

# Thèse

En vue de l'obtention du  
diplôme de doctorat 3<sup>ème</sup> cycle

Présenté par

**Mr. MATARI Zakaria**

Intitulé

## **Les structures intelligentes en génie civil : Modélisation, analyse et contrôle**

**Domaine** : Science et technologie

**Filière** : Génie civil

**Spécialité** : Génie parasismique

Soutenue publiquement devant le jury composé de :

<b>Nom &amp; Prénom</b>	<b>Qualité</b>	<b>Etablissement de rattachement</b>
Prof. Maliki Mustapha	Président	Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem
Prof. Benadla Zahira	Examinatrice	Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen
Prof. Tahar Berrabah Amina	Examinatrice	Université Belhadj Bouchaib, Ain Témouchent
Prof. Bensoula Mohamed	Examineur	Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem
Prof. Bourdim Sidi Mohammed El-Amine	Directeur de Thèse	Centre Universitaire de Maghnia
Prof. Kadri Tahari	Co-directeur de Thèse	Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem
Prof. Rodrigues Hugo	Invité	Université d'Aveiro, Portugal

**Année universitaire 2023 -2024**

# Remerciements

En cette étape cruciale de mon parcours, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Dieu le tout-puissant, source de santé et de courage, qui m'a permis de mener à bien ce projet. Ma reconnaissance la plus profonde va à mon directeur de thèse, Monsieur BOURDIM Sidi Mohamed El-Amine, dont l'acceptation de diriger ce travail a été un privilège. Son orientation éclairée, son soutien constant, et sa politesse exemplaire m'ont non seulement inspiré confiance en moi, mais m'ont également permis d'apprendre et de grandir.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers mon co-encadreur Professeur Kadri Tahar et mon Professeur Hugo Rodrigues, pour leur contribution précieuse à la finalisation de cet humble travail.

Je tiens à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire. Je tiens à exprimer mon entière gratitude à Monsieur Maliki Mustapha professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem pour avoir accepté la présidence du jury. Mes remerciements vont également à Madame Benadla Zahira professeur à l'Université de Tlemcen à Madame Tahar Berrabah Amina professeur à l'université de Ain Témouchent et Monsieur Bensoula Mohamed professeur à l'université de Mostaganem pour avoir consacré leur temps à l'examen de ce document en tant qu'examineurs.

Un remerciement chaleureux est adressé à mes collègues du LMPC, notamment à Dr. Noor Abdelkader, Dr. Terki Hessain Issam, Mme Maram Hammoudi, et Dr. Sabeur Bendihba, pour leur implication dans la concrétisation de ce recueil. Je tiens également à saluer la disponibilité constante du Dr. Chaibdraa Belckacem et Dr. Zelmat Yacine. Mes remerciements vont également aux Professeur Hamdaoui Karim, Monsieur Housseem Eddine Chitaoui, et Dr. Benkraled Ilyes Mohammed, dont l'aide a été inestimable.

Mes remerciements s'étendent également à Monsieur le doyen de la faculté Professeur Ghezzer, Monsieur le vice doyen Dr. Sardou Miloud, Monsieur Bouhaloufa Ahmed, le chef de département, ainsi que Dr. Zaoui Mohamed pour leur appui continu et le professeur Benanane Abdelkader.

Je saisis cette occasion pour exprimer ma reconnaissance envers l'université et l'école algérienne qui ont été les foyers de savoir pendant mon cursus scolaire. Mes remerciements vont aux membres du département du génie civil, au laboratoire LMPC, aux personnels du troisième cycle.

Je dédie ce travail à mes chers parents qui se sont battus pour moi depuis ma naissance et qui ne m'ont jamais tourné le dos je vous aime et aussi à ma femme qui détient en elle la source de mon inspiration ; ces personnes me guident et m'encouragent. Je dédie cet humble travail surtout à mon défunt père qui nous a quitté cette année Allah yarahmou et voulait tellement me voir réussir dans cette phase de ma vie. Je remercie aussi mes frères et ma sœur et leurs enfants que j'aime profondément et toute ma famille.

## Résumé

Les structures intelligentes, un domaine actuellement captivant, englobent à la fois les matériaux et les structures. Des progrès significatifs sont constamment réalisés dans la modélisation, l'analyse et le contrôle. Elles se sont développées sur le marché du bâtiment et des travaux publics à partir des années 70, où les systèmes passifs ont vu le jour. Par la suite, la recherche a permis de créer des systèmes encore plus innovants, incluant les systèmes actifs, semi-actifs et passifs.

Dans le contexte du Génie Civil, la conception d'infrastructures fait face à une préoccupation majeure : les mouvements induits par les catastrophes naturelles, notamment les séismes. Ainsi, la réussite réside dans la minimisation de ces mouvements. Pour répondre à ces défis, des systèmes de contrôle ont été développés pour réduire les déplacements dynamiques ainsi que les contraintes. La maîtrise de ces systèmes ouvre la voie à la conception de structures modernes de plus en plus élancées. Ces systèmes intègrent généralement des capteurs et des actionneurs liés à un ordinateur, capables de réagir de manière proactive aux excitations extérieures. L'intégration de ces systèmes de contrôle aux structures peut varier en fonction de leur disposition, leur nombre et leur emplacement. Le projet de recherche se fixe comme objectif principal d'explorer ces diverses variables afin d'améliorer le comportement des structures en Génie Civil. En se penchant sur ces aléas, le projet aspire à contribuer significativement à l'évolution des pratiques dans la conception et la réalisation d'infrastructures résilientes face aux aléas naturels comme les tremblements de terre. Ce travail retrace les progrès significatifs des types de contrôle les plus utilisés dans le génie civil et les résultats se divisent en parties. Lors du travail, une analyse dynamique du minaret d'une ancienne église transformée en une mosquée dans la wilaya de Mostaganem a été réalisée. Une analyse modale et une analyse transitoire ont été élaborées. Ensuite, ce minaret a été équipé d'alliages à mémoire de forme, des matériaux intelligents donnant lieu à une structure intelligente, en utilisant un système de contrôle passif. Ceci a été fait afin d'observer comment ces alliages agissent pour réduire les contraintes dans la structure. Les alliages à base de fer, de cuivre et de nickel, notamment le  $TiNi$ . Les  $NiTi$  ont été étudiés et utilisés avec une augmentation progressive de leur nombre, passant de 4 à 6, et à des positions différentes. Initialement, 4 ont été placés à la base, puis 6 ont été placés à la base, et enfin, 4 ont été placés à la base et 2 au sommet. Il a été constaté qu'effectivement ces alliages réduisent les contraintes et les déplacements. Cependant, le taux de réduction ne varie pas significativement lorsqu'on passe de 4 alliages à 6. En deuxième lieu, une analyse non linéaire a été réalisée sur un mur en maçonnerie susceptible de subir des dégâts très dangereux pour la structure. Bien que certains ingénieurs ne prennent pas en considération ce danger à sa juste mesure, cet élément a été étudié d'abord sans alliage, puis en utilisant des alliages avec un chargement progressivement croissant. Il a été confirmé que les alliages à mémoire de forme réduisent les déplacements et les contraintes, que ce soit pour les éléments en maçonnerie ou en béton armé

**Mots-clés :** Contrôle passif des structures, structures intelligentes , Alliages à mémoire de forme , analyse transitoire

## **Abstract**

Intelligent structures, a currently captivating field, encompass both materials and structures. Significant progress is constantly being made in modeling, analysis, and control. They have evolved in the building and public works market since the 1970s, where passive systems first emerged. Subsequently, research has led to the development of even more innovative systems, including active, semi-active, and passive systems.

In the context of Civil Engineering, the design of infrastructures faces a major concern: movements induced by natural disasters, particularly earthquakes. Success lies in minimizing these movements. To address these challenges, control systems have been developed to reduce dynamic displacements and constraints. Mastery of these systems paves the way for designing increasingly slender modern structures. These systems generally integrate sensors and actuators connected to a computer capable of reacting proactively to external excitations. The integration of these control systems into structures can vary depending on their arrangement, number, and location. The main objective of the research project is to explore these various variables to improve the behavior of structures in Civil Engineering. By addressing these challenges, the project aims to significantly contribute to the evolution of practices in designing and implementing resilient infrastructures against natural hazards such as earthquakes. This work outlines the significant progress of the most commonly used types of control in civil engineering, with results divided into sections. During the research, a dynamic analysis of the minaret of a former church transformed into a mosque in the wilaya of Mostaganem was conducted. Modal and transient analyses were developed. Subsequently, this minaret was equipped with shape memory alloys, intelligent materials resulting in a smart structure, using a passive control system. This was done to observe how these alloys act to reduce stresses in the structure. Alloys based on iron, copper, and nickel, including TiNi and NiTi, were studied and utilized. NiTi was studied and used with a progressive increase in their number, ranging from 4 to 6, and at different positions. Initially, 4 were placed at the base, then 6 at the base, and finally, 4 at the base and 2 at the top. It was observed that indeed these alloys reduce stresses and displacements. However, the reduction rate does not vary significantly when transitioning from 4 alloys to 6. Secondly, a nonlinear analysis was conducted on a masonry wall susceptible to dangerous damage to the structure. Although some engineers do not consider this danger to its full extent, this element was first studied without alloys and then using alloys with a gradually increasing load. It was confirmed that shape memory alloys reduce displacements and constraints, whether for masonry or reinforced concrete elements, making them important components in structural control.

By focusing on these hazards, the project aims to contribute significantly to the evolution of practices in the design and construction of resilient infrastructure in the face of natural hazards as earthquake.

**Keywords:** Passive control of structures, smart structures, Shape Memory Alloys (SMAs), transient analysis

## ملخص

الهيكل الذكي، مجال جذاب حالياً، يشمل كل من المواد والهيكل. يتم إحراز تقدم كبير باستمرار في مجالات التصميم والتحليل والتحكم. ظهرت هذه الهياكل في سوق البناء والأشغال العامة ابتداءً من السبعينيات، حيث ظهرت أنظمة سلبية في البداية. وفيما بعد، سمحت الأبحاث بابتكار نظم أكثر ابتكاراً، بما في ذلك النظم النشطة والنصف نشطة والسلبية. هذه النظم، رغم اختلاف أنواعها، تؤدي نفس الوظيفة. زادت فعاليتها وكفاءتها مع الوقت، وكذلك إمكانياتها التي ترجع إلى التنافس وزيادة الطلب.

في سياق الهندسة المدنية، تواجه تصميم البنية التحتية انخراطاً كبيراً في مواجهة التحركات الناتجة عن الكوارث الطبيعية، خاصة الزلازل. وبالتالي، تكمن النجاح في تقليل هذه التحركات. للتعامل مع هذه التحديات، تم تطوير نظم التحكم لتقليل التحركات الديناميكية وكذلك القيود. استيعاب هذه النظم يفتح الباب أمام تصميم هياكل حديثة ذات قامة متزايدة. تدمج هذه النظم عادة أجهزة الاستشعار والمشغلات المرتبطة بحاسوب، قادرة على التفاعل بطريقة نشطة مع التحفيز الخارجية. يمكن أن تتفاوت تكامل هذه نظم التحكم في الهياكل حسب ترتيبها وعددها وموقعها.

يهدف مشروع البحث الرئيسي إلى استكشاف هذه المتغيرات المتنوعة لتحسين سلوك الهياكل في الهندسة المدنية. باستعراض هذه التحديات، يطمح المشروع إلى المساهمة بشكل كبير في تطور الممارسات في تصميم وتنفيذ البنية التحتية المتينة ضد المخاطر الطبيعية مثل الزلازل. يتتبع هذا العمل التقدم الكبير لأنواع التحكم الأكثر استخداماً في الهندسة المدنية، وتنقسم النتائج إلى أقسام.

أثناء العمل، تم إجراء تحليل دينامي لمئذنة كنيسة قديمة تم تحويلها إلى مسجد في ولاية مستغانم. تم تطوير تحليل النمط والتحليل الانتقالي. بعد ذلك، تم تجهيز هذه المئذنة بسبائك الذاكرة الشكلية، وهي مواد ذكية تؤدي إلى هيكل ذكي، باستخدام نظام تحكم سلبي. تم دراسة واستخدام سبائك قائمة على الحديد والنحاس والنيكل، بما في ذلك  $Ti_{60}Ni_{40}$ . تمت دراسة واستخدام  $NiTi$  مع زيادة تدريجية في عددها، من 4 إلى 6، وفي مواقع مختلفة. في البداية، وضعت 4 في القاع، ثم وضعت 6 في القاع، وأخيراً، وضعت 4 في القاع و2 في القمة. تبين أن هذه السبائك تقلل بفعالية من التوترات والانحرافات. ومع ذلك، لا يتغير معدل التقليل بشكل كبير عند الانتقال من 4 سبائك إلى 6.

في المرتبة الثانية، تم إجراء تحليل غير خطي على جدار من الطوب الصلب قابل للتحلل بشكل خطير للهيكلي. على الرغم من أن بعض المهندسين لا يأخذون هذا الخطر في اعتبارهم بالشكل الصحيح، تم دراسة هذا العنصر أولاً بدون سبائك، ثم باستخدام سبائك مع زيادة تدريجية في الحمولة. تم تأكيد أن سبائك الذاكرة الشكلية تقلل من الانحرافات والقيود، سواء كان ذلك لعناصر الطوب أو الخرسانة المسلحة، مما يجعلها عناصراً هامة في التحكم الهيكلي.

**الكلمات الرئيسية:** التحكم السلبي في الهياكل، الهياكل الذكية، سبائك الذاكرة الشكل، تحليل عابر.

## Table des matières

Résumé .....	II
Abstract.....	III
ملخص .....	IV
Table des matières.....	V
Liste des tableaux.....	VII
Liste des figures .....	VIII
Liste des symboles .....	X
Liste des abréviations .....	XII
Introduction générale .....	1
Références .....	4
Chapitre 1 : Sismologie et activité sismique de l'Algérie.....	5
1.1. Introduction.....	5
1.2. Activité sismique de l'Algérie.....	5
1.2.1. Activité sismique dans la partie Nord .....	6
1.3. Réseau Algérien d'accélérographe .....	10
1.4. Les principaux séismes historiques en Algérie .....	13
1.4.1. Le séisme de Boumerdes 2003.....	13
1.4.2. Le séisme d'El-Asnam en 1980.....	15
1.4.3. Le séisme d'Alger en 1716.....	15
1.5. Règlement Parasismique Algérien (R.P.A).....	16
1.5.1. Introduction.....	16
1.5.2. La version RPA 99.....	16
1.5.3. La version modifiée du Règlement Parasismique Algérien R.P.A 99 (2003).....	18
1.5.4. Conclusion .....	19
1.6. Références.....	20
Chapitre 2 : Contrôle passif et actif dans le génie civil.....	21
2.1. Introduction.....	21
2.2. Principe du contrôle des vibrations.....	21
2.2.1. Principe d'amortissement sismique .....	23
<b>2.2.1.1. Système de contrôle passif .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.1.2. Contrôle actif.....</b>	<b>29</b>
<b>c- Amortisseur à masse active .....</b>	<b>32</b>
<b>2.2.1.3. Contrôle semi-actif : .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.1.4. Contrôle hybride.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.1.5. Contrôle de la santé des structures .....</b>	<b>35</b>
2.3. Définition des Alliages .....	35
2.3.1. Historique des AMF.....	36

