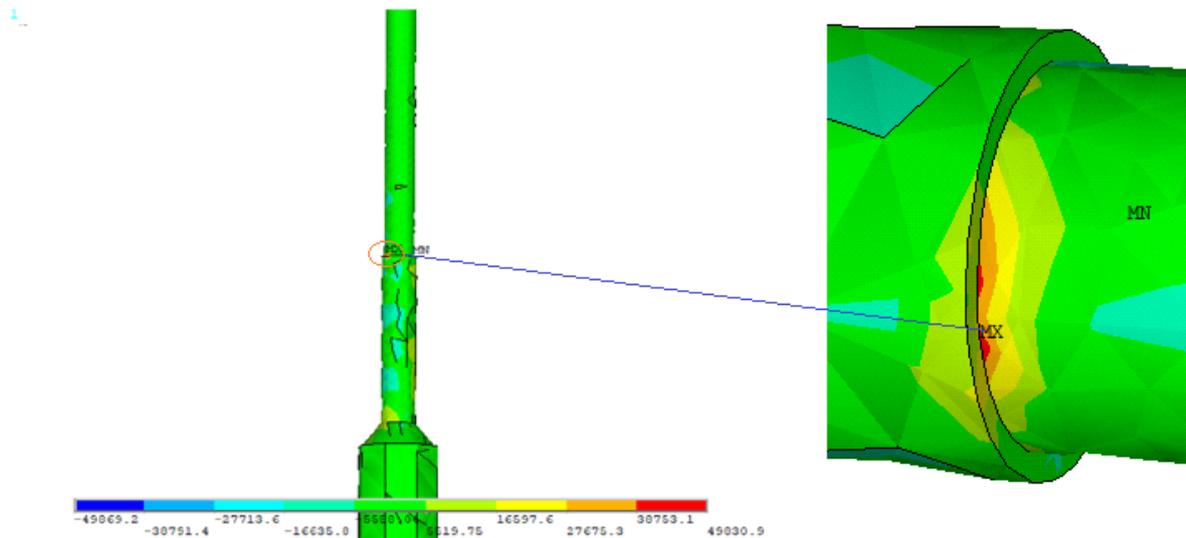


Figure IV.15 concentration des contraintes au niveau du point B du minaret de dolambahçe sans AMF

Les résultats sont résumés dans le tableau IV.3. La différence entre le cas sans et avec l'introduction de l'AMF sera présentée. D'après ces résultats, on a remarqué que le renforcement du minaret avec le fil d'AMF montre une efficacité dans l'atténuation du risque sismique. Au point « A » le fil d'AMF a réduit les déplacements, vitesses et l'accélération. Cependant, au point « B », les contraintes ont été réduites d'une manière remarquable et ceci grâce à l'effet dissipation d'Énergie du fil d'AMF.

Tableau IV.3 : Résultats de comparaison entre les grandeurs du minaret aux points (A) et (B) sans et avec AMF.

Points	Grandeurs	Sans AMF	Avec AMF	Différence (%)
(A)	UX Max (cm)	33,7	18,3	-45,7%
	VX Max (m/s)	1,24	0,66	-46,77%
	AX Max (m/s ²)	7,38	4,28	-42%
	σ_X Max (Mpa)	9,709	9,911	+2%
(B)	UX Max (cm)	3,37	3,24	-3,85%
	VX Max (m/s)	0,13	0,13	0%
	AX Max (m/s ²)	1,11	1,13	+1,8%
	σ_X Max (Mpa)	0,677	0,147	-78,17%

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons renforcé le minaret par un fil d'AMF et appliqué le signal sismique de Duzce99. La comparaison entre les résultats obtenus montre une efficacité du fil d'AMF sur la réduction des déplacements, vitesses et accélérations au sommet du minaret. Ainsi qu'une réduction des contraintes au point B.

L'introduction qu'un seul AMF a permis l'amélioration de presque **50%** des valeurs maximales de déplacements, vitesses et accélérations au sommet du minaret, et d'une amélioration de presque **80%** des contraintes vers la base, résultat qui semble plus que satisfaisant.

Conclusions et Perspectives

Lors de la réalisation de ce mémoire, on a utilisé des matériaux métalliques intelligents (AMF) qui présentent des propriétés thermomécaniques particulières, et notamment l'effet mémoire de forme pour l'atténuation des risques sismiques des structures.

