

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 :

**MODELISATION ET OPTIMISATION DES
DISPOSITIFS EN ALLIAGES A MEMOIRE DE
FORME (AMF) POUR ATTENUER LA REPONSE**

Présenté par :

BENABDELLAH Ikram

HATTAB Amel

Soutenu le 29/11/2020, devant le jury composé de :

M. MEGNOUNIF A.	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M ^{me} . DJAFOUR N.	Maitre de conférences B	Univ. Tlemcen	Examinatrice
M ^{me} . BENADLA Z.	Maitre de conférences A	Univ. Tlemcen	Encadrante
M. BENKRALED M. I.	Doctorant	Univ. Tlemcen	Co- encadrant

Année universitaire : 2019-2020

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah, le tout puissant de nous avoir donné la force, le courage et la volonté de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement et sincèrement nos encadreurs **M^{me}. BENADLA Zahira** et **M. BENKRALED Mohammed Ilyes** pour leur précieux conseils, leurs patiences et leurs aides durant toute la période du travail.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude aux membres du jury, **M. MEGNOUNIF Abdellatif** et **M^{me}. DJAFOUR Naoual**, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer le travail que nous avons effectué.

Nous tenons aussi à remercier vivement et sincèrement tous les enseignants de l'université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, en particulier ceux du département de Génie Civil, qui nous ont aidés et appris durant nos années d'études.

Nous remercions chaleureusement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Merci à tous.

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce projet de fin d'études à mes chers parents, qui m'ont toujours poussée et motivée dans mes études et ma vie en général.

Sans eux, je n'aurais certainement pas fait de longues études.

Ce travail représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements qu'ils m'ont prodigués tout au long de ma scolarité. Qu'ils en soient remerciés par cette trop modeste dédicace.

C'est un moment de plaisir de dédier cet œuvre, à mes belles sœurs : « Ghania, Nedjet et Marwa », en signe d'amour, de reconnaissance et de gratitude pour le dévouement et les sacrifices dont vous avez fait toujours preuve à mon égard.

Et finalement, à mes amies et mon binôme « Amel » qui n'ont jamais cessé de me soutenir.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

BENABDALLAH Ikram

Dédicace

Merci ALLAH de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve.

Je dédie mon travail :

A celle qui m'a donné la vie, la lumière de mes jours, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à « ma mère ».

A l'homme de ma vie, l'école de mon enfance, qui n'a pas cessé de m'encourager, à donner l'aide à me protéger, à « mon père ».

Je vous souhaite une longue vie et bonne santé.

A mes très chères sœurs que j'aime beaucoup « Fatima, Salima, Khouira et Nabila » je souhaite beaucoup de bonheur et réussite dans leurs vies.

A toute la famille « Hattab » et « Benmegri ».

A mon binôme « Ikram » que je remercie pour sa patience ainsi qu'à sa famille.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études, mes amis, mes collègues d'étude,

A tous ceux qui m'aiment,

A tous ceux que j'aime.

HATTAB Amel.

Résumé

Ce travail est une recherche qui propose l'étude d'efficacité de l'utilisation des matériaux intelligents, principalement les alliages à mémoire de forme « AMF ». Ces matériaux qui présentent des propriétés remarquables qui contribuent efficacement à la réduction de la réponse sismique des bâtiments. Or, la modélisation tridimensionnelle de ces éléments intégrée dans le logiciel de calcul Ansys V15.0 rend leur utilisation numérique très lourde, en termes de temps de calcul et de capacité de mémoire. Alors, ce travail consiste à proposer une alternative possible dans le logiciel de calcul utilisé, en utilisant des éléments unidimensionnels de type PIPE. L'objectif de ce travail est de voir leur efficacité en termes de déplacements, vitesses, accélérations et contraintes.

Dans un premier temps, notre comparaison a été validée sur une structure simple de forme prismatique en tenant compte de sa section (pleine ou creuse). Par la suite, un cas réel d'étude a été considéré, il s'agit de minaret de Dolmabahçe en Turquie.

Mots clés : Matériaux intelligents, AMF, Eléments PIPE, Minaret, Eléments finis, Analyse transitoire.

Abstract

This work is research that proposes the efficiency study of the use of intelligent materials, mainly the Shape Memory Alloys « SMA ». These materials have remarkable properties that effectively contribute to reducing the seismic response of buildings. However, the three-dimensional modeling of these elements integrated in the Ansys V15.0 software makes their digital use very heavy, in terms of calculation time and memory capacity. So, this work consists in proposing a possible alternative in the software used, by using one-dimensional elements of the PIPE type. The objective of this work is to see their efficiency in terms of displacements, speeds, accelerations and stress.

First, a comparison was validated on a simple prismatic structure taking into account its section (solid or hollow). Subsequently, a real study case was considered, it concerns the minaret of Dolmabahçe in Turkey.

Keywords: Smart materials, SMA, PIPE Element, Minaret, Finite elements, Transient analysis.

ملخص

هذا العمل عبارة عن بحث يقترح كفاءة استخدام المواد الذكية، وخاصة سبائك ذاكرة الشكل. تتمتع هذه المواد بخصائص رائعة تساهم بشكل فعال في تقليل الاستجابة الزلزالية للمباني. ومع ذلك، فإن النمذجة ثلاثية الأبعاد لهذه العناصر المدمجة في البرنامج Ansys V15.0 تجعل استخدامها العددي ثقیلاً للغاية، من حيث مدة الحساب وسعة الذاكرة. لذلك، يتمثل هذا العمل في اقتراح بديل محتمل في البرنامج المستخدم، باستخدام عناصر أحادية البعد من نوع أنابيب (PIPE).

الهدف من هذا العمل هو معرفة كفاءتها ومدى تأثيرها على التنقل، السرعة، التسارع والضغوطات. في البداية، نقوم بدراسة بنائية بسيطة الشكل مع مراعاة نوعية مساحتها (صلبة أو مجوفة). بعد ذلك، تمت دراسة حالة حقيقية تتعلق بمنذنة دولما بهجة (Dolmabahçe) في تركيا.

الكلمات المفتاحية: المواد الذكية، سبائك ذاكرة الشكل، عناصر الأنابيب، المنذنة، العناصر المحدودة، التحليل المؤقت

Sommaire

Liste des figures.....	x
Listes des tableaux.....	xi
Introduction générale	1
Chapitre 01 : Les alliages à mémoire de forme AMF et leurs applications en génie civil.....	5
1.1. Introduction.....	6
1.2. Alliages à mémoire de forme - Une brève histoire	6
1.3. Définition	7
1.3.1. Transformation Martensitique – Austénitique	8
1.3.2. Caractéristiques générales de la transformation.....	9
1.4. Les propriétés thermomécaniques des AMF	10
1.4.1. L'effet mémoire simple sens EMSS.....	10
1.4.2. L'effet super-élastique ES	12
1.5. Production des AMF	14
1.5.1. Matières premières	14
1.5.2. Fonderie.....	14
1.5.3. Mise en forme.....	14
1.5.4. Traitement de bétatisation (ou d'austénisation)	14
1.6. Les familles des AMF	14
1.6.1. Les alliages à base de Nickel-Titane	15
1.6.2. Les alliages à base de fer	15
1.6.3. Les alliages à base de cuivre	16
1.7. Applications en génie civil.....	17
1.7.1. Applications des AMF sans contrôle actif	17
1.7.2. Applications des AMF avec contrôle actif.....	28
1.8. Conclusion.....	30

Chapitre 02 : Introduction des AMF sur une structure prismatique.....	31
2.1. Introduction	32
2.2. Introduction sur le logiciel de calcul ANSYS, V 15.0	32
1.8.1. L'élément SOLID185	32
1.8.2. L'élément PIPE288.....	33
2.3. Les principes hypothèses.....	34
2.3. Caractéristiques mécaniques des structures et des AMF	34
2.3.1. Caractéristiques mécaniques des structures	34
2.3.2. Caractéristiques mécaniques des AMF	35
2.4. Modélisation numérique des AMF	36
2.5. Analyse modale	36
2.5.1. Analyse modale sans AMF	37
2.5.2. Analyse modale avec AMF (PIPE288)	40
2.5.3. Analyse modale avec AMF type d'élément solides 185 (3D) :	43
2.6. Analyse dynamique transitoire.....	45
2.6.1. Analyse transitoire sans et avec AMF type d'élément « PIPE288 ».....	46
2.6.2. Analyse transitoire avec AMF type d'élément « SOLID185 »	50
2.7. Conclusion.....	56
Chapitre 03 : Application des AMF sur le minaret de Dolmabahçe.....	57
3.1. Introduction	58
3.2. Historique	58
3.3. Architecture de la Mosquée Dolmabahçe	59
3.4. Les principales hypothèses.....	59
3.5. Caractéristiques géométriques du minaret	59
3.6. Les caractéristiques mécaniques du minaret et de l'AMF	60
3.6.1. Les caractéristiques mécaniques du minaret	60
3.6.2. Caractéristiques mécaniques des AMF	61

3.7. Analyse modale	61
3.7.1. Analyse modale sans AMF	62
3.7.2. Analyse modale avec AMF	63
3.8. Analyse transitoire.....	65
3.8.1. Points de mesure.....	66
3.8.2. Analyse transitoire du minaret sans et avec AMF type d'élément « PIPE288 ».....	67
3.8.3. Comparaison avec le cas de l'utilisation des éléments SOLID185.....	71
3.9. Conclusion.....	76
Conclusion générale	77

Liste des figures

Figure 1: Effets de séisme Détail d'un mille feuilles à Boumerdès.....	2
Figure 1.1 : Pseudo-diagramme de phase d'un alliage à mémoire de forme.....	8
Figure 1.2 : Diagramme des phases austénite A et martensite M en fonction de température.....	9
Figure 1.3 : Apparition et croissance de plusieurs variantes de martensite.....	10
Figure 1.4 : Chargement thermomécanique permettant d'obtenir l'effet mémoire de forme simple sens : (a) diagramme d'état, (b) courbe contrainte déformation.....	11
Figure 1.5 : Chargement thermomécanique permettant d'obtenir l'effet super-élastique : (a) diagramme d'état, (b) courbe contrainte-déformation.....	12
Figure 1.6 : AMF à base de Nickel-Titane.....	15
Figure 1.7 : AMF à base de fer.....	16
Figure 1.8 : AMF à base de cuivre.....	16
Figure 1.9 : Ouvrages ayant été réhabilités grâce à des AMF : a) église Saint Giorgio, b) basilique Saint Francisco, c) synagogue de San Francisco.....	17
Figure 1.10 : Schéma de modification d'une tour grâce à des tirants en AMF.....	18
Figure 1.11 : Principe de béton armé intelligent.....	18
Figure 1.12 : Applications pour la fermeture de fissures dans le béton. (Waibaye, 2016) a) poutrelle et fils électriques permettant de chauffer les AMF intégrés dans le béton, b) poutrelle sollicitée en flexion, c) ouverture de fissure, d) fermeture de fissure grâce à l'activation thermique des AMF.....	19
Figure 1.13 : Evolution d'une fissure lors de l'activation thermique de fils AMF insérés dans une poutrelle en béton.....	19
Figure 1.14 : Fermeture de fissure d'une poutrelle en flexion trois points par activation thermique d'un fil AMF disposé à l'extérieur de la poutre.....	20
Figure 1.15 : Réparation d'une zone fissurée dans un pont situé dans le Michigan.....	21
Figure 1.16 : Poutre contenant des fils en AMF. a) ouverture de fissures provoquée par chargement mécanique, b) fermeture de fissures grâce à auto-restauration.....	21
Figure 1.17 : Précontrainte de flexion des poutrelles à l'aide des fils d'AMF. a) dispositif ; b) évolution de la déformation longitudinale à mi-travée de la poutrelle pour différentes valeurs de prédéformation.....	22
Figure 1.18 : Confinement passif d'un cylindre en béton et essais d'écrasement.....	23

Figure 1.19 : Confinement actif d'un cylindre en béton et essai d'écrasement.....	23
Figure 1.20 : Comparaison entre des cylindres non-confiné et confiné activement.....	24
Figure 1.21 : Confinement actif d'un cylindre en béton par : a) photo du dispositif, b) comparaison des résultats obtenus.....	24
Figure 1.22: Ecrasement de cylindres en béton : a) non-confiné, b) confiné à l'aide d'un fil AMF.....	25
Figure 1.23: Loi de comportement des cylindres en béton écrasés.....	25
Figure 1.24 : Précontrainte de cylindres en béton par des fils en AMF, selon Shin M.....	26
Figure 1.25 : Etude sur des cylindres creux renforcés par fil en AMF.....	26
Figure 1.26 : Schéma d'installation d'une barre en AMF sur un pont pour la prévention sismique.....	27
Figure 1.27 : Schéma d'installation des bretelles en AMF pour la prévention sismique.....	27
Figure 1.28: Système de contrôle actif d'une poutrelle à l'aide d'un AMF.....	28
Figure 1.29 : Système de contrôle de la flexion d'une poutre à l'aide d'un fil AMF.....	29
Figure 2.1 : Géométrie de l'élément solide, SOLID185.....	33
Figure 2.2 : Géométrie de l'élément PIPE288.....	34
Figure 2.3 : Paramètre de la loi SMA de Ansys.....	35
Figure 2.4 : Définition des AMF dans ANSYS.....	36
Figure 2.5 : Structure pleine sans AMF.....	37
Figure 2.6 : Structure creuse sans AMF.....	37
Figure 2.7 : Modes propres de la structure pleine sans AMF.....	39
Figure 2.8 : Modes propres de la structure creuse sans AMF.....	39
Figure 2.9 : Structure pleine avec AMF en PIPE288.....	40
Figure 2.10 : structure creuse avec AMF en PIPE288.....	40
Figure 2.11 : Modes propre de la structure pleine avec AMF (PIPE288).....	42
Figure 2.12 : Modes propre de la structure creuse avec AMF (PIPE288).....	42
Figure 2.13 : Structure pleine avec AMF (SOLID185 3D).....	43
Figure 2.14 : Structure creuse avec AMF (SOLID185 3D).....	43
Figure 2.15 : Les dix premiers modes de la structure pleine avec AMF(SOLID185).....	44
Figure 2.16 : Les dix premiers modes de la structure creuse avec AMF(SOLID185).....	45
Figure 2.17 : L'enregistrement du séisme de Boumerdès 2003.....	45
Figure 2.18 : Déplacement de la structure pleine sans et avec AMF (PIPE288).....	46
Figure 2.19 : L'accélération de la structure pleine sans et avec AMF (PIPE288).....	46

Figure 2.20 : La vitesse de la structure pleine sans et avec AMF (PIPE288).....	47
Figure 2.21 : La contrainte de la structure pleine sans et avec AMF (PIPE288).....	47
Figure 2.22 : Déplacement de la structure creuse sans et avec AMF (PIPE288).....	48
Figure 2.23 : L'accélération de la structure creuse sans et avec AMF (PIPE288).....	48
Figure 2.24 : la vitesse de la structure creuse sans et avec AMF (PIPE288).....	49
Figure 2.25 : La contrainte de la structure creuse sans et avec AMF (PIPE288).....	49
Figure 2.26 : Déplacement de la structure pleine avec AMF (PIPE288/SOLID185).....	51
Figure 2.27 : L'accélération de la structure pleine avec AMF (PIPE288/SOLID185).....	51
Figure 2.28 : La vitesse de la structure pleine avec AMF (PIPE288/SOLID185).....	52
Figure 2.29 : La contrainte de la structure pleine avec AMF (PIPE288/SOLID185).....	52
Figure 2.30 : Déplacement de la structure creuse avec AMF (PIPE288/SOLID185).....	53
Figure 2.31 : L'accélération de la structure creuse avec AMF (PIPE288/SOLID185).....	54
Figure 2.32 : La vitesse de la structure creuse avec AMF (PIPE288/SOLID185).....	54
Figure 2.33 : La contrainte de la structure creuse avec AMF (PIPE288/SOLID185).....	55
Figure 3.1 : Mosquée Dolmabahçe.....	58
Figure 3.2 : Les deux minarets de la mosquée Dolmabahçe.....	59
Figure 3.3 : Géométrie et dimensions du minaret.....	60
Figure 3.4 : Modèle du minaret sans AMF.....	62
Figure 3.5 : Les dix premiers modes du minaret sans AMF.....	63
Figure 3.6 : Modèle du minaret avec AMF.....	64
Figure 3.7 : Les dix premiers modes du minaret avec AMF.....	65
Figure 3.8 : L'enregistrement de séisme de Düzce99.....	66
Figure 3.9 : Position de deux points critiques.....	66
Figure 3.10 : Déplacement du minaret de Dolmabahçe au point A.....	67
Figure 3.11 : La vitesse du minaret de Dolmabahçe au point A.....	67
Figure 3.12 : L'accélération du minaret de Dolmabahçe en point A.....	68
Figure 3.13 : La contrainte du minaret de Dolmabahçe au point A.....	68
Figure 3.14 : Déplacement du minaret de Dolmabahçe au point B.....	69
Figure 3.15 : La vitesse du minaret de Dolmabahçe en point B.....	69
Figure 3.16 : L'accélération du minaret de Dolmabahçe en point B.....	70
Figure 3.17 : La contrainte du minaret de Dolmabahçe au point B.....	70
Figure 3.18 : Déplacement du minaret de Dolmabahçe au point A (PIPE288/SOLID185)...	71
Figure 3.19 : La vitesse du minaret de Dolmabahçe au point A (PIPE288/SOLID185).....	72

Figure 3.20 :	L'accélération du minaret de Dolmabahçe au point A (PIPE288/SOLID185)..	72
Figure 3.21 :	La contrainte du minaret de Dolmabahçe en point A (PIPE288/SOLID185)...	73
Figure 3.22 :	Déplacement du minaret de Dolmabahçe au point B (PIPE288/SOLID185)...	73
Figure 3.23 :	La vitesse du minaret de Dolmabahçe au point B(PIPE288/SOLID185).....	74
Figure 3.24 :	L'accélération du minaret de Dolmabahçe au point B (PIPE288/SOLID185)..	74
Figure 3.25 :	La contrainte du minaret de Dolmabahçe au point B(PIPE288/SOLID185)....	75
Figure 3.26 :	Concentration des contraintes sans AMF.....	75

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : caractéristiques mécaniques des matériaux des structures pleine et creuse.....	35
Tableau 2.2 : caractéristiques mécaniques de l'AMF.....	35
Tableau 2.3 : Les paramètres de l'AMF.....	36
Tableau 2.4 : Les périodes et les fréquences de la structure sans AMF des dix premiers modes.....	38
Tableau 2.5 : les périodes et les fréquences de la structure avec AMF des dix premiers modes.....	40
Tableau 2.6 : les périodes et les fréquences propres de la structure avec AMF des dix premiers modes.....	43
Tableau 2.7 : les valeurs maximum sans et avec AMF pour la structure pleine et creuse	50
Tableau 2.8 : les valeurs maximum avec AMF (PIPE288/SOLID185) pour la structure pleine et creuse	55
 Tableau 3.1 : caractéristiques mécaniques du minaret.....	 60
Tableau 3.2 : caractéristiques mécaniques de l'AMF.....	61
Tableau 3.3 : Les paramètres de l'AMF.....	61
Tableau 3.4 : les fréquences et périodes des dix premiers modes du minaret.....	62
Tableau 3.5 : les fréquences et périodes des dix premiers modes du minaret.....	64
Tableau 3.6 : Récapitulation des résultats trouvés aux points de mesure A et B.....	71
Tableau 3.7 : Comparaison entre SOLID185 et PIPE288 aux points de mesure A et B.....	76

Introduction Générale

Chaque année, les séismes coûtent plusieurs milliards de dollars en réparations et font de nombreuses victimes. Durant la décennie de 1990 à 2000, les conséquences économiques des tremblements de terre ont été évaluées à plus de 150 milliards de dollars.

Pendant l'année 2003, l'Algérie a connu un séisme dévastateur qui a causé plus de 2 300 décès, plus de 10 200 blessés et 180 000 sans-abris. Il s'agit du séisme de Boumerdès qui s'est produit le 21 Mai 2003 et qui a enregistré environ 10 000 constructions détruites et 140 000 autres endommagées. Des dégâts matériels considérables ont été constatés, estimés à plus de 3 milliards de dollars.

Les dommages enregistrés ont touché principalement les structures en portiques (poteaux-poutres). Ce type constructif est très répandu et qui représente entre 80% et 90% des constructions réalisées dans la zone sinistrée. Parmi les dommages caractéristiques observés et l'effet mille feuilles (figure 1). (PIERRE, 2006), où les poteaux sous-dimensionnés par rapport aux planchers beaucoup trop lourds ont rompu. La rupture de l'ensemble des poteaux des structures a entraîné un empilement des planchers les uns sur les autres ne laissant aucune chance aux occupants d'être évacués.



Figure 1:Effets de séisme

Détail d'un mille feuilles à Boumerdès (Azurseisme, s.d.)

Depuis, des recherches considérables ont été entamées afin de devancer ces risques sismiques. Ces derniers, qui ne peuvent pas toucher que des bâtiments, mais aussi d'autres types de constructions de plus grande importance tels que les ponts, les ouvrages d'art et les monuments historiques.

Ces recherches ont touché plusieurs domaines (structural, matériaux, géotechnique ...etc.). Parmi ces études, les matériaux ont toujours été au cœur des grandes innovations technologiques dans divers secteurs industriels, notamment le Génie Civil.

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 ces nouveaux matériaux, un engouement particulier a été porté aux matériaux multifonctionnels (adaptatifs ou intelligents) tels que les AMF. 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. Ils ont ainsi suscité de nombreux travaux de recherche ayant abouti aujourd'hui à de nombreuses applications. (Armattoe K. M., 2014)

Dans le domaine du Génie Civil, ces matériaux commencent à avoir leur place, notamment dans les constructions de grande importance.

Dans ce travail, nous allons donc définir l'utilité d'utiliser ces matériaux dans les structures de grande hauteur, telles que les minarets. La démarche que nous avons choisie et adoptée est de modéliser ces AMF en utilisant des éléments unidimensionnels tels que les poutres et les pipes. Ces deux types d'éléments qu'offre le logiciel de calcul en éléments finis, que nous avons choisi pour notre étude, il s'agit du logiciel ANSYS, V15.0. Notre objectif principal est de voir la possibilité de modéliser les AMF en passant par des éléments unidimensionnels au lieu des éléments tridimensionnels utilisés dans des études antérieures, et qui restent très limités du point de vue capacité numérique (espace mémoire et temps de calcul).

Pour cet effet, nous avons choisi d'organiser ce document comme suit :

Tout d'abord, nous allons définir les AMF et leur utilisation, principalement dans le domaine du Génie Civil. Ce qui constitue le chapitre 1.

Après quoi, une étude comparative est réalisée sur une structure simple de forme prismatique où les AMF sont introduits sous forme d'éléments pipes (PIPE288). Les résultats trouvés sont

comparés aux résultats établis dans la référence (Houmat & Seghir, 2019). Dans cette dernière, les AMF ont été modélisés en 3D en utilisant des éléments solides (SOLID185). Cette comparaison, se porte sur une structure pleine ainsi qu'une structure creuse, chose qui peut représenter un minaret.

A l'issue des résultats établis, le minaret de Dolmabahçe en Turquie sera considéré comme cas d'étude en chapitre 3. Une étude dynamique transitoire sera faite sous l'excitation sismique du séisme de Düzce99 en Turquie. Dans celle-ci, les résultats sont analysés et comparés en termes de contraintes, déplacements, vitesses et accélérations de la structure sans et avec AMF. Ensuite les résultats seront affrontés au cas tridimensionnel en utilisant les élément SOLID185 établis par (Houmat & Seghir, 2019).

Enfin, nous finirons ce manuscrit par des conclusions et des perspectives.

Chapitre 01 :

Les alliages à mémoire de forme

AMF et leurs applications en Génie

Civil

Contenu

- 1.1. Introduction
- 1.2. Alliages à mémoire de forme - Une brève histoire
- 1.3. Définition
- 1.4. Les propriétés thermomécaniques des AMF
- 1.5. Production des AMF
- 1.6. Les familles des AMF
- 1.7. Applications en génie civil
- 1.8. Conclusion

1.1. Introduction

De nombreux secteurs industriels ont besoin de matériaux adaptatifs et capables de changer leurs propriétés en fonction de l'environnement qui les entoure et des sollicitations appliquées.

Avec les progrès de la science et de la technologie et une meilleure compréhension des effets de la microstructure et des techniques de traitement sur le comportement des matériaux, le domaine de la science des matériaux s'est radicalement amélioré au cours des dernières décennies et a généré de nouveaux matériaux plus performants et multi fonctionnels pour diverses applications. La possibilité de définir différentes propriétés des matériaux (mécanique, thermique, électrique, etc.) pour diverses applications a permis le développement de nouveaux alliages et composites. Parmi les différents types des matériaux intelligents, les alliages à mémoire de forme (AMF), qui présentent un couplage thermique/mécanique, semblent prometteurs par leurs propriétés thermomécaniques et qui ont des caractéristiques uniques de pseudo-élasticité de mémoire de forme unidirectionnelle et bidirectionnelle. (Messai, 2019)

1.2. Alliages à mémoire de forme - Une brève histoire

Les alliages à mémoire de forme (AMF) ont été développés en 1930 par la découverte d'un alliage d'or-cadmium. Selon Liberman, Arne Ölander est le père des AMF et il a fait part de sa découverte à la communauté scientifique pour la première fois lors de la conférence de la Swedish Metallographic Society, le 27 mai 1932. Dans la même année, il a publié un article intitulé « An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys ». À ce moment, les gens pouvaient reconnaître les propriétés des AMF, mais ils ne pouvaient expliquer les phénomènes physiques qui les régissent. Kurdyumov et Khandros ont publié certains articles à la fin des années 1940 pour décrire le phénomène, mais il a fallu attendre jusqu'en 1951, après la publication de Chang et Read, pour comprendre tous les aspects fondamentaux des AMF. Dans les années qui ont suivi, d'autres alliages ont été découverts, mais leur commercialisation n'était pas encore envisagée à cause des coûts trop élevés et de toutes les autres complications nécessaires à la réalisation de tels matériaux. Ce n'est qu'à partir des années 1960, lorsque Buehler et ses collègues de l'U.S. Naval Ordnance Laboratory de San Diego ont découvert un alliage équi-atomique de titane et de nickel, que l'industrie commença à s'intéresser aux AMF. Cet alliage est maintenant mieux connu sous son acronyme, le nitinol, donné en l'honneur de leurs fondateurs (Nickel Titane Naval Ordnance Laboratory). Il a dès lors eu quelques succès industriels. En 1969, la compagnie Raychem a développé un manchon de raccordement pour

les conduites hydrauliques du célèbre chasseur américain, le F14. Selon Ryhänen, les premiers efforts déployés pour exploiter le potentiel du nitinol comme implants médicaux ont été réalisés par Johnson et Alicandri en 1968. Dès lors, dans les années 1970, il y a eu quelques applications. Cependant, le premier succès biomédical a eu lieu au milieu des années 1990 avec la réalisation d'un stent en nitinol qui permet de régler les problèmes dus aux artères bloquées. (Sahli, 2009)

1.3. Définition

Les alliages à mémoire de forme (AMF) représentent un comportement spécifique appelé mémoire de forme qui a donné son nom à cette famille d'alliages. Ils se distinguent des autres alliages par leurs comportements thermomécaniques tout à fait remarquables. En effet, le terme AMF est lié à leur capacité à revenir à une forme ou à une taille préalablement définie lorsqu'ils sont soumis au processus thermique approprié. Généralement, ces matériaux peuvent être déformés plastiquement à une température relativement basse et lorsqu'ils sont exposés à une température plus élevée, ils reprennent leur forme avant la déformation.

Les matériaux qui présentent une mémoire de forme uniquement lors du chauffage sont considérés comme ayant une mémoire de forme à sens unique. Certains matériaux subissent également un changement de forme lors du refroidissement. Ces matériaux ont une mémoire de forme bidirectionnelle.

Ce comportement distinctif des AMF est la conséquence d'une transformation martensitique entre une phase mère austénitique stable à haute température et une phase produite appelée martensite métastable à basse température. La martensite formée se présente généralement sous forme de plaquettes appelées variantes de martensite. (Armatoe K. M., 2014).

Pour les AMF un pseudo-diagramme de transformation peut être établi dans l'espace contrainte-température. La Figure 1.1 représente un exemple généralement admis de ce pseudo-diagramme. Elle montre en effet que la transformation martensitique se produit sous des conditions thermomécaniques spécifiques.