2.3.2.	Comportement des AMF.....	37
2.3.2.1.	<b>Effet mémoire de forme .....</b>	<b>37</b>
	<b>a- Marteniste auto-accommodée : .....</b>	<b>38</b>
	<b>b- Martensite orientée .....</b>	<b>38</b>
2.3.2.2.	Effet mémoire simple sens.....	39
2.3.2.3.	Effet mémoire double sens.....	40
2.3.2.4.	Effet super élastique.....	40
2.4.	Type d'alliage existant.....	42
2.4.1.	AMF NiTi .....	42
2.4.2.	AMF à base de cuivre .....	42
2.5.	Fabrication des AMF .....	43
2.6.	Modèle mathématique des alliages à mémoire de forme .....	44
2.6.1.	Modèle constitutif des alliages à mémoire de forme .....	44
2.6.2.	Tanaka model.....	44
2.6.3.	Liang and Rogers model .....	45
2.6.4.	Brison model.....	46
2.7.	Références.....	47
Chapitre 3 : Etat de l'art sur l'utilisation du contrôle passif et actif dans les structures intelligentes dans le génie civil.....		50
3.1.	Introduction.....	50
3.2.	Contrôle de vibration sans AMF.....	50
3.2.1.	Contrôle de vibration dans le siège du CTC de AIN defla.....	51
3.2.2.	Contrôle de vibration dans la grande mosquée d'Alger.....	51
3.2.2.1.	<b>Salle de prière .....</b>	<b>51</b>
	<b>b- Amortisseurs hydrauliques .....</b>	<b>54</b>
3.2.2.2.	<b>Le minaret .....</b>	<b>54</b>
3.3.	Contrôle passif en utilisant les AMF.....	58
3.3.1.	Performance des isolateurs à la base en utilisant les AMF .....	58
3.3.2.	L'exemple de l'église S.Giorgio .....	61
3.3.3.	Dans les assemblages poteau poutre .....	63
3.3.4.	Utilisation des AMF dans les contreventements .....	65
3.3.5.	Utilisation des AMF dans la précontrainte du béton.....	67
3.3.6.	Applications pour la fermeture de fissures dans le béton. ....	68
3.4.	Contrôle actif des vibrations dans les structures en utilisant les AMF .....	69
3.5.	Conclusion : .....	70
3.6.	Références.....	70
Chapitre 4 : Contrôle passif en utilisant les AMF pour le cas d'un mur en maçonnerie .....		72
4.1.	Introduction.....	72

4.2.	Etude du cas .....	72
4.2.1.	Méthode utilisée.....	77
4.3.	Résultats et discussions.....	80
	.....	80
4.4.	Conclusion .....	83
4.5.	Référence .....	84
Chapitre 5 : Analyse sismique et Réhabilitation d'une ancienne mosquée en Algérie avec des AMF...		85
5.1.	Introduction :.....	85
5.2.	Analyse transitoire dans le logiciel Ansys .....	85
5.3.	Méthode utilisée dans notre travail .....	89
5.4.	Modélisation des AMF .....	91
5.5.	Présentation du cas étudié.....	92
5.6.	Modèle Numérique du Minaret.....	94
5.7.	Analyse modale.....	95
5.8.	Analyse transitoire du minaret sans AMF.....	96
5.9.	Avec AMF .....	100
5.10.	conclusion .....	107
5.11.	Référence .....	107
Conclusion générale.....		109
Perspective.....		110
Annexe .....		110

## Liste des tableaux

Tableau1. 1	Liste des principaux séismes en Algérie .....	7
Tableau1. 2.	Coefficient de l'accélération maximale du sol en (g). .....	17
Tableau1. 3	.Coefficient d'accélération, PGA en (g), selon le code RPA99 modifié 2003. ....	18
Tableau2. 1.	Grand projet qui utilise les TLD et les TMD.....	28
Tableau2. 2.	propriétés thermomécanique des AMF .....	42
Tableau4. 1	Propriété de la brique .....	77
Tableau4. 2	Propriété du mortier .....	77
Tableau4. 3.	Valeur de contrainte déformation pour le mortier.....	78
Tableau4. 4.	Valeurs des contraintes déformations pour la brique .....	79
Tableau4. 5.	Propriété des des AMF à base de NiTi .....	79

Tableau5. 1. Différentes méthodes pour l'analyse transitoire .....	87
Tableau5. 2. Propriété mécanique du béton armé du minaret.....	94
Tableau5. 3. Liste des périodes et fréquences sans AMF .....	95
Tableau5. 4 Liste des périodes avec les AMF.....	96
Tableau5. 5. Réponse sismique maximale aux points A et B sans AMF. ....	99
Tableau5. 6. Propriétés mécaniques du Nitinol.....	100
Tableau5. 7. Réponse sismique maximum des minarets au point A et B pour 4, 6 et sans AMF .....	101
Tableau5. 8. Réponse maximal au point A et B pour 4 AMF et 4 +2 AMF.....	105

## Liste des figures

Figure1. 2 La faille entre les plaques tectoniques africaine et eurasienne passe par tout le littoral algérien[2].....	6
Figure1. 3 Carte schématique montrant les principales tectoniques et les domaines géologiques dans le Nord de l'Algérie (modifié d'après [3]) .....	6
Figure1. 4 .Les tremblements de terre passés en Algérie (1700-2002) [7]. ....	10
Figure1. 5. Carte de séismicité de l'Algérie pour la période (1365-1992) [7].....	10
Figure1. 6. Répartition des stations sismographiques [7] .....	11
Figure1. 7. Réseau national d'accélérographe, avec les limites administratives régionales. Les nombres entre parenthèses à côté des triangles remplis représentent le nombre de stations installées dans la région. [8].....	12
figure1. 8. Séisme de Boumerdès [11] .....	14
Figure1. 9. L'accélération du champ libre et les amplitudes de Fourier au site de Keddara2 pour le séisme de Boumerdès [12] .....	15
Figure1. 10. Les stations installées dans la région du centre du pays [7].....	15
Figure1. 11. La distribution des séismes majeurs dans l'histoire de l'Algérie [12]. ....	16
Figure1. 12. Zones sismiques du territoire national.....	18

Figure2. 1. Système de contrôle des structures [3] .....	23
Figure2. 2. Système de contrôle passif .....	24
Figure2. 3. Les types de système contrôle passif [5] .....	25
Figure2. 4.Appuis en élastomère [5].....	25
Figure2. 5. Appuis à glissement .....	26
Figure2. 6 .Utilisation du TMD dans la tour Taipei 101[11] .....	27
Figure2. 7. Utilisation des TLD dans la Shanghai World Financial Center[12] .....	28
Figure2. 8. Utilisation du contrôle passif dans la grande mosquée d'Alger[14].....	29
Figure2. 9.Principe du contrôle actif.....	30
Figure2. 10. Contrôle actif en utilisant la piézoélectricité .....	31
Figure2. 11. Utilisation de matériaux piézoélectrique dans les bâtiments [16] .....	32
Figure2. 12. Structure de Kyobashi Seiwa à Tokyo.[17].....	33
Figure2. 13. Modèle mathématique de l'amortisseur de masse accordée semi-actif.[18] .....	34
Figure2. 14. Schéma d'une structure avec contrôle hybride.....	35
Figure2. 15. Contrôle de la santé des structures dans une poutre en béton armée[16] .....	35
Figure2. 16.Etat de phase des AMF [21] .....	38
Figure2. 17. Schématisation de l'effet mémoire de forme simple sens [23].....	39
Figure2. 18. Effet mémoire de forme simple sens (a) graphe contrainte température (b) graphe contrainte déformation. [22] .....	40
Figure2. 19. Effet mémoire double sens.....	40

Figure2. 20. Effet super-élastique [22] .....	41
Figure2. 21. Effet thermomécanique des AMF [25] .....	41
Figure3. 1.Siege du CTC Ain Defla en Algérie [1] .....	51
Figure3. 2.La grande mosquée d'Alger .....	52
Figure3. 3.Système de contrôle sismique dans la salle de prière [2].....	53
Figure3. 4.Palier oscillant à glissement dans la salle de prière [3] .....	54
Figure3. 5. Système parasismique en noyau central et en charpente métallique utilisé dans la grande mosquée d'Alger [4].....	55
Figure3. 6. Répartitions des efforts externes et internes dans la charpente du minaret de la grande mosquée d'Alger [4].....	56
Figure3. 7. Noyaux centraux dans le minaret de la grande mosquée d'Alger [4] .....	57
Figure3. 8. Classification des éléments anti sismique selon leur efficacité [4] .....	58
Figure3. 9.Géométrie de l'isolateur à la base qui utilise les AMF [5] .....	59
Figure3. 10. Prototype de l'isolateur à la base qui utilise les AMF [5] .....	60
Figure3. 11. Force en fonction du déplacement à une fréquence de 2.2 hz [5].....	61
Figure3. 12. Force en fonction du déplacement dans l'état final à une fréquence de 4 hz . [5].....	61
Figure3. 13 . Eglise de saint Giorgio avec et sans AMF [6].....	62
Figure3. 14. Vue en plan et en élévation de la structure à 8 étages [7] .....	63
Figure3. 15. Mise en place des assemblages poteau poutre avec utilisation des AMF : a assemblage poteau poutre. b : coupleur [7] .....	64
Figure3. 16. Assemblage poteau poutre avec AMF à l'état réel [7] .....	64
Figure3. 17. Vue en plan des structures [8].....	65
Figure3. 18. Vue en élévation des structures à 3 et 9 étages[8] .....	66
Figure3. 19 . Mise en place des AMF dans les contreventements en V inversé [8] .....	67
Figure3. 20. Schéma de précontrainte des cylindres en béton par AMF sous la forme d'une spire a) avant chauffage b) après chauffage [9].....	67
Figure3. 21. Principe du béton intelligent .....	68
Figure3. 22.Applications pour la fermeture de fissures dans le béton. 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 [12].....	69
Figure3. 23.Evolution d'une fissure lors de l'activation thermique de fils AMF insérés dans une poutrelle en béton .....	69
Figure3. 24. Système de contrôle de la flexion d'une poutre à l'aide d'un fil AMF [12] .....	70
Figure 4. 1 Cas du mur étudié .....	73
Figure 4. 2. Vue en 3d de la brique et le mortier [1] .....	73
Figure 4. 3. Chargement et condition au limite du mur .....	74
Figure 4. 4. Mur en maçonnerie équipé d'un AMF.....	75
Figure 4. 5. a :réponse super-élastique des AMF b : courbe contrainte température des AMF .....	76
Figure 4. 6. Les différents composants du mur en maçonnerie [1] .....	76
Figure 4. 7. Courbe contrainte déformation des AMF à base a : De Ni-Ti b : Cu-Zn-Al .....	77
Figure 4. 8. Valeur de la contrainte en fonction de la déformation pour le mortier.....	78
Figure 4. 9. Courbe contrainte déformation pour le mortier .....	78
Figure 4. 10. Courbe contrainte déformation pour la brique .....	79

Figure 4. 11. Courbe contrainte en fonction du temps pour le mur en maçonnerie avec et sans AMF .	80
Figure 4. 12. Courbe contrainte de Van misses en fonction du temps pour le mur en maçonnerie avec et sans AMF.....	81
Figure 4. 13. Déformation élastique en fonction du temps avec et sans AMF.....	82
Figure 4. 14. Courbe force déplacement avec et sans AMF .....	83
Figure5. 1 . Exemple de courbe donnée par logiciel Ansys.....	86
Figure5. 2. La déformée sur le logiciel Ansys .....	87
Figure5. 3. Résultats donnés par le logiciel Ansys .....	87
Figure5. 4. Choix du type de méthode utilisée sur logiciel Ansys Apdl .....	90
Figure5. 5. Utilisation des AMF dans le logiciel Ansys .....	92
Figure5. 6. Mosquée El-Badr (a) Avant transformation ; (b) Après transformation.....	92
Figure5. 7. Vue en élévation du minaret .....	93
Figure5. 8. Vue en plans du minaret ; (a) coupe A-A (b) Coupe B-B .....	93
Figure5. 9. Solid 185 model.....	94
Figure5. 10. Positions des points A et B.....	95
Figure5. 11. Mode de vibration du minaret.....	96
Figure5. 12. Enregistrement réel du séisme de Boumerdes en 2003 selon la composante E-O (Est-Ouest).....	97
Figure5. 13. Déplacement, contrainte et accélération au point A ; (a) contrainte ; (b) déplacement ; (c) accélération .....	98
Figure5. 14. Déplacement, contrainte et accélération au point B ; (a) contrainte ; (b) déplacement ; (c) accélération. ....	99
Figure5. 15. Ceinture métallique pour le placement des alliages.....	100
Figure5. 16. Variation de la réponse sismique ; (a) contrainte, (b) déplacement, (c) accélération au point A entre sans AMF et 4 AMF.....	103
Figure5. 17. Variation de la réponse sismique ; (a) contrainte, (b) déplacement, (c) accélération au point B entre sans AMF et 4 AMF.....	103
Figure5. 18. Variation de la réponse sismique ; (a) contrainte, (b) déplacement, (c) accélération au point A entre 4AMF et 6 AMF.....	104
Figure5. 19. Variation de la réponse sismique ; (a) contrainte, (b) déplacement, (c) accélération au point B entre 4AMF et 6 AMF .....	104

## Liste des symboles

$\sigma$  : la contrainte unidimensionnelle

$\varepsilon$  : la déformation

$E$  : le module d'élasticité

$Y$  : la contrainte de transformation

$n$  : constante supposée être une valeur réelle positive et impaire qui contrôle la netteté de la transition de l'état élastique à la transformation de phase

$\dot{\sigma}$  : la dérivée temporelle ordinaire de la contrainte

$\beta$  : contrainte de rappel unidimensionnelle

$f_T$  : constantes matérielles qui contrôlent le type et la taille de l'hystérésis

$a$  : constantes matérielles quantité de récupération élastique lors du déchargement  
 $c$  : pente du plateau de contrainte de déchargement  
 $E_y$  : la pente de la courbe  $\sigma$ - $\varepsilon$  dans la plage inélastique  
 $\varepsilon_{in}$  : déformation inélastique  
 $u(x)$  : fonction échelon unitaire  
 $\sigma_0$  : la contrainte initiale  
 $\sigma$  : contrainte à un certain état  
 $\varepsilon_0$  : déformation initiale  
 $\varepsilon$  : déformation à un certain état  
 $T$  : température à un certain état  
 $\xi$  Nombre de volume de transformation à un certain état  
 $E_A$  : modules d'élasticité à l'austénite  
 $E_M$  : modules d'élasticité en martensite  
 $\theta$  : le coefficient thermique  
 $\varepsilon_L$  : déformation maximale de transformation  
 $\Omega(\xi)$  : le coefficient de transformation  
 $\xi$  : la variable interne qui reflète le changement de la transformation du matériau  
 $C_A$  : coefficients de transformation équivalents de la contrainte et de la température lorsque l'austénite se transforme en martensite  
 $C_M$  : coefficients de transformation équivalents de la contrainte et de la température lorsque et lorsque la martensite se transforme en austénite  
 $\xi_T$  : le nombre de transformation martensitique  
 $\xi_S$  : le nombre de transformation martensitique induite par le changement de contrainte  
 $T$  : période  
 $\nu_A$  : coefficient de poisson à la phase Austénite  
 $\nu_M$  : coefficient de poisson à la phase Martensite  
 $\hat{k}$  : raideur effective  
 $m$  : Masse  
 $k$  : raideur  
 $C$  : amortissant  
 $a$  : contribution de l'accélération due aux charges d'inertie  
 $\hat{p}_{i+1}$  : force résultante à l'instant  $i+1$

$p_{i+1}$  : force appliquée à l'instant  $i+1$   
 $\beta$  et  $\gamma$  sont les paramètres de Newmark.  
 $U_{x,max}$  : valeurs maximales de déplacement  
 $\sigma_{x,max}$  : valeurs maximales de la contrainte  
 $A_{x,max}$  Valeur maximales d'accélération  
 $\sigma^S$  : Contrainte initiale du chargement  
 $\sigma^{SA}$  : Contrainte initiale du déchargement  
 $\sigma^F$  : Contrainte finale du chargement  
 $\sigma^{FA}$  : Contrainte finale du déchargement  
4AMFb : 4 AMF à la base  
4AMFs : 4 AMF au sommet

### Liste des abréviations

PGA : Peak ground acceleration  
TMD : Amortisseur à masse accordé  
TLD : Amortisseur à liquide accordé  
PFD : Amortisseur à friction piézoélectrique  
AMD : amortisseur à masse active  
ABS : amortisseur à barre actif  
ATS : amortisseur à câble actif  
PVDF : piezo polyfluorure de vinylidène  
PZT : titano-zirconates de plomb  
Ms : la température de début de la martensite  
Mf : La température de fin de la martensite  
AS : La température de début de l'Austénite  
Af : La température de fin de l'Austénite  
Cd Au : cadmium or  
Cu Zn : cuivre zinc  
Cu Al : Cuivre aluminium  
Niti : nickel titane  
Cu Al B : Bronze d'Aluminium au Bore  
SIP : paliers oscillants à glissement

HDM : Membres hautement dissipatifs

LDM : Membres moins dissipatifs

EM : Membres élastiques

JBC : Assemblage poteau poutre

SMA : Alliage à mémoire de forme

## Introduction générale

L'épopée des structures intelligentes dans le domaine du génie civil, tracée depuis les années 70 jusqu'à nos jours, constitue une saga d'envergure mondiale, révélant une transition impressionnante des systèmes passifs vers des solutions d'une sophistication inégalée. Cette évolution transcende les frontières disciplinaires pour englober les dimensions actives, semi-actives. La révolution des structures intelligentes est motivée par la nécessité impérieuse de relever des défis considérables comme les mouvements sismiques et les charges dynamiques, offrant une vision panoramique de la conception structurelle. Elle façonne une ère où émergent des structures avant-gardistes et élancées.