Premièrement, nous avons étudié l'effet d'attaches de ces éléments sur une structure simple de forme prismatique, et ceci suite aux études qui ont précédé la nôtre au sein de notre établissement. La structure élancée de dimensions $(2 \times 2 \times 20) \text{ m}^3$ a été considérée avec deux systèmes d'attaches (par cornières et par ceinture). Sous l'effet du signal sismique de Boumerdès (2003), nous avons constaté que ces deux systèmes d'assemblage n'influent pas sur les résultats trouvés. La comparaison a été faite en termes de déplacements, vitesses et accélérations qui ont conduit vers les mêmes résultats.

A l'issue de cette première analyse, le système d'assemblage par ceinture a été adopté pour la suite. Ainsi, nous avons considéré un séisme plus fort que celui de Boumerdès (2003), bien que celui-ci reste fort également. Il s'agit du signal sismique duzce en Turquie (1999).

Les structures étant de très grandes hauteurs et généralement évidées, nous a ramené à étudier l'effet de la masse sur le comportement de l'AMF. Les structures étudiées ont été inspirées des dimensions du minaret de Mansourah. Une dimension de $(40 \times 10 \times 10) \text{ m}^3$ a été considérée. Avec une paroi de 0,5 m pour la structure évidée. Les résultats ont montré que ces deux paramètres n'influent pas sur le comportement dynamique des AMF. La structure (pleine ou évidée) présente le même comportement vis-à-vis du placement de l'AMF. En revanche, pour le cas d'une structure pleine la différence a été remarquable pour le placement /ou non de l'AMF. Cette différence est nettement remarquée au niveau des déplacements maximums. Une réduction de 10% a été relevée juste pour le placement d'un seul alliage. Pour les structures évidées, il n'est pas nécessaire d'utiliser l'AMF. Cette conclusion est valable pour le test d'un seul fil d'AMF. Peut-être que l'effet de l'alliage sera lisible pour un nombre supérieur à 1, chose qui n'a pas été vérifiée dans ce travail. Nous aurions souhaité étudier plusieurs scénarii mais nous avons rencontré certains problèmes qui nous ont empêchés de faire plus d'analyses, à savoir :

- Le temps d'analyse de la structure pleine avec un seul fil d'AMF a dépassé les 15 heures.
- Les résultats d'une seule analyse ont pris une capacité mémoire qui dépasse 500 GB
- Vu la différence d'échelles entre la structure (en dizaine de mètres) et les dimensions des fils (en millimètres) rend le maillage des structures très difficile à réaliser.

L'étude du minaret de Dolmabahçe en Turquie a montré que l'effet de l'AMF a un effet considérable sur les résultats de déplacements, vitesses et accélérations au sommet du minaret. En effet, des réductions qui s'approchent des 50% ont été relevées. Aussi, une réduction très intéressante dans la contrainte (80%) vers la base du minaret. Ce point de concentration de contraintes a été remarqué au changement de section dans la structure, ce qui confirme le résultat trouvé au minaret d'Ajloun (Benallal et Chitaoui, 2015).

A issue de cette étude, on souhaiterait présenter certaines recommandations :

- Considérer des structures évidées au lieu des structures pleines et tester plus de scénarii, à savoir augmenter le nombre de fils d'AMF au moins à 2 fils et voir l'influence ce ceci sur le comportement de la structure.
- Etudier la possibilité de modéliser les fils d'AMF autrement que les éléments 3D. (en éléments barres par exemple). Ceci réduira considérablement le temps de calculs et la capacité mémoire.
- Utiliser d'autres types d'AMF et comparer les résultats.

Références bibliographiques

Abdulridha A., Palermo D., Foo S., Vecchio FJ. Behavior and modeling of superelastic shape memory alloy reinforced concrete beams. *Eng Struct* 2013;49:893e904.

Adeel ZAFAR BA. Experimental flexural behavior of SMA-FRP reinforced concrete beam. *Front Struct Civ Eng* 2013;7(4):341e55.

Adoum Waibaye. Création de structures actives à l'aide d'alliages à mémoire de forme. Thèse de Doctorat. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016.

Ahmet Murat Türk, Seismic Response Analysis of Masonry Minaret and Possible Strengthening by Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Materials. *Advances in Materials Science and Engineering* 2013. Article ID 952497, 14 pages.

Aiken, I. D., Nims, D. K., Whittaker, A. S., and Kelly, J. M. Testing of Passive Energy Dissipation Systems. *Earthquake Spectra* 9, 3 (1993), 335–369.