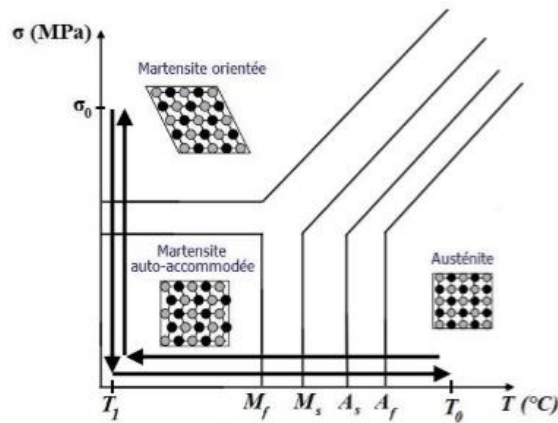


Figure 1.1 : Pseudo-diagramme de phase d'un alliage à mémoire de forme

(Armattoe K. M., 2014)

L'effet mémoire de forme ne représente qu'un des nombreux comportements particuliers de ces matériaux. En effet, les AMF possèdent plusieurs propriétés inédites parmi les matériaux métalliques :

- La capacité de garder en mémoire une forme initiale et retourner même après une déformation.
- La possibilité d'alterner entre deux formes préalablement mémorisées lorsque sa température varie autour d'une température critique.
- Un comportement super élastique permettant des allongements sans déformation permanente supérieurs à ceux des autres métaux.

Les propriétés physiques et mécaniques, les avantages et inconvénients, les comportements thermomécaniques de chaque famille constituent des éléments déterminants dans le choix de ces matériaux pour les applications qui couvrent désormais divers secteurs industriels tels que l'aéronautique, l'automobile, le biomédical. Les alliages à base de Nickel-Titane sont parmi les plus couramment utilisés. (Armattoe K. M., 2014)

1.3.1. Transformation Martensitique – Austénitique

La transformation martensitique qui se produit dans les AMF est responsable des propriétés particulières présentées par les AMF. Il s'agit d'une transformation qui se produit sans diffusion d'atomes lors d'un changement réversible de la forme du réseau cristallin. C'est une

transformation représentée par deux phases : l'austénite et la martensite. La première d'entre elles, nommée la phase mère, est une phase stable aux hautes températures et elle est caractérisée par une structure régulière du réseau cristallin (structure cubique). Alors que la deuxième (phase martensitique) est une phase existante aux températures plus basses et qui possède un réseau cristallin avec symétrie plus basse que l'austénite.

Pour les AMF, on définit quatre températures caractéristiques qui commencent ou terminent la transformation martensitique (Aleksendra, 2014)

- M_s : température de début de transformation martensitique (martensite start). C'est la température à partir de laquelle l'austénite se transforme en martensite.
- M_f : température de fin de transformation martensitique (martensite finish). C'est la température à laquelle la transformation est complète.
- A_s : température de début de transformation austénitique (austenite start). C'est la température à partir de laquelle la martensite commence à se transformer en austénite.
- A_f : température de fin de transformation austénitique (austenite finish). Le matériau est totalement austénitique.

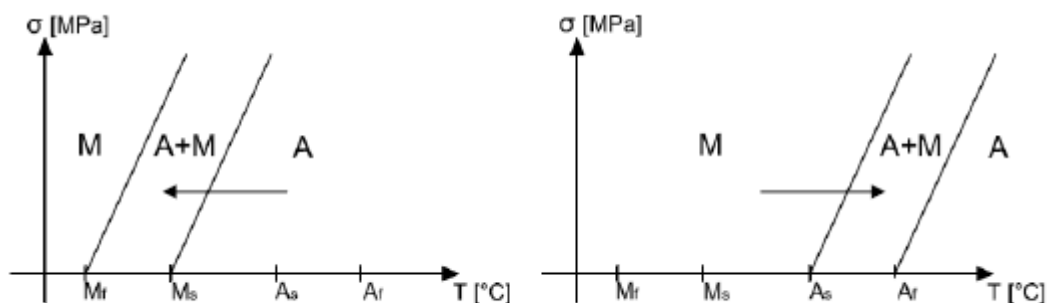


Figure 1.2 : Diagramme des phases austénite A et martensite M en fonction de température (Aleksendra, 2014)

1.3.2. Caractéristiques générales de la transformation

Le comportement des AMF est lié à une transformation de phase thermoélastique, de premier ordre, sans diffusion, appelée transformation martensitique par référence à la transformation produite lors de la trempe des aciers, qui doit son nom au métallurgiste allemand Adolf Martens. C'est une transformation displacive à l'état solide du matériau, sans modification de la composition chimique, entre deux phases : une phase mère, stable à haute température, appelée «Austénite», et une phase produite appelée « Martensite » stable à basse température. La

transformation martensitique est une transformation réversible, basée sur un déplacement coopératif des atomes sur des faibles distances et avec une faible variation de volume. Ce déplacement génère une déformation homogène du réseau cristallin qui est principalement obtenue par cisaillement, selon un plan et une direction bien définis. Ce plan est appelé plan d'habitat, il est invariant et appartient aux deux phases.

1.4. Les propriétés thermomécaniques des AMF

Les AMF présentent des propriétés particulières dont l'origine est à mettre en relation avec les caractéristiques de la transformation martensitique. Ce sont les caractéristiques de cette transformation décrite dans la partie précédente qui vont permettre de rendre compte de ces propriétés (Chastaing, 2007).

Les principales propriétés des AMF sont :

- L'effet mémoire simple sens.
- L'effet super élastique.

1.4.1. L'effet mémoire simple sens EMSS

L'effet mémoire de forme résulte d'une transformation martensitique, généralement à faible hystérésis et de caractère thermoélastique. Ainsi un échantillon déformé à l'état martensitique de plusieurs pourcents de façon permanente, retrouve sa forme initiale par réchauffage dans l'état austénitique.

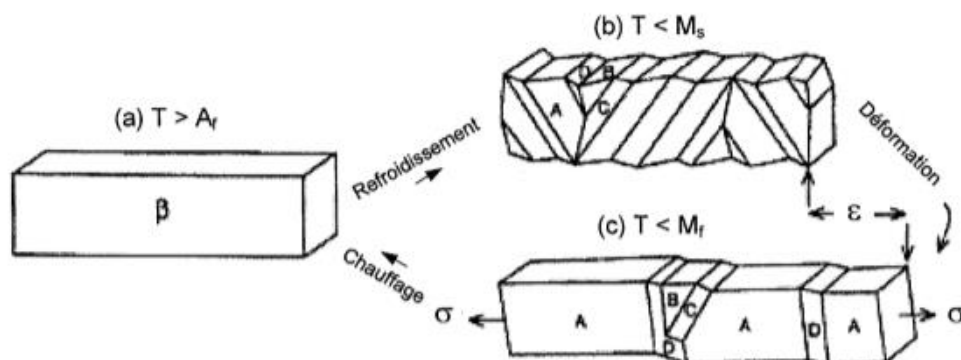


Figure 1.3 : Apparition et croissance de plusieurs variantes de martensite : (Bastarch, 2000)

- (a) phase austénitique.

- (b) apparition de variantes auto-accommodantes A, B, C, D.
- (c) croissance des variantes favorisées A (martensite orientée).

Le cycle thermomécanique complet permettant d'obtenir l'effet mémoire de forme simple sens peut être aussi représenté par un diagramme d'état et un essai de traction.

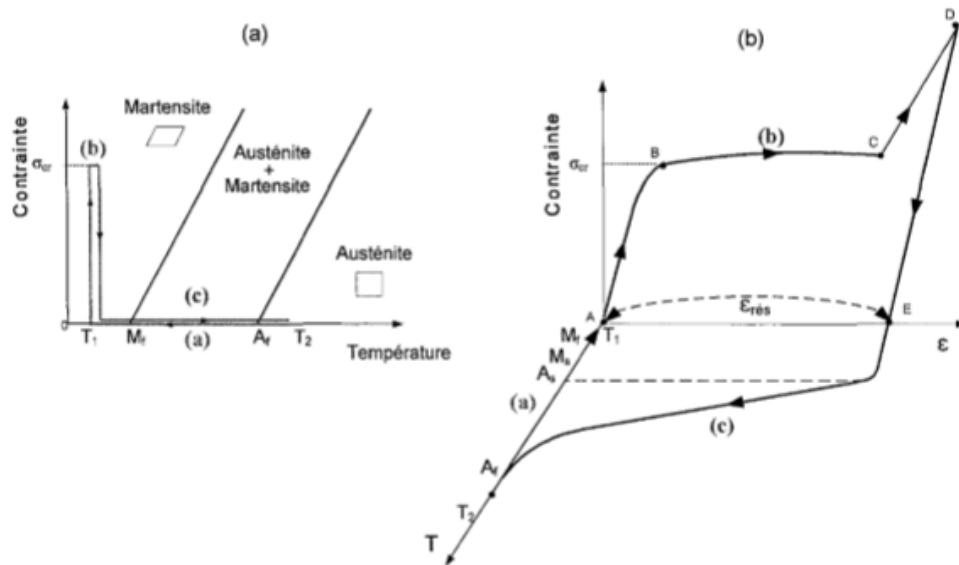


Figure 1.4 : Chargement thermomécanique permettant d'obtenir l'effet mémoire de forme simple sens : (a) diagramme d'état, (b) courbe contrainte déformation (Bastarch, 2000)

Refroidissement (a) : l'échantillon est refroidi sans contrainte en partant d'une température T_2 qui est supérieure à A_r , et cela jusqu'à une température T_1 inférieure à M_r .

Dans cette séquence, la martensite est formée mais la déformation de transformation est nulle (aucune déformation macroscopique). À cette étape du cycle thermomécanique, la martensite obtenue est qualifiée d'auto-accommodante et différentes variantes sont créées.

Déformation (b) : une contrainte (charge et décharge) est appliquée à température constante ABCDE, il n'y a pas de transformation de phase mais une réorientation des variantes de la martensite pendant le chargement et un retour élastique lors du déchargement (apparition d'une déformation résiduelle). Donc, la première section de la courbe représente la déformation élastique de la martensite auto-accommodante (A-B). Par la suite, la martensite se réoriente à partir de la contrainte critique de réorientation ($CicrM$) qui forme le plateau de réorientation (BC). Une augmentation subséquente de la contrainte favorise la déformation élastique de la

martensite orientée (C-D) ; puis, un déchargement (D-E) engendre une déformation résiduelle (Brés) .

Chauffage (c) : l'échantillon déformé est chauffé jusqu'à une température T_2 sous contrainte nulle. Lors de la séquence (c), la déformation résiduelle obtenue pendant le déchargement disparaît suite à la transformation de phase inverse « martensite $\sim$ austénite » induite par un chauffage jusqu'à une température T_2 supérieure à A_r (E-A).

Pendant cette transformation, l'échantillon AMF reprend sa forme initiale si aucune contrainte externe n'est appliquée sur ce dernier pour empêcher cette reprise de forme.

Donc, la transformation martensitique est accompagnée d'une déformation qui est réversible, ce qui n'est pas le cas pour les déformations obtenues par glissement. La caractéristique principale de l'effet mémoire de forme simple sens réside alors dans le fait que la déformation résiduelle « Erés » infligée au matériau à l'état martensitique peut être totalement ou en partie récupérée lors du chauffage à partir de la température A_s jusqu'à une température supérieure à A_r .

1.4.2. L'effet super-élastique ES

La super-élasticité résulte de la formation et de la réversion totale de variantes de martensite induites sous contrainte à des températures proches mais supérieures à la température de transformation A_r .

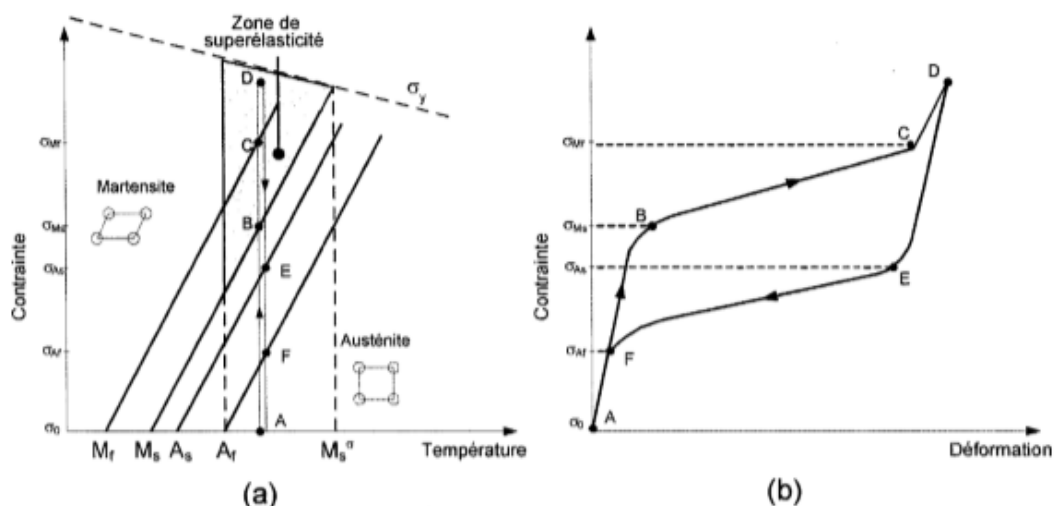


Figure 1.5 : Chargement thermomécanique permettant d'obtenir l'effet super-élastique :
(a) diagramme d'état, (b) courbe contrainte-déformation (Bastarch, 2000)

Alors, le comportement super-élastique est observé pour un chargement thermomécanique correspondant à la séquence « A ~ B ~ C ~ D ~ E ~ F ~ A » présentée à la figure 1.5.

La zone « A ~ B » représente le comportement purement élastique de la phase austénitique. La contrainte croît d'un chargement nul à la contrainte d'initiation de la transformation directe ($\sigma_{0} \sim \sigma_{Ms}$). Lors de la séquence « B ~ C », la déformation est réalisée par le mécanisme de la transformation martensitique. La contrainte passe par le chargement du début et de fin de la transformation de phase directe ($\sigma_{Ms} \sim \sigma_{Mf}$). C'est à l'intérieur de cette zone que la transformation de phase de l'austénite vers la martensite se produit. Une augmentation de la contrainte fera en sorte que la martensite transformée (orientée) se déformera élastiquement « C ~ D ».

Lors de la séquence de déchargement « C ~ D ~ E ~ F ~ A », la martensite précédemment induite se retransforme en austénite et l'échantillon retrouve sa forme initiale. L'allure générale de la décharge « D ~ E ~ F ~ A » est analogue à celle de la charge « A ~ B ~ C » avec cependant une hystérésis, puisque les contraintes de début et de fin de transformation inverse (σ_{As} et σ_{Af}) diffèrent des contraintes du début et de fin de transformation directe (σ_{Ms} et σ_{Mf}). Cette hystérésis est due aux frottements internes accompagnant les transformations de phase.

Il existe une température M_{su} à partir de laquelle la contrainte d'écoulement plastique de l'austénite devient inférieure à la contrainte de changement de phase, présente l'enveloppe fonctionnelle de l'effet super-élastique « fenêtre de super-élasticité ». Pour des températures supérieures à M_{su} , la transformation martensitique sous contrainte n'est plus possible car l'énergie d'activation de la transformation martensitique (par maclage) est maintenant plus importante que l'énergie nécessaire au déplacement des dislocations (glissement). En d'autres mots, pour une température supérieure à M_{su} , l'application d'une contrainte croissante fera en sorte que l'échantillon subira une déformation plastique permanente non réversible semblable aux matériaux conventionnels. Somme toute, afin de pouvoir avoir un comportement Super-élastique complet :

1. la température de déformation T_{ct} doit être plus élevée que la température T_{Af} .
2. la température T_{Af} doit être inférieure à la température M_{su} .
3. la contrainte appliquée doit être inférieure à la limite d'écoulement pour ne pas passer dans le domaine de la déformation plastique de la martensite.

1.5. Production des AMF

L'élaboration des AMF est procédée par quatre grosses étapes (Vignes, Andre , & Kapala , 2001) :

1.5.1. Matières premières

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

1.5.2. Fonderie

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

1.5.3. Mise en forme

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

1.5.4. Traitement de bétatisation (ou d'austénisation)

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

1.6. Les familles des AMF

Il existe trois nombreuses familles majeures d'AMF : les AMF à base de Nickel-Titane, à base de Cuivre et à base fer. Elles se distinguent par leurs compositions chimiques, leurs propriétés mécaniques et physiques, leurs comportements thermomécaniques et leurs applications industrielles.

1.6.1. Les alliages à base de Nickel-Titane

Les alliages à base de Nickel-Titane (nitinol) sont les plus utilisés, « Ni-Ti » pour « nickel-titane » et « nol » pour « Naval Ordnance Laboratory » à Maryland « États Unis d'Amérique » (JORDAN & ROCHER, 2009). Ils sont caractérisés par :

- Le comportement super-élastique.
- Des propriétés thermomécaniques (l'effet simple sens, l'effet double sens).
- Le pouvoir amortissant.
- Bonne résistance à la fatigue et à la corrosion.
- La matière première est très chère.
- La déformation de transformation est la plus importante et peut aller jusqu'à 8%.



Figure 1.6 : AMF à base de Nickel-Titane. (Wikipédia, s.d.)

1.6.2. Les alliages à base de fer

Les alliages à base de fer (aciers et fontes) jouent et continuent de jouer un rôle capital sur le plan technologique. Les alliages ferreux se prêtent facilement à une production en masse, ils sont bon marché et on peut les acquérir sous des formes très variées grâce à la diversité des traitements thermiques et des éléments d'addition. Ils sont caractérisés par :

- Mauvaise résistance à la corrosion.
- Les pertes par hystérésis sont très réduites.
- Grande perméabilité magnétique.
- Une forte limite élastique.
- Faible coût avec des propriétés mécaniques très intéressantes pour l'industrie.

- Son oxydation au contact de l'oxygène de l'air est rapide.



Figure 1.7 : AMF à base de fer. (Wikipédia, s.d.)

1.6.3. Les alliages à base de cuivre

Les alliages de cuivre font partie des métaux et alliages non ferreux. En utilisant des alliages, les performances du cuivre peuvent être étendues pour répondre à de nombreuses applications industrielles. Ils sont caractérisés par :

- Une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation.
- Très malléable.
- Facilité de mise en œuvre.
- L'effet de mémoire est petit et moins stable.
- Ont des propriétés mécaniques intéressantes et ont un coût de production faible.
- Très grande capacité de déformation à froid.



Figure 1.8 : AMF à base de cuivre. (Wikipédia, s.d.)

1.7. Applications en génie civil

1.7.1. Applications des AMF sans contrôle actif

Cette section présente des applications des AMF pour : (Waibaye, 2016)

- La réparation des structures en béton.
- La fermeture de fissures.
- La création de précontrainte dans des structures.
- Le contrôle sismique passif des structures.

1.7.1.1. Applications pour la réparation des structures en béton

Plusieurs travaux ont été menés sur l'utilisation des AMF pour la réhabilitation des ouvrages. Seuls quelques cas ont abouti à la réparation des structures existantes. A titre d'exemple, la (Figure 1.9) montre les réhabilitations de la cloche de la tour de l'église Saint Giorgio, des tympans de transept de la basilique Saint Francisco et de la synagogue de San Francisco.

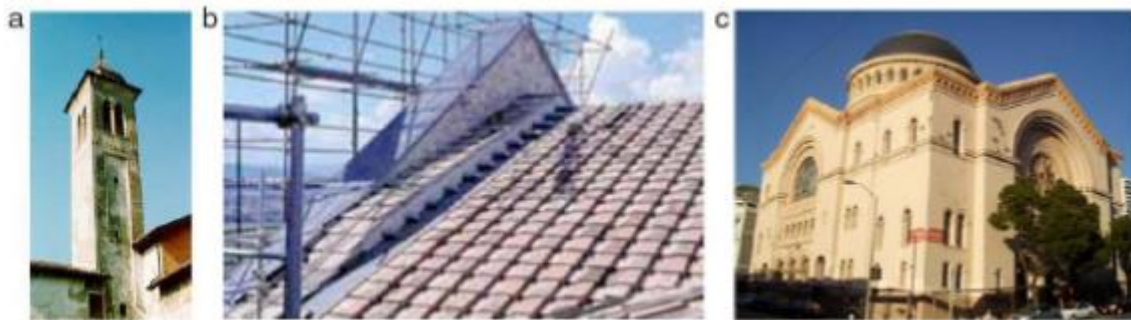


Figure 1.9 : Ouvrages ayant été réhabilités grâce à des AMF :

a) église Saint Giorgio, b) basilique Saint Francisco, c) synagogue de San Francisco.

(Waibaye, 2016)

La (Figure1.10) présente l'illustration de la propriété de superélasticité mise à profit dans la procédure d'autorégulation de structures à l'aide de tirants en AMF (cas de la tour de l'église Saint Francisco en Italie).

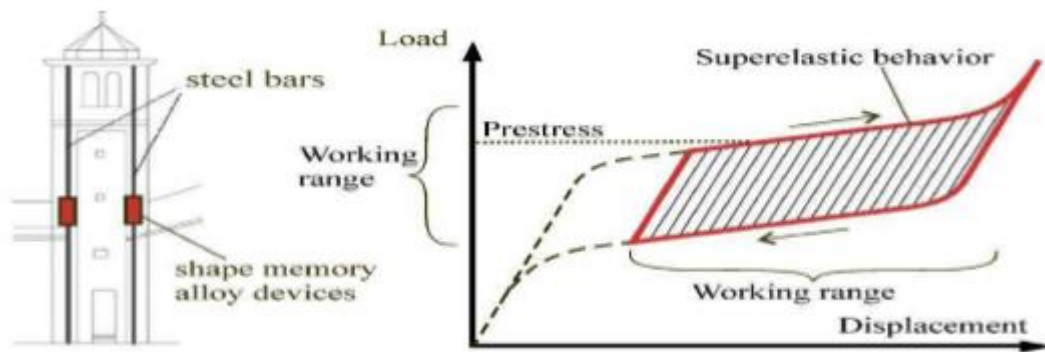


Figure 1.10 : Schéma de modification d'une tour grâce à des tirants en AMF. (Waibaye, 2016)

1.7.1.2. Applications pour la fermeture de fissures dans le béton

Song et al ont mis en œuvre un concept du béton armé « intelligent » en se servant de l'activation de l'effet mémoire des AMF (Figure 1.11). Des fils d'AMF initialement à l'état martensitique permettent de créer de la précontrainte au chauffage. Ceci permet par exemple de réduire l'ouverture des fissures dans un composant en béton (« autoréhabilitation »). (Waibaye, 2016)

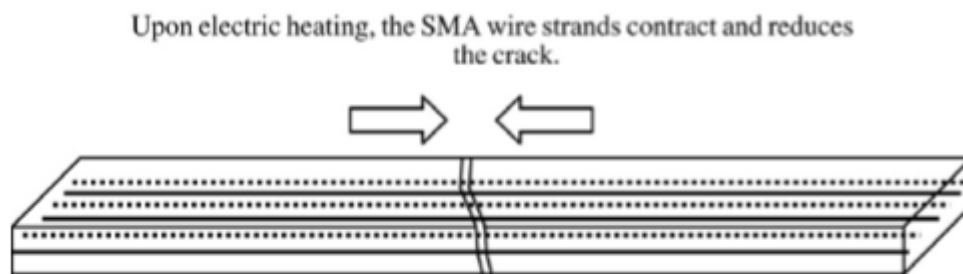


Figure 1.11 : Principe de béton armé intelligent. (Waibaye, 2016)

Pour illustrer ce concept, Song et al ont réalisé une étude sur une poutrelle en flexion sur deux appuis. Des fils d'AMF ont été incorporés dans la poutrelle. Un dispositif électrique permet de chauffer les fils par effet Joule (Figure 1.13-a). Une charge est appliquée à mi-portée, faisant apparaître des fissures (Figures 1.12-b et 1.12-c). Sans décharger la poutre, un courant électrique est appliqué dans les fils AMF, qui cherchent alors à se raccourcir. La Figure 1.33-d montre que les fissures se referment effectivement. En 2008, le même type d'étude a été réalisé par Li et al voir (Figure 1.13). (Waibaye, 2016)

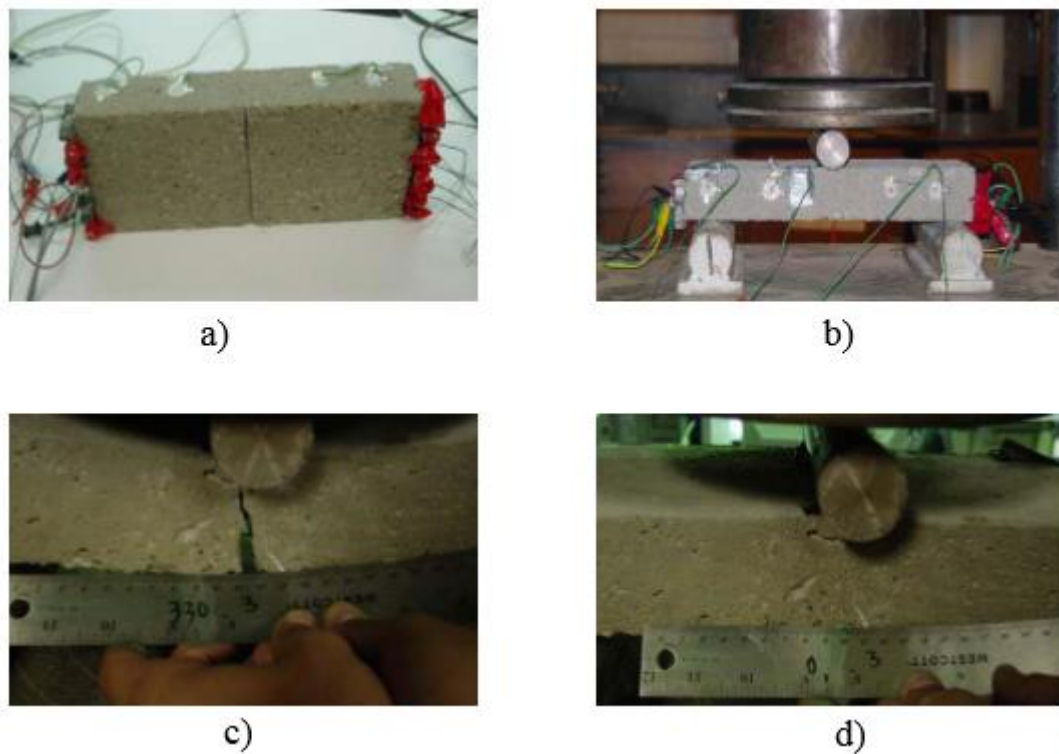


Figure 1.12 : Applications pour la fermeture de fissures dans le béton. (Waibaye, 2016)

- a) poutrelle et fils électriques permettant de chauffer les AMF intégrés dans le béton,
- b) poutrelle sollicitée en flexion, c) ouverture de fissure,
- d) fermeture de fissure grâce à l'activation thermique des AMF.

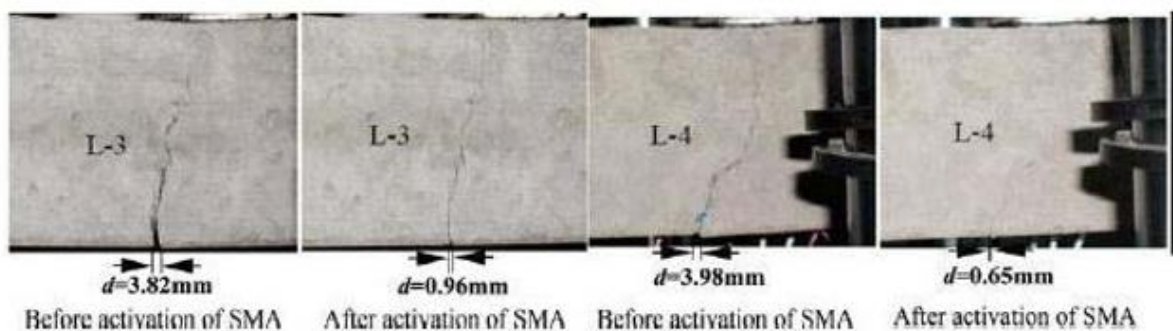


Figure 1.13 : Evolution d'une fissure lors de l'activation thermique de fils AMF insérés dans une poutrelle en béton. (Waibaye, 2016)

La (Figure 1.14) présente également une étude sur une poutrelle en flexion dont trois points sont équipés d'un fil en AMF. Ce fil est initialement à l'état martensitique et est placé à

l'extérieur de la poutrelle (sous la poutrelle). La poutrelle est soumise à une charge, faisant apparaître une fissure dans le béton. Au chauffage du fil AMF, la fissure se referme.