Dans ce tableau dynamique, les approches de contrôle actif, semi-actif et passif émergent comme des piliers fondamentaux propulsant le génie civil vers des sommets inexplorés, réduisant de manière significative les déplacements dynamiques et les contraintes. Cette trajectoire ascendante propulse la discipline vers des normes toujours plus élevées de durabilité et de résilience. Ces techniques de contrôle permettent une réponse plus rapide et plus efficace aux sollicitations externes, améliorant ainsi la sécurité et la longévité des structures.

Au cœur de cette symphonie d'innovation, les alliages à mémoire de forme (AMF), incarnant une révolution potentielle dans les systèmes de contrôle passifs, prennent place. Ces matériaux intelligents, portés par des alliages innovants tels que le NiTi (Nitinol), ouvrent des perspectives infinies pour renforcer la robustesse des structures et marquer une nouvelle ère dans la conception structurelle avancée. Les AMF, avec leurs propriétés uniques de superélasticité et de mémoire de forme, permettent aux structures de retrouver leur configuration initiale après déformation, offrant une solution robuste face aux charges sismiques et dynamiques. Leur capacité à absorber et dissiper l'énergie sismique réduit significativement les risques de dommages structurels, assurant une protection accrue des infrastructures critiques.

La thèse de doctorat à venir, aspire à explorer de manière exhaustive les nombreuses variables influençant ces systèmes complexes. Elle étudie d'abord les structures intelligentes ensuite procure une compréhension de certains éléments sur les alliages à mémoire de forme en se basant sur les travaux déjà entrepris par les chercheurs Benkraled .I et al [1] Elle met en lumière les implications profondes des AMF, en s'appuyant sur des analyses transitoires et modales. L'utilisation de la méthode des éléments finis pour la modélisation et du logiciel ANSYS pour les simulations enrichit ces analyses, permettant une compréhension approfondie du comportement dynamique des structures intelligentes. ANSYS, par ses capacités de simulation avancées, offre un cadre rigoureux pour modéliser les interactions complexes entre les matériaux et les structures sous diverses conditions de charge.

L'objectif fondamental de cette thèse est de constituer une contribution monumentale à l'amélioration des normes en matière de conception et de mise en œuvre d'infrastructures résilientes. Mais comment vont agir AMF ? Et la problématique est comment rendre ces alliages efficaces

dans le domaine du génie civil. Cette contribution anticipe et surmonte les aléas naturels, dont les séismes représentent l'apogée de la complexité auxquels le génie civil doit faire face. La capacité des AMF à subir des déformations significatives tout en conservant leur intégrité structurelle offre une nouvelle dimension de résilience et de durabilité pour les infrastructures. Cette thèse s'inscrit humble ajout dans la fresque colossale des structures intelligentes, où l'intégration symbiotique de techniques de contrôle de pointe, d'analyses transitoires et modales, et de matériaux intelligents promet de hisser la durabilité et la sécurité des infrastructures à des sommets sans précédent.

Cette thèse aspire à définir une trajectoire novatrice qui transcende les frontières traditionnelles de la discipline. L'implémentation de tels matériaux pourrait également entraîner des économies substantielles en termes de coûts de maintenance et de réparation, tout en augmentant la durée de vie des structures.

Plusieurs cas antérieurs ont été traités par les chercheurs Hamdaoui et al[2] tel que l'utilisation des AMF dans la mosquée el Ajloun dans laquelle ils ont utilisé 4 et 8 AMF pour réduire la réponse sismique en terme de contrainte de déplacement et d'accélération , Les chercheurs Caciati et Hamdaoui [3] ont aussi travaillé sur un isolateur qui a été équipé d'AMF pour modifier la fréquence . Le contrôle de la santé des structures est aussi un autre axe des structures intelligentes qui a été étudié par Rodrigues.h et al [4] ainsi que les chercheurs Tabrizikahou et al [5] , qui ont travaillé sur les murs en maçonnerie et les alliage de forme dont de nombreux travaux ont été cités dans cette thèse de doctorat. Ces études antérieures constituent une base solide, offrant des insights précieux sur les approches et les résultats obtenus dans le renforcement des structures intelligentes. Les contributions de ces chercheurs ont permis d'affiner les modèles et les méthodes d'analyse, facilitant ainsi une meilleure compréhension et une application plus efficace des technologies de contrôle intelligent.

Le premier chapitre de cette thèse offre un aperçu général sur la sismicité spécifique de l'Algérie, notamment dans la zone nord du pays où les séismes sont plus fréquents. Ce contexte géographique particulier impose des exigences spécifiques en matière de conception et de renforcement des structures, soulignant l'importance des solutions avancées telles que les AMF pour garantir la résilience des infrastructures. Les règles parasismiques étudiées dans ce chapitre fourniront une base essentielle pour comprendre les défis spécifiques liés à la conception et à la mise en œuvre de structures résistantes aux séismes.

Le deuxième chapitre plonge au cœur des notions fondamentales des structures intelligentes, détaillant les différents types de contrôle, passif et actif, et mettant en lumière leurs avantages et différences. Cette section fournit également des informations approfondies sur les AMF, qui seront au centre de cette recherche. Les AMF, grâce à leur capacité à s'adapter aux changements de charge et à absorber l'énergie, représentent une avancée significative dans le domaine de la construction durable et résiliente. Les caractéristiques des AMF, telles que la transition de phase et la réponse thermique, seront également explorées pour mieux comprendre leur fonctionnement et leur efficacité.

Le troisième chapitre propose un état de l'art sur l'utilisation des contrôles passifs en Algérie et dans le monde. Il met en lumière les progrès réalisés par ces systèmes intelligents au fil du temps, grâce au travail acharné des chercheurs. Cette rétrospective est essentielle pour comprendre les développements actuels et futurs dans le domaine des structures intelligentes. Les études de cas internationales fourniront des exemples concrets de l'application des technologies de contrôle passif et actif, illustrant les avantages et les défis associés à leur mise en œuvre.

Le quatrième chapitre se concentre sur une analyse non linéaire d'un mur en maçonnerie soumis à un chargement croissant, suivi d'un déchargement. L'objectif de cette étude est d'examiner les contraintes et les déformations du mur à son état initial, comparées à celles d'un mur équipé d'AMF. Cette analyse vise à démontrer l'efficacité des AMF dans la réduction des efforts, en utilisant la modélisation avec le logiciel ANSYS APDL. Les simulations permettront d'observer le comportement du mur sous diverses conditions de charge, et d'évaluer la performance des AMF dans l'amélioration de la résilience structurelle. Les résultats de cette étude fourniront des données précieuses pour la conception de structures renforcées avec des AMF, offrant des recommandations pratiques pour leur application dans des environnements sismiques.

Le cinquième chapitre présente une analyse dynamique du minaret d'une mosquée située dans la ville de Mostaganem, autrefois une église, qui a une hauteur de 30,2 mètres. Ce chapitre se penche sur le contrôle passif, mettant en évidence les effets des AMF dans la réduction de la réponse sismique, tout en variant le nombre et la position des alliages. La modélisation, réalisée avec ANSYS APDL, débutera par une analyse modale, suivie d'une analyse transitoire. Plusieurs configurations des AMF seront étudiées pour déterminer l'emplacement et le nombre optimal d'alliages nécessaires pour maximiser l'efficacité du renforcement. Les différentes configurations étudiées incluront l'utilisation de 4 AMF à la base, puis l'ajout de 2 AMF supplémentaires au sommet, ainsi que l'installation de 4 AMF à une hauteur de 24 mètres. Ces configurations seront comparées pour évaluer leur performance en termes de réduction des contraintes, des déformations et des déplacements.

Ces divers chapitres tissent un canevas exhaustif, mettant en évidence la pertinence des avancées scientifiques dans le domaine des structures intelligentes, en particulier en Algérie, et démontrant la contribution cruciale des alliages à mémoire de forme dans l'amélioration de la résilience et de la performance des structures face aux contraintes sismiques. Les conclusions de cette thèse offriront des recommandations pratiques pour l'implémentation des AMF dans les infrastructures existantes et futures, contribuant ainsi à un environnement bâti plus sûr et plus durable. En outre, l'étude des implications socio-économiques permettra de mieux comprendre l'impact global des structures intelligentes sur la société et l'économie, ouvrant la voie à une nouvelle ère où les structures intelligentes deviennent la norme dans le monde du génie civil.

Les perspectives offertes par les structures intelligentes sont vastes et prometteuses. En plus des avantages évidents en termes de résilience et de durabilité, ces avancées technologiques ouvrent également de nouvelles possibilités en matière de conception architecturale et de

fonctionnalité structurelle. Les structures intelligentes peuvent être conçues pour s'adapter aux conditions environnementales changeantes, offrant des solutions innovantes pour les défis posés par le changement climatique et l'urbanisation croissante. De plus, l'intégration de technologies intelligentes dans les infrastructures existantes peut permettre une gestion plus efficace des ressources et une réduction de l'empreinte carbone des bâtiments et des infrastructures.

La thèse explore de manière exhaustive les multiples facettes des structures intelligentes, mettant en lumière les avancées technologiques et les implications socio-économiques de ces innovations. Elle offre une contribution significative à la compréhension et à l'application des AMF dans le domaine du génie civil, ouvrant la voie à des infrastructures plus résilientes, durables et adaptatives. Par ces travaux, la thèse aspire à transformer le paysage du génie civil, propulsant la discipline vers un avenir où les structures intelligentes deviennent la norme, assurant ainsi la sécurité et la durabilité des infrastructures pour les générations futures.

## Références

- [1] Benkraled, M. I., & Benadla, Z. (2021). Introduction of the strain rate and cyclic loading effects on shape memory alloys constitutive law models. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00412-w>
- [2] Hamdaoui, K.; Benadla, Z.; Chitaoui, H.; Benallal, A. *Dynamic Behavior of A Seven Century Historical Monument Reinforced by Shape Memory Alloy Wires. Smart Struct. Syst.* 2019, 23, 337–345
- [3] Casciati, F., Faravelli, L., & Hamdaoui, K. (2007). Performance of a base isolator with shape memory alloy bars. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 6(4), 401–408. <https://doi.org/10.1007/s11803-007-0787-2>
- [4] Rodrigues, H., & Duvnjak, I. (n.d.). *Advanced Structural Health Monitoring From Theory to Applications*. [www.mdpi.com/journal/applsci](http://www.mdpi.com/journal/applsci)
- [5] Tabrizikahou, A., Kuczma, M., & Łasecka-Plura, M. (2022). Out-of-Plane Behavior of Masonry Prisms Retrofitted with Shape Memory Alloy Stripes: Numerical and Parametric Analysis. *Sensors*, 22(20). <https://doi.org/10.3390/s22208004>

# Chapitre 1 : Sismologie et activité sismique de l'Algérie

## 1.1. Introduction

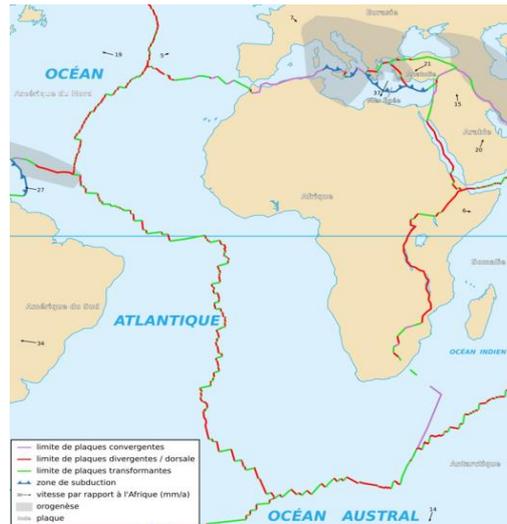
Selon les lois de comportement classiques, un matériau rigide, soumis à des contraintes de cisaillement, subit initialement une déformation élastique. Une fois sa limite plastique atteinte, il passe à la rupture, libérant instantanément l'énergie accumulée pendant la déformation élastique. Ce processus peut se produire dans la lithosphère (écorce terrestre), constamment soumise à des contraintes dues au mouvement des plaques tectoniques, telles que les chocs interplaques ou les "craquements" intraplaques. Lorsque la limite d'élasticité est dépassée en certains endroits de la lithosphère, des ruptures d'équilibre se produisent sous l'effet du mouvement, libérant brusquement l'énergie potentielle accumulée dans les roches de l'écorce et générant des séismes de diverses magnitudes le long des failles.

## 1.2. Activité sismique de l'Algérie

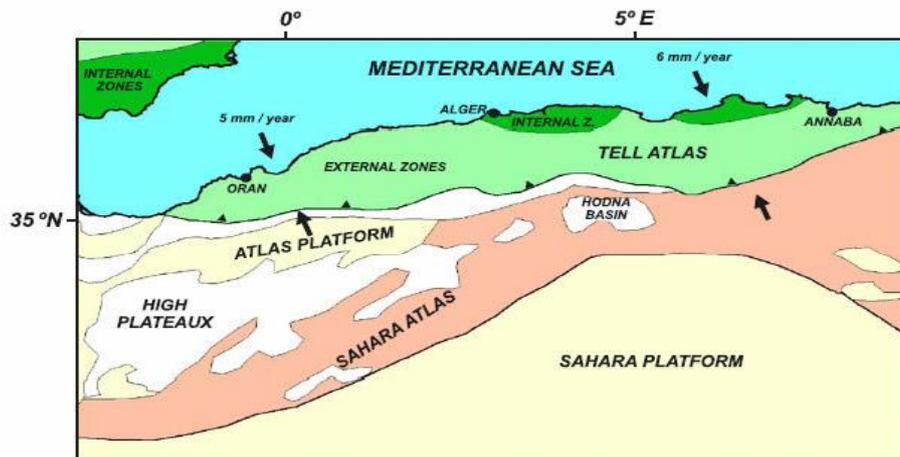
Une activité sismique significative est concentrée dans les zones côtières de l'Algérie et en mer Méditerranée. La compression tectonique entre les plaques africaine et eurasiennne crée de nombreuses failles actives, déclenchant des séismes de diverses intensités le long de la côte nord de l'Algérie. Selon les explications, "Cette côte est traversée par une limite convergente de plaques lithosphériques continentales : la plaque eurasiennne, au nord, chevauche la plaque africaine au sud. C'est le long de cette faille de chevauchement que se produisent les séismes dans la région."

L'Algérie est géologiquement divisée en deux plaques tectoniques séparées par la faille sud-atlasique. Au nord, nous trouvons la tectonique alpine, tandis qu'au sud, la plate-forme saharienne offre une relative stabilité. Historiquement, cette région est reconnue comme étant très active sur le plan sismique. Des études menées après le séisme d'El Asnam (actuellement Chlef) en 1980 ont révélé des traces d'anciens séismes ayant affecté la région. Selon le CRAAG (Centre de Recherche Astronomie Astrophysique et Géophysique)[1], l'activité sismique au nord de l'Algérie est connue depuis le 2 janvier 1356, date du séisme d'Alger.

Depuis lors, de nombreux séismes ont été enregistrés, et la zone du nord de l'Algérie peut être brièvement décrite en incluant, du nord au sud, les principaux domaines structuraux tels que le Tell (Tell d'Atlas), les hauts plateaux, l'Atlas du Sahara (Système Montagneux d'Atlas), et la Plate-forme du Sahara (Figure 1.1 et 1.2).