Aizawa, S., Kakizawa, T., and Higasino, M. Case studies of smart materials for civil structures. *Smart Materials and Structures* 7 (1998), 617–626.

Alam M S., Youssef M A., and Nehdi M. Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review. *Canadian Journal of Civil Engineering* 34 (2007), 1075–1086.

Alam M S., Youssef M. A and Nehdi M. Analytical prediction of the seismic behaviour of superelastic shape memory alloy reinforced concrete elements. *Engineering Structures* 30 (2008), 3399–3411.

Alam MS., Youssef MA., Nehdi M. Analytical prediction of the seismic behaviour of superelastic shape memory alloy reinforced concrete elements. *Eng Struct* 2008;30(12):3399e411.

Andrawes B., and DesRoches R. Comparison Between Shape Memory Alloy Restrainers and and Other Bridge Retrofit Devices. *ASCE Journal of Bridge Engineering* 12, 6 (2007), 700–709.

Auguet C., Isalgue A., Lovey Martorell F and Torra V. Metastable effects on martensitic transformation in SMA Part 4. Thermomechanical properties of CuAlBe and NiTi observations for dampers in family houses. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 88, 2 (2007), 537–548.

Auricchio F., Fugazza D and Desroches R. Earthquake Performance of Steel Frames with Nitinol Braces. *Journal of Earthquake Engineering* 10, 4 (2006), 45–66.

Baidi Salim, Etude thermodynamique d'alliages binaires à mémoire de forme. Thèse de Magister. Université de Batna, 2009.

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.

Bekker A and Brinson L C. Phase Diagram based description of the hysteresis behavior of shape memory alloys. *Acta Metallurgica et Materialia* 46, 10 (1997), 3649–3655.

Ben Mekki O, Auricchio F. Performance evaluation of shape-memory-alloy superelastic behavior to control a stay cable in cable-stayed bridges. *Int J Nonlinear Mech* 2011;46(2):470e7.

Benallal M.E., Chitaoui H. Etude du comportement d'une structure historique équipée d'amortisseurs en matériaux intelligents, (Application sur le minaret d'Ajloun en Jordanie), mémoire de master GC, soutenu 11 Juin 2015, Tlemcen.

Birman V. Shape memory elastic foundation and supports for passive vibration control of composite plates. *International Journal of Solids and Structures* 45 (2008), 320–335.

Boroschek R L., Farias G., Moroni O and Sarrazin M. Effect of SMA braces in a Steel Frame Building. *Journal of Earthquake Engineering* 11 (2007), 326–342.

Brinson L C. One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 4 (1993), 229–242.

Brinson L.C. (1993) One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 4 : 229-242.

Bruno S and Valente C. Comparative response analysis of conventional and innovative seismic protection strategies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 31 (2007), 1067–1092.

Casciati F., Faravelli L., Hamdaoui K. Performance of a base isolator with shape memory alloy bars. *Earthq Eng Vib* 2007; 6(4):401e8.

Casciati S and Faravelli L. Structural components in shape memory alloy for localized energy dissipation. *Computers and Structures* 86 (2008), 330–339.

Castellano M G., Indirli M and Martelli A. Progress of application, research and development and design guidelines for shape memory alloy devices for cultural heritage structures in Italy. *SPIE Proceedings* 4330 (2000), 250–261.

Castellano MG., Indirli M., Martelli A., Liu S. Progress of application, research and development, and design guidelines for shape memory alloy devices for cultural heritage

structures in Italy. In: Smart structures and materials 2001: smart systems for bridges, structures, and highways, vol. 4330. Newport Beach (CA, USA): SPIE; 2001. pp. 250e61.

Chang L C and Read T A. Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals - The gold-cadmium beta phase. *Trans AIME* 189 (1951), 47–52.

Chopra A K. Dynamics of Structures: theory and applications to earthquake engineering, 2nd ed. Prentice-Hall, Inc., 2001.

Corbi O. Shape memory alloys and their application in structural oscillations attenuation. *Simulation Modelling Practice and Theory* 11 (2003), 387–402.

Croci G. Strengthening the Basilica of St. Francis of Assisi after the September 1997 Earthquake. *Structural Engineering International* 11, 3 (2001), 207–210.

DesRoches R and Delemont M. Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. *Engineering Structures* 24 (2002), 325–332.

DesRoches R and Smith B. Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: a critical review of their potential applications. *Journal of Earthquake Engineering* 7, 3 (2003), 1–15.