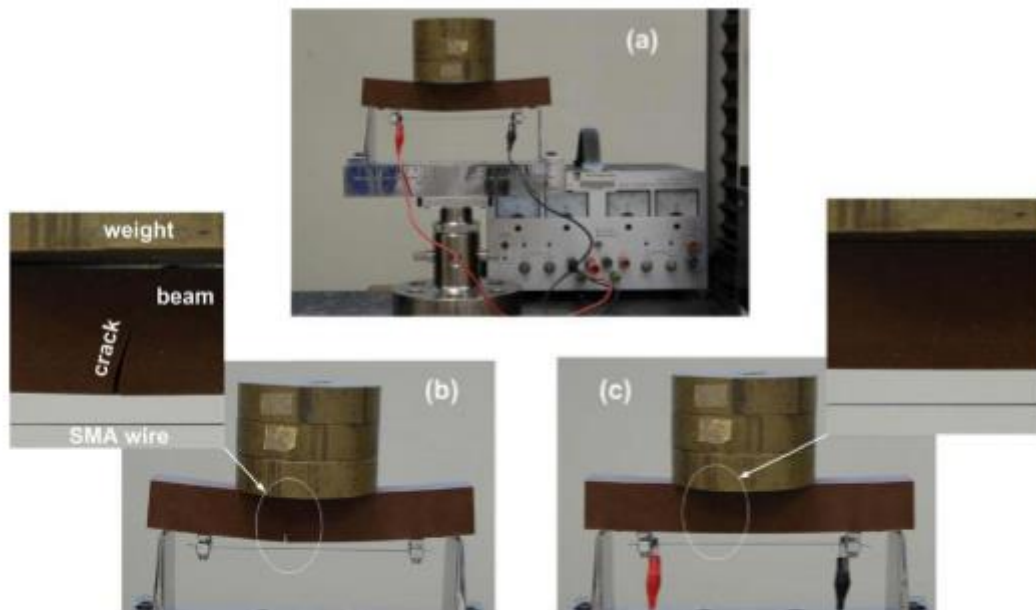


Figure 1.14 : Fermeture de fissure d'une poutrelle en flexion trois points par activation thermique d'un fil AMF disposé à l'extérieur de la poutre. (Waibaye, 2016)

La (Figure 1.15) présente une autre utilisation des AMF pour la fermeture de fissures dans un composant en béton. Le premier cas de réparation a été réalisé dans le Michigan aux Etats Unis en 2001. Il concerne une fissure qui est apparue dans une poutre en béton armé à section en T dont la résistance au cisaillement est faible. Des barres en AMF à base de Fe-MnSi-Cr ont été utilisées. Elles sont initialement à l'état martensitique et disposées perpendiculairement aux fissures. En procédant par activation thermique de l'effet mémoire, il apparaît des contraintes dans les barres, ce qui permet la réduction de fissures.

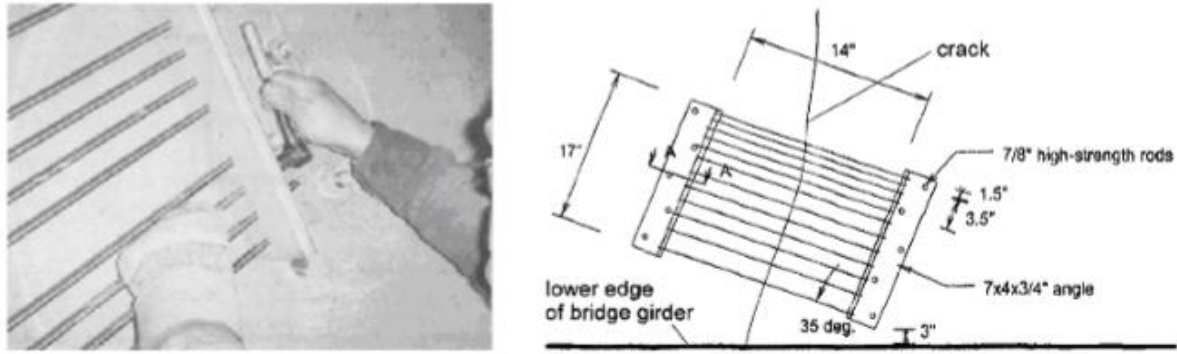


Figure 1.15 : Réparation d'une zone fissurée dans un pont situé dans le Michigan. (Waibaye, 2016)

Otero et al ont réalisé des travaux sur une poutre en béton dans laquelle ont été incorporés des fils d'AMF (Figure 1.16). La poutre est soumise à une charge importante créant des fissures. Une fois que la poutre est déchargée, la fissure se referme grâce à la propriété de mémoire de forme des AMF (« auto-restauration » de la structure). (Waibaye, 2016)

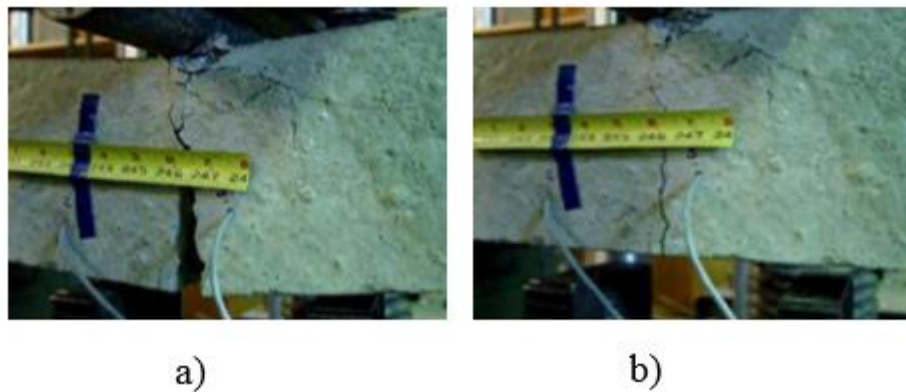


Figure 1.16 : Poutre contenant des fils en AMF. a) ouverture de fissures provoquée par chargement mécanique, b) fermeture de fissures grâce à auto-restauration.

1.7.1.3. Applications pour la création de précontraintes dans des structures en béton

La (Figure 1.17-a) présente une étude sur des poutrelles en béton avec création de précontrainte à l'aide de fils en AMF. Les fils sont initialement à l'état martensitique et pré-étirés. Ils étaient placés à l'extérieur de la poutrelle et encastrés aux extrémités sur la poutrelle. Le chauffage

entraîne le retour à l'état austénitique, entraînant l'apparition de contrainte car le retour à la longueur initiale est gêné. La (Figure 1.17-b) présente les principaux résultats obtenus. Ces résultats montrent l'évolution de la déformation de la poutrelle, mesurée par des jauges à mi-portée, lors du chauffage et du retour à la température ambiante. Une précontrainte de flexion est ainsi créée. (Waibaye, 2016)

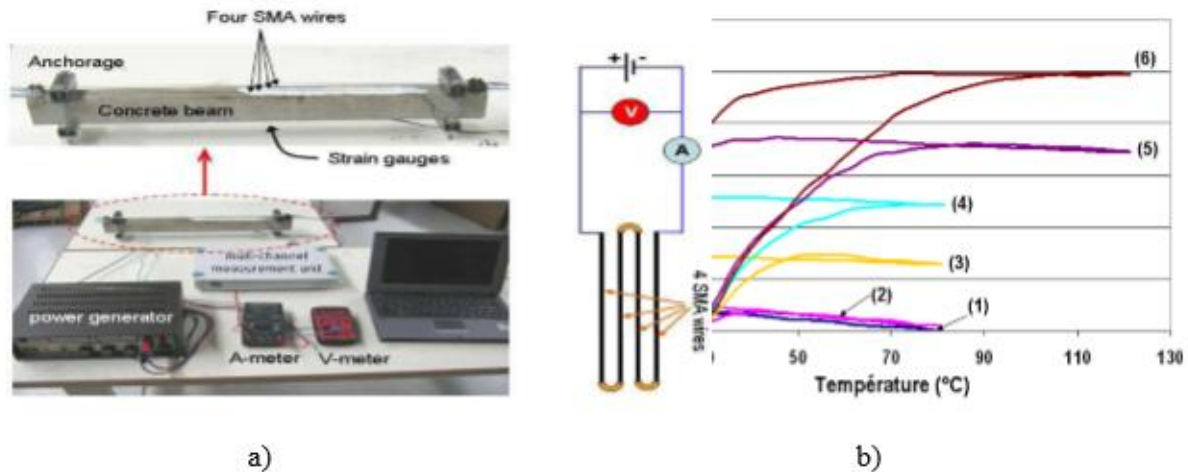


Figure 1.17 : Précontrainte de flexion des poutrelles à l'aide des fils d'AMF. a) dispositif ; b) évolution de la déformation longitudinale à mi-travée de la poutrelle pour différentes valeurs de prédéformation. (Waibaye, 2016)

En 2008, Choi et al ont mené des travaux sur le confinement de cylindres en béton (Figure 1.18). Les fils AMF utilisés sont de type Ni-Ti, soit à l'état martensitique, soit à l'état austénitique. Ces fils sont enroulés sur la surface latérale des cylindres, sans toutefois activer l'effet mémoire (on parle de confinement « passif »). Les résultats à l'écrasement des cylindres montrent que la configuration des fils à l'état martensitique permet d'augmenter la résistance et la ductilité du béton, tandis que la configuration à l'état austénitique améliore seulement la ductilité. (Waibaye, 2016)

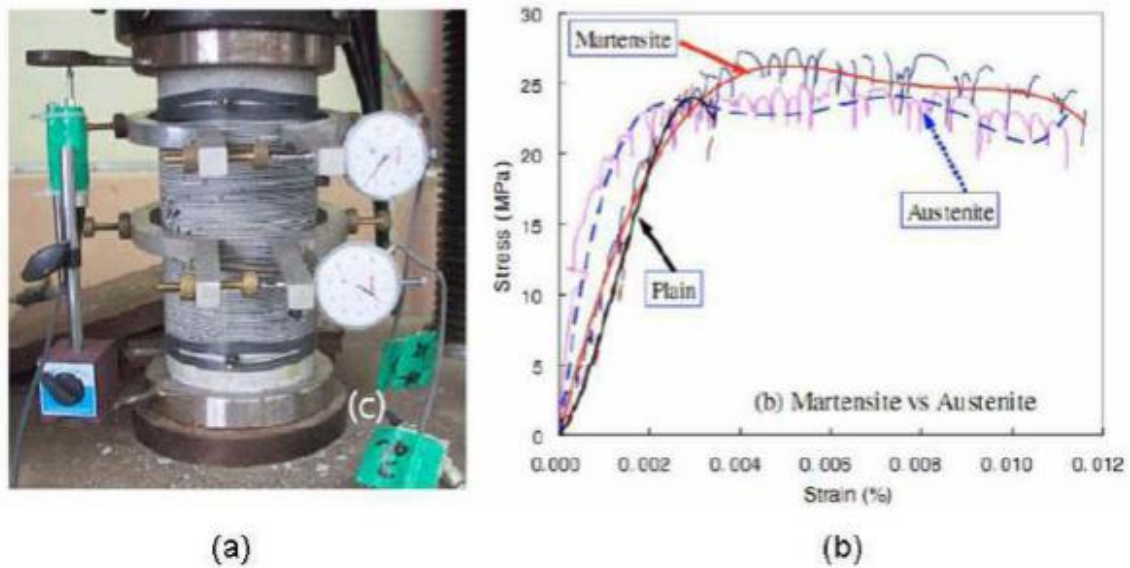


Figure 1.18 : Confinement passif d'un cylindre en béton et essais d'écrasement.

(Waibaye, 2016)

Shin et al ont également réalisé des travaux de confinement sur des cylindres en béton (Figure 1.19). Ici, le confinement est activé par le chauffage des fils initialement à l'état de martensite (on parle de confinement « actif », au sens où il existe une précontrainte avant même d'écraser les échantillons). La Figure 1.20 présente les résultats obtenus : la contrainte dans le cylindre confiné de manière active est nettement supérieure à celle du cylindre non-confiné (gain de 21%). (Waibaye, 2016)

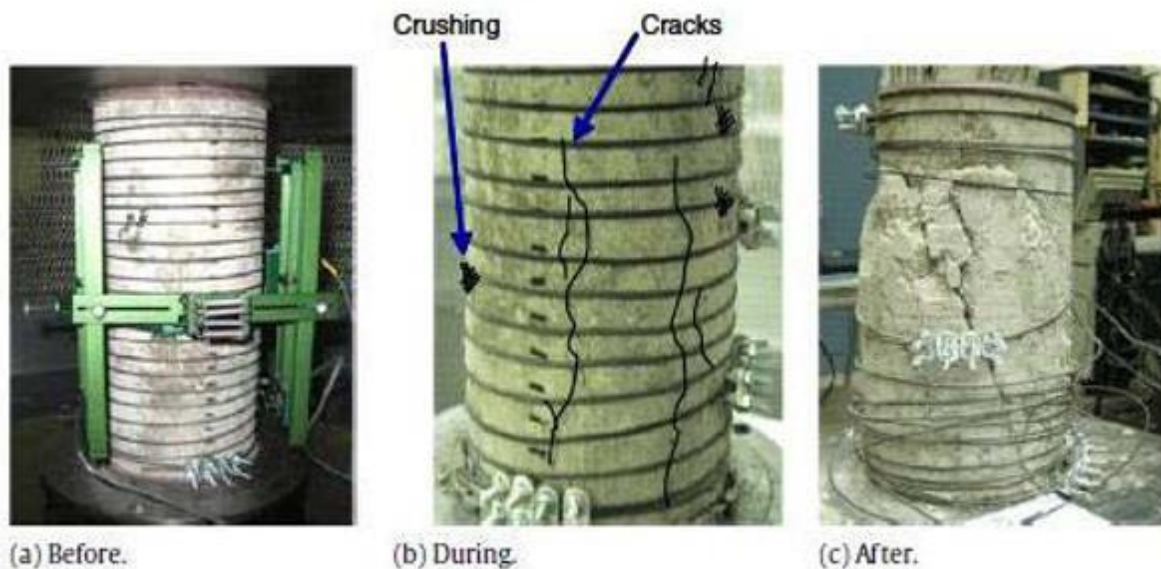


Figure 1.19 : Confinement actif d'un cylindre en béton et essai d'écrasement. (Waibaye, 2016)

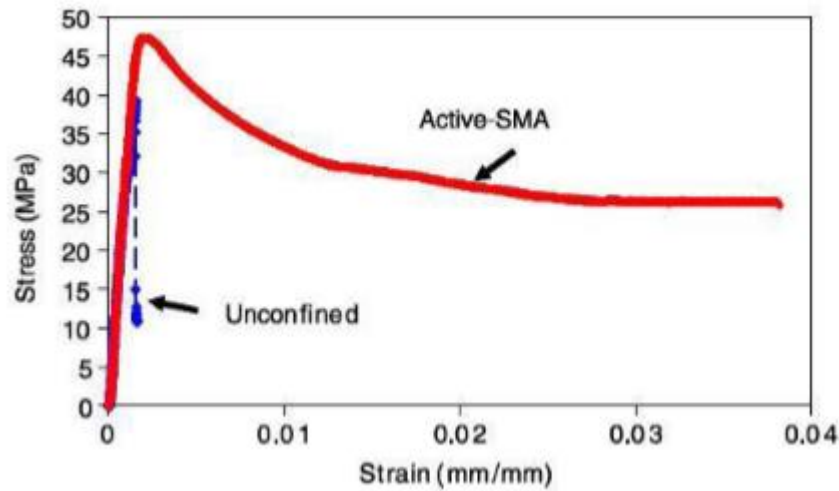


Figure 1.20 : Comparaison entre des cylindres non-confiné et confiné activement.
(Waibaye, 2016)

La Figure 1.21 présente les travaux sur le confinement de cylindres de béton en utilisant des fils en AMF de type Ni-Ti et Ni-Ti-Nb. Les cylindres avec fils en Ni-Ti-Nb donnent à l'écrasement des contraintes plus élevées que ceux utilisant des AMF classiques en Ni-Ti.

Ceci est dû à une différence de température de transformation entre les deux types d'alliage, le Ni-Ti-Nb se transforme pour des températures plus basses. (Waibaye, 2016)

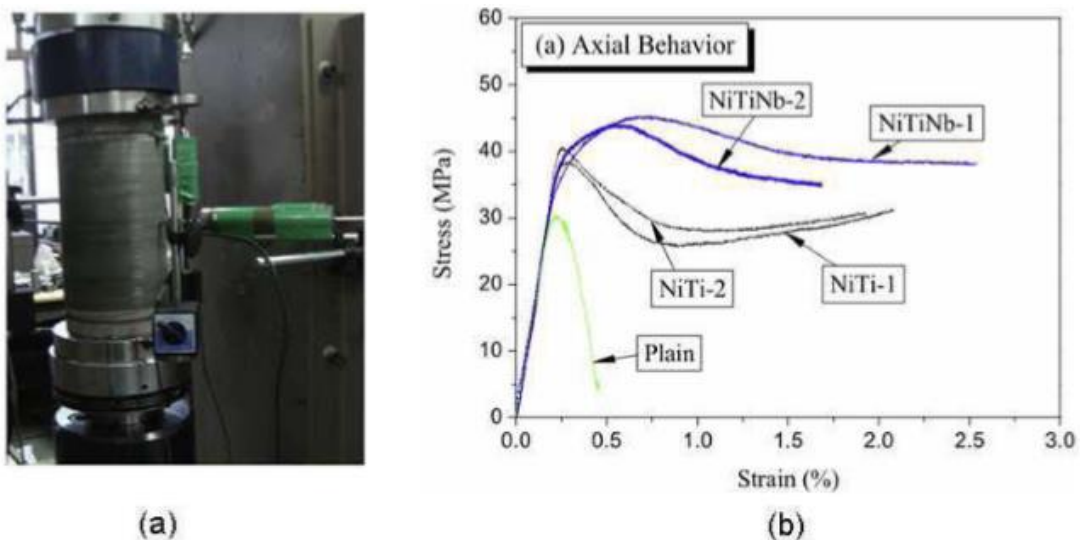


Figure 1.21 : Confinement actif d'un cylindre en béton par :
a) photo du dispositif, b) comparaison des résultats obtenus. (Waibaye, 2016)

Tran et al ont réalisé des essais de compression sur des éprouvettes cylindriques en béton non-confinées et confinées à l'aide de fils en Ni-Ti, Figure 1.22 dont les résultats sont représentés par la Figure 1.23. La résistance des cylindres confinés est supérieure à celle des cylindres non-confinés. De plus, le confinement actif est plus efficace que le confinement passif (ce dernier cas correspond au cas d'utilisation de l'AMF à l'état austénitique, sans transformation de phase lors de l'essai). De manière générale, la présence du fil en AMF améliore de manière significative la performance mécanique du béton en termes de rigidité, résistance et ductilité. (Waibaye, 2016)

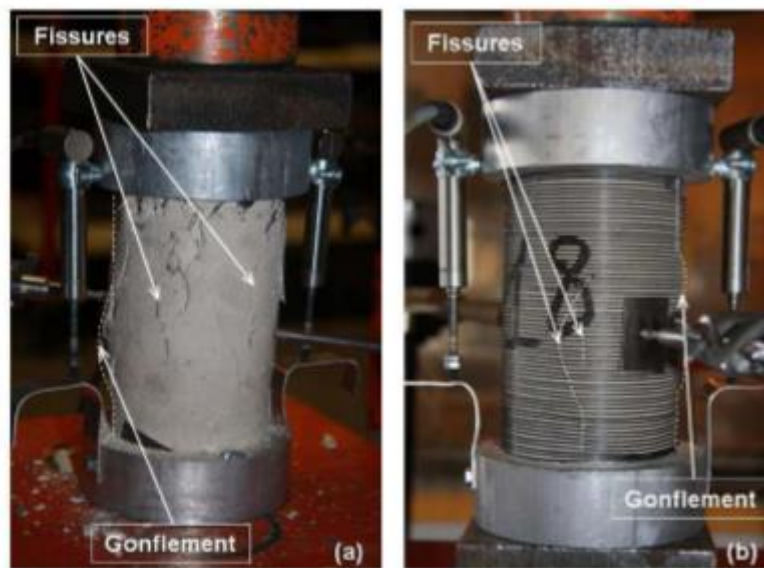


Figure 1.22: Ecrasement de cylindres en béton :
a) non-confiné, b) confiné à l'aide d'un fil AMF. (Waibaye, 2016)

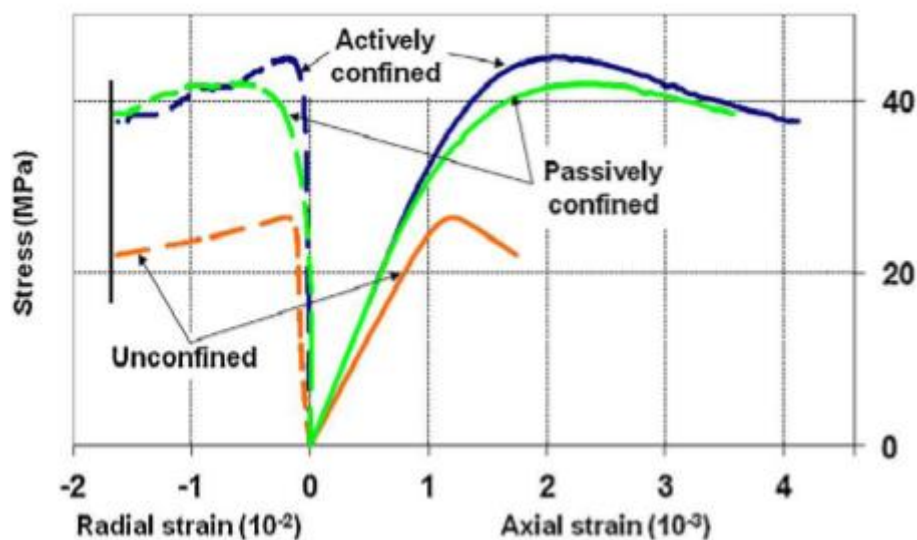


Figure 1.23: Loi de comportement des cylindres en béton écrasés. (Waibaye, 2016)

Shin et al ont réalisé des travaux de renforcement de colonnes en béton en utilisant des fils en AMF à base Ni-Ti-Nb, Figure 1.24. Le renforcement latéral permet l'élimination complète des dommages dans la configuration testée. De plus, le confinement à l'aide de fils en Ni-Ti-Nb permet d'améliorer la résistance de la structure par rapport à l'utilisation des fils en Ni-Ti. (Houmat & Seghir, 2019)

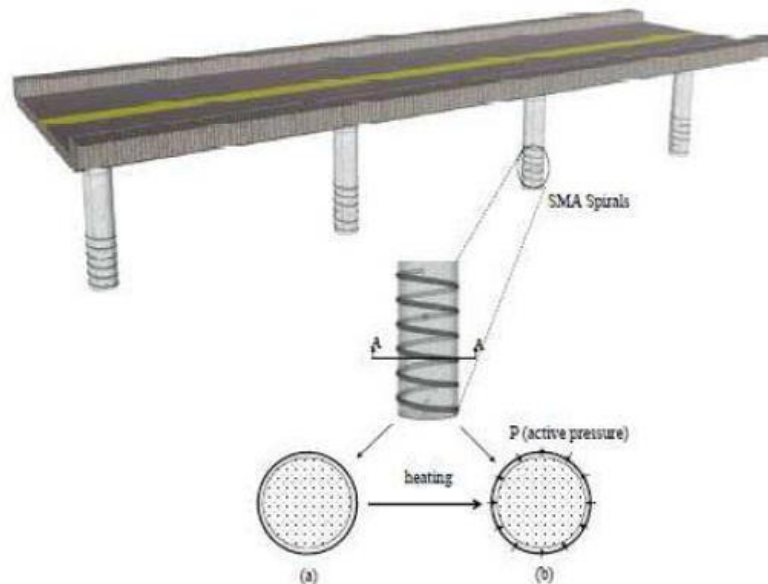


Figure 1.24 : Précontrainte de cylindres en béton par des fils en AMF, selon Shin M. (Waibaye, 2016)

En 2014, Debska a mené une étude sur le confinement sur des cylindres creux en béton en utilisant des fils en AMF Ni-Ti. Deux cylindres ont été confinés à mi-hauteur, Figure 1.25. Un autre n'a pas été confiné. Les trois cylindres ont été soumis à une même force de compression. Le résultat stipule que la précontrainte créée par le fil AMF améliore la performance des cylindres. (Houmat & Seghir, 2019)



Figure 1.25 : Etude sur des cylindres creux renforcés par fil en AMF. (Waibaye, 2016)

1.7.1.4. Applications pour le contrôle sismique (passif) des structures

En termes de prévention sismique, Dolce et al (Waibaye, 2016) ont développé et étudié un système d'isolement par dissipation de l'énergie sismique grâce à des fils AMF. Mayes et al (Waibaye, 2016) ont utilisé des ressorts en AMF dans le même but. L'impact des AMF sur le changement de fréquence de résonnance du système et de son amplitude a été mis en évidence dans ces travaux. Li et al (Waibaye, 2016) ont utilisé des AMF pour amortir la vibration d'un câble de pont. DesRoches et al (Waibaye, 2016) ont placé des barres en AMF sur un pont pour diminuer les effets sismiques, Figure 1.27. Dans le cas des ouvrages en génie civil, plusieurs travaux ont également été menés : Clark et al (Waibaye, 2016) ont par exemple installé des dispositifs de dissipation d'énergie en fil Ni-Ti sur des baies de bâtiments, Figure 1.28. Williams et al (Waibaye, 2016) ont aussi réalisé des travaux sur la diminution des fréquences de vibration en utilisant un amortisseur adaptatif passif comportant des éléments en AMF. En 2014, Helbert a étudié la contribution à la durabilité de câbles de génie civil vis-à-vis de la fatigue par un dispositif amortisseur à base de fils NiTi. (Waibaye, 2016)

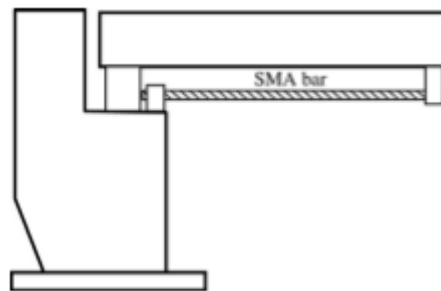


Figure 1.26 : Schéma d'installation d'une barre en AMF sur un pont pour la prévention sismique. (Waibaye, 2016)

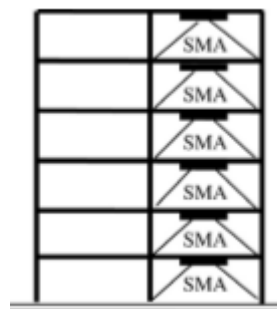


Figure 1.27 : Schéma d'installation des bretelles en AMF pour la prévention sismique. (Waibaye, 2016)

1.7.2. Applications des AMF avec contrôle actif

On présente maintenant des applications en ingénierie des AMF avec contrôle actif, c'est-à-dire qu'il y a un pilotage de l'AMF en temps réel en fonction de la valeur d'un paramètre mesuré.

Cette section est organisée de la manière suivante : (Waibaye, 2016)

- Des applications pour le contrôle actif de la déformation d'une structure de type poutre.
- Des applications pour le contrôle actif des vibrations dans les structures.

1.7.2.1. Contrôle de la déformation d'une poutre

La Figure 1.28 concerne les travaux relatifs au contrôle de la flexion d'une poutrelle en acier au moyen d'un fil en AMF placé parallèlement à celle-ci. La flexion de la poutrelle est provoquée en chauffant le fil en AMF. Un dispositif mesure en temps réel la flèche à mi-portée. L'objectif est de suivre une consigne en fonction du temps en agissant par chauffage du fil AMF. Grâce à la rigidité de la poutre, l'arrêt du chauffage permet de restituer le moment provoqué pendant le chauffage. Ainsi, le système fonctionne à double-sens.