**Figure1. 1** La faille entre les plaques tectoniques africaine et eurasiennne passe par tout le littoral algérien[2].



**Figure1. 2** Carte schématique montrant les principales tectoniques et les domaines géologiques dans le Nord de l'Algérie (modifié d'après [3])

La tectonique de cette région a été examinée dans diverses études, dont celles de [4], [5], [6]. Actuellement, le Tell fait partie de l'ensemble montagneux des Alpes, englobant les montagnes Bétiques espagnoles à l'ouest et les Alpes italiennes à l'est. Ces montagnes se composent d'une succession de vallées (bassins sédimentaires) et de crêtes formées par des plissements et des emboîtements. La direction principale de l'emboîtement est orientée vers le sud et le sud-est. La zone des hauts plateaux est située entre le centre de l'Atlas, le Tell et l'Atlas saharien actuelles », IVème Contrat de Plan Etat Région "Risques naturels et nuisances".

### 1.2.1. Activité sismique dans la partie Nord

La région du Nord de l'Algérie, en particulier sa partie centrale, est caractérisée par une structure tectonique active, où la plaque africaine entre en collision avec la plaque eurasiennne. Ces collisions créent une zone de compression, manifestée par une série de failles en poussée et normales. Cette région est reconnue comme étant la zone sismique la plus active dans la région méditerranéenne occidentale.

Historiquement, cette zone a connu une sismicité notable et a été le théâtre de plusieurs séismes destructeurs, tels que celui de 1365, qui a complètement détruit la ville d'Alger. D'autres tremblements de terre importants incluent ceux de 1716 (20 000 morts), 1887, 1910, 1922 et 1934 [1]. Plus récemment, plusieurs séismes de magnitude modérée ont été enregistrés dans cette région ces dernières années [6].

Parmi les séismes violents, on peut citer le séisme d'El Asnam (actuellement Chlef) en septembre 1954 avec une magnitude de 6,7 (environ 1000 morts), et en octobre 1980 avec une magnitude de 7,1 (environ 3000 morts). D'autres régions ont également été touchées, notamment Constantine en octobre 1985, Tipasa en octobre 1989, Mascara en août 1994, Alger en septembre 1996, Aïn Témouchent en décembre 1999 (magnitude 5,7), Beni Ourtilane en novembre 2000 (magnitude 5,6). Plus récemment, un séisme de magnitude 6,8 a frappé la ville de Boumerdès le 21 mai 2003, causant environ 2300 décès. Le dernier séisme meurtrier enregistré en Algérie est celui de M'sila en mai 2010.

Une liste des tremblements de terre importants dans le pays depuis 1365 jusqu'à aujourd'hui est récapitulée dans le tableau suivant.

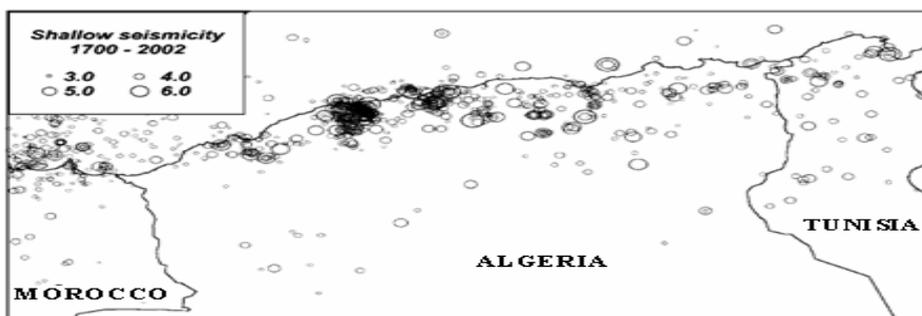
**Tableau1. 1** Liste des principaux séismes en Algérie.

03 Janvier 1365	: Alger était détruite totalement, 100 répliques dans la nuit.
03 Février 1716	: Intensité X à Alger, 20000 morts.
09 Octobre 1790	: Intensité X à Oran, 3000 victimes.
Mars 1819	: Intensité X à Mascara, beaucoup de victimes.
02 Mars 1825	: Intensité X à Blida, 7000 morts.
09 Février 1850	: Intensité VIII à Zemmoura.
22 Novembre 1851	: Intensité VII-VIII à Mascara.
22 Août 1856	: Intensité IX à Jijel, VIII à Béjaia.
02 Janvier 1867	: Intensité X-XI à Mouzaia, 100 morts
16 Novembre 1868	: Intensité IX à Biskra.
19 Janvier 1885	: Intensité VIII à N'gaous (Batna).
08 Janvier 1887	: Intensité VIII à EL Mansoura.
29 Novembre 1887	: Intensité IX-X, magnitude de 6.5-7.5 à Collo, 20 morts.
06 Janvier 1888	: Intensité VIII à Mouzaia.
15 Janvier 1891	: Intensité X, magnitude de 7.5 à Gouraya, 38 morts.
11 Mars 1908	: Intensité VII-VIII à Blida.
04 Août 1908	: Intensité VIII, magnitude de 5.1 à Constantine.
24 Juin 1910	: Intensité VIII-X, magnitude de 6.4-6.6 à Sour El-Gouzlène,
	30 morts.
06 Août 1912	: Intensité VI, magnitude de 5.3 à Oued Marsa.
25 Août 1922	: Intensité IX-X, magnitude de 5.1 à Bordj Abou Hassan, 02morts.
16 Mars 1924	: Intensité IX, magnitude de 5.6 à Batna, beaucoup de morts.
05 Novembre 1924	: Intensité VIII, magnitude de 5.0 près d'Alger.
10 Juin 1925	: Intensité VIII près de Boghar.
24 Août 1928	: Intensité VIII, magnitude de 5.4 à Oued Rhiou.
15 Août 1931	: Intensité VIII, magnitude de 4.9 à Djebel Dira.

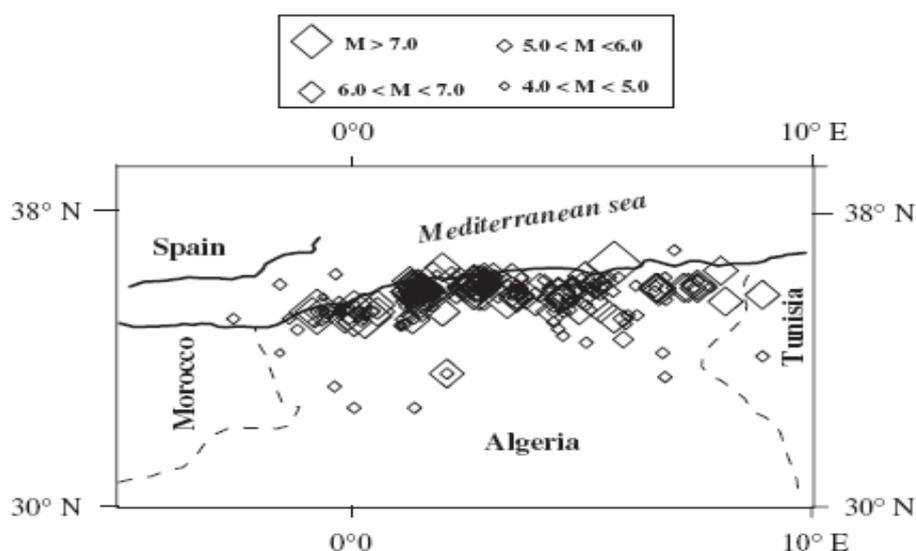
07 Septembre 1934	: Intensité VII-IX, magnitude de 5.0 à EL-Abadia, pas de mort.
19 Septembre 1935	: magnitude de 5.1 près de Chetaibi.
10 Février 1937	: Intensité VIII, magnitude de 5.4 près de Guelma.
16 Avril 1943	: Intensité IX, magnitude de 4.0 près d'EL-Mansoura, beaucoup de victimes.
12 Février 1946	: Intensité VIII-IX, magnitude de 5.6 à la montagne de Hodna.
06 Août 1947	: Intensité VIII-IX, magnitude de 5.3 à Oued Hamimine, beaucoup de victimes.
13 Mars 1948	: Intensité VIII, magnitude de 4.9 à Asla, 01 mort.
17 Février 1949	: Intensité VIII, magnitude de 4.9 près de Kherrata.
20 Avril 1950	: Intensité VI-VIII, magnitude de 5.1 près d'Aflou.
05 Juillet 1953	: Intensité VIII, près d'Ain Bessam.
29 Août 1953	: Intensité VIII-IX à la montagne de Hodna, 01 mort.
09 Septembre 1954	: Intensité X, magnitude de 6.7 à Chlef, 1243 morts, et 20000 maisons détruites.
10 Septembre 1954	: Intensité IX, magnitude de 6.2, une réplique à Chlef.
04 Février 1955	: Intensité VIII, une réplique à Chlef.
08 Mai 1955	: Intensité VIII à Béni Haoua.
05 Juin 1955	: Intensité VIII, magnitude de 5.7 à Béni Rached.
14 Février 1956	: Intensité VI-VII, magnitude de 5.9 à Bordj Abou Hassan.
28 Juin 1957	: Intensité VII, magnitude de 5.0 à Sendjas.
24 Mai 1959	: Intensité VII-VIII, magnitude de 5.5 à Zemmoura El-Ghenzet.
07 Novembre 1959	: Intensité VIII, magnitude de 5.5 à Boumedfâa.
12 Février 1960	: Intensité VIII-IX, magnitude de 5.6 à Béjaïa, 264 morts, 112 blessés et 1000 maisons détruites.
21 Février 1960	: Intensité VIII, magnitude de 5.6 à Melouza (M'sila), 47 morts et 88 blessés.
02 Décembre 1961	: magnitude de 5.5 à Annaba (en mer).
04 Septembre 1963	: magnitude de 5.7 près de Sétif, 01 mort et 100 blessés.
01 Janvier 1965	: magnitude de 5.5 à M'Sila, 5 morts et 24 blessé et 1304 maisons détruites.
13 Juillet 1967	: Intensité VII, magnitude de 5.1 à Sig, 10 morts et 15 blessés.
28 Février 1968	: Intensité VIII, magnitude de 4.9 à El-Alen, 01 mort et 4 blessés.
05 Février 1971	: magnitude de 5.9 à Aménas.
23 Février 1971	: Intensité VIII, magnitude de 4.9 à Rouina.
25 Février 1971	: magnitude de 5.4 à Asla.
11 Mars 1973	: magnitude de 5.7 sur la côte, près de Tènes.
24 Novembre 1973	: Intensité VII, magnitude de 5.1 à Bordj Bou-Arreridj, 4 morts, 50 blessés.
25 Novembre 1973	: Intensité VII, magnitude de 4.9 à Guenzet.
28 Juillet 1974	: Intensité VII, magnitude de 5.0 à Sétif.
09 Novembre 1974	: Intensité VIII, magnitude de 4.1 au sud de Béjaïa.
11 Juillet 1975	: Intensité VIII, magnitude de 5.0 à Sétif, 01 morts, 18 blessés.
10 Octobre 1980	: Intensité X à XI, magnitude de 7.5 à Béni Rached (Chlef), 2633 morts, 8369 blessés, 70% d'habitation était détruites.
10 Octobre 1980 (1 heure plus tard)	: première réplique magnitude de 6.5 à Béni Rached.
08 Novembre 1980	: Magnitude de 5.7 à Béni Rached.
19 Avril 1981	: Magnitude de 4.8 à Oran, Arzew.

30 Juin 1981	: Magnitude de 4.5 à Ain Bénian, Chéraga et Staoueli.
23 Mai 1982	: Magnitude de 4.5 à Bordj Ménaïel.
15 Novembre 1982	: Magnitude de 4,8 dans la région de Tiaret.
28 Septembre 1983	: Magnitude de 4.4 dans la région de Teniat El-Hade.
10 Novembre 1983	: Magnitude de 4.5 à la région de Relizane.
07 Décembre 1983	: Magnitude de 4.5 à Alger, Staoueli, Zéralda.
20 Décembre 1983	: Magnitude de 4.7 à Constantine, Skikda.
15 Juin 1984	: Magnitude de 4.5 à Gouraia, Tènes.
05 Octobre 1984	: Magnitude de 4.5 à Oum El-Bouaghi.
05 Mars 1985	: Magnitude de 4.8 à la région de Tiaret.
07 Septembre 1985	: Magnitude de 4.7 à Relizane et Chlef.
27 Octobre 1985	: Intensité VIII, Magnitude de 5.9 à Constantine, 10 mort, 300 blessés.
Janvier 1986	: Magnitude de 4.6 à Blida, El-Affroun et Mouzaia.
28 Mars 1986	: Magnitude de 4.5 à Constantine.
20 Mai 1986	: Magnitude de 4.8 à Batna, Constantine.
04 Novembre 1986	: Magnitude de 4.5 à Ain Defla.
19 Décembre 1986	: Magnitude de 4.7 à Blida, Alger.
26 Janvier 1987	: Intensité VI-VII à Bordj Bounaama (Tissemsilt), 01 mort, plusieurs blessés, quelques maisons gravement endommagé.
28 Février 1987	: Intensité V, magnitude de 4.6 à Tissemsilt.
24 Juillet 1987	: Intensité V, magnitude de 4.3 à la région de Médéa.
31 Octobre 1988	: Intensité VII, magnitude de 5.4 à El-Afroun, Boumedfâa, plusieurs dégâts (écoles, habitations et hôpitaux), plus de 500 familles sinistrés et 3 blessés.
12 Février 1989	: Intensité V, magnitude de 4.9 à Alger et Blida.
29 Octobre 1989	: Intensité VIII, magnitude de 6.0 à Chenoua (Tipaza), 22 morts.
18 Août 1994	: Intensité VII, magnitude de 5.6 à Mascara.
04 Septembre 1996	: Intensité VII, magnitude de 5.8 à Alger.
22 Décembre 1999	: Intensité VII, magnitude de 5.7 à Aint-Temouchent, 28 morts.
10 Novembre 2000	: Intensité VII, magnitude de 5.4 à Béni-Ouartilane (Tizi-Ouzou), 02 morts.
21 Mai 2003	: Intensité X, magnitude de 6.8 à Boumerdes, et la région de la capitale Alger, 2300 morts.
14 Mai 2010	Magnitude de 5.2 à M'sila, 02 morts et une vingtaine de blessés
1er août 2014	Alger, M=5.6, 06 morts et 400 blessés I= VI
18 mars 2021	Bejaia, M= 6.0, aucun dégâts.

L'analyse de la distribution des épacentres au cours des trois derniers siècles, conduit à une conclusion que les tremblements de terre en Algérie se produisent principalement dans certaines zones de couche de Tell. Cependant, quelques séismes apparus dans les hauts plateaux et dans le large d'Atlas du Sahara (Figure 1.3 et 1.4).



**Figure1. 3.** Les tremblements de terre passés en Algérie (1700-2002) [7].



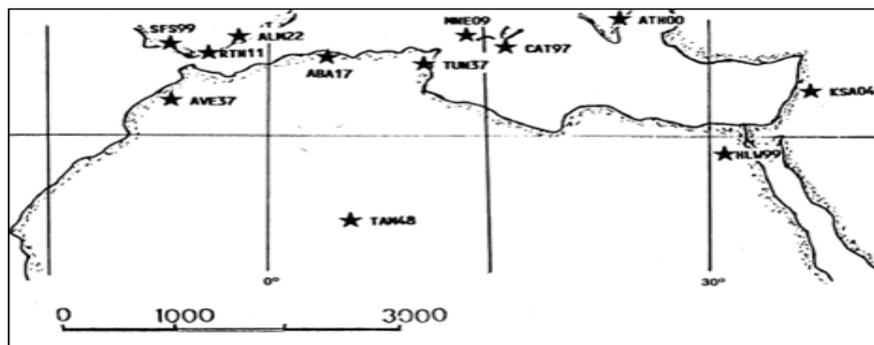
**Figure1. 4.** Carte de séismicité de l'Algérie pour la période (1365-1992) [7].