DesRoches R., McCormick J., Delemont M. Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars. *J Struct Eng ASCE* 2004;130 (1):38e46.

DesRoches R., Pfeifer T., Leon R T and Lam T. Full-Scale Tests of Seismic Cable Restrainer Retrots for Simply Supported Bridges. *Journal of Bridge Engineering* 8, 4 (2003), 191–198.

Dieng L., Helbert G., Chirani SA., Lecompte T., Pilvin P. Use of shape memory alloys damper device to mitigate vibration amplitudes of bridge cables. *Eng Struct* 2013;56:1547e56.

Dolce M., Cardone D., Ponzo F C and Valente C. Shaking table tests on reinforced concrete frames without and with passive control systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 34 (2005), 1687–1717.

Dolce M., Donatello C and Ponzo F C. Shaking-table tests on reinforced concrete frames with different isolation systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 36 (2007), 573–596.

Duerig T W and Pelton A R. Materials Propreties Handbook: Titanium Alloys. ASM International, 1994.

Echchorfi Rachid. Dialogue essais - simulation et identification de lois de comportement d'alliage à mémoire de forme en chargement multiaxial, Thèse de doctorat, Soutenue en-2013, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers –ENSAM ,France, 238p.

Eggeler G., Hornbogen E., Yawny A., Heckmann A., Wagner M. Structural and functional fatigue of NiTi shape memory alloys. *Mater Sci Eng A-Structural Mater Prop Microstruct Process* 2004; 378(1e2): 24e33.

Entemeyer Denis, Etude micromécanique du comportement thermomécanique des alliages à mémoire de forme. Thèse de Doctorat. Université Paul Verlaine - Metz, 1996.

Entermayer Denis. Etude micromécanique du comportement thermomécanique des alliages à mémoire de forme, Thèse de doctorat, Soutenue en-1996, l'Université de Metz, France, 244p.

Fatma JEMAL ELLOUZE. Modélisation du comportement thermomécanique d'un alliage à mémoire de forme à base de fer type Fe-Mn-Si. Thèse de Doctorat. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2009.

Fugazza D. Shape-memory alloy device in earthquake engineering: Mechanical properties, constitutive modelling and numerical simulations. Master's thesis, Rose School. European School of Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, Pavia, Italy, 2003.

Gadaj S P., Nowacki W K and Pieczyska E A. Temperature evolution in deformed shape memory alloy. *Journal of Engineering Mechanics* 43 (2002), 151–155.

Greninger A B and Mooradian V G. Strain transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper-tin alloys. *Trans AIME* 128 (1938), 337–368.

Guenin G, *Technique de l'ingénieur*, M530, 1996.

Guenin Gerard. Alliages à mémoire de forme. *Techniques de l'ingénieur*.1996, 14p

GUILLAND Jessica, Le Nitinol : Un alliage à mémoire de forme aux applications biomédicales. Thèse de Doctorat d'Etat en Pharmacie. Université Claude Bernard-Lyon 1. 2017.

Hamburger R O., Foutch D A and Cornell C A. Translating research to practice: FEMA/SAC performance-based design procedures. *Earthquake Spectra* 19, 2 (2003), 255–267.

Han Y L., Li Q S., Li A Q., Leung A Y T and Lin P H. Structural vibration control by shape memory alloy damper. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 32, 3 (2003), 483–494.

Heinonen J., Vessonen I., Klinge P and Jarvinen E. Controlling stiffness of a frame spring by changing the boundary condition with an SMA actuator. *Computers and Structures* 86 (2007), 398–406.

Hodgson D E and Brown J W. Using Nitinol Alloys. Shape Memory Applications, Inc., 2000.

Housner G W., Bergman L A., Caughey T K., Chassiakos A G., Claus R O., Masri S F., Skelton, R E., Soong T T., Spencer B F and Yao J T P. Structural control. Past, present, and future. *Journal of Engineering Mechanics* 123, 9 (1997), 897–971.

https://campus.minesdouai.fr/pluginfile.php/13740/mod_resource/content/0/CH2_fr_mai_2013/co/cours_ch2_3_2_fr.html.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Mosqu%C3%A9_de_Dolmabah%C3%A7e

Indirli M., Castellano M G., Clemente P and Martelli A. Demo-application of shape memory alloy devices: The rehabilitation of the S. Giorgio Church bell-tower. SPIE Proceedings 4330 (2001), 262–272.