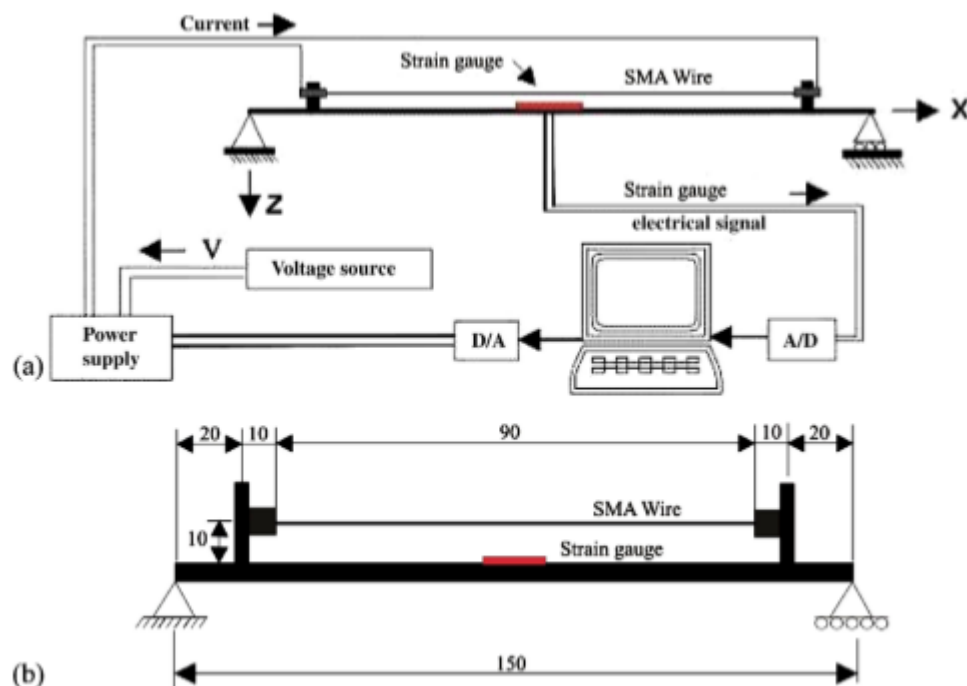


Figure 1.28: Système de contrôle actif d'une poutrelle à l'aide d'un AMF. (Waibaye, 2016)

Deng et al ont également réalisé des travaux sur le contrôle de la flèche d'une poutre en béton à l'aide de fils en AMF, Figure 1.29, (Houmat & Seghir, 2019). Les fils initialement martensitiques sont incorporés dans la poutre. La mesure de la flèche est effectuée à mi-portée en temps réel. Une charge est ensuite appliquée. Dès que la flèche mesurée excède la valeur programmée, le système commence à alimenter le fil en courant électrique afin d'activer thermiquement l'effet mémoire.

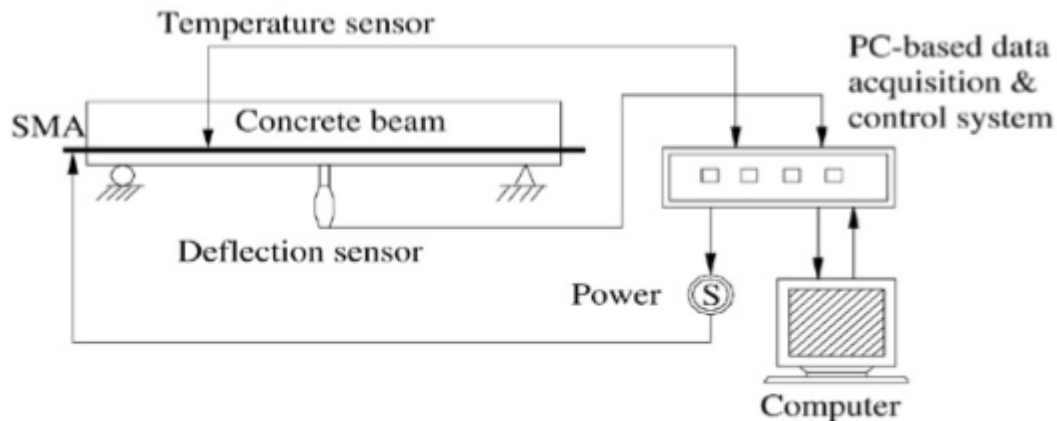


Figure 1.29 : Système de contrôle de la flexion d'une poutre à l'aide d'un fil AMF.

(Waibaye, 2016)

Ces différents travaux montrent qu'il est possible de créer des structures intelligentes en béton pour des applications en génie civil.

1.7.2.2. Contrôle actif des vibrations dans les structures

Baz et al ont mené des travaux sur la fiabilité de l'utilisation d'actionneurs à base d'AMF pour le contrôle actif des vibrations en flexion d'une poutre. Ils ont utilisé un capteur de position pour surveiller la vibration. Le signal est envoyé à un micro-ordinateur par l'intermédiaire d'un convertisseur, et une comparaison est faite par rapport à une position désirée de la poutre. Un système de contrôle en vibration de la structure flexible a été ainsi mis en place. Les résultats obtenus montrent que les AMF sont des éléments fiables pour amortir la vibration des systèmes flexibles. (Waibaye, 2016)

1.8. Conclusion

Les différentes propriétés des AMF et leurs domaines d'applications ont été abordés dans ce chapitre. Nous avons fait le choix dans cet état de l'art de distinguer les applications des AMF avec et sans contrôle actif (c'est-à-dire avec possibilité ou non de piloter en temps réel l'action du composant AMF en fonction de la valeur d'un paramètre mesuré). Bien que chaque application ait été présentée que de manière succincte, il apparait clairement que l'utilisation des AMF en ingénierie ouvre de nombreuses perspectives technologiques, notamment dans le domaine du Génie Civil.

La suite de ce manuscrit se focalise sur l'utilisation de fils en AMF afin de prévoir les risques sismiques dans des structures, notamment les monuments historiques de type minarets. A commencer par des structures simples qui peuvent être représentatives de ce type de constructions, ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 02 :

Introduction des AMF sur une structure prismatique

Contenu

- 2.1. Introduction
- 2.2. Introduction sur le logiciel de calcul ANSYS, V 15.0
- 2.3. Les principales hypothèses
- 2.4. Caractéristiques mécaniques des structures et des AMF
- 2.5. Modélisation numérique des AMF
- 2.6. Analyse modale
- 2.7. Analyse transitoire
- 2.8. Conclusion

2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous étudions l'influence du système d'attaches des AMF sur le comportement des structures. Pour cela, nous allons considérer deux structures de même dimensions ($10 \times 10 \times 40$) m³, l'une pleine et l'autre creuse. Nous allons modéliser les AMF par des éléments PIPE288 et comparer les résultats au cas de modélisation par des éléments solides (SOLID185) utilisés dans la référence (Houmat & Seghir, 2019).

Tout d'abord, nous allons analyser les fréquences et les périodes propres pour les types de structures (pleine et creuse). Par la suite, nous allons faire une étude dynamique transitoire sous une excitation sismique du signal du séisme de Boumerdès 2003, et ceci toujours dans le but de comparer les résultats de calcul en termes de déplacements, vitesses, accélérations et la distribution des contraintes sans et avec un fil d'AMF.

2.2. Introduction sur le logiciel de calcul ANSYS, V 15.0

Pour mener notre étude par modélisation numérique, on a utilisé le logiciel numérique ANSYS, qui est l'un des codes de calcul, basé sur la méthode d'éléments finis.

Le logicielle « ANSYS » comprend plusieurs composantes telles que : ANSYS/Professionnel, ANSYS/ Multiphysics, ANSYS/ Structural...etc. Dans notre analyse, on a utilisé le module structural dans ANSYS/ Multiphysics, qui permet de traiter la majorité des problèmes de mécanique. Il offre des outils puissants pour l'analyse uni, deux et trois dimensions. (Itim, 2010)

Cependant, pour notre cas, nous pouvons choisir de modéliser les AMF en 3D en passant par des éléments structuraux solides (Solid185) ou bien en considérant des éléments unidimensionnels tels que les éléments poutres (Beam) ou des éléments pipes (Pipe288). Dans cette étude nous avons opté pour des éléments PIPE288 que nous allons définir par la suite.

2.2.1. L'élément SOLID185

L'élément SOLID185 est utilisé pour la modélisation 3D de structures solides, Figure 2.1. Il est défini par huit nœuds ayant trois degrés de liberté à chaque nœud : des translations dans les nodales directions x, y et z. L'élément a une plasticité, une hyper-élasticité, une rigidification

sous contrainte, un fluage, une grande déformation et de grandes capacités de déformation. Il a également une capacité de formulation mixte pour simuler les déformations de matériaux élasto-plastiques presque incompressibles et de matériaux hyper-élastiques totalement incompressibles.

Les directions de contrainte indiquées sont pour les directions globales.

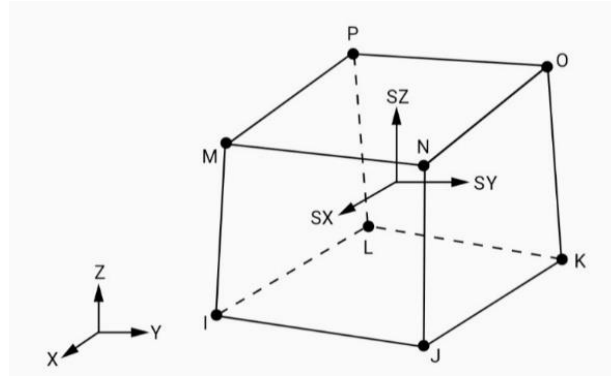


Figure 2.1 : Géométrie de l'élément solide, SOLID185.

2.2.2. L'élément PIPE288

L'élément PIPE288 convient à l'analyse de structures de tuyaux minces à modérément épais. L'élément est basé sur la théorie de Timoshenko. Les effets du déformation de cisaillement sont inclus. PIPE288 est un élément de tuyau à deux nœuds linéaire, quadratique ou cubique en 3D. Il a six degrés de liberté à chaque nœud (les translations dans les directions x , y et z et les rotations autour des directions x , y et z). Il est bien adapté aux applications linéaires, à grande rotation et/ou non linéaires à grande déformation. PIPE288 inclut les termes de rigidité et de contrainte, par défaut. Les termes contrainte-rigidité fournis permettent aux éléments d'analyser les problèmes de stabilité en flexion, latérale et en torsion (en utilisant des études de flambement aux valeurs propres ou d'effondrement avec des méthodes de longueur d'arc ou une stabilisation non linéaire). Élasticité, hyper-élasticité, plasticité, fluage et d'autres modèles de matériaux non linéaires sont pris en charge. Le fluide interne et l'isolation externe sont pris en charge. La masse ajoutée, la masse et la charge ajoutées hydrodynamiques et la charge flottante sont disponibles.

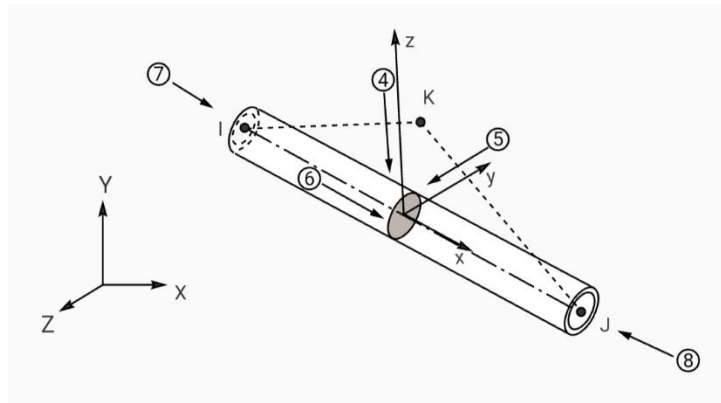


Figure 2.2 : Géométrie de l'élément PIPE288

2.3. Les principales hypothèses

Les hypothèses retenues dans la modélisation sont :

- Le comportement du matériau des deux structures est supposé être linéaire, élastique et isotrope.
- Le modèle est tridimensionnel, donc on a été amené à utiliser l'élément de type « SOLID185 » pour modéliser les structures et « PIPE288 » pour modéliser le fil d'AMF.
- Le modèle numérique est supposé être encasté à sa base.
- Le poids propre des structures est négligé.
- L'épaisseur de la structure creuse est de 0.5 m.

2.4. Caractéristiques mécaniques des structures et des AMF

2.4.1. Caractéristiques mécaniques des structures

Les caractéristiques mécaniques des deux structures (pleine et creuse) sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : caractéristiques mécaniques des matériaux des structures pleine et creuse

Module d'élasticité (MPa)	2000
Masse volumique (kg/m ³)	2500
Coefficient de Poisson	0,2

2.4.2. Caractéristiques mécaniques des AMF

On a utilisé un fil en AMF à base de cuivre de 3.5 mm de diamètre et 1.00 m de hauteur. En plus de leurs caractéristiques mécaniques mentionnées dans le tableau 2.2. Et les propriétés qui doivent être fournies à la loi de matériau AMF sont représentées sur la figure 2.3 ainsi qu'au tableau 2.3. Il s'agit des contraintes de transformation directe (σ_{Ms} et σ_{Mf}) et inverse (σ_{As} et σ_{Af}), la déformation de transformation maximale (ϵ_{trmax}) et la variable α qui correspond à la sensibilité du matériau à la pression isostatique. (francois, 2004)

Tableau 2.2 : caractéristiques mécaniques de l'AMF

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

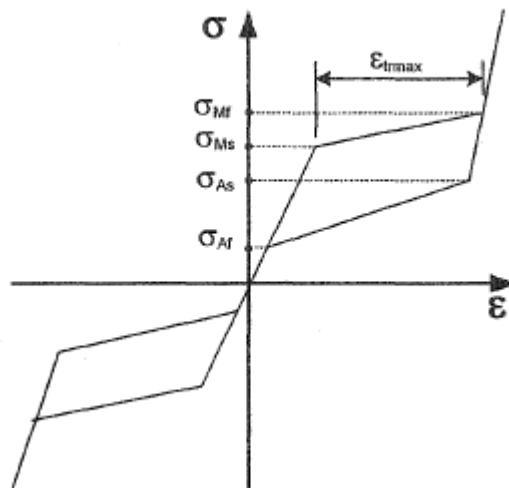
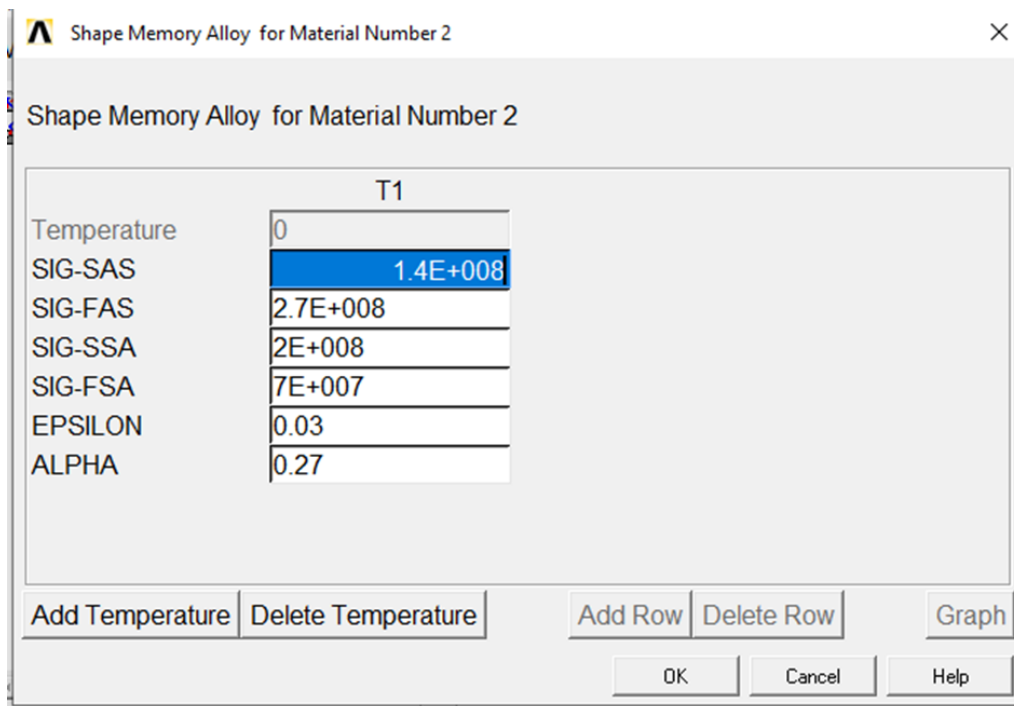
**Figure 2.3** : Paramètre de la loi SMA de Ansys. (francois, 2004)

Tableau 2.3 : Les paramètres de l'AMF.

σ_{Ms}	σ_{Mf}	σ_{As}	σ_{Af}	ϵ_{trmax}	α
140	270	200	70	0,03	0,27

2.5. Modélisation numérique des AMF

La modélisation est réalisée via le logiciel en éléments finis Ansys V15.0. Celui-ci nous donne la possibilité d'introduire les six paramètres des AMF définis précédemment (Tableau 2.3). La figure 2.4 présente la fenêtre d'Ansys qui permet de définir les paramètres de l'AMF.

**Figure 2.4** : Définition des AMF dans ANSYS

2.6. Analyse modale

Dans cette partie, nous avons fait une analyse modale de deux structures tridimensionnelles. La 1^{ère} est une structure pleine de dimensions (10*10*40) m³ et la 2^{ème} est creuse avec les mêmes dimensions. Le vide intérieur est réalisé en supposant une paroi de 0.5 m. Le but de cette analyse est d'obtenir les fréquences et les périodes propres des structures précédentes.

La modélisation a été faite selon les étapes suivantes :

- Définir les types des éléments utilisés « SOLID185 » pour la structure et « PIPE288 » pour le fil d'AMF, ainsi que les caractéristiques des matériaux de la structure et le fil d'AMF.
- Créer la géométrie.
- Créer les caractéristiques géométriques de la section de l'élément « PIPE288 ».
- Passage en modèle en éléments finis en maillant les deux structures.
- Introduction des conditions aux limites, qui correspondent à un encastrement à la base.
- Faire une analyse modale.
- Déterminer les 10 premiers modes propres.

2.5.1. Analyse modale sans AMF

Nous présentons dans les figures 2.5 et figure 2.6 le maillage utilisé pour les deux structures pleine et creuse. Nous avons fait une analyse modale et nous avons relevé les 10 premiers modes. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.4.

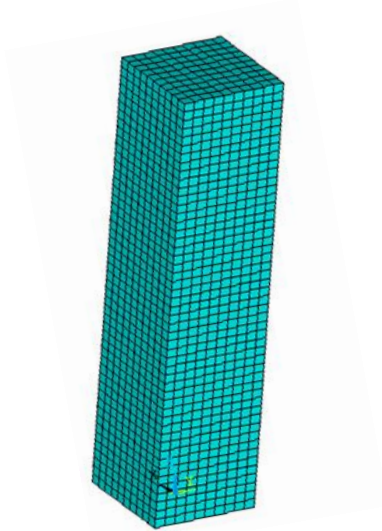


Figure 2.5 : Structure pleine sans AMF

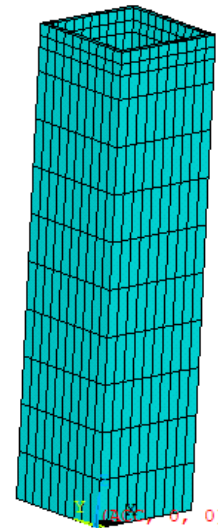


Figure 2.6 : Structure creuse sans AMF

Tableau 2.4 : Les périodes et les fréquences de la structure sans AMF des dix premiers modes

Mode	Fréquence propre (Hz)	Période (s)
Structure Pleine		
1	0,8982	1,1133
2	0,8982	1,1133
3	3,3528	0,2983
4	4,6474	0,2152
5	4,6474	0,2152
6	5,6148	0,1781
7	10,153	0,0985
8	10,962	0,0912
9	10,962	0,0912
10	16,916	0,0591
Structure Creuse		
1	1,0993	0,9097
2	1,0993	0,9097
3	2,6413	0,3786
4	3,2132	0,3112
5	3,5342	0,2829
6	4,0358	0,2478
7	4,3442	0,2302
8	4,3442	0,2302
9	4,6072	0,2171
10	5,6078	0,1783

Si nous comparons les fréquences propres des deux structures (pleine et creuse), nous remarquons que les deux premiers modes propres qui représentent des modes translationnels (figures 2.7 et 2.8) sont plus élevés dans le cas de structure creuse $F=1.0993$ Hz que dans le cas de structure pleine où $F=0.8982$ Hz. En revanche, pour les modes suivants (supérieurs à 2) les valeurs de la structure creuse deviennent inférieures vis-à-vis des celles de la structure pleine.

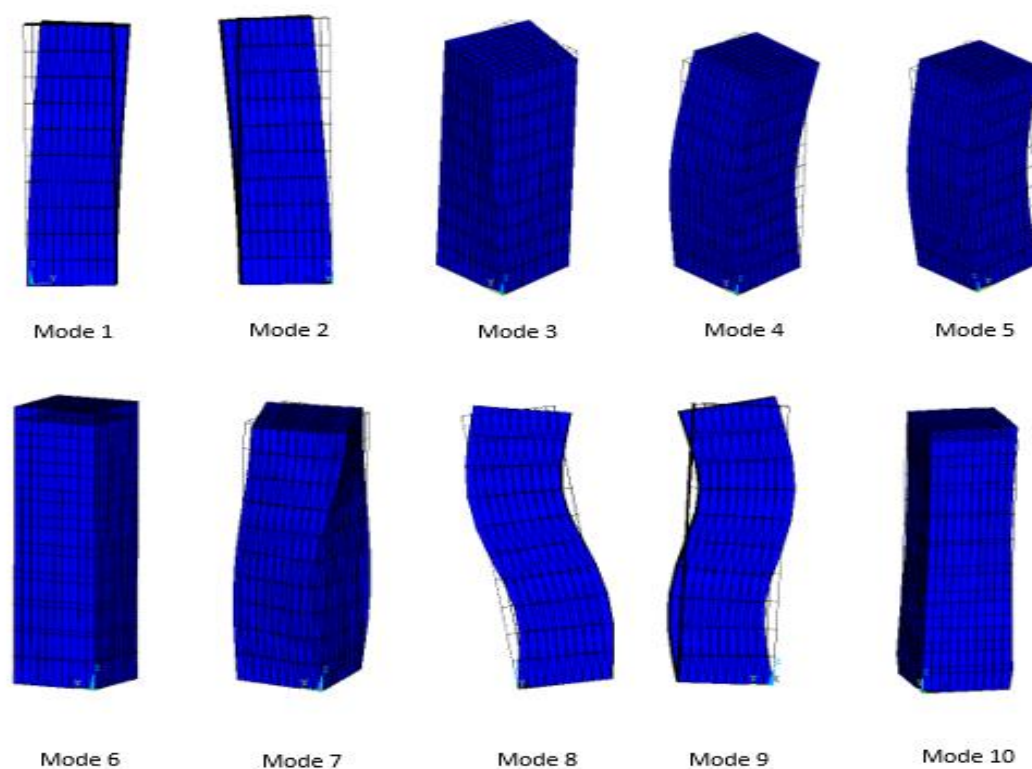


Figure 2.7 : Modes propres de la structure pleine sans AMF

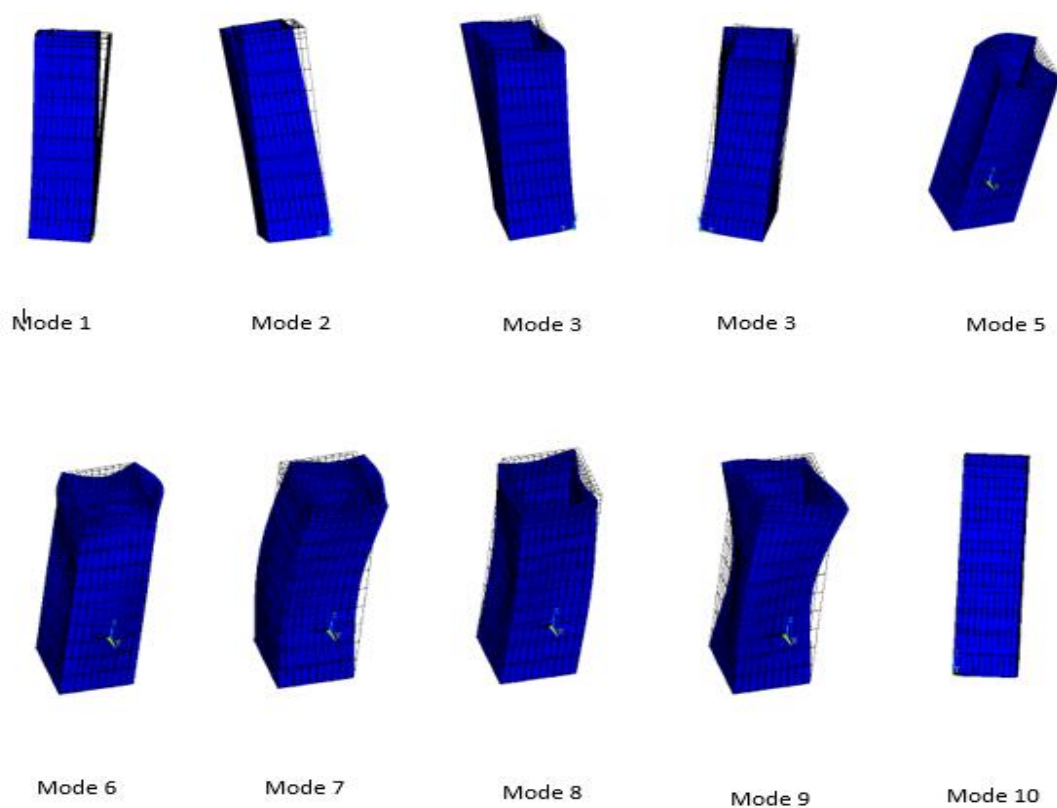


Figure 2.8 : Modes propres de la structure creuse sans AMF

2.5.2. Analyse modale avec AMF (PIPE288)

Nous présentons dans les figures 2.9 et 2.10 le maillage utilisé pour les deux structures pleine et creuse, en considérant l'AMF en PIPE288. Nous avons fait une analyse modale et nous avons relevés les 10 premiers modes. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.5.

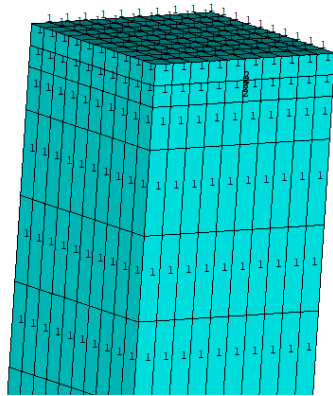


Figure 2.9 : Structure pleine avec AMF en PIPE288

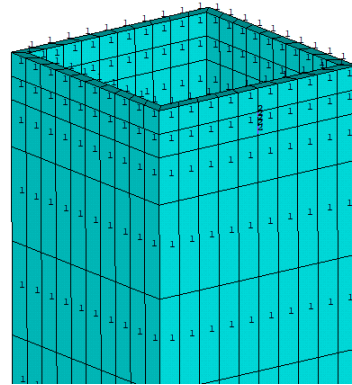


Figure 2.10 : structure creuse avec AMF en PIPE288

Tableau 2.5 : les périodes et les fréquences de la structure avec AMF des dix premiers modes

Mode	Fréquence propre (Hz)	Période (s)
Structure Pleine		
1	0,8962	1,1158
2	0,8962	1,1158
3	3,3522	0,2983
4	4,6460	0,2152
5	4,6460	0,2152
6	5,6138	0,1781
7	10,136	0,0987
8	10,949	0,0913
9	10,949	0,0913
10	16,890	0,0592

Structure Creuse		
1	1,0993	0,9097
2	1,0993	0,9097
3	2,6413	0,3786
4	3,2132	0,3112
5	3,5342	0,2829
6	4,0358	0,2478
7	4,3442	0,2302
8	4,3442	0,2302
9	4,6072	0,2171
10	5,6078	0,1783

La comparaison des fréquences propres des deux structures (pleine et creuse) montre que les deux premiers modes propres qui représentent des modes translationnels (figures 2.11 et 2.12) sont plus élevés dans le cas de structure creuse $F=1.0993$ Hz que dans le cas de structure pleine où $F=0.8962$ Hz. En revanche, pour les modes suivants (supérieurs à 2) les valeurs de la structure creuse deviennent inférieures vis-à-vis des celles de la structure pleine.

Si nous comparons maintenant entre le cas sans et avec AMF. Nous constatons que l'utilisation modifié légèrement les résultats dans les deux cas des structures (pleine/creuse) avec AMF par rapport le cas sans AMF.