Selon Aoudia.A et al [5], l'analyse de la sismicité indique également que les zones sismo-géniques se situent aux abords des bassins du Quaternaire. Ces zones tectoniques, en corrélation avec les zones où l'on trouve des dépôts néogènes et quaternaires, s'étendent du bassin Messeta (région d'Oran) dans le Tell de l'Ouest, au centre du bassin de Mitidja (Tipaza-Alger) près de l'Atlas Blidéen (à partir de la ville de Blida), et se prolongent vers les bassins de Soumam, Constantine et Guelma dans la partie orientale, ainsi que dans le bassin du Hodna dans le Sud-Est.

### 1.3. Réseau Algérien d'accélérographe

Les enregistrements sismiques dans la région de l'Afrique du Nord ont débuté au 19<sup>e</sup> siècle avec des instruments très limités. Le premier instrument de la région a été installé à Bouzaréah (Alger) en 1917 [8] et [7].

La plupart des stations sismographiques couvrant les pays du Maghreb étaient opérationnelles dans le sud de l'Europe. La répartition des stations sismographiques qui fonctionnaient en Afrique du Nord et dans les régions avoisinantes avant 1955 est présentée dans la figure 1.5.



**Figure1. 5.** Répartition des stations sismographiques [7]

Pendant la période 1899-1919, les premiers instruments installés étaient les sismographes de Milne, principalement non-amortis, de courte période (10-20 secondes), et à faible amplification. Ces instruments manquaient de précision temporelle. Les sismographes de Milne enregistraient principalement les ondes de surface et ne pouvaient pas fournir de manière fiable les phases des ondes P et S, ce qui rendait difficile l'estimation des temps d'origine et, par conséquent, la localisation précise nord-sud. Bien que les emplacements instrumentaux semblent corrects à quelques dizaines de kilomètres pour certains événements majeurs, ils étaient trop rudimentaires pour être utilisés au-dessus des épicentres macrosismiques.

Entre 1920 et 1960, et surtout dans les premières années, les pendules non amorties de Milne ont été progressivement remplacées par un nombre croissant d'instruments amortis de période plus courte. Le nouveau matériel avait une sensibilité plus élevée, fournissant des lectures plus fiables des phases des ondes P et S, ce qui améliorait la précision des calculs. Cette période a vu une amélioration des capacités du réseau de stations sismologiques dans la région, notamment avec l'installation de stations locales à Tamanrasset (1948), Relizane (1955) et Sétif (1957).

Depuis 1961, avec la mise en place du réseau sismographique standard mondial (WWSSN), la qualité des données, à la fois en termes de précision et de nombre d'enregistrements sismiques, s'est considérablement améliorée. L'introduction d'instruments avancés et l'amélioration des techniques de localisation (déterminations informatiques) ont été clairement démontrées par le nombre de tremblements de terre signalés, par la concordance précise des positions épicentrales fournies par différentes stations sismologiques, ainsi que par la multiplication des paramètres sources disponibles. Cette période a également été marquée par le développement de réseaux sismographiques nationaux en Algérie, passant d'une seule station en 1917 à 2 en 1948, 4 en 1957, 9 en 1990, et 200 en 2003.

Suite au séisme catastrophique d'El Asnam en 1980, les autorités algériennes ont initié en 1982 un projet d'installation d'un réseau sismographique national de télémétrie dans la partie nord du pays. Les instruments, reçus en 1986, sont en cours d'installation, avec le "Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique (GRAAG)" chargé de l'exploitation du réseau. Ce réseau national est subdivisé en quatre réseaux régionaux : Oran, Chlef, Alger et Constantine. Ces quatre réseaux régionaux sont connectés à la station principale à Bouzaréah (Alger). En 1987, le "Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS)" a été créé pour mener des enquêtes et des activités de recherche dans le domaine de la réduction des risques

sismiques, construire des laboratoires de recherche et d'essais, et assister les bureaux d'ingénierie et les institutions concernées. Les deux centres (GRAAG et CGS) ont été équipés d'un nombre important d'accéléromètres installés en plein air et dans des bâtiments spéciaux.

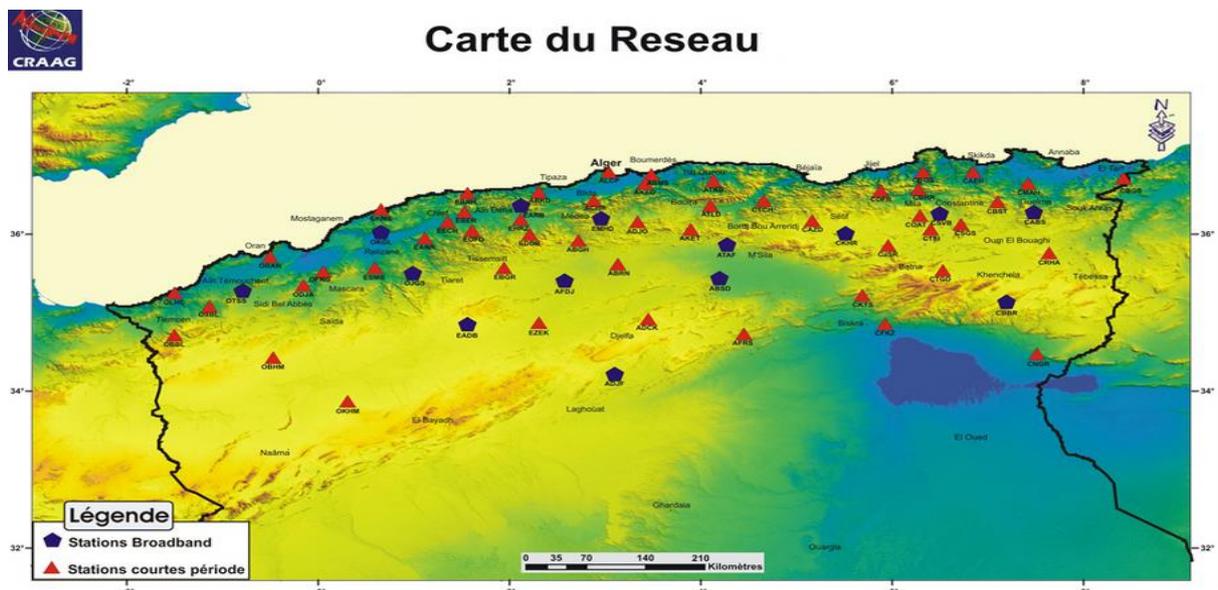
En 1998, le CRAAG procéda à la réinstallation de près de 35 stations du réseau téléométré ce qui lui permit ainsi de surveiller correctement l'activité sismique du pays et de faire face à la crise sismique de Boumerdes où près de 5000 secousses ont été enregistrées.

Le développement de la technologie imposa au CRAAG de se doter d'un nouvel équipement de surveillance dans le but de renforcer la surveillance du territoire.

C'est ainsi que le CRAAG acquies en 2006 un réseau de surveillance de près de 45 stations dont 10 stations BB.

Actuellement, le réseau compte 335 stations d'accéléromètres avec trois composantes, dont 218 sont déjà installées en plein air et 30 dans des structures (bâtiments, barrages, etc...) (voir la figure 2.8). Le réseau a été acquis en trois étapes : i) Après le séisme d'El Asnam en 1980, 90 accéléromètres analogiques de type SMA-1 ont été principalement installés en plein air ; ii) En 1990, 80 accéléromètres analogiques de type SMA-1 et 40 accéléromètres numériques de type SSA-1 ont été ajoutés pour renforcer le réseau existant, avec un accent accru sur les structures (bâtiments, barrages) ; et iii) 125 accéléromètres numériques de type ETNA ont été ajoutés en 2002-2003 et sont actuellement installés.

De 2006 jusqu'à l'heure actuelle le réseau de surveillance sismique algérien est composé des 35 stations du réseau téléométré et des 45 stations digitales acquies récemment. Ce réseau couvre aujourd'hui la plus grande partie de région nord du pays, là où se produit la plus grande activité du pays mais aussi dans la région de Tamanrasset où une station est localisée au niveau de l'Observatoire de Tamanrasset.( figure 1.6.)



**Figure1. 6.** Réseau national d'accélérographe, avec les limites administratives régionales. Les nombres entre parenthèses à côté des triangles remplis représentent le nombre de stations installées dans la région. [8]

#### 1.4. Les principaux séismes historiques en Algérie

En raison de leur impact dévastateur, trois tremblements de terre particulièrement mémorables pour les Algériens sont succinctement exposés ici.

##### 1.4.1. Le séisme de Boumerdes 2003

Ce séisme, le plus récent, a eu lieu le 21 mai 2003. Caractérisé par une intensité de X et une magnitude  $M_w$  de 6,8, il a entraîné la perte de 2300 vies, blessé 11 450 personnes, laissant environ 182 000 personnes sinistrées et provoqué d'importants dégâts matériels [10]. Les séquelles de cette catastrophe sont encore visibles dans la ville touchée et parmi ses habitants.

Des répliques sismiques importantes ont été enregistrées, notamment celles au site de Kaddara, situé au Sud-Est de la capitale Alger et à 20 km de l'épicentre (figure 1.7). L'accélération maximale enregistrée au site de Kaddara était de  $PGA=0,58g$  à la station Keddara2 dans la direction Est-Ouest, comparée à une valeur de  $PGA=0,34g$  à la station Keddara1. Ces deux stations sont distantes de seulement 150 m l'une de l'autre. La fréquence centrale pour les deux signaux était d'environ 5 Hz. Cette différence significative s'explique par l'effet du site [7]. Les données de ces événements ont été obtenues à partir des enregistrements du réseau du Centre National de Génie Sismique (CGS) d'Alger.

La figure 1.8 présente les accélérations enregistrées à la station Kaddara 2, qui a enregistré la plus grande PGA par rapport aux autres stations du réseau d'accéléromètres algériens. Le pic d'accélération a atteint 0,58g dans la direction horizontale, composante Est-Ouest, et 0,35g pour la composante Nord-Sud, tandis qu'il était de 0,22g pour la composante verticale.

Les amplitudes de Fourier correspondantes à ces enregistrements sont également présentées sur la figure 1.9 Ces amplitudes indiquent que les amplifications sont plus prononcées dans la direction Est-Ouest que dans la direction Nord-Sud. Cependant, les amplitudes correspondant à la composante verticale révèlent un mouvement atténué.

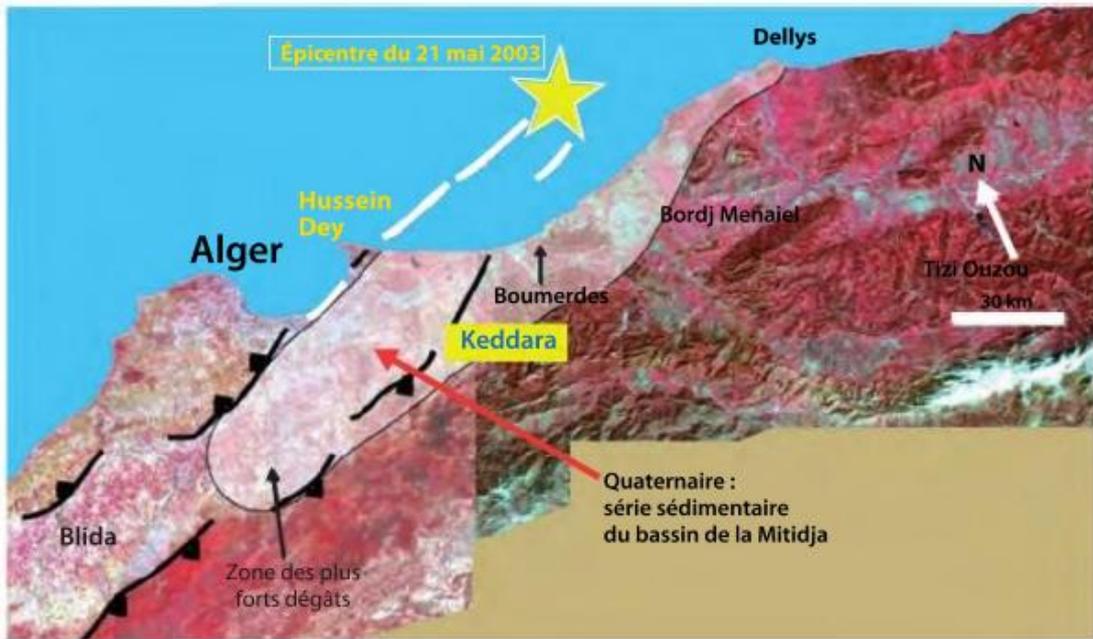
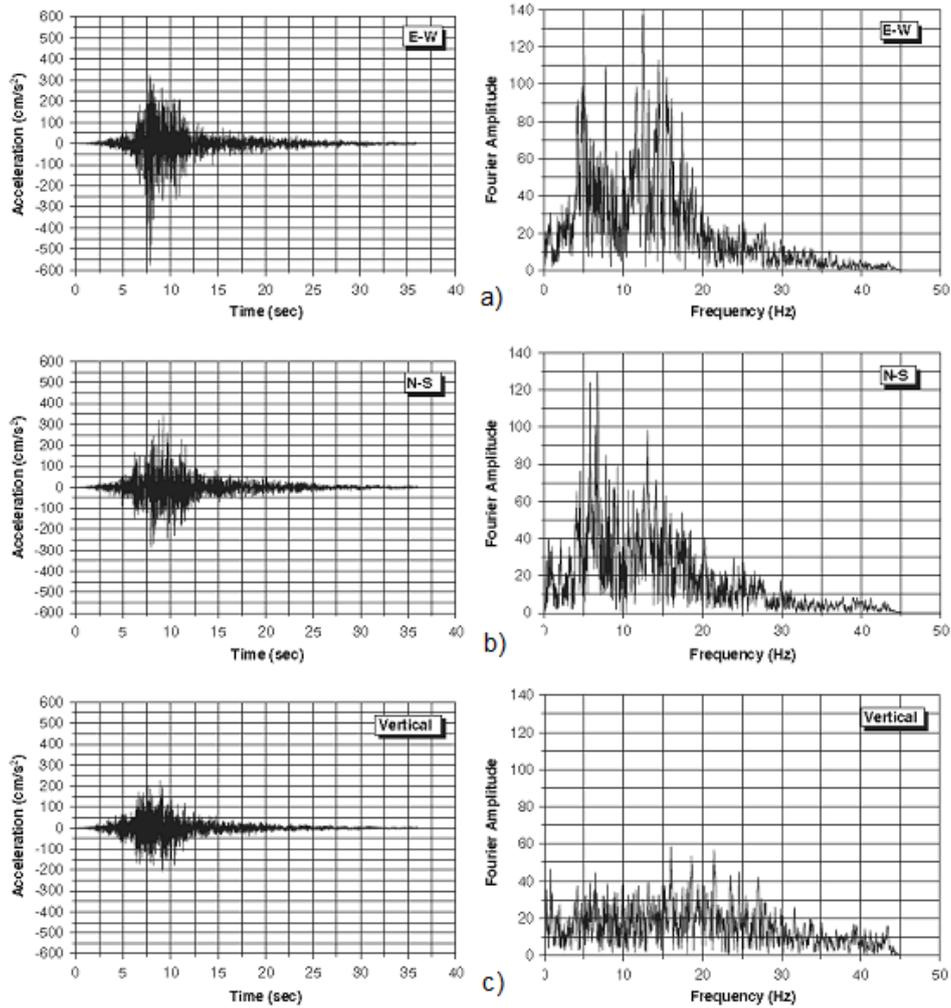
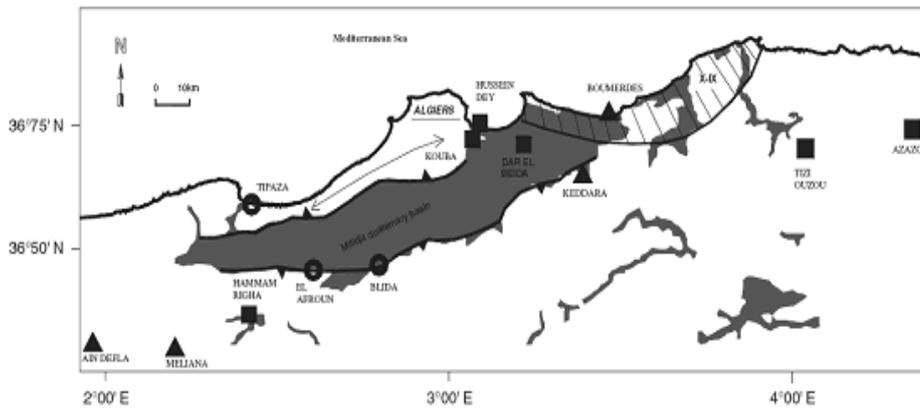


figure 1. 7. Séisme de Boumerdes [11]