Indirli M., Castellano MG., Clemente P., Martelli A., Liu S. Démo-application of shape memory alloy devices: the rehabilitation of the S. Giorgio church bell tower. Smart structures and materials 2001: smart systems for bridges, structures, and highways, vol. 4330. Newport Beach (CA, USA): SPIE; 2001. 262e272.

Isalgue A., Torra V., Yawn A and Lovey F. Metastable effects on martensitic transformation in SMA Part VI. The ClausiusClapeyron relationship. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 91, 3 (2008), 991–998.

Johnson R., Padgett J E., Maragakis M E., DesRoches R and Saiidi M S. Large scale testing of Nitinol shape-memory alloy devices for retrofitting of bridges. Smart Materials and Structures 17, 3 (2008).

Jordan L. & Rocher P., Les alliages Nickel-Titane (NiTi). Support de cours PDF. 2010.

Jordan, P. Rocher. Les alliages Nickel-Titane (NiTi). Polycopie. Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, 2009.

Juntunen D. Study of Michigan's Continuous Span Variable Depth T-beam Bridges. Tech. Rep. R-1374, Michigan Department of Transportation, Testing and Research Section, 2000.

Karine Lavernhe Taillard, Etude du comportement thermomécanique des Alliages à Mémoire de Forme sous sollicitations multiaxiales complexes. Thèse de Doctorat. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2006.

Khalil, Walid. Développement d'outils de dimensionnement d'applications en alliages à mémoire de forme à base Fer : prise en compte du couplage transformation de phase - glissement plastique, Thèse de doctorat, Soutenue en-2012, l'Université de Lorraine, France, 134p.

Kurdjumov G V., and Khandros L G. Doklady Akademii Nauk SSSR 66 (1949), 211–213.

Lakes R S. Viscoelastic measurement techniques. Review Scientific Instruments 75, 4 (2004), 797–810.

leonardo lecce and antonio concilio. Shape Memory Alloy Engineering, For Aerospace Structural and Biomedical Applications, Editors: Leonardo Lecce Antonio Concilio, 2014, 9780080999210.

Li H., Liu M., and Ou J. Vibration mitigation of a stay cable with one shape memory alloy damper. Structural Control and Health Monitoring 11 (2000), 21–36.

Liang C and Rogers C A. Design of Shape Memory Alloy Springs with Applications in Vibration Control. *Journal of Vibration and Acoustics* 115 (1993), 129–135.

Ma N., Song G and Tarefder R A. Vibration control of a frame structure using shape memory alloy braces. *Proceedings of the Third International Conference on Earthquake Engineering* (2004).

McCormick J., DesRoches R., Fugazza D., and Auricchio F. Seismic Vibration Control Using Superelastic Shape Memory Alloys. *Journal of Engineering Materials and Technology* 128, 3 (2006), 294–301.

McCormick J., Tyber J., DesRoches R., Gall K., and Maier H J. Structural Engineering with NiTi. II: Mechanical Behavior and Scaling. *Journal of Engineering Mechanics* 133, 9 (2007), 1019–1029.

Melton K R. General applications of shape memory alloys and smart materials, in: K. Otsuka, C. M. Wayman (Eds.), *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999, Ch. 10, pp. 220–239.

memory alloys spirals, Univeristy of Illinois at Urban – Champaing, 2012.

Michaud V. Can shape memory alloy composites be smart? *Scripta Materialia* 50 (2004), 249–253.

Modena C., and Lourenco P B. *Structural Analysis of Historical Constructions*. Taylor and Francis Group, 2004.

Montecinos S., Moroni M., and Sepulveda A. Superelastic behavior and damping capacity of CuAlBe alloys. *Materials Science and Engineering A* 419 (2005), 91–97.

Motahari S A., Ghassemieh M and A A. S. Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations. *Journal of Constructional Steel Research* 63 (2007), 1570–1579.

Nae F A., Tadashige I., and Matsuzaki Y. The active tuning of a shape memory alloy pseudoelastic property. *Smart Materials and Structures* 13 (2004), 503–511.

Ocel J., DesRoches R., Leon R T., Hess W G., Krumme R., Hayes J., and Sweeney S. Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory Alloys. *Journal of Structural Engineering* 130, 5 (2004), 732–740.

Oleg Volkov. *Création de structures actives à l'aide d'alliages à mémoire de forme. Mémoire de Maitrise ès Sciences Appliquées. École polytechnique de Montréal*, 1999.