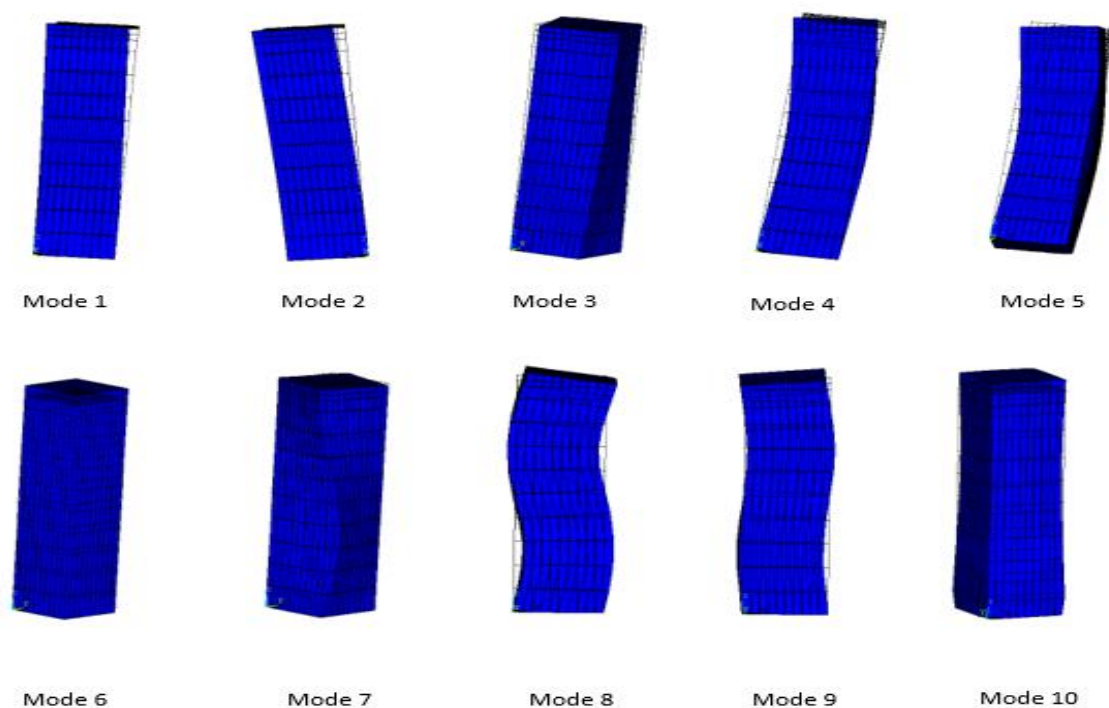


Figure 2.11 : Modes propre de la structure pleine avec AMF (PIPE288)

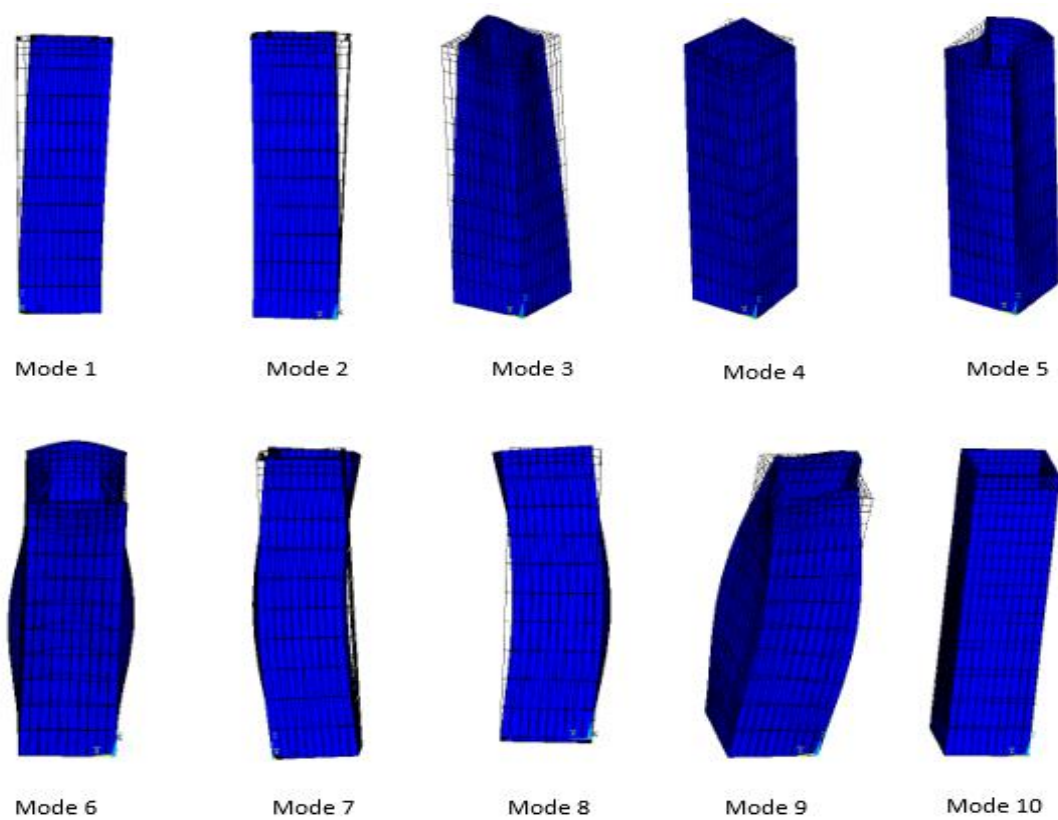


Figure 2.12 : Modes propres de la structure creuse avec AMF (PIPE288).

2.5.3. Analyse modale avec AMF type d'élément solides 185 (3D)

Dans cette partie, nous avons repris l'exemple de la structure avec les éléments 3D, Solid185. Ce fil en AMF est attaché à la structure par des cornières. Le but de cette étude est de comparer les résultats avec le cas de l'utilisation de l'élément PIPE288.

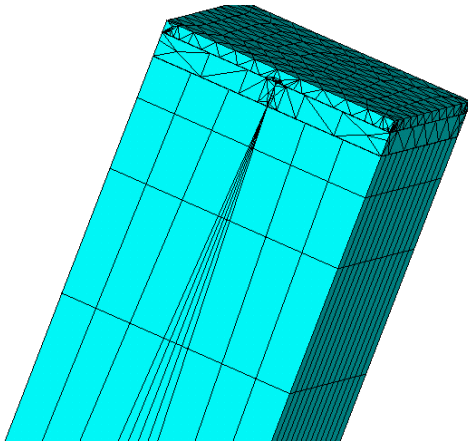


Figure 2.13 : Structure pleine avec AMF
(SOLID185 3D)

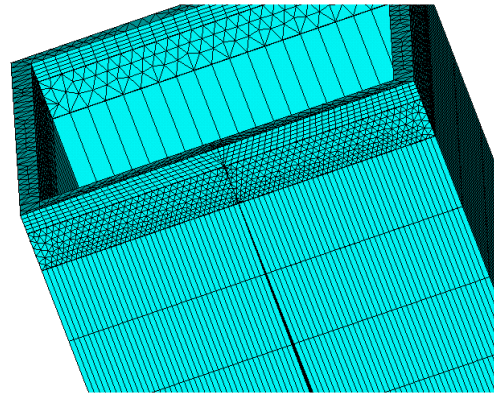


Figure 2.14 : Structure creuse avec AMF
(SOLID185 3D)

Tableau 2.6 : les périodes et les fréquences propres de la structure avec AMF des dix premiers modes

Mode	Fréquence propre (Hz)	Période (s)
Structure Pleine		
1	0,8998	1,1114
2	0,8999	1,1114
3	3,3484	0,2987
4	4,7824	0,2091
5	4,7827	0,2091
6	5,6156	0,1781
7	10,1897	0,0981
8	11,4586	0,0873
9	11,4595	0,0873
10	16,981	0,0589

Structure Creuse		
1	1,078	0,9276
2	1,0784	0,9273
3	2,2355	0,4473
4	3,1745	0,3150
5	3,6633	0,2729
6	3,9594	0,2526
7	4,0734	0,2455
8	4,0979	0,2440
9	4,2858	0,2333
10	4,8757	0,2051

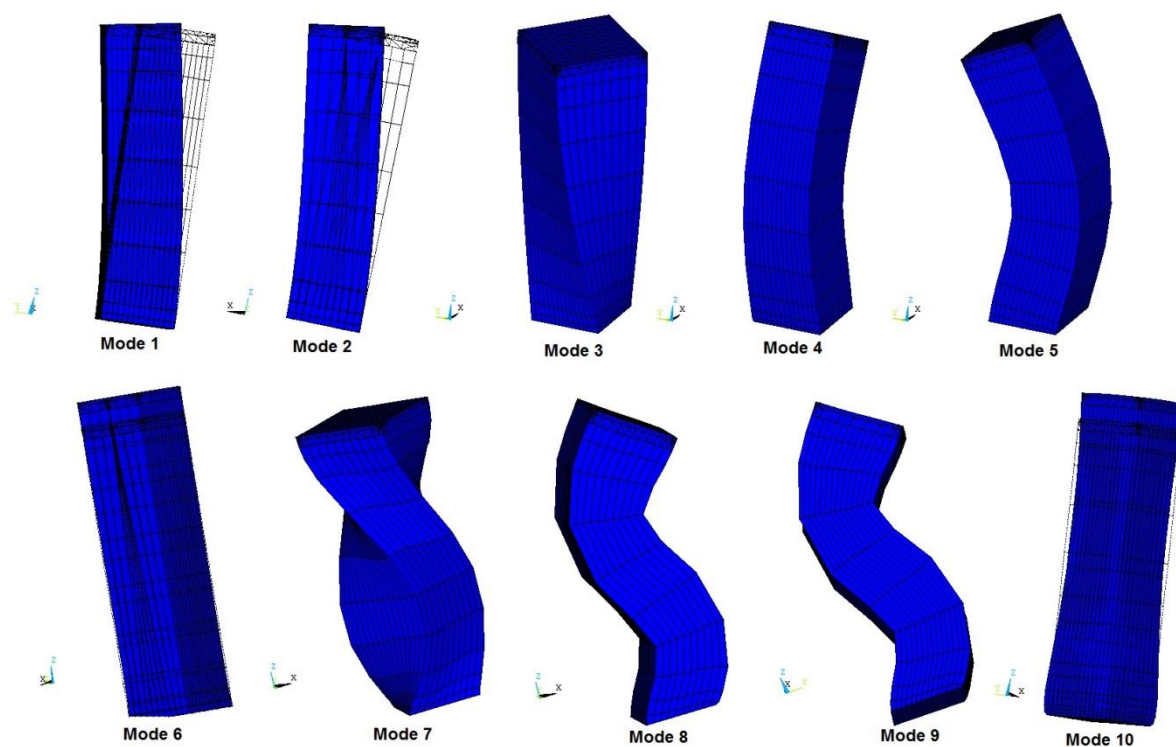


Figure 2.15 : Les dix premiers modes de la structure pleine avec AMF (SOLID185)

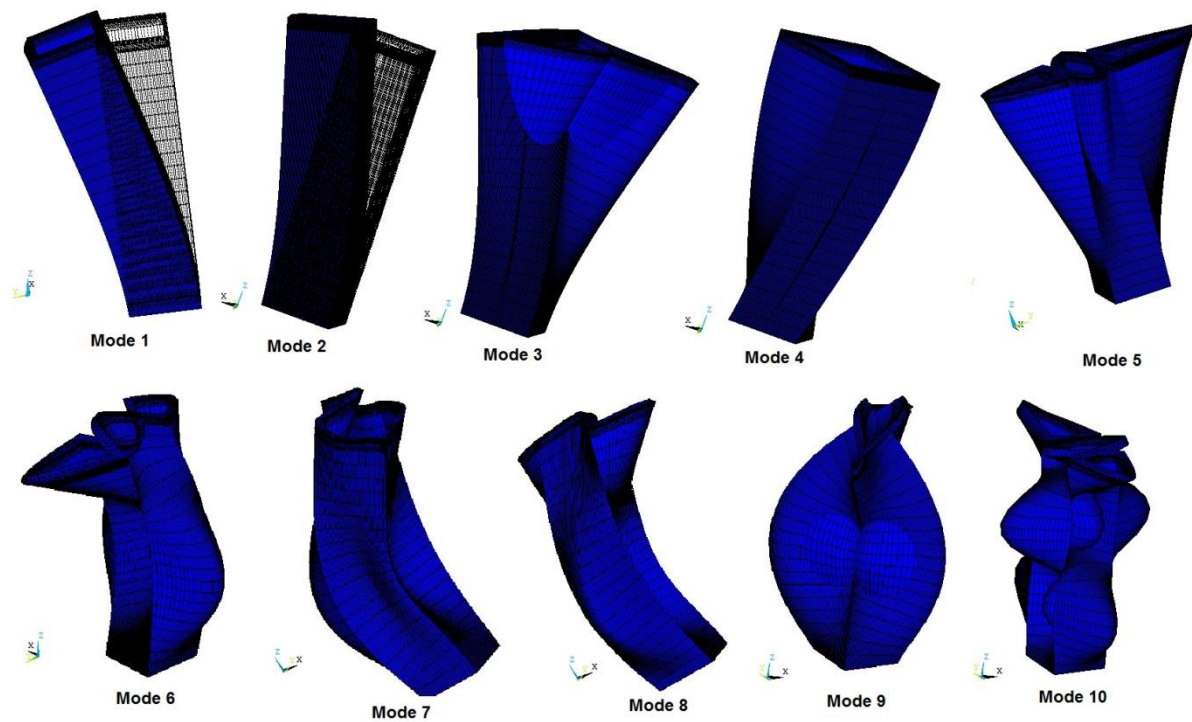


Figure 2.16 : Les dix premiers modes de la structure creuse avec AMF (SOLID185)

2.6. Analyse dynamique transitoire

Dans cette partie, nous avons fait une analyse transitoire sous le signal de Boumerdès2003 (voir la figure 2.17), pour voir le meilleur assemblage de fil d'AMF (PIPE288 ou SOLID185) sur une structure pleine et l'autre creuse.

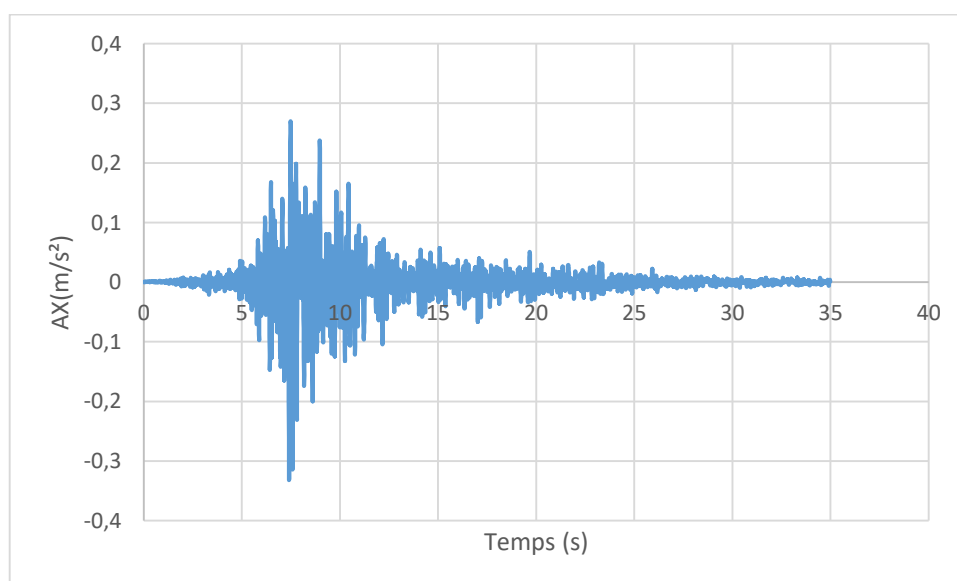


Figure 2.17 : L'enregistrement du séisme de Boumerdès 2003.

2.6.1. Analyse transitoire sans et avec AMF type d'élément « PIPE288 »

2.6.1.1. Structure pleine

La figure suivante présente la variation du déplacement au niveau du sommet de la structure pleine sans et en introduisant l'élément PIPE 288. Les résultats montrent que les deux courbes sont identiques. Le fait d'introduire l'alliage n'a pas amélioré les déplacements.

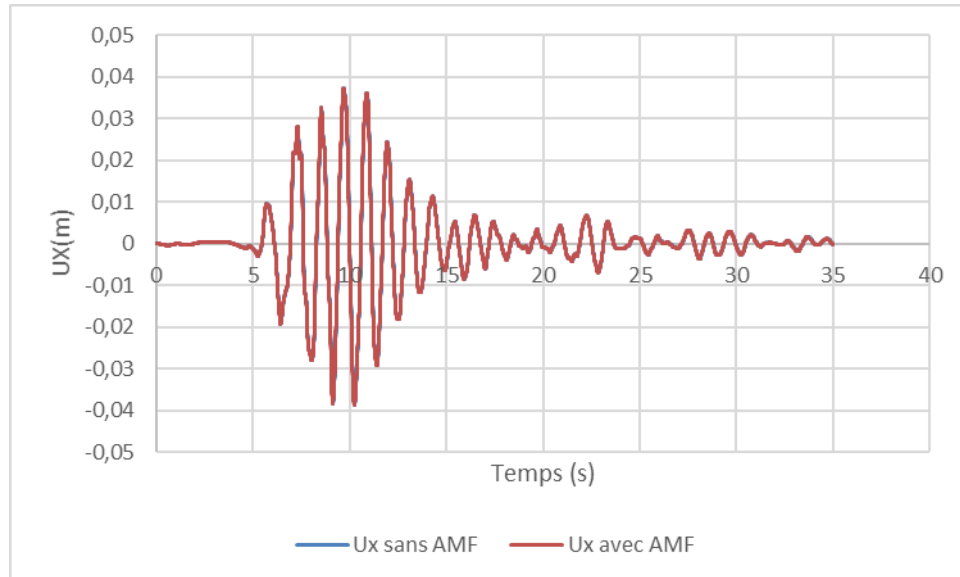


Figure 2.18 : Déplacement de la structure pleine sans et avec AMF (PIPE288)

La figure 2.21 présente la variation de l'accélération en fonction du temps. Les résultats sont également identiques. La même remarque a été constatée pour les vitesses et contraintes en niveau de la base de la structure.

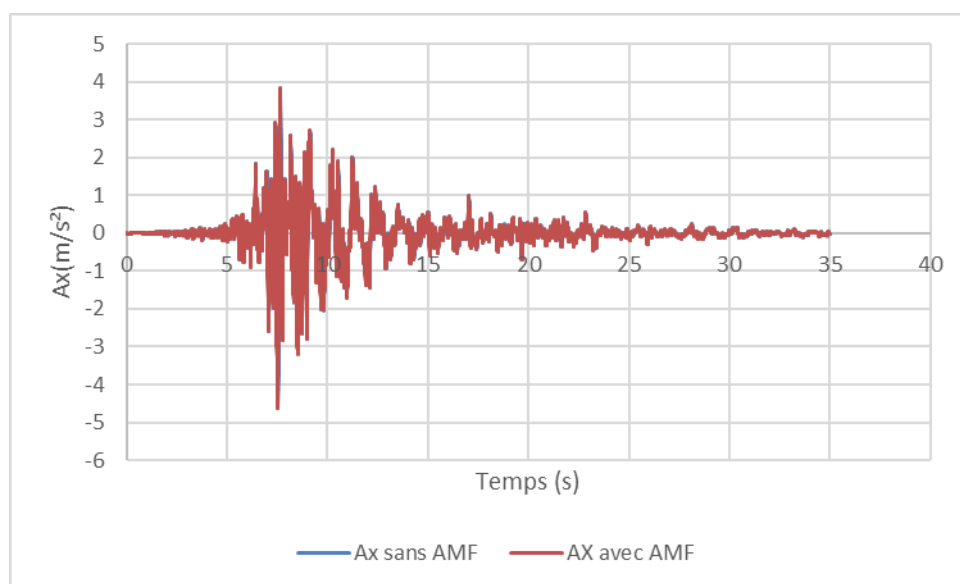


Figure 2.19 : L'accélération de la structure pleine sans et avec AMF (PIPE288)

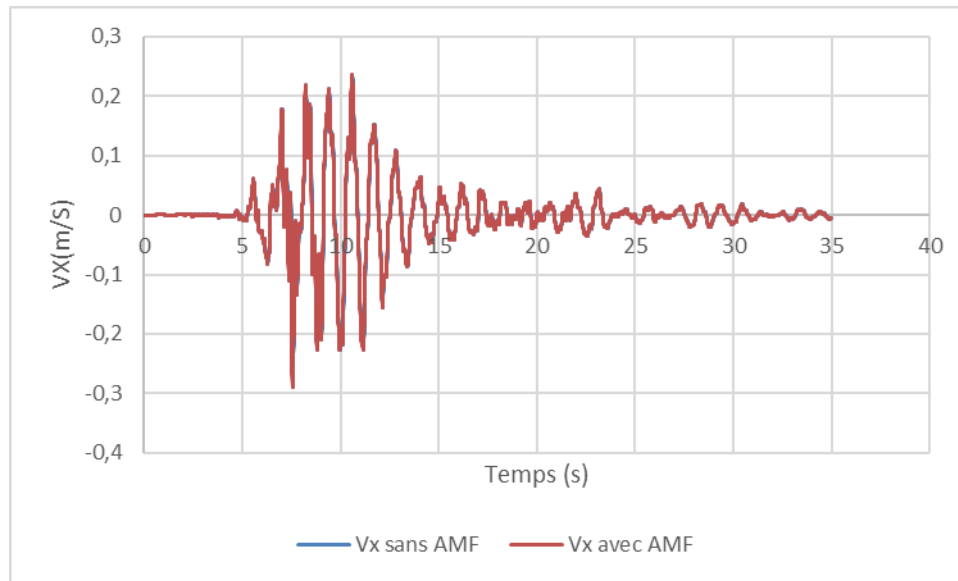


Figure 2.20 : La vitesse de la structure pleine sans et avec AMF (PIPE288)

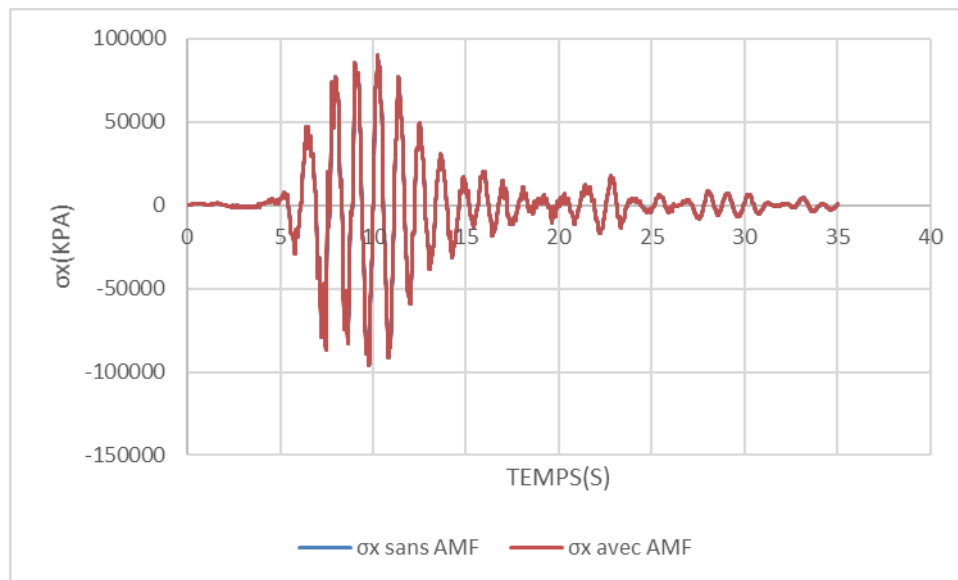


Figure 2.21 : La contrainte de la structure pleine sans et avec AMF (PIPE288)

Les figures 2.18, 2.19, 2.20, et 2.21 représentent respectivement le déplacement U_x , l'accélération A_x , la vitesse V_x et la contrainte σ_x de la structure pleine sans et avec AMF modélisé en PIPE288.

Après la comparaison, nous avons remarqué qu'il n'y a pas une différence en termes de U_x , A_x , V_x et σ_x pour la structure pleine sans et avec AMF.

Nous avons remarqué aussi dans la figure 2.18 que le déplacements U_x atteint son maximum entre 7s et 12s, et entre 6s et 9s pour l'accélération (voir la figure 2.19), et dans les figures 2.20 et 2.21 la vitesse et la contrainte successivement le maximum est entre 10s et 12s.

2.6.1.2. Structure creuse

Les figures suivantes présentent la variation des entités (déplacements, vitesses, accélérations et les contraintes) dans le cas d'une structure creuse.

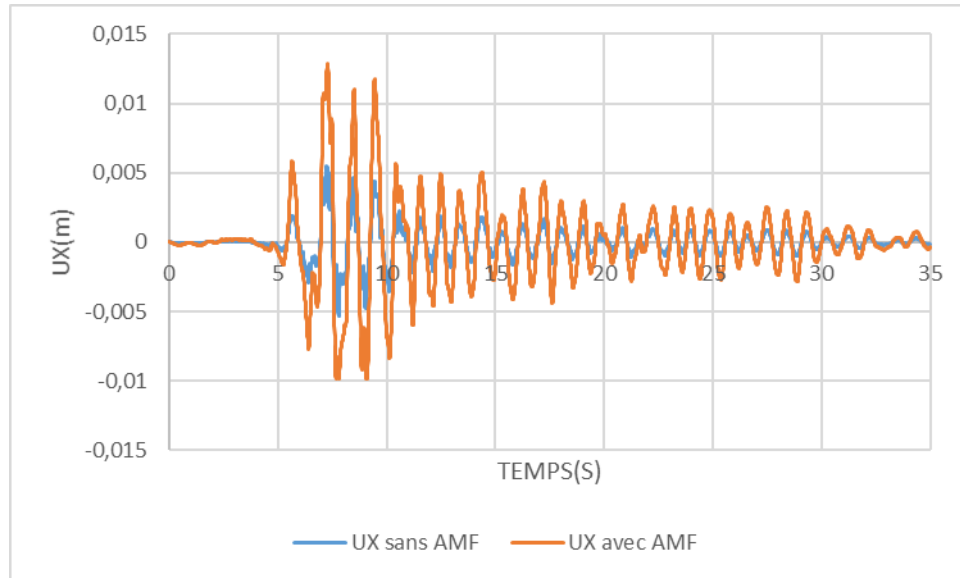


Figure 2.22 : Déplacement de la structure creuse sans et avec AMF (PIPE288)

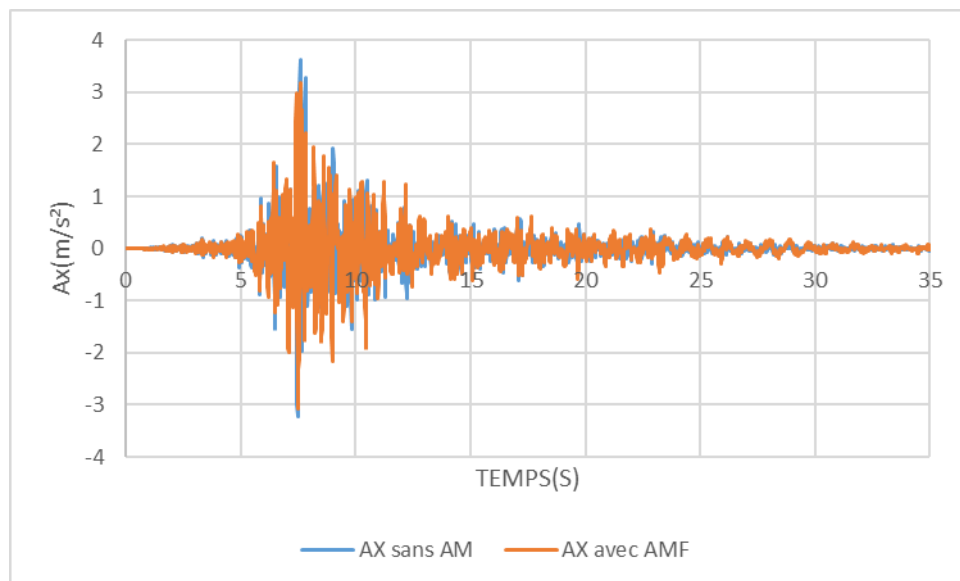


Figure 2.23 : L'accélération de la structure creuse sans et avec AMF (PIPE288)

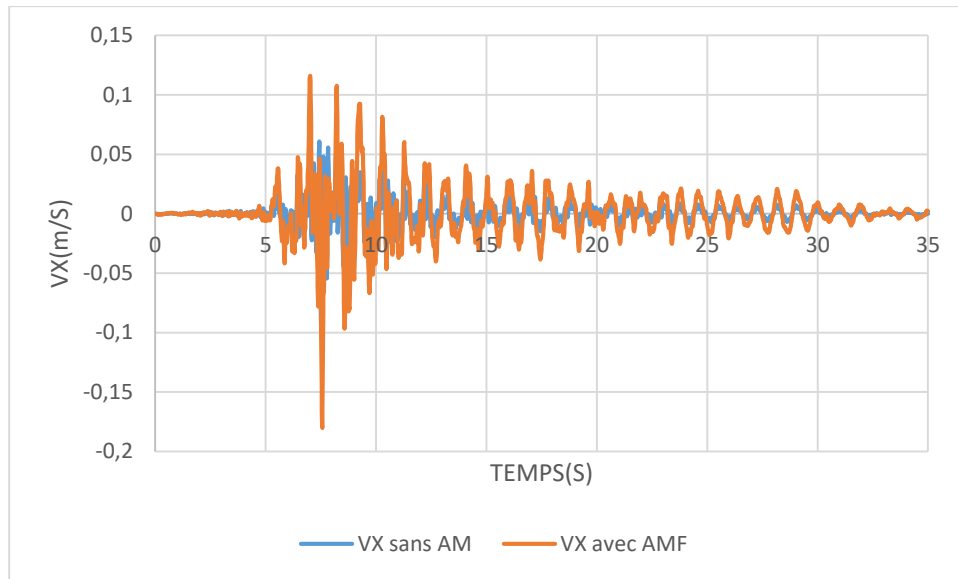


Figure 2.24 : la vitesse de la structure creuse sans et avec AMF (PIPE288)

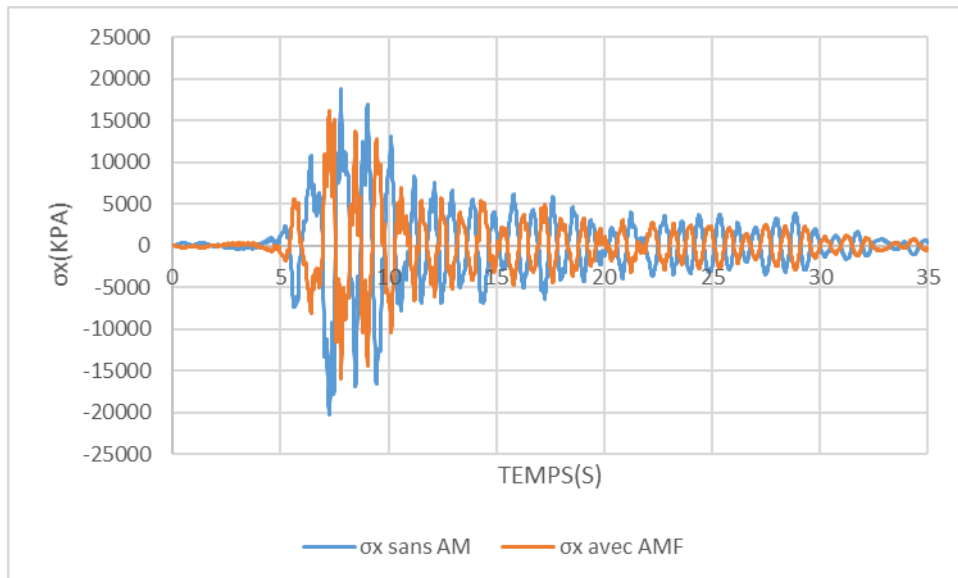


Figure 2.25 : La contrainte de la structure creuse sans et avec AMF (PIPE288)

Les figures 2.22, 2.23, 2.24, et 2.25 représentent respectivement le déplacement U_x , l'accélération A_x , la vitesse V_x et la contrainte σ_x de la structure creuse sans et avec AMF type d'élément PIPE288.