**Figure1. 8.** L'accélération du champ libre et les amplitudes de Fourier au site de Keddara2 pour le séisme de Boumerdès [12]

a) Composante Est-Ouest, b) Composante Nord-Sud, c) Composante verticale



**Figure1. 9.** Les stations installées dans la région du centre du pays [7].

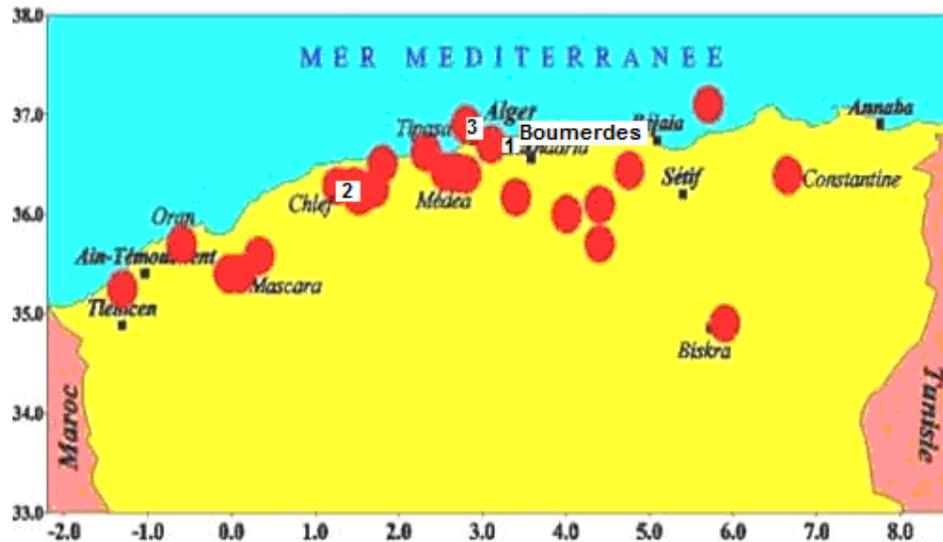
#### 1.4.2. Le séisme d'El-Asnam en 1980

Le deuxième événement, survenu il y a 43 ans en 1980, a eu des conséquences catastrophiques et a jeté les bases des réglementations dans le code parasismique algérien. Se produisant le 10 octobre 1980, il a été caractérisé par une intensité de X à XI et une magnitude MS de 7,5. Les dégâts ont été dévastateurs, avec 2633 décès, 8369 blessés et la destruction de 70% des habitations [11].

#### 1.4.3. Le séisme d'Alger en 1716

Le séisme d'Alger, survenu le 3 février 1716, a été caractérisé par une intensité de X, entraînant la perte de 20 000 vies.

En effet, à partir de ces données historiques, la figure 1.10 présente les principaux séismes historiques en Algérie.



**Figure1. 10.** La distribution des séismes majeurs dans l'histoire de l'Algérie [12].

1) Boumerdes 2003, 2) L'Asname (Chlef) 1980, 3) Alger 1716.

## 1.5. Règlement Parasismique Algérien (R.P.A)

### 1.5.1. Introduction

Le premier code sismique en Algérie a été élaboré par les Français en 1955. Ce code a été utilisé lors de la reconstruction dans la région sinistrée et a divisé l'ensemble du pays en deux zones sismiques : "A" pour la sismicité faible et "B" pour l'activité sismique élevée (de la partie nord du Maroc aux frontières tunisiennes). Ces règlements ont été révisés en 1969, intégrant davantage de règles générales sismiques inspirées de la réglementation française moderne "PS 69". En 1976, le CTC (Organisme National de Contrôle Technique de Construction) a établi un accord avec l'Université de Stanford afin de créer un nouveau code prenant en compte plus précisément les paramètres spécifiques de construction en Algérie (carte de microzonage, techniques de construction locales, etc.).

Ce projet de code était prêt en 1979 et était en cours de discussion et d'enrichissement au niveau du personnel technique du CTC lorsque le tremblement de terre d'El Asnam a eu lieu le 10 octobre 1980. Cet événement a fourni de nombreux enseignements intéressants qui ont été pris en compte dans le nouveau code. C'est pourquoi le code a été adopté définitivement seulement en 1983 sous le titre "Règlements Algériens de Conception Parasismique 1981" (RPA 81-version 1983).

La version RPA 88 a été rendue obligatoire suivant la réglementation et les aspects législatifs pris en compte par deux décrets relatifs à la réduction de 1985 en cas de catastrophe et d'urgence au niveau mondial. La version actuelle du code algérien a été publiée en 1999 (RPA 99) sous le modèle américain. Elle prescrit les exigences pour la conception parasismique des structures ductiles et l'utilisation d'équivalents et d'analyses de la dynamique statique.

### 1.5.2. La version RPA 99

Le code RPA 99 divise le territoire en quatre zones en fonction de leur intensité sismique :

- Zone 0 : sismicité négligeable ;
- Zone 1 : faible sismicité ;
- Zone 2 : sismicité modérée ;
- Zone 3 : forte sismicité.

Le code attribue également un niveau de sécurité à une structure en fonction de son importance pour la communauté. Quatre groupes ont été proposés :

- Groupe 1A : Ouvrages d'art d'une importance vitale tels que les hôpitaux, centrales électriques, aéroports, casernes militaires, barrages, etc.
- Groupe 1B : Ouvrages d'art d'une grande importance, notamment les bâtiments publics, les universités, les mosquées, etc.
- Groupe 2 : Structures de moyenne importance, incluant les habitations, les bâtiments administratifs, les constructions sportives, etc.
- Groupe 3 : Structures de faible importance, englobant les constructions provisoires et les structures de propriétés non importantes, etc.

Le coefficient d'accélération maximale du sol (PGA), A, est déterminé en fonction du groupe d'importance et de la zone sismique correspondante (voir le tableau 1.2).

**Tableau1. 2.** Coefficient de l'accélération maximale du sol en (g).

Groupe	Zone		
	1	2	3
<b>1A</b>	0,12	0,25	0,35
<b>1B</b>	0,10	0,20	0,30
<b>2</b>	0,08	0,15	0,25
<b>3</b>	0,05	0,10	0,15

En outre, le code prend en compte la nature du sol et ses propriétés mécaniques. Il le classe en fonction de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement :

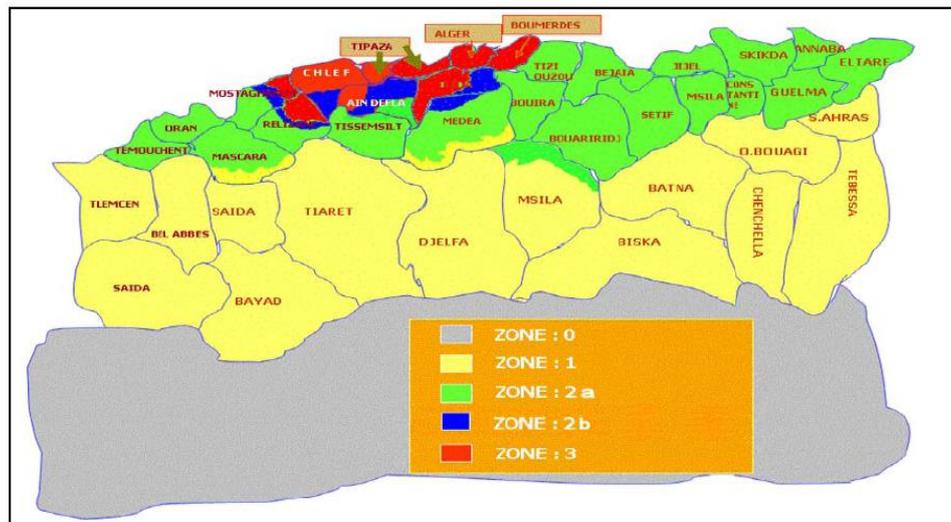
- Sol rocheux :  $V_s > 800$  m / s ;
- Sol ferme :  $V_s > 400$  m / s de 10 m de profondeur ;
- Sol meuble :  $V_s > 200$  m / s de 10 m de profondeur ;
- Sol très meuble :  $V_s < 200$  m / s dans les 20 premiers mètres.

Suite au séisme de Boumerdès survenu le 21 Mai 2003, une édition actualisée du code RPA99 a été élaboré, tenant compte des informations tirées de cette catastrophe. Plusieurs modifications ont été vues dans la version précise actualisée, Quelques importantes modifications sont citées dans la section suivante.

### 1.5.3. La version modifiée du Règlement Parasismique Algérien R.P.A 99 (2003)

Selon la version originale du R.P.A 99, Alger était située dans la zone sismique 2, avec une valeur d'accélération maximale du sol (PGA) de 0,15 g pour les bâtiments à usage d'habitation. Cependant, d'après les données fournies par le Centre National Algérien de la Recherche en Génie Sismique (CGS), les accélérations maximales enregistrées dans la partie Est d'Alger lors du séisme du 21 mai 2003 ont atteint environ 0,5 g.

Dans la version de 2003, la zone sismique d'Alger a été reclassée en zone 3, avec une valeur de PGA de 0,25 g. De plus, une carte de micro-zonage plus précise du pays a été fournie, divisant la zone 2 (activité sismique modérée) en zone 2A (PGA de 0,15 g) et zone 2B (PGA de 0,20 g) pour la même catégorie de bâtiment à usage d'habitation. De manière similaire à Alger, d'autres villes et départements (wilayas) ont été reclassés en fonction de leur nouvelle activité sismique. La figure 1.11 présente la carte des zones sismiques en Algérie conformément aux modifications apportées dans la version modifiée du R.P.A 99 en 2003, tandis que le tableau 1.3 expose les facteurs de PGA correspondants.



**Figure1. 11.** Zones sismiques du territoire national.

**Tableau1. 3 .**Coefficient d'accélération, PGA en (g), selon le code RPA99 modifié 2003.

Groupe	Zone			
	1	2A	2B	3
1A	0,15	0,25	0,30	0,40
1B	0,12	0,20	0,25	0,30
2	0,10	0,15	0,20	0,25
3	0,07	0,10	0,14	0,18

La nouvelle version a également augmenté la superficie minimale d'acier pour les structures en béton armé. Par conséquent, la majorité des structures en Béton Armé dans la région sismique modérée ont été renforcées par l'augmentation du minimum de la surface d'acier. En outre, il corrige aussi les erreurs techniques précédentes dans l'ancien code.

Note par exemple que le code RPA99 permis l'utilisation d'un coudre à la base des poteaux pour faciliter la mise en place du coffrage (qui a causé un joint de rupture), où il était strictement interdit dans la version modifiée 2003.

#### 1.5.4. Conclusion

Le dimensionnement des bâtiments vis-à-vis d'un des plus dangereux risques majeurs, à savoir le séisme, est un enjeu crucial pour l'ingénieur en génie civil. Ce chapitre a fourni un aperçu détaillé sur la sismicité en Algérie et a présenté des statistiques sur les séismes qui ont frappé le pays au fil des années, en mettant particulièrement l'accent sur les événements les plus violents. L'Algérie, située dans une zone de forte activité sismique, a connu plusieurs tremblements de terre dévastateurs, dont le séisme de Boumerdès en 2003 avec une magnitude de 6,8, qui a causé la perte de 2300 vies humaines et des dégâts matériels considérables. De même, le séisme d'El Asnam en 1980, avec une magnitude de 7,3, a entraîné la mort de près de 5000 personnes et la destruction massive de la ville d'El Asnam (aujourd'hui Chlef). Ces événements montrent clairement l'importance de la prise en compte des risques sismiques dans la planification et la construction des infrastructures. La compréhension des caractéristiques géologiques de l'Algérie, telles que la convergence de la plaque africaine et de la plaque eurasiatique, est essentielle pour prévoir les zones à risque et pour développer des stratégies de mitigation efficaces. L'étude des séismes passés, comme celui de Boumerdès, a été utilisée pour illustrer les défis spécifiques et les stratégies d'ingénierie nécessaires pour concevoir des structures capables de résister à de tels événements. Ce chapitre vise à mieux préparer les ingénieurs à concevoir des bâtiments et des infrastructures résilients en Algérie, en se basant sur des données réelles et des analyses approfondies des séismes passés. La prévention et la préparation sont des

éléments clés pour réduire les impacts des tremblements de terre. Une compréhension approfondie des risques sismiques et des techniques de construction appropriées est indispensable pour assurer la sécurité et la durabilité des structures dans les zones sismiques. Cette approche permet de minimiser les dommages et de protéger les vies humaines, soulignant ainsi l'importance d'une ingénierie sismique bien informée et proactive.

## 1.6. Références

- [1] CRAAG- Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et de Géophysique. (1994). "Les séismes en Algérie de 1365 à 1992". CRAAG Report, Algiers
- [2] Wikipedia 2010
- [3] Frizon de Lamotte D., Saint Bezar B., Bracenc R. and Mercier, E. (2000) "The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the Western Mediterranean", *Tectonics*, vol. 19, 740-761.
- [4] Aoudia A. and Meghraoui M. (1995) "Seismotectonics in the Tell Atlas of Algeria: the Cavaignac (Abou El Hassan) earthquake of 25.08.1922." *Tectonophysics*, 248, 263-276.
- [5] Aoudia A., Vaccari F., Suhadolc P. and Meghraoui M. (2000), "Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the Tell Atlas of Algeria", *J. Seismo.* vol. 4, 79-98.
- [6] McKenzie D. (1972,) "Active tectonics of the Mediterranean region", *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, vol. 30, 109-185
- [7] Laouami N. Slimani A., Bouhadad Y., Chatelain JL., Nour A. (2006), "Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake: Consequences on damage distribution and the Algerian seismic code", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26, P 991–1003.
- [8] [https://www.craag.dz/r\\_sismologique.php](https://www.craag.dz/r_sismologique.php)
- [9] Benouar D. and Laradi N. (1996). "A Reappraisal of the Seismicity of the Maghreb Countries – Algeria, Morocco, and Tunisia", *Natural Hazards*, vol. 13, no. 3, 275-296.
- [10] Bendimerad F. (2004) "The 21 May 2003 Boumerdes Earthquake Lessons Learned And Recommendations", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada August 1-6.
- [11] Victor Davidovichi conception construction réhabilitation parasismique 2019
- [12] Bourdim SMA. (2011) "Contribution à l'étude d'interaction sol-structure, Exemple mur de soutènement", Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, Algérie.