Ortin, J and Delaey L. Hysteresis in shape-memory alloys. *International Journal of Non-Linear Mechanics* 37 (2002), 1275–1281.

Ostowari K and Souroushian P. *Field Trial of Shape-Memory Based Rehabilitation System*. Tech. Rep. NCHRP-48, IDEA Program, Transportation Research Board, National Research Council, 2000.

Othmane Benafan and Ronald D. Noebe Glenn, Research Shape Memory Alloy Rock Splitters (SMARS)—A Non-Explosive Method for Fracturing Planetary Rocklike Materials and Minerals, 2015, 35p.

Otsuka K., and Wayman C M. Eds. Shape memory materials (1998), Cambridge University Press.

Ozbulut O. E., Mir C., Moroni M O., Sarrazin M., and Roschke P N. A fuzzy model of superelastic shape memory alloys for vibration control in civil engineering applications. *Smart Materials and Structures* 16 (2007), 818–829.

Padgett J E., DesRoches R., and Ehlinger R. Experimental response modification of a four-span bridge retrofit with shape memory alloys. *Structural Control and Health Monitoring* (2009).

Patoor E., Lagoudas D C., Entchev P., Brinson C., and Gao X. Shape memory alloys, Part I: General properties and modeling of single crystals. *Mechanics of Materials* 38 (2006), 391–429.

Patoor Étienne & Berveiller Marcel, Technologie des alliages à mémoire de forme. Hermes Science Publications (1994). ISBN 10 : 286601426X, ISBN 13 : 9782866014261.

Patoor, E., El Amrani, M., Eberhardt, A. Berveiller, M. (1995). Determination of the Origin for the Dissymmetry Observed between Tensile and Compression Tests on Shape Memory Alloys. *J. Phys. IV*, 5: 495–500.

Piedboeuf M C and Gauvin R. Damping behaviour of shape memory alloys: strain amplitude, frequency and temperature effects. *Journal of Sound and Vibration* 214, 5 (1998), 885–901.

Raymond L, technologie, Les alliages à mémoire de forme, article, 2000.

Reynolds D R. A Nonlinear Thermodynamic Model for Phase Transitions in Shape Memory Alloy Wires. PhD thesis, Rice University, Houston, Texas, 2003.

Saadat S., Noori M., Davoodi H., Suzuki Y. and Masuda A. Using NiTi SMA tendons for vibration control of coastal structures. *Smart Materials and Structures* 10 (2001), 695–704.

Shin M. Seismic retrofit of repair of reinforced concrete bridge columns using shape

Shook D A., Roschke P N and Ozbulut O E. Superelastic semiactive damping of a base-isolated structure. *Structural Control and Health Monitoring* 15 (2008), 746–768.

Song G., Ma N., and Li H N. Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures* 28 (2006), 1266–1274.

Soroushian P., Ostowari K., Nossoni A. and Chowdhury B. Repair and strengthening of concrete structures through applications of corrective posttensioning forces with shape memory alloys. *Transportation Research Record* 1770 (2001), 2026.

Tamai H and Kitagawa Y. Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wire and its application to seismic resistance member for building. *Computational Materials Science* 25, 1-2 (2002), 218–227.

Tamai H., and Kitagawa Y and Fukuta T. Application of sma rods to exposed-type column bases in smart structural systems. In *Proc., 13th World Conf. on Earthquake Engineering*, no. 1884.

Van Humbeeck J., and Liu Y. Shape memory alloys as damping materials. *Materials Science Forum* (2000), 327–338.

Vivet A., Approche expérimentale du comportement pseudoélastique des alliages de mémoire de forme : Modélisation isotherme et anisotherme. Thèse de Doctorat. Université de Franche-Comté. 1999.

Wilde K., Gardoni P., and Fujino Y. Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges. *Engineering Structures* 22 (2000), 222–229.

Zhang Y and Zu S. Seismic Response Control of Building Structures with Superelastic Shape Memory AlloyWire Dampers. *Journal of Engineering Mechanics* 134, 3 (2007), 240–251.

Zhang Y., and Zu, S. A. shape memory alloy-based reusable hysteretic damper for seismic hazard mitigation. *Smart Materials and Structures* 16 (2007), 1603–1623.

Zuo X B., Chang W., Li A Q., and Chen Q F. Design and experimental investigation of a superelastic SMA damper. *Materials Science and Engineering A* 438-440 (2006), 1150–1153.