Après la comparaison, nous avons remarqué une augmentation en termes de déplacements dans le cas de la structure avec AMF vis-à-vis du cas sans AMF, et qu'il n'y a pas une grande différence en termes de A_x , V_x et σ_x pour la structure creuse sans et avec AMF.

Nous avons remarqué aussi dans la figure 2.22, la figure 2.23 et la figure 2.24 que le déplacement, l'accélération et la vitesse successivement atteignent leurs maximums entre 6s et

8s, et entre 5s et 9s pour la contrainte (voir la figure 2.25). Le tableau suivant résume les résultats de comparaison de deux structures :

Tableau 2.7 : les valeurs maximum sans et avec AMF pour la structure pleine et creuse

Structure	Grandeurs	Sans AMF	Avec AMF
Pleine	Ux max (cm)	3,71	3,72
	Ax max (m/s ²)	3,83	3,8314
	Vx max (m/s)	0,236	0,2364
	σ_x max (Pa)	89800	89800,7
Creuse	Ux max (cm)	0,55	1,28
	Ax max (m/s ²)	3,6168	3.1895
	Vx max (m/s)	0,0607	0,1159
	σ_x max (Pa)	18829	16172,4

2.6.2. Analyse transitoire avec AMF type d'élément « SOLID185 »

1.6.2.1. Structure pleine

Cette partie concerne l'effet de modélisation de l'AMF d'une part par des éléments PIPE288 et d'autres part par des éléments solide « solid185 ».

Les figures 2.26, 2.27, 2.28, et 2.29 représentent respectivement le déplacement Ux, l'accélération Ax, la vitesse Vx et la contrainte σ_x de la structure pleine.

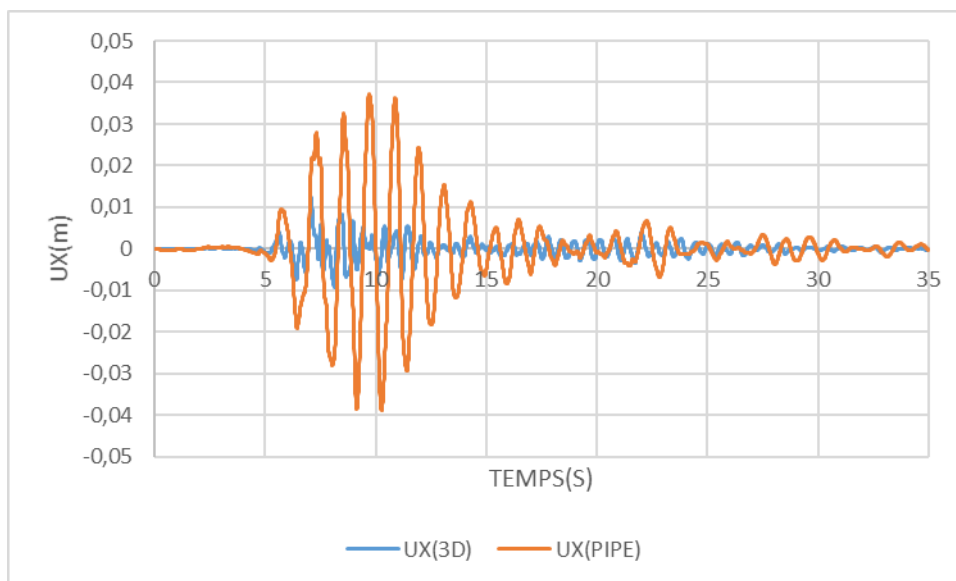


Figure 2.26 : Déplacement de la structure pleine avec AMF (PIPE288/SOLID185)

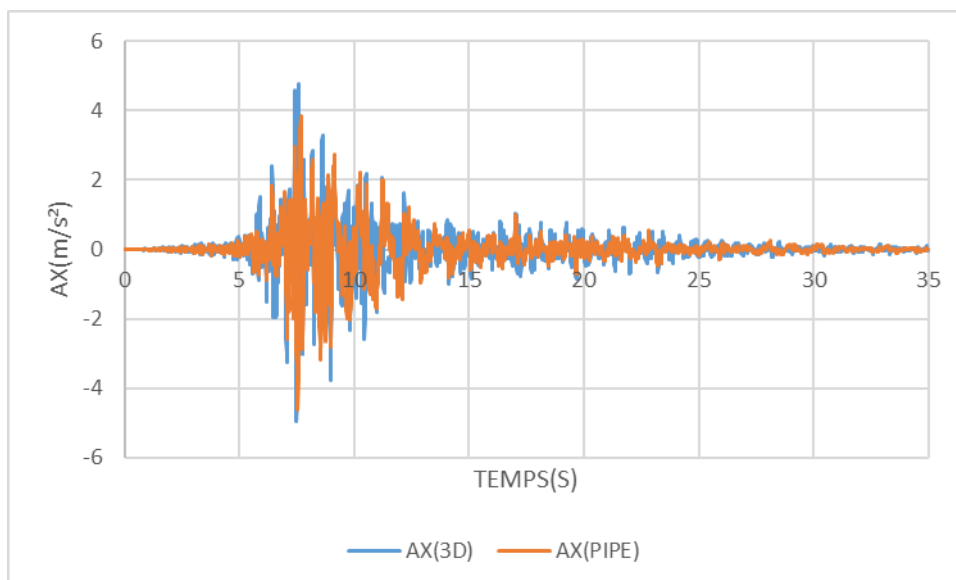


Figure 2.27 : L'accélération de la structure pleine avec AMF (PIPE288/SOLID185)

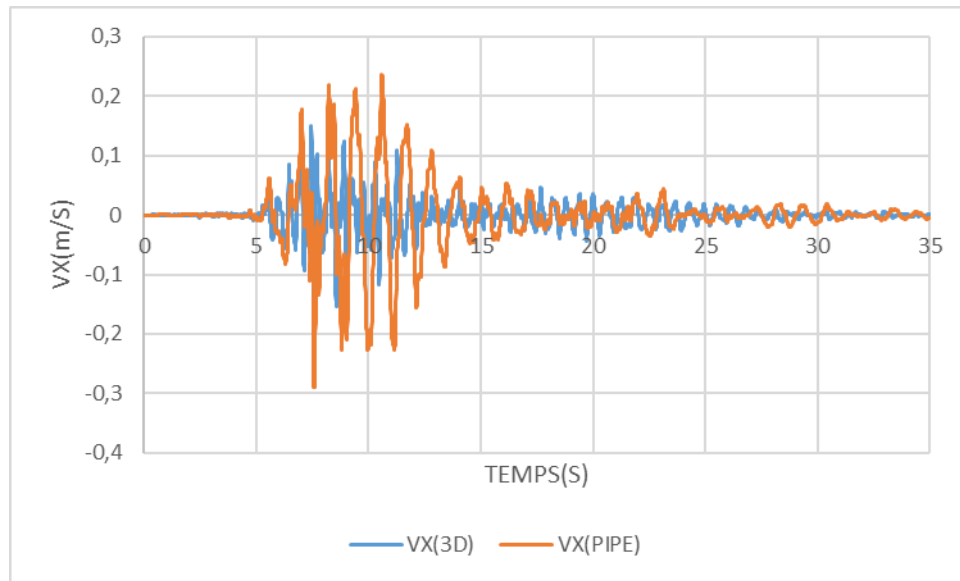


Figure 2.28 : La vitesse de la structure pleine avec AMF (PIPE288/SOLID185)

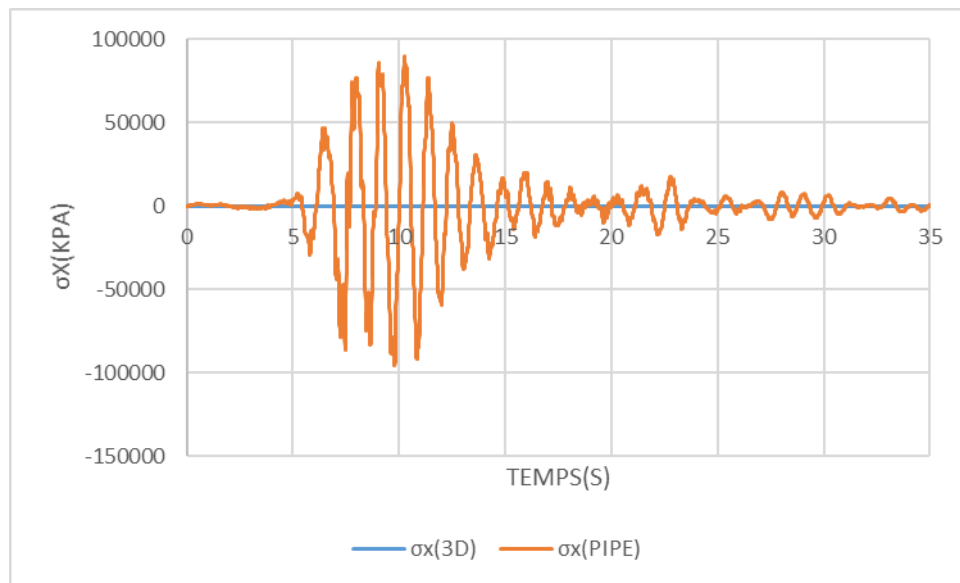


Figure 2.29 : La contrainte de la structure pleine avec AMF (PIPE288/SOLID185)

Après la comparaison de la structure pleine, nous avons remarqué une grande augmentation en termes de déplacements et de vitesses dans le cas de l'utilisation de l'AMF en PIPE288 par rapport au cas avec AMF SOLID185. En revanche, aucune différence n'a été retrouvée en termes de l'accélération « Ax ». Concernant les contraintes, elles sont beaucoup plus importantes dans le cas de l'utilisation de l'AMF en PIPE288 alors que l'utilisation de l'AMF SOLID185 ne présente pas de très grandes valeurs.

Nous avons remarqué aussi dans la figure 2.26 que le déplacement atteint son maximum entre 8s et 11s pour le cas de l'AMF PIPE288 et entre 6s et 8s pour le cas de l'AMF SOLID185. La figure 2.28 présente le maximum entre 6s et 8s pour les deux cas, et pour la contrainte le maximum est vers les 10s pour le cas avec AMF PIPE288 et 0.005s pour le 2ème cas (voir la figure 2.29), tandis que la vitesse (voir la figure 2.28) atteint son maximum entre 10s et 12s pour le cas avec AMF PIPE288 et entre 6s et 9s pour le cas avec AMF SOLID185 .

2.6.2.2. Structure creuse

Les figures suivantes présentent les variations des déplacements, vitesses, accélérations et contraintes pour le cas de la structure creuse. Nous avons introduit les éléments PIPE288 et nous les avons comparés avec le cas des éléments SOLID185.

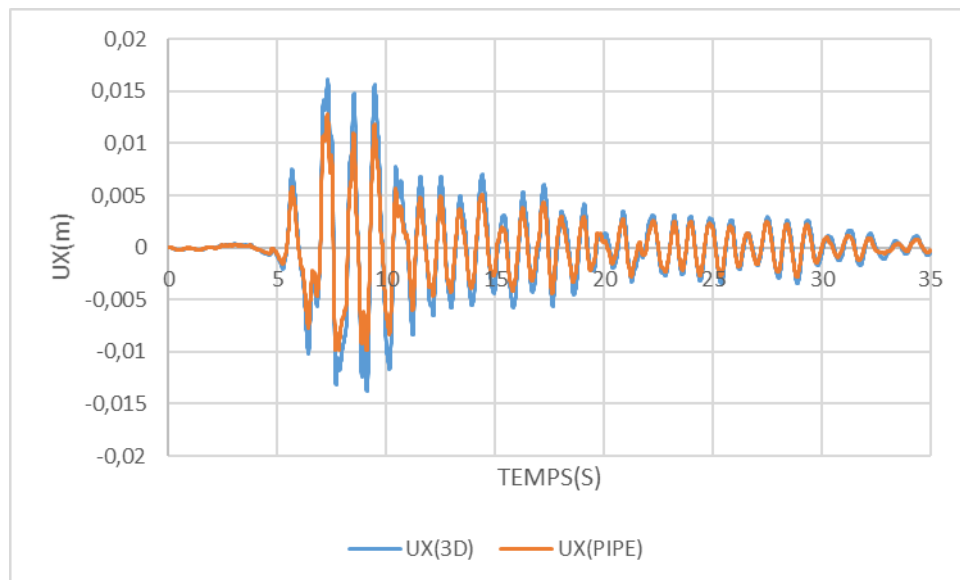


Figure 2.30 : Déplacement de la structure creuse avec AMF (PIPE288/SOLID185)

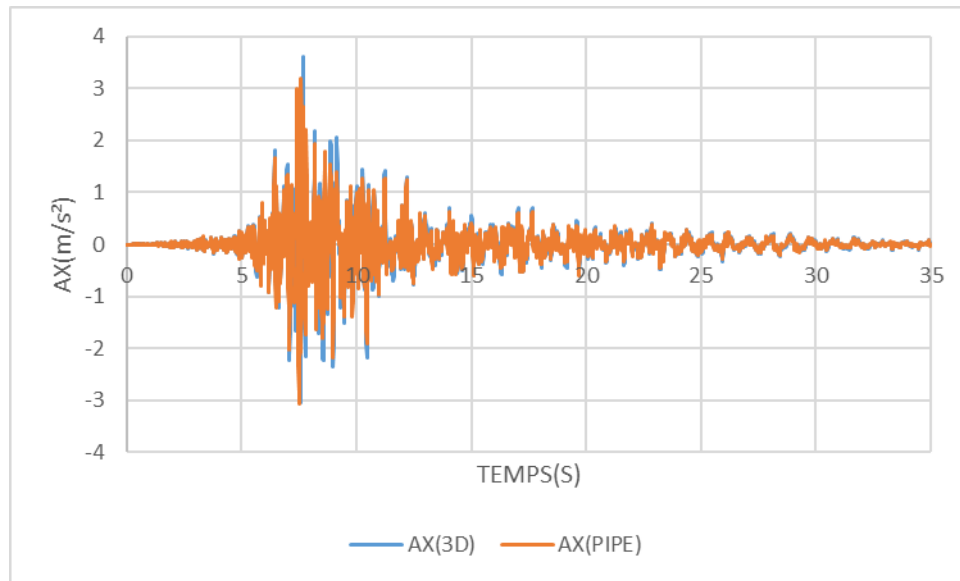


Figure 2.31 : L'accélération de la structure creuse avec AMF (PIPE288/SOLID185)

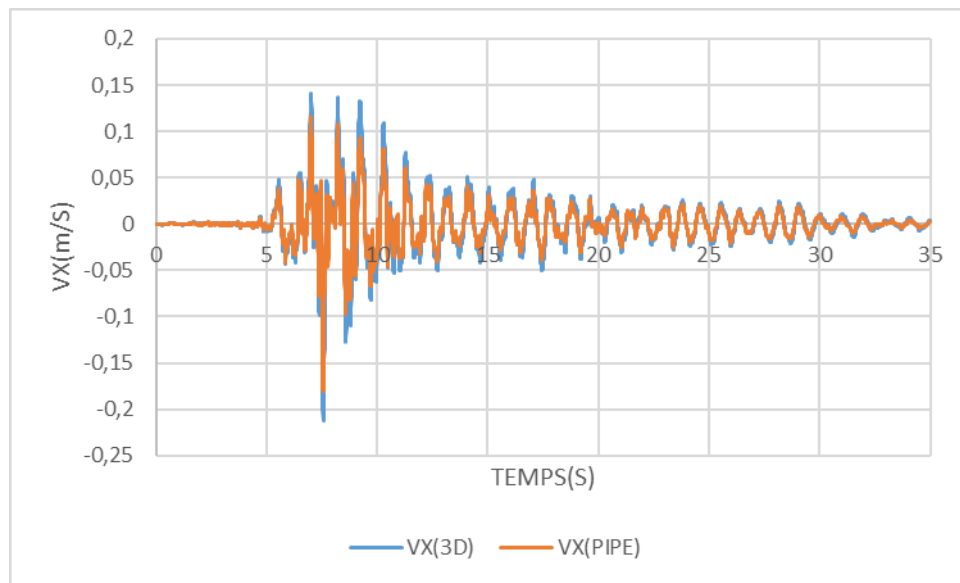


Figure 2.32 : La vitesse de la structure creuse avec AMF (PIPE288/SOLID185)

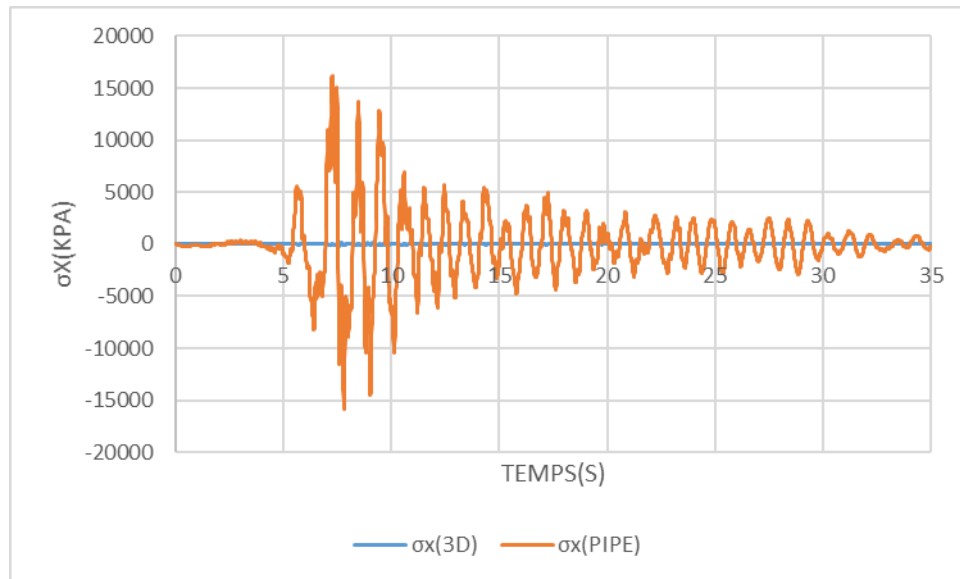


Figure 2.33 : La contrainte de la structure creuse avec AMF (PIPE288/SOLID185)

Les figures 2.32, 2.33, 2.34, et 2.35 représentent respectivement le déplacement U_x , l'accélération A_x , la vitesse V_x et la contrainte σ_x de la structure creuse avec AMF PIPE288 /SOLID 185.

Nous remarquons qu'une différence est observée au niveau de la variation des déplacements, vitesses et accélérations. Les maximums sont obtenus entre 7s et 9s, pour les déplacements et ils sont entre 6s et 8s pour les vitesses et accélérations (voir les figures 2.32, 2.33 et 2.34). Concernant les contraintes, la même remarque a été constatée que pour le cas d'une structure pleine, à savoir les valeurs sont beaucoup plus importantes si on utilise les éléments PIPE alors que pour le cas des alliages modélisés avec des éléments SOLID185 les valeurs sont minimales. Les valeurs maximales sont observées entre 6s et 8s. Le tableau suivant résume les résultats de comparaison des deux structures :

Tableau 2.8 : les valeurs maximum avec AMF (PIPE288/SOLID185) pour la structure pleine et creuse

Structure	Grandeurs	Avec AMF PIPE288	Avec AMF SOLID185
Pleine	U_x max (cm)	3,72	1,22
	A_x max (m/s^2)	3,8314	4,7495
	V_x max (m/s)	0,2364	0,1647
	σ_x max (Pa)	89800,7	122,706

Creuse	U _x max (cm)	1,28	1,61
	A _x max (m/s ²)	3,1895	3,6048
	V _x max (m/s)	0,1159	0,1404
	σ _x max (Pa)	16172,4	194,89

2.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la comparaison entre l'utilisation des AMF modélisés en 3D, en utilisant des éléments solides « Solid185 » et des éléments unidimensionnels de type PIPE « PIPE288 ». Les résultats ont montré d'une part, que l'utilisation des éléments PIPE pour les structures pleines présentent les mêmes résultats que pour le cas sans AMF. C'est-à-dire le fait de rajouter l'AMF n'a pas modifié le comportement de la structure, et ceci quel que soit l'entité comparée (U_x, V_x, A_x ou σ_x). En revanche, pour les structures creuses, la comparaison montre que l'utilisation des éléments PIPE modifie légèrement les résultats.

D'autre part, l'affrontement des résultats SOLID aux éléments PIPE montre que les valeurs en termes de vitesses et d'accélération sont semblables pour les deux types de structures (pleine et creuse). Pour les déplacements, ils sont majorés dans le cas de la structure pleine alors qu'ils sont presque les mêmes dans le cas de la structure creuse. En revanche, les résultats des contraintes relevés en bas des deux structures ne sont pas significatifs.

Nous pouvons conclure alors que, les AMF peuvent être modélisés par les éléments PIPE offerts par le logiciel de calcul Ansys ; mais cette utilisation est représentative pour les déplacements, vitesses et accélérations alors qu'elle n'est pas pour le cas des contraintes.

Dans le chapitre suivant, nous allons considérer un cas réel d'étude. Il s'agit du minaret de Dolmabahçe en Turquie, qui a été étudié par (Houmat & Seghir, 2019). Ces derniers, ont utilisé des éléments 3D « SOLID185 », alors que pour notre cas nous allons étudier le minaret en utilisant des éléments PIPE « PIPE288 ».

Chapitre 03 :

Application des AMF sur le minaret de Dolmabahçe

Contenu

- 3.1. Introduction
- 3.2. Historique
- 3.3. Architecture de la mosquée Dolmabahçe
- 3.4. Les principales hypothèses
- 3.5. Caractéristiques géométriques du minaret
- 3.6. Caractéristiques mécaniques du minaret et d'AMF
- 3.7. Analyse modale
- 3.8. Analyse transitoire
- 3.9. Conclusion

3.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons choisi d'étudier le comportement d'une structure réelle en utilisant les AMF modélisés en PIPE, en se basant sur les résultats trouvés dans le chapitre 02. Pour cela, nous avons choisi le minaret de la mosquée de Dolmabahçe en Turquie comme cas d'étude car nous nous disposons des résultats antérieurs le concernant en utilisant les AMF modélisés en tridimensionnel.

Nous avons choisi donc les éléments PIPE288 comme type d'éléments pour les AMF et nous avons fait une étude dynamique sous une excitation du signal enregistré du séisme de Düzce99, dans le but d'analyser les fréquences, les périodes et de présenter les résultats de calcul des déplacements, accélérations et les contraintes sans et avec un fil d'AMF.

3.2. Historique

La mosquée Dolmabahçe, Bezmi Alem Valide Sultan Camii ou Dolmabahçe Camii en turc, est située dans le quartier de Besiktas (Istanbul). La Mosquée Dolmabahçe fut construite en 1855 par l'architecte Sarkis Baylan. Connue sous le nom turc de Bezmi Alem Valide Sultan Camii, la mosquée fut rapidement également nommée sous le titre de mosquée Dolmabahçe du fait de sa proximité géographique et temporelle avec le Palais Dolmabahçe. (Istanbul city, s.d.).

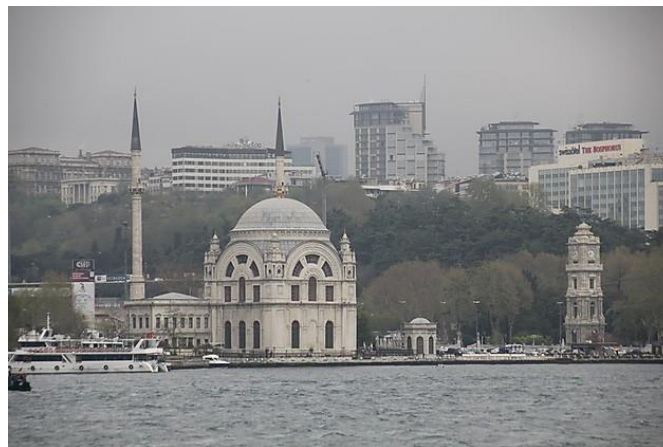


Figure 3.1 : Mosquée Dolmabahçe. (Istanbul city, s.d.)

3.3. Architecture de la Mosquée Dolmabahçe

La Mosquée Dolmabahçe 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. De style baroque, à l'intérieur de la mosquée Dolmabahçe, vous remarquerez que le mihrab et le minbar sont en porphyre rouge (roche magmatique). (Istanbul city, s.d.)



Figure 3.2 : Les deux minarets de la mosquée Dolmabahçe. (Houmat & Seghir, 2019)

3.4. Les principales hypothèses

Le minaret que nous avons modélisé est tridimensionnel, la structure est modélisée avec des éléments tridimensionnel de type Solide, répertorié dans le logiciel Ansys « Solid185 ». Par contre, l'AMF a été modélisé en utilisant les éléments PIPE « PIPE288 ». Le matériau est supposé être linéaire, élastique et isotrope. Les caractéristiques du calcaire appelé également pierre de Kufeki ont été utilisées. Le modèle du minaret supposé être encasté à la base. Nous avons négligé la partie conique du minaret en bois ainsi que les escaliers intérieurs.

3.5. Caractéristiques géométriques du minaret

Dans cette étude le minaret ouest de la mosquée Dolmabahçe a été considéré comme cas d'étude avec les dimensions suivantes :

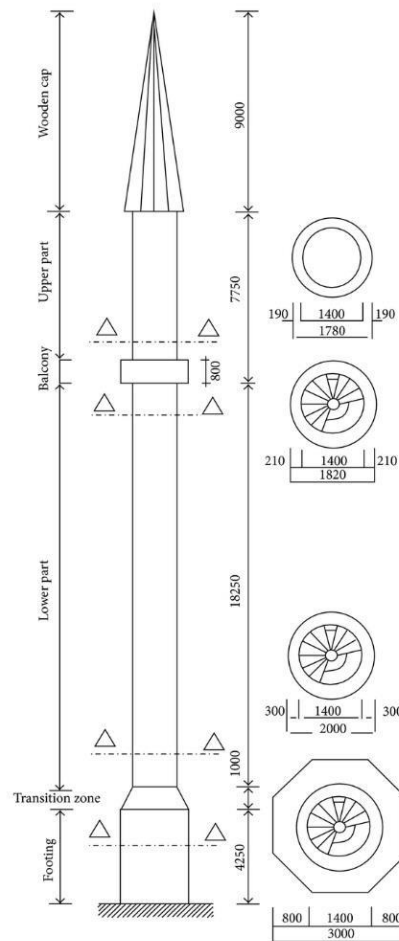


Figure 3.3 : Géométrie et dimensions du minaret.