# Chapitre 2 : Contrôle passif et actif dans le génie civil

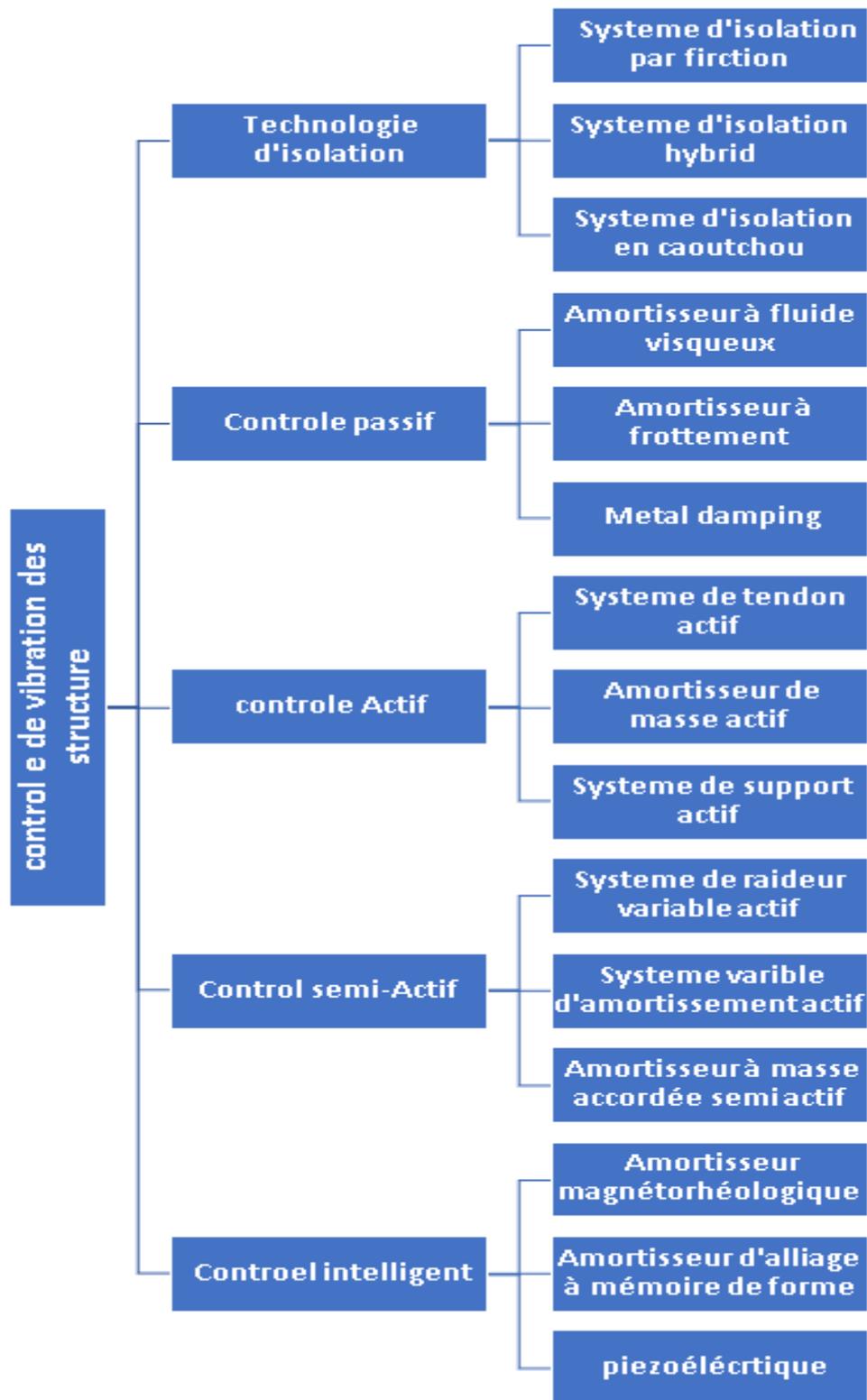
## 2.1. Introduction

Avec l'augmentation continue du développement national global, la construction du génie civil évolue vers des bâtiments en hauteur, des portées plus grandes et des structures plus complexes, ceci constitue non seulement une opportunité de développement pour le génie civil, mais aussi un énorme défi pour la recherche. Les charges dans les structures peuvent être statiques comme la gravité ou dynamiques comme les séismes. Les composants tels que les poteaux, les poutres, les plaques et les coques, sont des systèmes porteurs et constituent des structures à part entière, . Le comportement d'une structure et de ses composants, comme la déformation sous des charges statiques et la vibration sous des charges dynamiques, est appelé réponse structurelle. La conception d'une structure typique assure la sécurité (résistance et stabilité) et l'aptitude au service de la structure et de son environnement. Dans le même temps, le développement rapide de la science et de la technologie a apporté de nouvelles perspectives à la prévention des catastrophes et à l'atténuation de leurs effets. Parmi elles, la technologie de contrôle des vibrations structurelles qui est progressivement devenue l'un des moyens techniques les plus efficaces pour résister aux tremblements de terre et au vent en raison de ses caractéristiques de sécurité, d'économie et d'efficacité. Le concept de contrôle des vibrations structurelles a été proposé pour la première fois par J. T. P. Yao, un universitaire américain d'origine chinoise. Après plus de 40 ans de développement, il s'est progressivement penché vers un nouveau domaine de recherche de pointe comprenant le contrôle passif, le contrôle actif, le contrôle semi-actif, le contrôle hybride et l'isolation, impliquant la dynamique, l'informatique, les matériaux avancés, etc.[1]

## 2.2. Principe du contrôle des vibrations

Afin de dimensionner les composants d'une structure les ingénieurs en génie civil s'intéressent aux charges appliquées par rapport au site et au type de bâtiment. Les anciennes méthodes de dimensionnement se basaient plus sur la rigidité des bâtiments par contre les nouvelles conceptions considèrent plus la capacité du bâtiment à se déformer et la ductilité de ces éléments pour consommer l'énergie sismique et réduire la réponse ; ainsi une structure va se fissurer mais sans s'effondrer quand l'épisode sismique se produit. Le contrôle des vibrations est une nouvelle

technologie qui est aussi utilisée dans le domaine militaire et l'aérospatiale et dans les autres types d'industrie. Depuis les années 1970 les concepteurs ont commencé à l'utiliser le contrôle des structures dans le bâtiment. La figure 2.1 [ 2] montrent les différents type de contrôle qui sont utilisé dans les structures qui se répartissent en technologie d'isolation et en technologie de dissipation d'énergie et en réduction de vibration ces derniers se divisent en plusieurs autres catégorie que nous allons voir dans ce chapitre . Le contrôle passif modifie l'amortissement et la rigidité du système structurel sans lui administrer une énergie externe. Pour réduire les effets des sollicitations le contrôle actif a besoin d'une source d'énergie externe qui va lui donner une force afin de s'opposer aux excitations appelée force de contrôle. Le contrôle semi actif et le contrôle hybride utilisent le système actif et passif en simultanée. Ces types de contrôle utilisent des capteurs et actionneurs.



**Figure2. 1.** Système de contrôle des structures [3]

### 2.2.1. Principe d'amortissement sismique

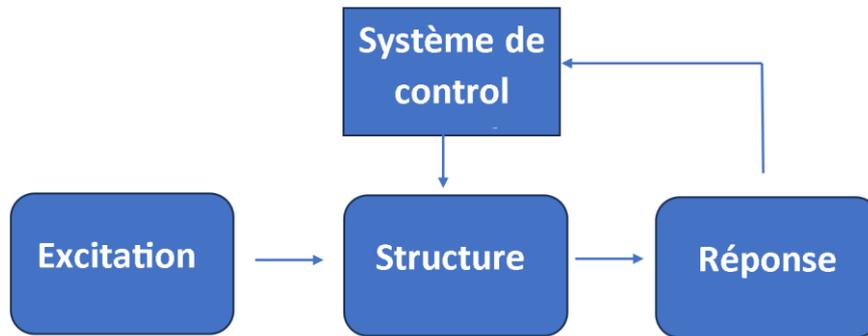
L'idée du contrôle des vibrations des structures consiste à créer passivement ou activement une force de contrôle qui s'oppose à la direction du mouvement pour réduire la réponse; ceci peut être expliqué par l'équation suivante [4]

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} + \{fd(t)\} = F(t) \quad (2.1)$$

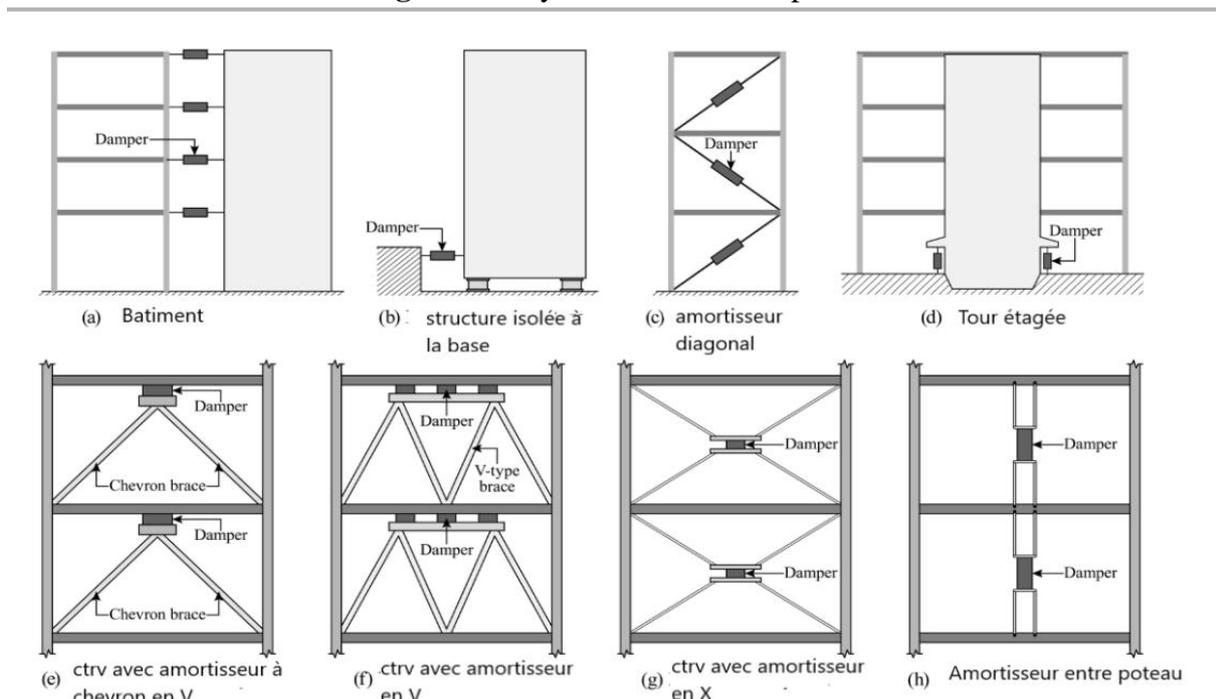
$[M]$  ,  $[K]$  et  $[C]$  sont la masse, la raideur et l'amortissement;  $\{\ddot{x}(t)\}$  ,  $\{\dot{x}(t)\}$ ,  $\{x(t)\}$  sont respectivement l'accélération la vitesse et le déplacement;  $F(t)$  est la force externe,  $\{fd(t)\}$  est la force de contrôle. Dans le cas du contrôle actif et passif cette force peut être appelée dispositif d'amortissement de modulation de fréquence.

### 2.2.1.1. Système de contrôle passif

Le système de contrôle passif est utilisé pour atténuer la réponse sismique (figure 2.2 et 2.3 ), il apporte un effet de dissipation d'énergie. Ce type d'isolation passive ne nécessite aucune intervention énergétique externe lorsque la structure est soumise à des charges. Ce système utilise les propriétés dynamiques et mécaniques de l'isolateur solidarisé à la structure afin d'isoler le bâtiment en dissipant l'énergie ou en contrebalançant la vibration de la structure comme avec les TMD( Tuned mass damping) .



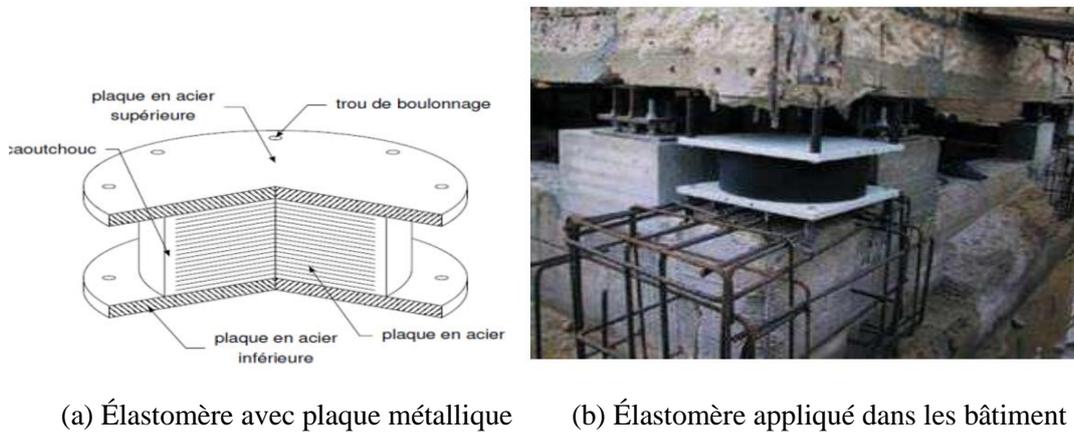
**Figure2. 2.** Système de contrôle passif



**Figure2. 3.** Les types de système contrôle passif [5]

**a- Contrôle passif avec isolateurs à la base**

Les isolateurs à la base sont dotés d'une énorme souplesse horizontale et d'une rigidité à la base et sont posés entre les fondations et la superstructure pour dissiper une grande quantité d'énergie. Il existe une multitude d'isolateurs à la base, certains ont été utilisés d'autres sont encore en phase de recherche. Parmi ces derniers on peut citer les appuis à déformation qui sont conçus pour isoler la construction des effets sismiques, qui sont similaires à ceux utilisés dans les ponts. Ces derniers sont fabriqués en élastomère naturel (caoutchouc) comme le montre la figure 2.4 qui désigne des appuis en élastomère. On peut citer encore les appuis en néoprène séparé par des frètes (barre) métalliques. Les frètes en acier contribuent à la résistance aux forces verticales et l'élastomère aux déformations horizontales. Le comportement viscoélastique donne une grande souplesse par rapport aux efforts horizontaux. L'inconvénient de cet isolateur c'est qu'il possède une période fondamentale élevée et peut rentrer en résonance en présence d'un sol mou ou lorsqu'il y'a un séisme de faible fréquence [6 -7]



**Figure2. 4.** Appuis en élastomère [5]

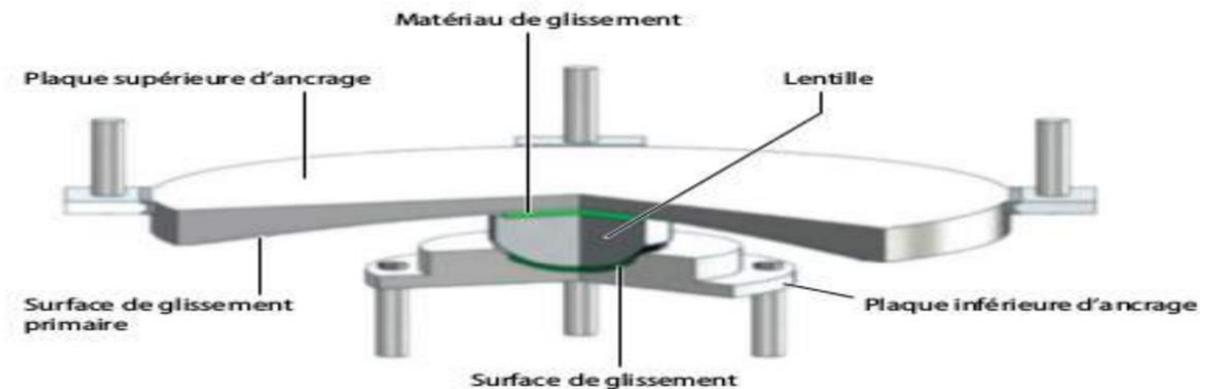
Les dispositifs d'appui à frottement sont une autre technique utilisée pour l'isolation sismique. Ils supportent le poids de la structure en utilisant un support reposant sur une interface glissante. Généralement, ces dispositifs sont fabriqués à partir de matériaux ayant un faible coefficient de frottement, tels que l'acier inoxydable, pour l'interface. Lorsque l'excitation horizontale dépasse la force de frottement statique, il y a un glissement entre la structure et son support. Cet effet limite la transmission de la force horizontale à travers l'interface glissante, ce qui entraîne un effet d'isolation. Toutefois, les dispositifs d'appui à frottement requièrent une force de rappel pour restreindre le déplacement résiduel de la structure après un séisme. Cette force de rappel peut être obtenue à l'aide d'un dispositif élastique supplémentaire ou grâce à la conception même de l'appui, comme c'est le cas avec les pendules de frottement.

**b- Contrôle passif avec dissipateurs d'énergie à glissement**

Le dissipateur à glissement (figure2. 5) est un dispositif utilisé pour absorber et dissiper l'énergie cinétique et vibratoire d'une structure en mouvement. Il est conçu pour réduire les vibrations indésirables et les effets dynamiques, notamment en réponse à des charges telles que le vent, les séismes ou les mouvements humains [8-9].