3.6. Les caractéristiques mécaniques du minaret et de l'AMF

3.6.1. Les caractéristiques mécaniques du minaret

Les caractéristiques mécaniques du minaret sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : caractéristiques mécaniques du minaret

Module d'élasticité (MPa)	8856
Masse volumique (kg/m ³)	2300
Coefficient de Poisson	0,24

3.6.2. Caractéristiques mécaniques des AMF

Les caractéristiques mécaniques de l'AMF sont présentées dans les tableaux 3.2 et 3.3.

Tableau 3.2 : caractéristiques mécaniques de l'AMF

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

Tableau 3.3 : Les paramètres de l'AMF

σ_{Ms}	σ_{Mf}	σ_{As}	σ_{Af}	ε_{trmax}	α
140	270	200	70	0,03	0,27

3.7. Analyse modale

Dans cette partie nous avons fait une analyse modale du minaret dans le but d'obtenir les fréquences et périodes propres. Nous avons fait une comparaison entre le cas sans AMF et en introduisant un élément PIPE288.

3.7.1. Analyse modale sans AMF

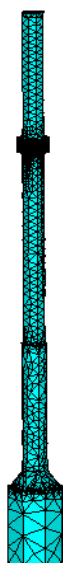


Figure 3.4 : Modèle du minaret sans AMF.

Les résultats de l'analyse modale sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.4 : les fréquences et périodes des dix premiers modes du minaret.

Modes	Fréquences (Hz)	Périodes (s)
1	0,7237	1,3818
2	0,7322	1,3657
3	3,8436	0,2602
4	3,9030	0,2562
5	9,8626	0,1014
6	9,8978	0,1010
7	14,637	0,0683
8	18,484	0,0541
9	18,632	0,0537
10	19,965	0,0501

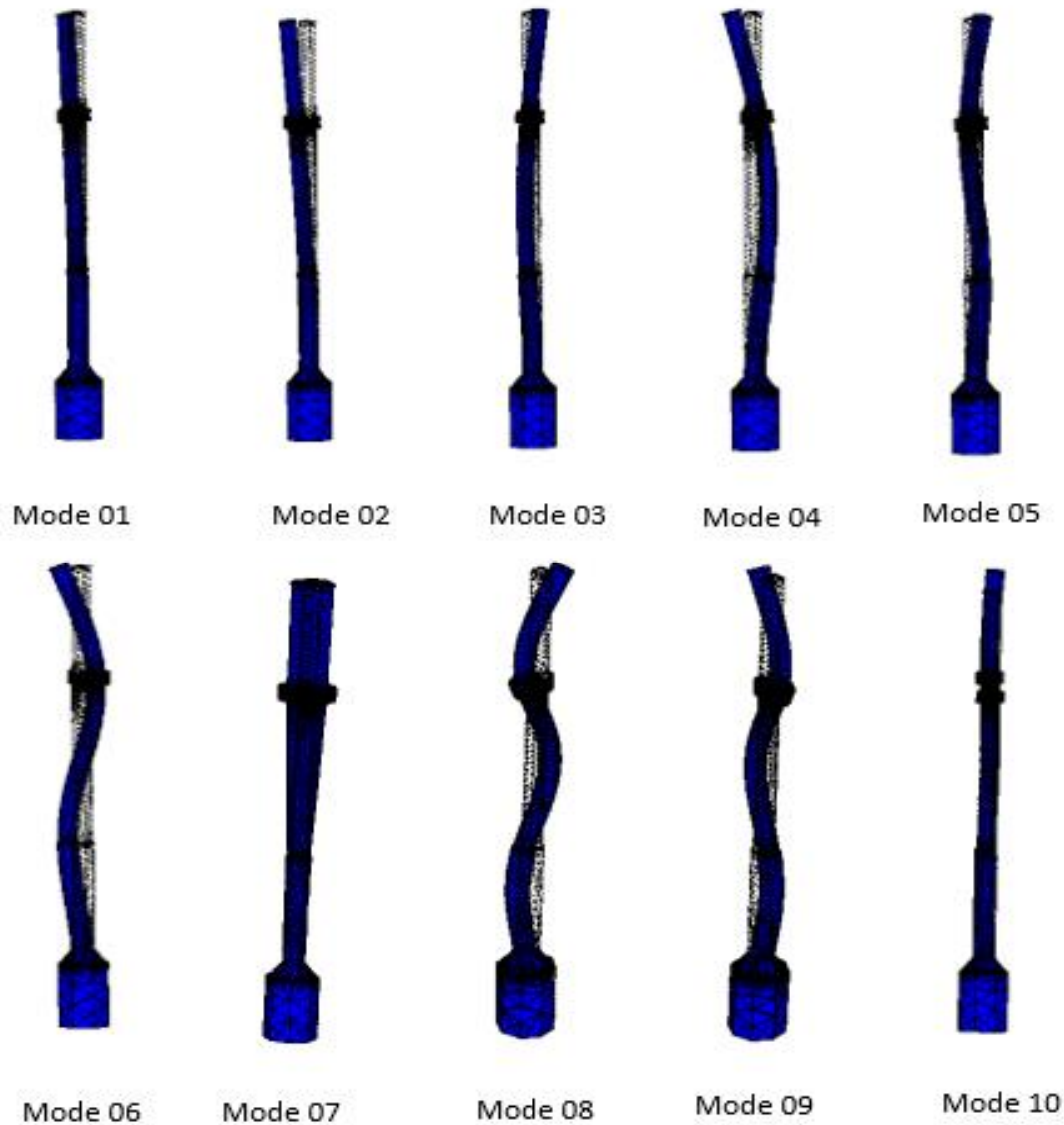


Figure 3.5 : Les dix premiers modes du minaret sans AMF.

3.7.2. Analyse modale avec AMF

Le fil d'AMF a été positionné comme c'est montré en figure 3.6. Il est situé à une hauteur de 3,5 mètres à partir du sommet du minaret. La longueur de ce fil est de 1 mètre.

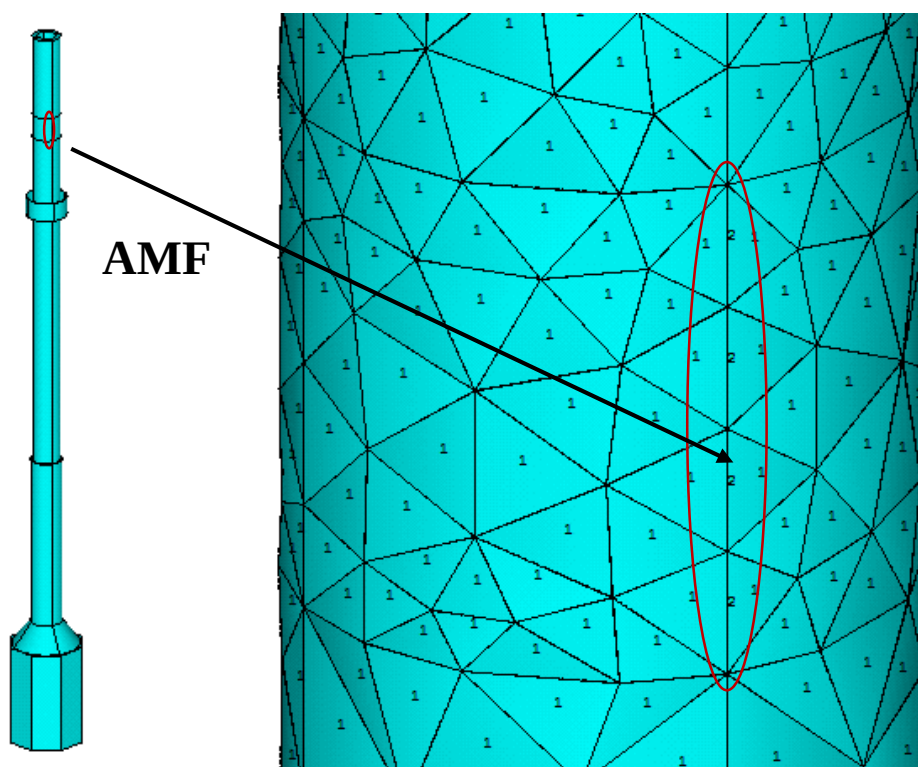


Figure 3.6 : Modèle du minaret avec AMF

Les résultats de l'analyse modale sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.5 : les fréquences et périodes des dix premiers modes du minaret.

Modes	Fréquences (Hz)	Périodes (s)
1	4,6973	0,2223
2	4,8836	0,2048
3	9,5526	0,1047
4	12,224	0,0818
5	12,299	0,0813
6	18,471	0,0541
7	19,591	0,0510
8	24,315	0,0411
9	25,637	0,039
10	33,371	0,0299

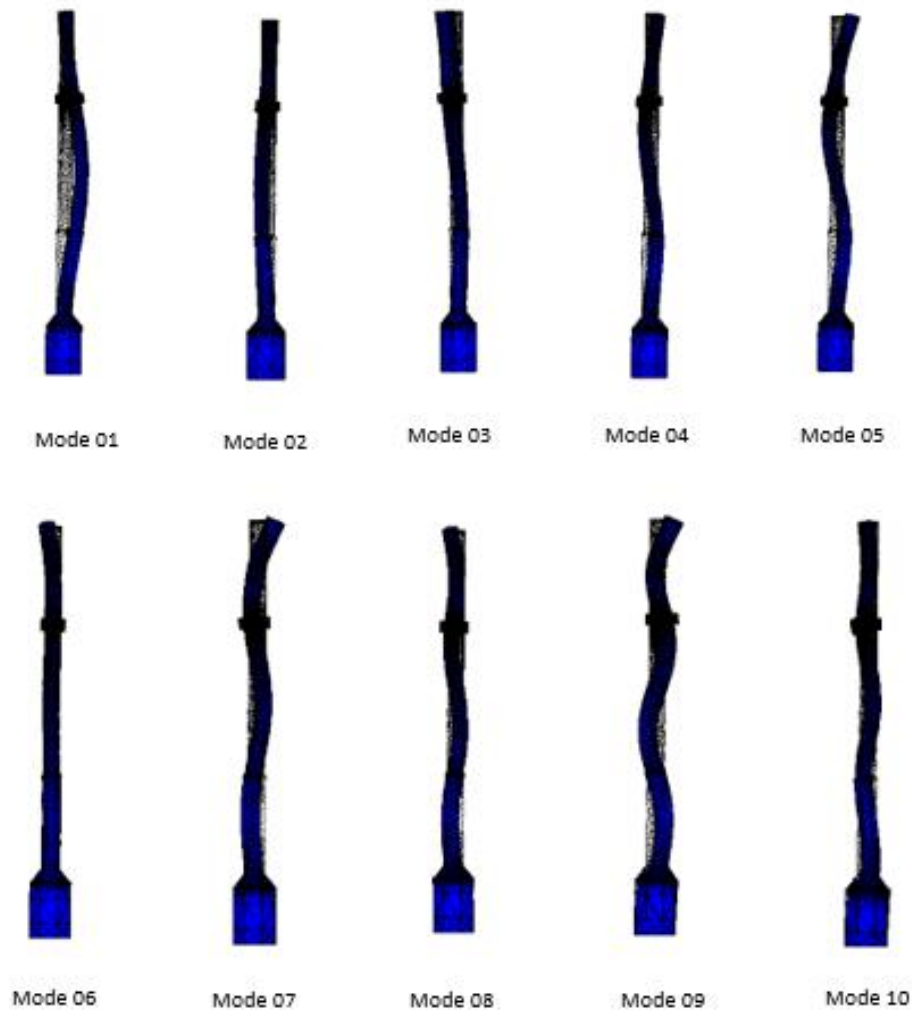


Figure 3.7 : Les dix premiers modes du minaret avec AMF.

3.8. Analyse transitoire

Dans cette partie, nous avons fait une analyse transitoire du minaret de Dolmabahçe sous le signal de Düzce 99 (voir la figure 3.8). Après, nous avons fait une comparaison entre l'élément PIPE288 et l'élément SOLID185 afin de voir si le fait d'utiliser des éléments unidimensionnels de type PIPE peut représenter le comportement de l'AMF.

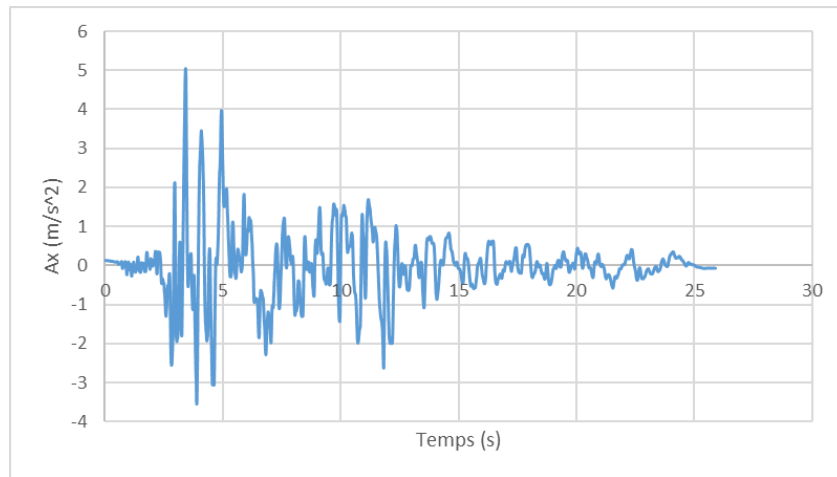


Figure 3.8 : L'enregistrement de séisme de Düzce 99

3.8.1. Points de mesure

Dans l'analyse, nous avons choisi 2 points critiques sur le minaret afin d'analyser les résultats (voir la figure 3.9) des déplacements, vitesses, accélérations et contraintes dans les deux cas (sans et avec AMF / PIPE288 et SOLID185).

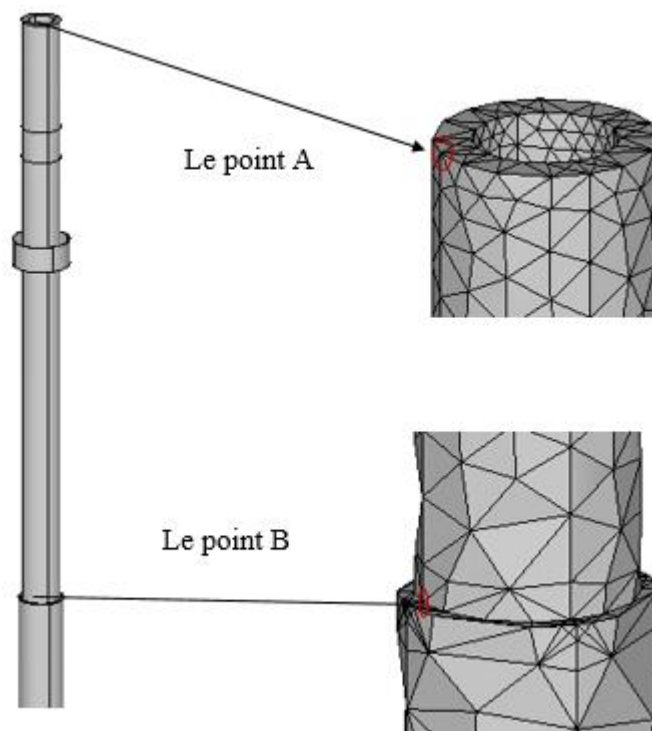


Figure 3.9 : Position de deux points critiques

3.8.2. Analyse transitoire du minaret sans et avec AMF type d'élément « PIPE288 »

Les figures 3.10, 3.11, 3.12 et 3.13 représentent respectivement le déplacement U_x , la vitesse V_x , l'accélération A_x et la contrainte σ_x du minaret sans et avec AMF modélisé en PIPE288 en fonction du temps au point A qui est situé au sommet du minaret.

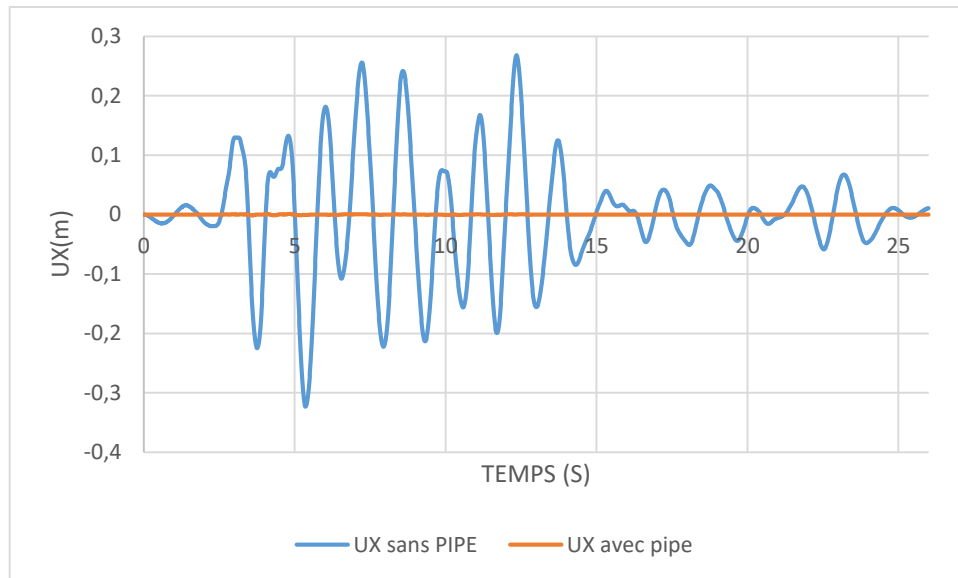


Figure 3.10 : Déplacement du minaret de Dolmabahçe au point A.

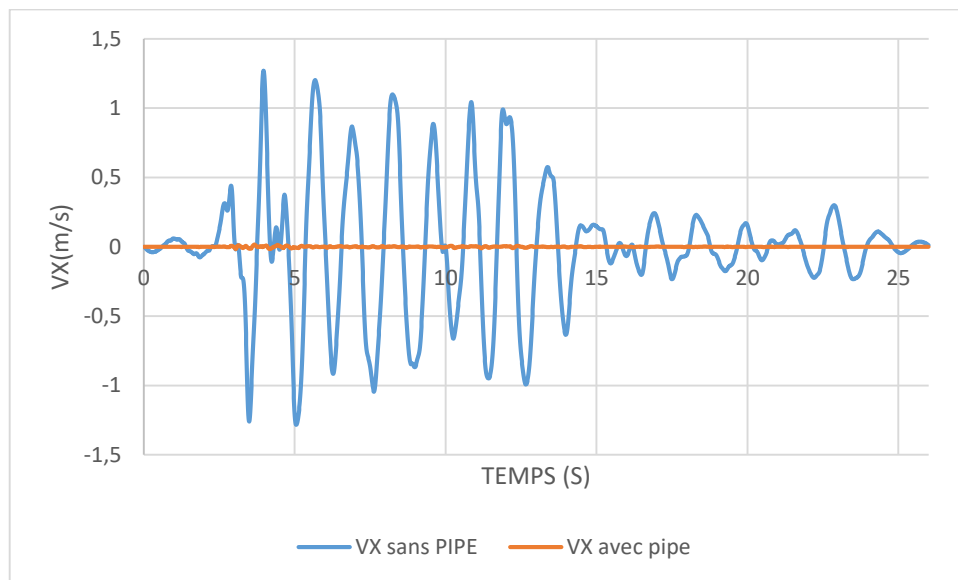


Figure 3.11 : La vitesse du minaret de Dolmabahçe au point A.

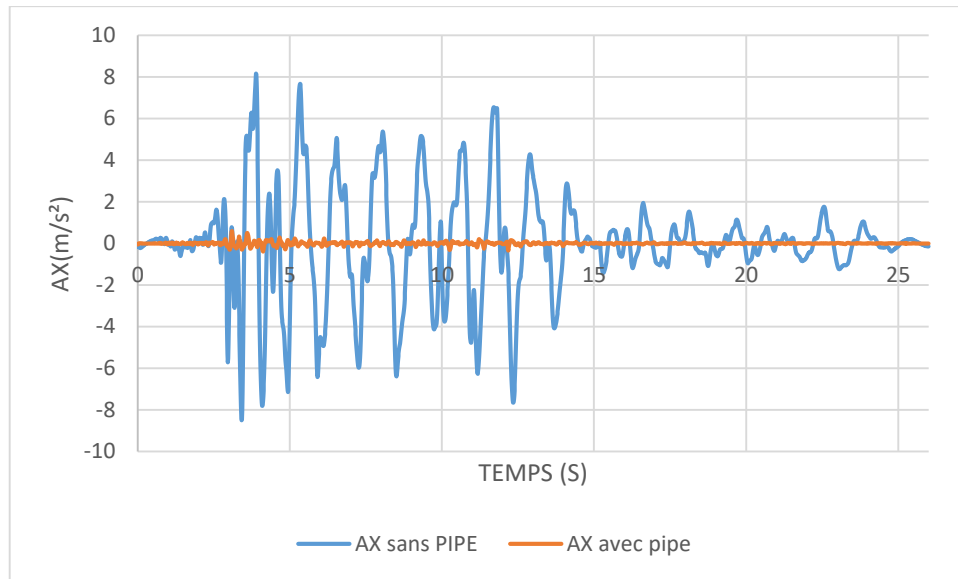


Figure 3.12 : L'accélération du minaret de Dolmabahçe en point A.

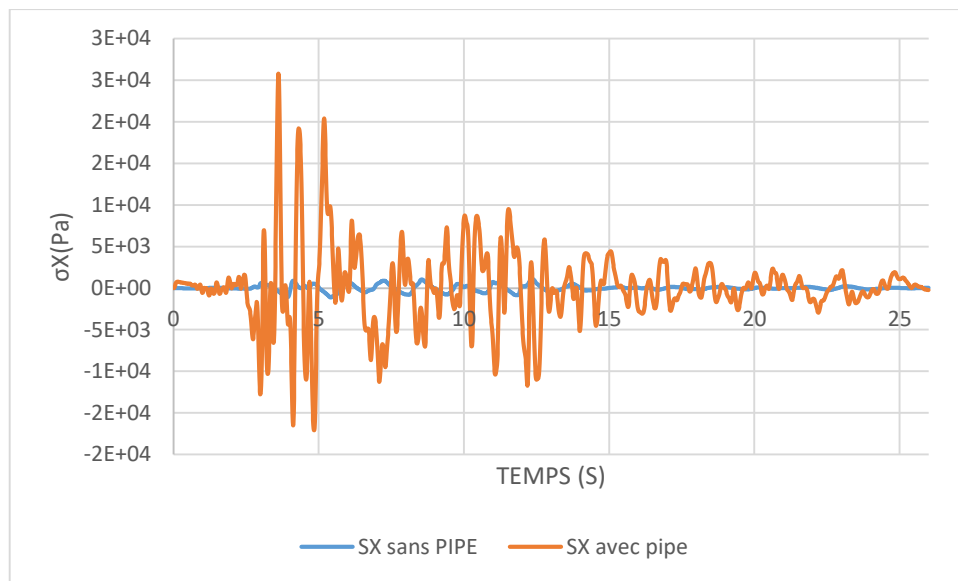


Figure 3.13 : La contrainte du minaret de Dolmabahçe au point A.

La comparaison entre les différents graphes montre que le fait de rajouter l'AMF diminue considérablement les déplacements, vitesses et accélérations ; en revanche, une augmentation en termes de contraintes a été observée.

Les figures 3.14, 3.15, 3.16 et 3.17 représentent respectivement le déplacement U_x , la vitesse V_x , l'accélération A_x et la contrainte σ_x du minaret sans et avec AMF modélisé en PIPE288 en fonction de temps au point B (figure 3.9).

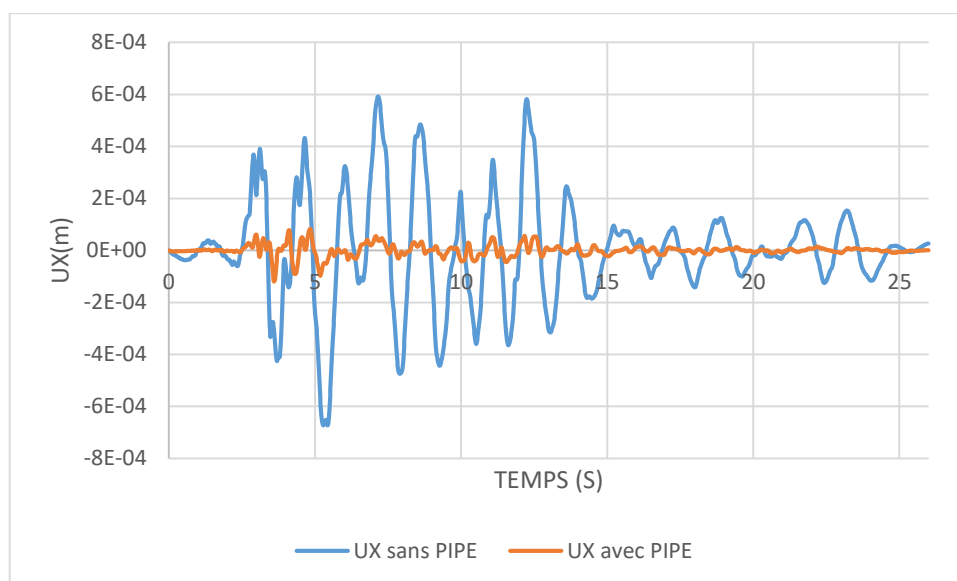


Figure 3.14 : Déplacement du minaret de Dolmabahçe au point B.

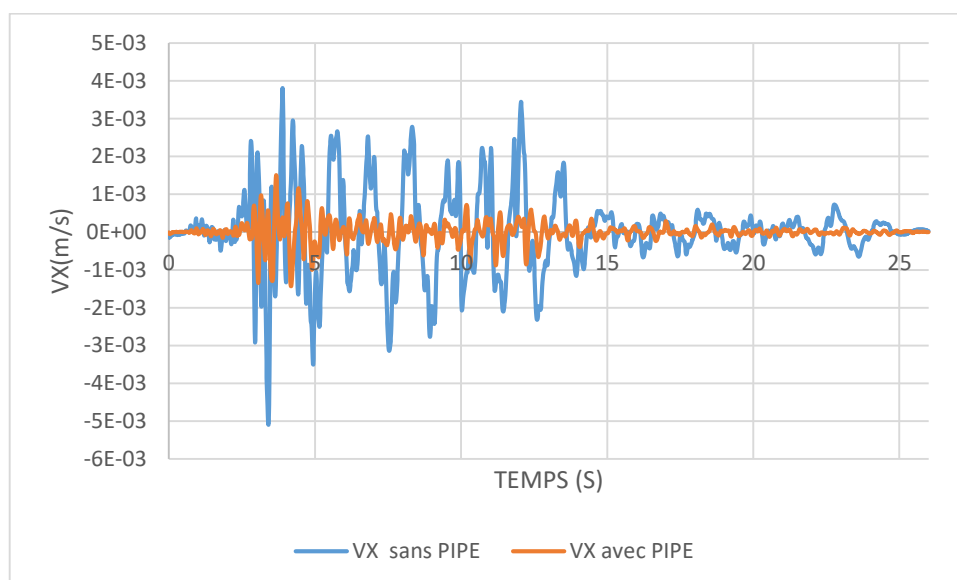


Figure 3.15 : La vitesse du minaret de Dolmabahçe en point B.

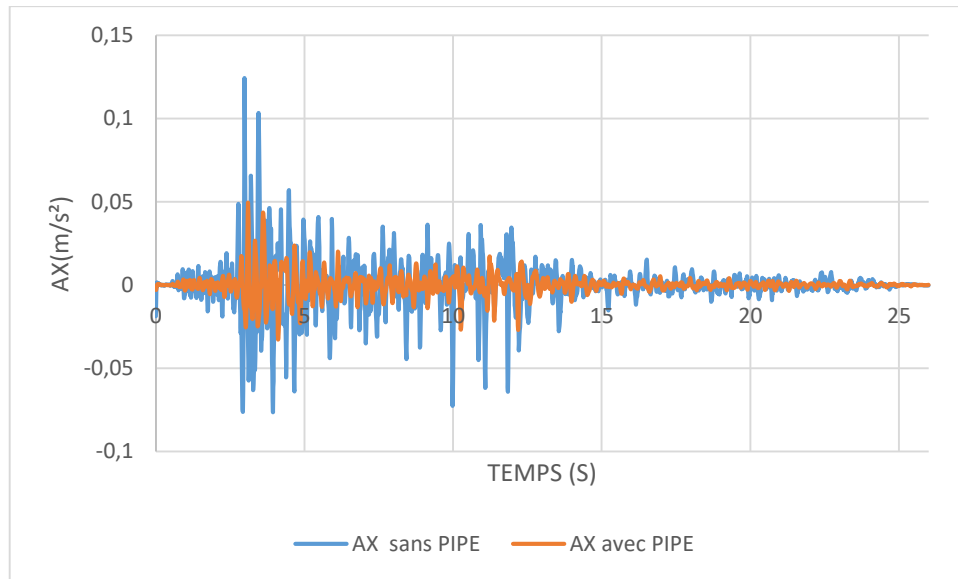


Figure 3.16 : L'accélération du minaret de Dolmabahçe en point B.

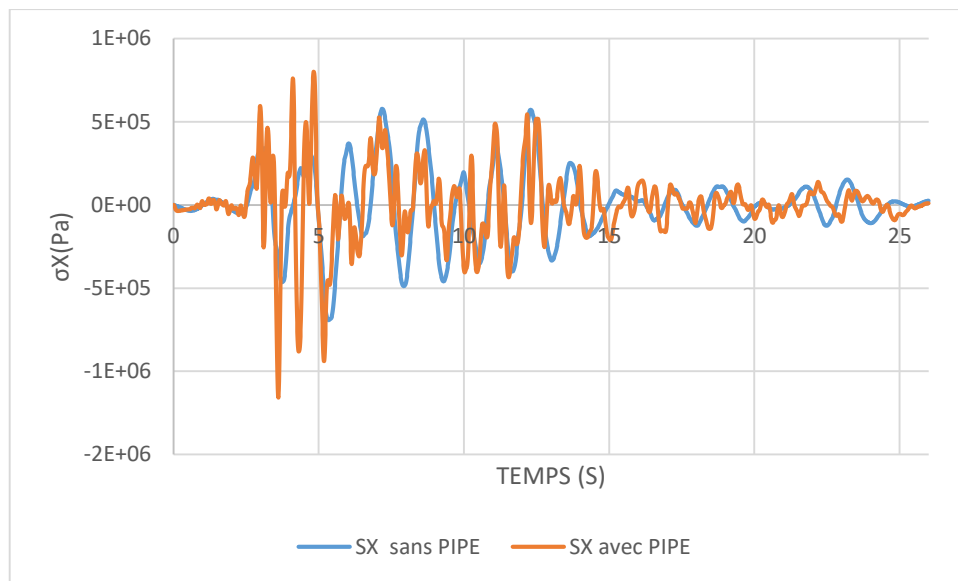


Figure 3.17 : La contrainte du minaret de Dolmabahçe au point B.

La comparaison entre les différentes courbes nous montre que le rajout de l'AMF a amélioré les déplacements, vitesses et accélérations. La comparaison des contraintes montre que les valeurs sont comparables. En effet, entre 5s et 26 s, les valeurs sont similaires quel que soit sans ou avec AMF. Par contre, moins de 5s nous avons remarqué que la contrainte est maximale dans le cas de l'AMF. Le tableau suivant résume les valeurs maximales des différentes entités aux points A et B.

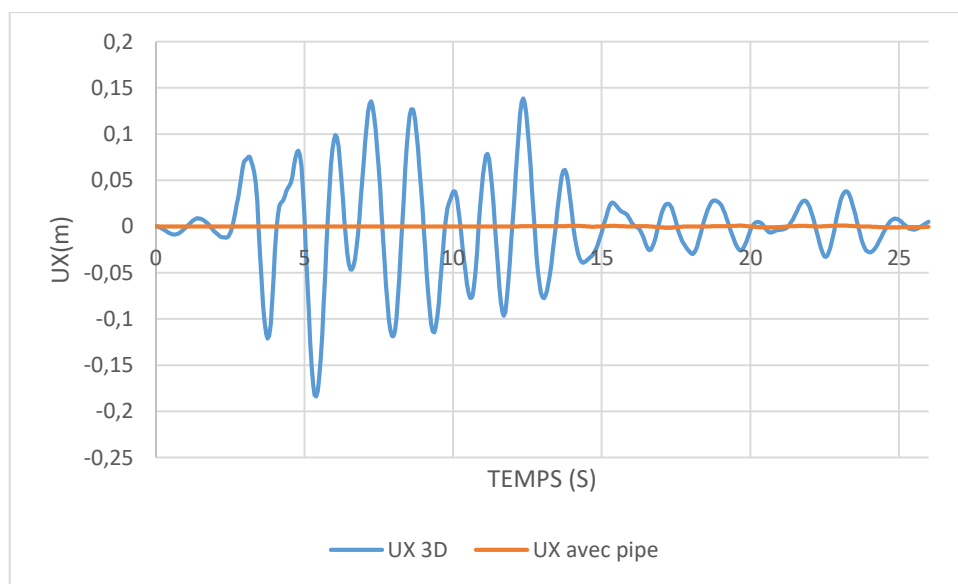
Tableau 3.6 : Récapitulation des résultats trouvés aux points de mesure A et B

Grandeurs	Sans AMF	Avec AMF (PIPE288)
Point A		
U_x (cm)	26,8	0,096
V_x (m/s)	1,2696	0,0166
A_x (m/s ²)	8,1754	0,6001
σ_x (Pa)	1123,42	25766,1
Point B		
U_x (cm)	0,059	0,0083
V_x (m/s)	0,0038	0,0015
A_x (m/s ²)	0,1245	0,0495
σ_x (Pa)	578002	800583

3.8.3. Comparaison avec le cas de l'utilisation des éléments SOLID185

Nous avons affronté nos résultats précisés précédemment avec ceux trouvés par (Houmat & Seghir, 2019). Dans cette référence des éléments solides 3D ont été utilisés « SOLID185 ».

Les figures 3.18, 3.19, 3.20 et 3.21 représentent respectivement le déplacement U_x , la vitesse V_x , l'accélération A_x et la contrainte σ_x du minaret avec AMF (PIPE288/SOLID185) en fonction du temps au point A.

**Figure 3.18** : Déplacement du minaret de Dolmabahçe au point A (PIPE288/SOLID185).

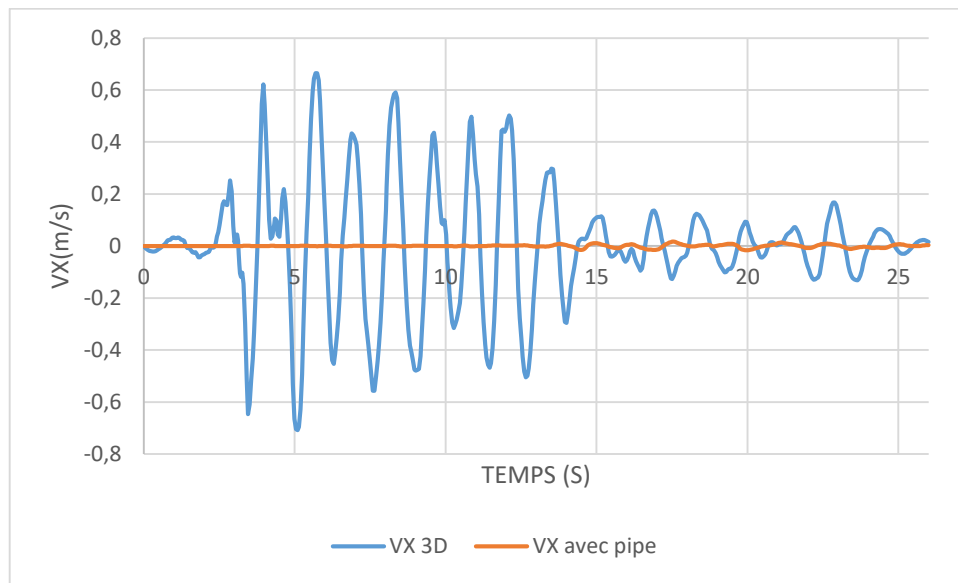


Figure 3.19 : La vitesse du minaret de Dolmabahçe au point A (PIPE288/SOLID185).

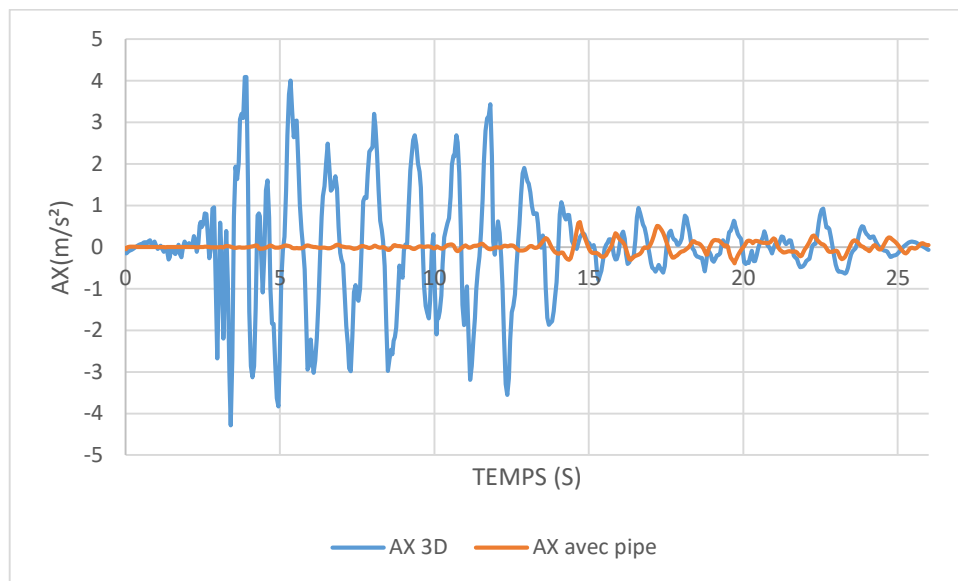


Figure 3.20 : L'accélération du minaret de Dolmabahçe au point A (PIPE288/SOLID185).

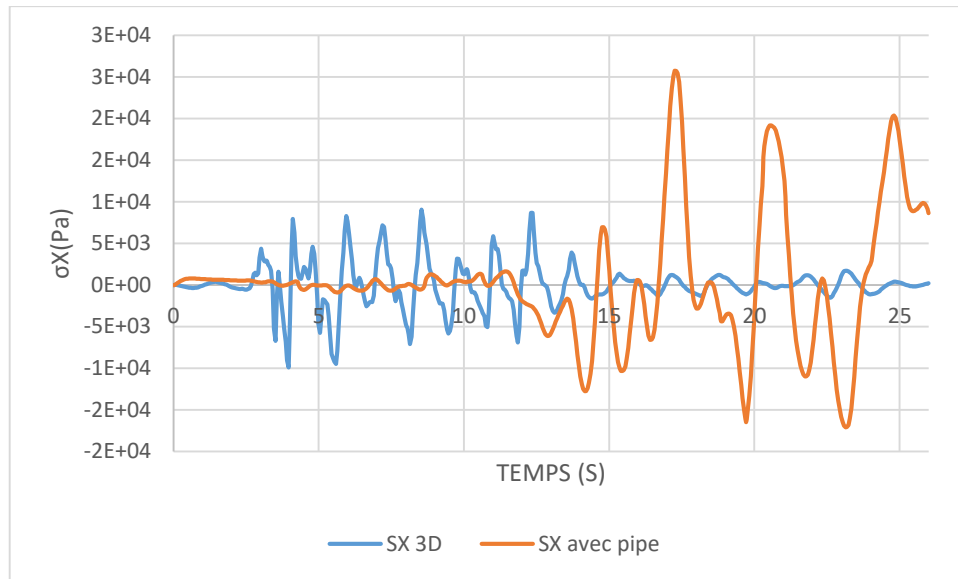


Figure 3.21 : La contrainte du minaret de Dolmabahçe en point A (PIPE288/SOLID185).

Nous remarquons une très grande différence en termes de U_x , V_x et A_x dans le cas avec PIPE vis-à-vis du cas de l'utilisation des éléments SOLID185. Concernant la contrainte, les valeurs sont minimisées en utilisant les éléments PIPE pendant les 12 premières secondes. En revanche la situation s'inverse au-delà de 12s. Les contraintes deviennent maximales pour le cas des PIPE.

Les figures 3.22, 3.23, 3.24 et 3.25 représentent respectivement U_x , A_x , V_x et σ_x au point B.

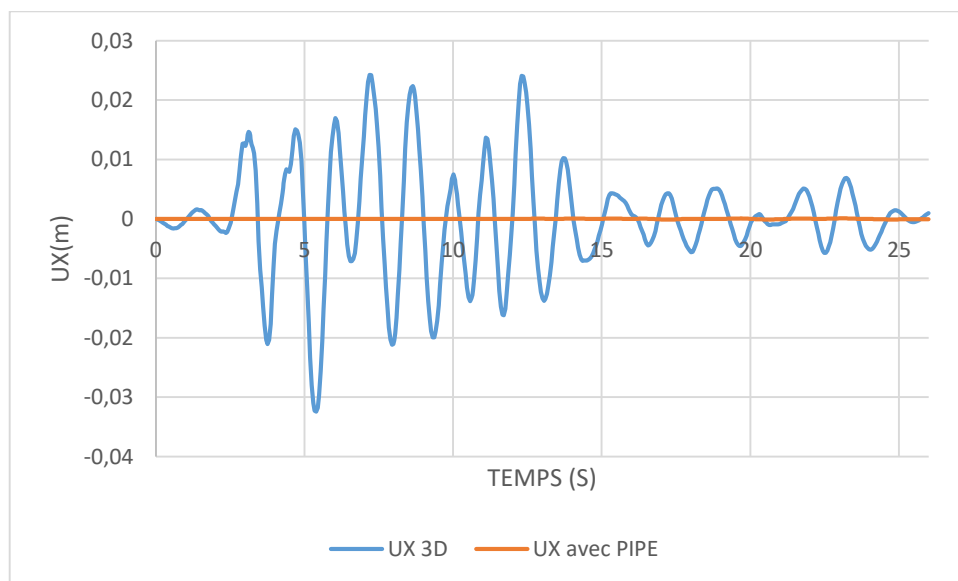


Figure 3.22 : Déplacement du minaret de Dolmabahçe au point B (PIPE288/SOLID185).

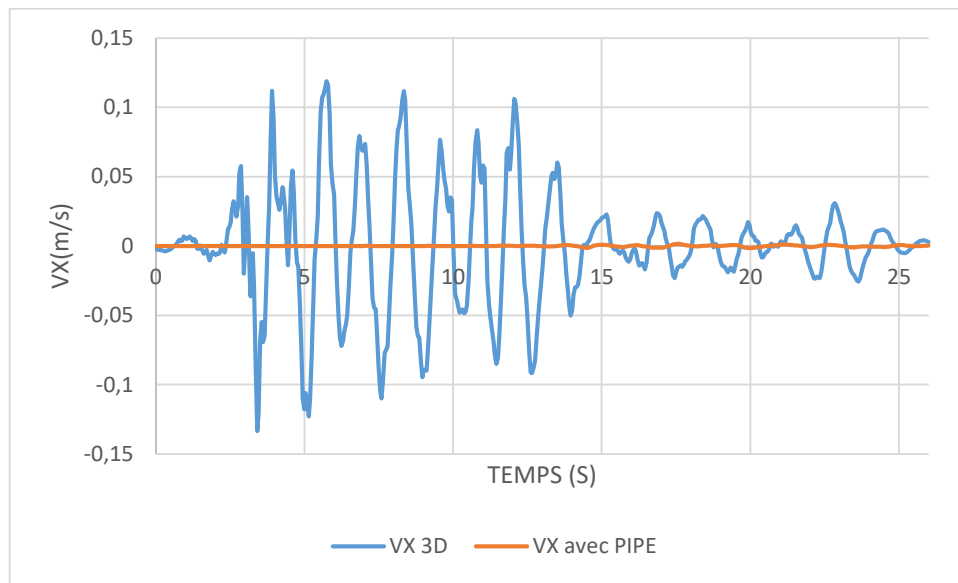


Figure 3.23 : La vitesse du minaret de Dolmabahçe au point B(PIPE288/SOLID185).

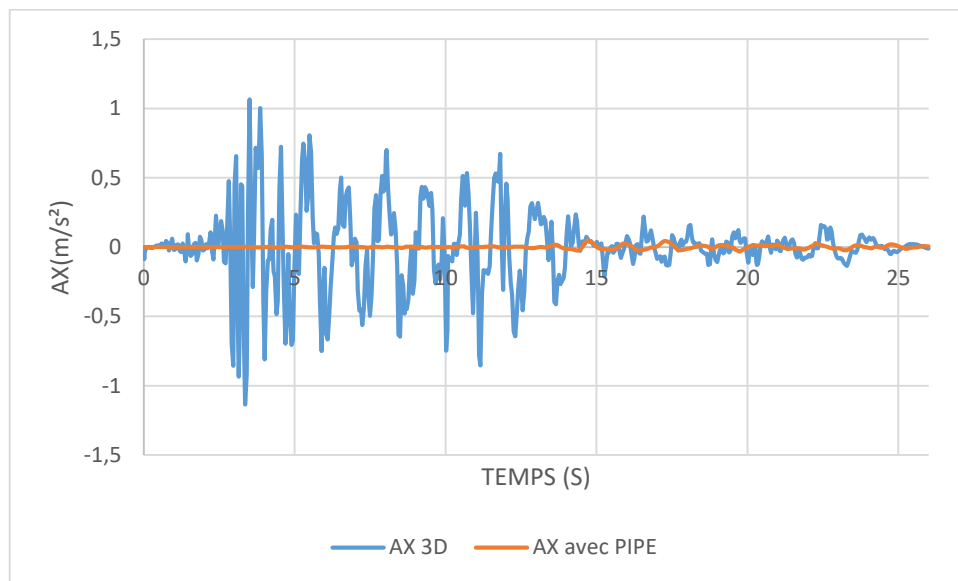


Figure 3.24 : L'accélération du minaret de Dolmabahçe au point B (PIPE288/SOLID185).

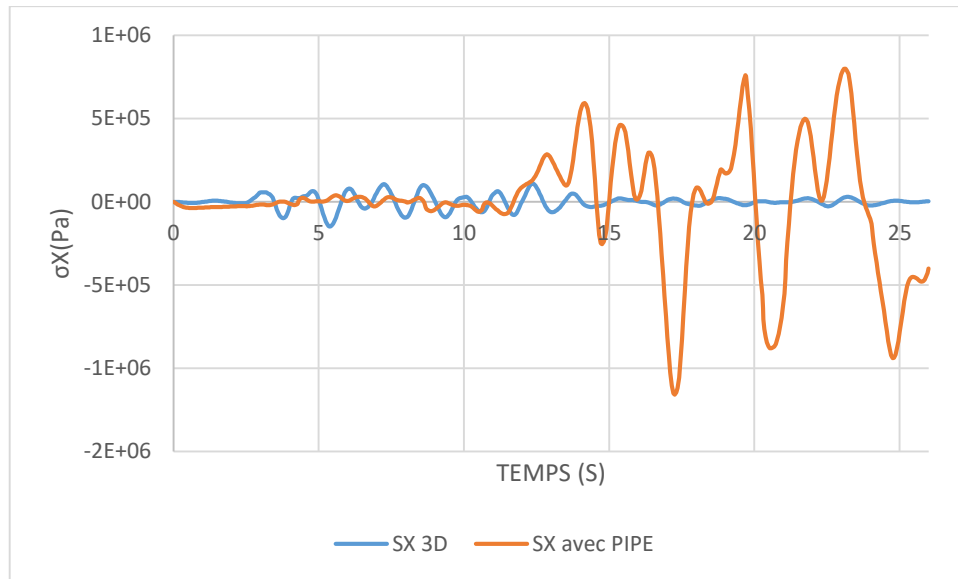


Figure 3.25 : La contrainte du minaret de Dolmabahçe au point B(PIPE288/SOLID185).

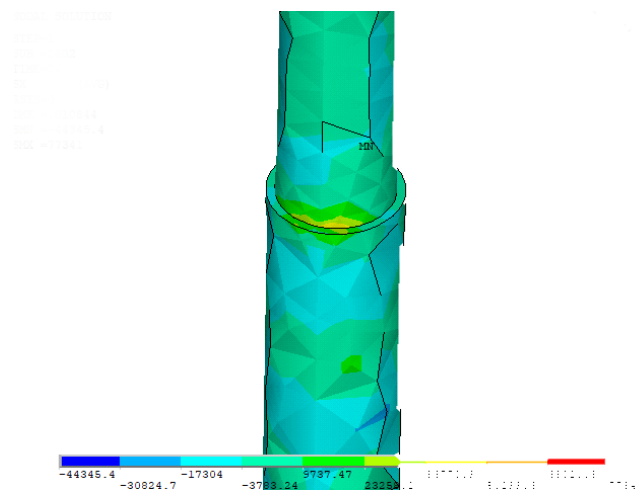


Figure 3.26 : Concentration des contraintes au point B sans AMF

Les constatations au point B sont les mêmes que le cas du point A. C'est-à-dire que les déplacements, vitesses et accélérations sont minimisées quand on utilise les éléments PIPE que les éléments solides. Les contraintes atteignent leur maximum entre 15s et 25s pour les éléments PIPE. Le tableau suivant résume les résultats de comparaison du minaret aux points A et B :

Tableau 3.7 : Comparaison entre SOLID185 et PIPE288 aux points de mesure A et B

Grandeurs	Avec AMF (SOLID185)	Avec AMF (PIPE288)
Point A		
Ux (cm)	13,857	0,0961
Vx (m/s)	0,6648	0,01657
Ax (m/s ²)	4,0901	0,6001
σ_x (Pa)	9050,46	25766,1
Point B		
Ux (cm)	2,42	0,00829
Vx (m/s)	0,1188	0,0015
Ax (m/s ²)	1,064	0,0495
σ_x (Pa)	110674	80058

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une comparaison entre l'utilisation des éléments PIPE et des éléments SOLID sur une structure réelle. Deux points de mesures ont été considérés le point A au sommet de la structure et le point B situé à une hauteur intermédiaire du minaret. La première comparaison qui consistait à affronter l'utilisation des éléments PIPE au cas sans AMF a montré que les valeurs de déplacements, vitesses et accélérations sont minimisées. En revanche les contraintes sont très importantes. La seconde comparaison consiste à examiner les résultats en utilisant la modélisation en 3D (SOLID185) et la modélisation unidimensionnelle (PIPE288). Les résultats montrent que l'utilisation des éléments PIPE diffère du cas tridimensionnel. En effet, les déplacements, vitesses et accélérations sont minimisés alors que les contraintes sont maximisées.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, on a étudié un des matériaux intelligents, il s'agit des alliages à mémoire de forme (AMF) et nous les avons appliqués sur les structures de grandes hauteurs. Les objectifs que nous sommes définis dans ce travail sont d'évaluer et d'analyser deux structures par le logiciel de calcul en éléments finis ANSYS, V15.0. et en utilisant des éléments unidimensionnels pour les AMF « PIPE288 ». Les résultats trouvés ont été comparés aux résultats établis dans la référence (Houmat & Seghir, 2019) en utilisant la modélisation en 3D (SOLID185).

Nous avons commencé par étudier une structure simple (pleine et creuse) de forme prismatique de même dimensions (10x10x40) m³. Nous avons modélisé les AMF par des éléments PIPE288 et la structure par des éléments tridimensionnels « SOLID185 » sous l'effet du signal sismique de Boumerdès (2003). La comparaison a été faite en termes de déplacements, accélérations, vitesses et la distribution des contraintes, en considérant deux cas :

- Le 1^{er} : sans et avec un fil d'AMF
- Le 2^{ème} : entre l'utilisation de l'élément PIPE288 ou l'élément SOLID185 pour l'AMF.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation des éléments PIPE pour les structures pleines présentent les mêmes résultats que pour le cas sans AMF et pour les structures creuses, la comparaison montre que l'utilisation des éléments PIPE modifie légèrement les résultats. D'autre part, les résultats d'utilisations l'élément SOLID et les éléments PIPE montre que les valeurs des déplacements sont presque les mêmes et pour les vitesses, les accélérations sont semblables pour les deux types de structures. Mais les résultats des contraintes ne sont pas significatifs.

La deuxième partie du travail, nous avons étudié le comportement d'une structure réelle, on a choisi le minaret de la mosquée de Dolmabahçe en Turquie en utilisant l'élément PIPE sous une excitation du signal enregistré du séisme de Düzce99. La première comparaison a été faite avec et sans l'élément PIPE288 et pour la seconde comparaison entre l'élément PIPE288 et l'élément SOLID185.

Dans le cas de minaret, la comparaison entre avec et sans AMF montrer que les déplacements, vitesses et accélérations sont minimisées avec des valeurs importantes pour les contraintes. La deuxième comparaison en utilisant (SOLID185), les résultats montrent une minimisation des déplacements, vitesses et accélérations et une maximisation des contraintes.

Finalement, et comme perspectives, nous suggérons d'approfondir ce travail en proposant d'autres scénarii afin de remédier aux problèmes de comparaison rencontrés.

- Optimiser la position de l'AMF : en effet, peut être que l'emplacement que nous avons choisi pour l'AMF n'est pas idéal ; on pourra chercher un autre endroit afin de le positionner.
- Rajouter d'autres fils. Dans le cas de la modélisation 3D, on ne pouvait pas rajouter d'autres éléments en AMF par faute de moyens informatiques (espace mémoire et temps d'exécution que peut prendre un seul calcul), alors que dans le cas unidimensionnel, on pourra se permettre de rajouter des fils car le calcul est beaucoup moins important.
- Essayer d'autres de type d'éléments unidimensionnels tels que les éléments poutres (Beam), chose qu'on a commencé à faire dans le présent travail, mais les résultats n'ont pas été exploitables et par faute de temps nous n'avons pas pu nous élargir là-dessus.

Références bibliographiques

1. Aleksandra, D. (2014, octobre 9). Utilisation d'alliage à mémoire de forme pour la création d'effets de précontrainte dans des composants en béton. *These de doctorat*. Paris, France.
2. Armattoo, k. (2014, juin 26). Modélisation non-locale du comportement thermomécanique d'alliages à mémoire de forme (AMF) avec prise en compte de la localisation et des effets de la chaleur latente lors de la transformation de phase : application aux structures minces en AMF. *thèse de doctorat* . mécanique et énergétique , lorraine france.
3. *azurseisme*. (s.d.). Récupéré sur www.azurseisme.com
4. Bastarch, E. (2000). Structures et propriétés des alliages à mémoire de forme titane-nickel. *Maitrise en génie mécanique*. Québec.
5. Benallal, M. E., & Chitaoui , H. (2015, juin 11). Etude du comportement d'une structure historique équipée d'amortissement en matériaux intelligents (application sur le minaret d'Aljoun en Jordanie). *Mémoire master génie civil*. Tlemcen, Algérie.
6. Cécile, F.-M. (2018, juillet 2). *Les alliges à mémoire de forme, une nouvelle famille de matériaux*. Récupéré sur MetalBlog: <http://metalblog.ctif.com>
7. Chastaing, K. (2007, septembre 28). Etude d'alliages à mémoire de forme base Ru pour application hautes températures. *Thèse de doctorat*. Paris, France.
8. Choi, Y. K. (2002, juin 24). Réalisation et caractérisation de composites hybrides verre/epoxy/ni-ti adaptateurs. *These de doctorat*. Lyon, France.
9. ECH-Chourfi, R. (2013, septembre). Dialogue essais_simulation et identification de lois de comportement d'alliages a mémoire de forme en chargement multiaxial. *thèse de doctorat*. paris, mécanique et matériaux, paris: paris tech.
10. francois, v. (2004, juin 30). implantation d'une loi de matériau des alliages a mémoire de forme dans un logiciel d'éléments finis commercial. *maitrise en génie mécanique*. montréal, france.

11. Houmat, A. M., & Seghir, N. M. (2019, juillet 6). L'effet des dispositifs en alliages à mémoire de forme sur le comportement dynamique des structures. *Mémoire de master en génie civil*. Tlemcen, Algérie.
12. *Istanbul city* . (s.d.). Récupéré sur istanbul city: <http://www.istanbul-city.fr/guide-istanbul/mosquée/mosquée-dolmabahçe/>
13. Lafortune, P. (2006, Décembre 22). Utilisation des alliages à mémoire de forme en controle sismique des structures. *Maitrise en génie mécanique*. Montréal, france.
14. Legmairi, A. Y. (2018). Utilisation des réseaux neurons pour modéliser le compertement non linéaire des matériaux magnétostrictifs sous l'effet d'une contrainte mécanique chapitre 2. *Mémoire master en génie élictrique*. Oum el bouaghi, Algerie.
15. Raymond , N. (1997). Les alliages à mémoire de forme appliqués à la lunetterie. *Rapport de recherche bibliographique* . Lyon, France.
16. Réol, & Sylvie. (2001). Arcade centrale. *Monuments histirorique* .
17. Vignes, J., Andre , G., & Kapala , F. (2001). Alliage à mémoire de forme . Cenrte d'Animation Régional en Matériaux Avances CARMA, France.
18. *Wikipédia*. (s.d.).