Ce type de dispositif fonctionne en permettant à la structure de se déplacer ou de glisser dans des directions spécifiques en cas de vibrations ou de secousses. Lorsque la structure se déplace, une partie de l'énergie cinétique est convertie en chaleur par le frottement et l'absorption d'énergie, ce qui réduit l'amplitude des vibrations et protège ainsi la structure contre les dommages ou l'inconfort.

Les dissipateurs à glissement sont utilisés dans diverses applications, telles que les bâtiments, les ponts, les passerelles et d'autres structures exposées à des forces dynamiques. Ils peuvent être conçus de différentes manières, notamment en utilisant des matériaux spéciaux, des mécanismes de glissement ou des éléments amortisseurs pour améliorer leur efficacité.



**Figure2. 5.** Appuis à glissement

Il existe deux types d'amortisseur, à masse accordée TMD et à liquide accordé TLD

### **c- Contrôle passif avec les amortisseurs à masse accordée (TMD)**

Un autre moyen de contrôle passif consiste à équiper les bâtiments d'amortisseur à masse accordée (TMD) en le mettant dans un étage en hauteur en le liant avec un ressort et un mécanisme d'amortissement. Il y'a un couplage entre l'inertie du système et la structure ce qui va réduire les vibrations causées par le séisme.

L'amortisseur à masse accordée est l'un des dispositifs de contrôle des vibrations les plus traditionnels ; il se compose d'une masse, de quelques ressorts et d'éléments d'amortissement. En fonction de son objectif.

Un exemple célèbre, est le gratte-ciel Taipei 101 à Taiwan , achevé en 2003, où 101 indique le nombre d'étages. Sa hauteur avec les antennes est de 509 m, le toit sans les antennes se termine à 448 m (figure 2.6) [10].



**Figure2. 6** .Utilisation du TMD dans la tour Taipeiil 101[11]

Ce bâtiment contient non pas un mais trois amortisseurs de masse accordés, qui amortissent les oscillations générées par les tremblements de terre et les vents. La plus grande masse accordée est une sphère d'un diamètre d'environ 5,5 m, assemblée à partir de plaques d'acier. Elle a une masse de 662 tonnes et est suspendue à des câbles d'acier de 42 m de long qui s'étendent du 92e au 88e étage. Il s'agit actuellement du plus grand amortisseur de masse accordé au monde. Le bâtiment oscille occasionnellement jusqu'à 35 cm dans un sens ou dans l'autre. Pendant les super-typhons, qui ne sont attendus en moyenne qu'une fois tous les cent ans, mais deviennent de plus en plus fréquents, des amplitudes de 150 cm sont même envisageables. Le TMD atténue les oscillations de jusqu'à 40%. Il existe d'autres exemples comme la CN tower au Canada qui a été construite en 1976 d'une hauteur de 553 m et avec un TMD fait de deux pendules de 18 tonnes [10].

#### **d- Contrôle passif Amortisseur à liquide accordé ( TLD )**

Un TLD (Tuned Liquid Damper) (figure 1.7) est un dispositif de contrôle de réponse passif qui fonctionne de manière similaire à un TMD, c'est-à-dire en s'opposant à la vibration du système principal. Dans le cas d'un TLD, la masse est remplacée par un liquide, généralement de l'eau, qui agit comme la masse en mouvement, et la force de rappel est générée par la gravité. La vibration structurelle agite le TLD et induit le mouvement du liquide à l'intérieur du récipient. La turbulence de l'écoulement du liquide et le frottement entre l'écoulement du liquide et le récipient convertissent l'énergie dynamique de l'écoulement du fluide en chaleur, absorbant ainsi l'énergie de vibration structurelle. Un TLD a le même principe fondamental qu'un TMD, qui est d'absorber l'énergie de vibration structurelle.

La différence réside dans le fait que toutes les caractéristiques de la masse du système auxiliaire, de l'amortissement et des mécanismes de restauration du TLD sont fournies par le liquide. Dans

un TLD typique, un réservoir rigide contenant de l'eau peu profonde est relié solidement à la structure. Le liquide dans le réservoir s'oppose à la vibration de la structure. La fréquence fondamentale linéaire d'oscillation du TLD peut être ajustée à la fréquence naturelle de la structure. Cela provoque une grande quantité d'oscillation et de formation d'ondes du liquide. De telles oscillations et formation d'ondes qui se produisent aux fréquences de résonance du système TLD-structure combiné dissipent une quantité significative d'énergie, ce qui contribue à réduire la vibration de la structure parente et à améliorer le niveau de protection que le TLD peut fournir.



**Figure2. 7.** Utilisation des TLD dans la Shanghai World Financial Center[12]

Ces deux systèmes ont été utilisé dans plusieurs partie dans le monde comme le montre le tableau 2.1[10]

**Tableau2. 1.** Grand projet qui utilise les TLD et les TMD

Nom de l'ouvrage	Type de structure	Hauteur	Nombre d'étages	Ville / pays	Date	Amortisseur
<b>CN Tower</b>	Tour	m 553		Toronto , Canada	1976	pendules TMD 2 poids : 18 tonnes
<b>Nagasaki Airport Tower</b>	aéroport,	42		Nagasaki japon	1987	kg TLD 950
<b>Ferneshturm Tower</b>	Tour de télévision	m 368		Berlin Allemagne	1990	TMD poids 1.5 t 1
<b>Hotel Burdj Al Arab</b>	Bâtiment	m 321	60	Dubai , Emirats arabes unis	1997	: TMD 11 Poids 11 * 5 t

<b>Shanghai • World Financial Center</b>	Tour	492	101	Shanghai chine	2008	TLD 8
<b>Taipei 101</b>	Bâtiment	m 449	101	Taipei Taiwan	2004	TMD pendulaire Poids 662
<b>Hongzhou BayBridge tower</b>	Tour de télévision	m 130		Jixang , Chine	2009	TMD 1 Poids : 110 t
<b>Tokyo Skytree</b>	Tour	634		Tokyo- Japan	2012	TMD 1 Poids 100 t

### e- Paliers oscillant à glissement

Appelés aussi paliers à articulation ils améliorent la résistance au séisme en s'adaptant aux forces générées par ce dernier (figure 2.8 ). Ils réduisent les contraintes et les déformations. Ils offrent un mouvement relatif contrôlé entre les différentes parties de la structure. Ils dissipent l'énergie et s'adaptent aux déformations ils permettent aux éléments de la structure de se déplacer et de se réaligner sans générer de contraintes excessives. Cette dissipation d'énergie contribue à protéger la structure en réduisant les dommages potentiels. Ils réduisent aussi les moments sismiques transmis à la structure. Ces équipements ont été utilisés en Algérie dans la grande mosquée d'Alger [13].



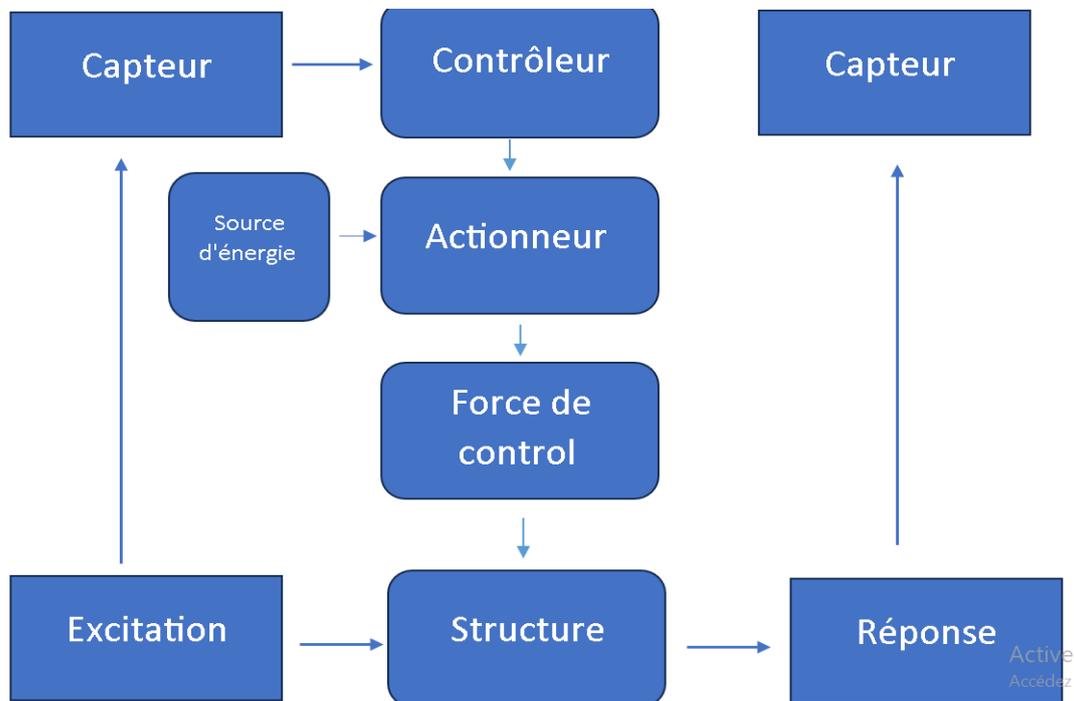
**Figure2. 8.** Utilisation du contrôle passif dans la grande mosquée d'Alger[14]

#### 2.2.1.2. Contrôle actif

A l'opposé des systèmes passifs le contrôle actif (figure 2.9) agit grâce à une force de contrôle qui va s'opposer aux sollicitations en jouant le rôle d'amortisseur à l'aide d'actionneur. la 1ere apparition de ce type de concept dans le génie civil fut lancé pour contrer le vent. Parmi ces

avancés on peut utiliser des vérins hydrauliques positionnés dans les fondations proposées par lev zeltin .

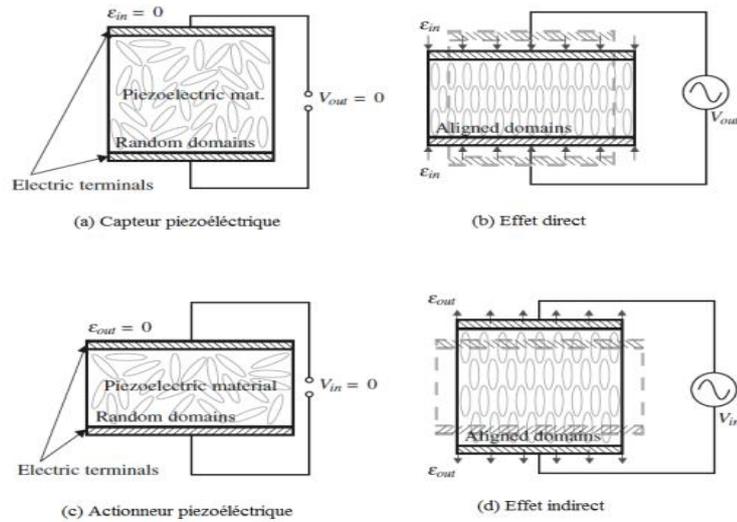
Les systèmes actifs ajustent leur réponse en fonction de chaque contrainte appliquée et ont la capacité d'adapter leur comportement en réponse aux changements de leur environnement Le principe fondamental est le suivant ( voir figure 2.9 ) : les structures sujettes à l'isolation sont équipées de capteurs qui mesurent les vibrations de la structure et/ou les excitations qui y sont appliquées. Ces données sont ensuite interprétées par des algorithmes de contrôle (les algorithmes de contrôle sont utilisés pour ajuster les paramètres du système en temps réel afin d'obtenir un comportement souhaité) déterminent la réponse la plus appropriée pour son application à la structure à isoler. Pour mettre en œuvre cette réponse, des actionneurs sont utilisés, nécessitant ainsi une injection d'énergie extérieure dans ce processus de rétroaction. Cette caractéristique, en combinaison avec la complexité et les coûts associés à de telles solutions, peut constituer un inconvénient majeur dans certaines situations par rapport aux systèmes passifs .



**Figure2. 9.Principe du contrôle actif**

### **a- Les applications des matériaux piézoélectriques aux contrôle des vibrations**

Les matériaux piézo-électriques ont la propriété de se polariser électriquement sous l'action d'une charge mécanique (figure 2.10 a et b) (effet direct), ou de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet inverse) (figure 2.10 c et d). Ces propriétés font d'eux les matériaux idéales pour créer des capteurs et des actionneurs [15].



**Figure2. 10.** Contrôle actif en utilisant la piézoélectricité

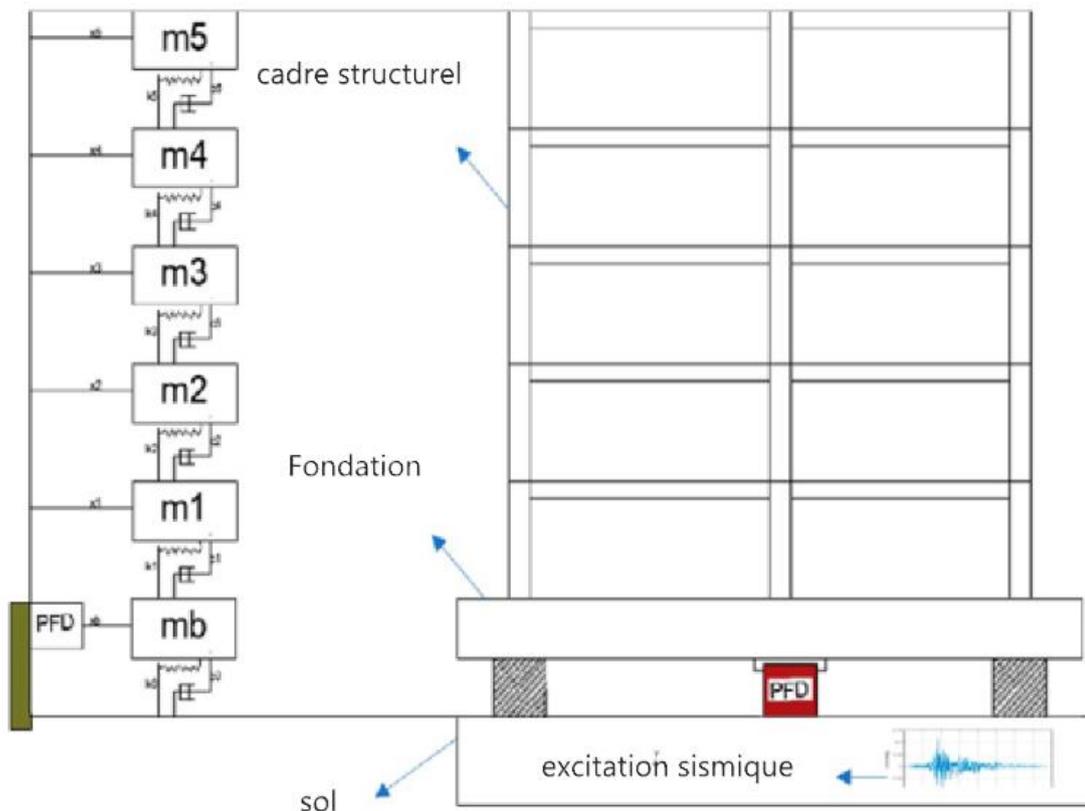
Les matériaux piézo-électrique ont la capacité de convertir une énergie électrique en énergie mécanique; l'application d'une contrainte sur un matériau piézo-électrique entraîne l'apparition d'une tension entre les électrodes.

Beaucoup de bâtiments sont sous le danger d'être détruit sous un puissant séisme ou en raison d'un vent fort. les chercheurs et ingénieurs en génie civil développent des moyens de préventions efficaces équipé par des systèmes avec des matériaux piézoélectriques par le contrôle de la santé de la structure ou par le contrôle actif ceci en utilisant ces matériaux intelligents. Ainsi que les algorithmes de contrôle mais ces dernier nécessitent une source d'énergie externe

Un des exemples concrets d'utilisation de capteurs piézoélectriques dans un bâtiment est le "Burj Khalifa" à Dubaï. Burj Khalifa est l'un des gratte-ciels les plus emblématiques et les plus hauts au monde (828 m).

### b- Amortisseur à friction piézoélectrique PFD

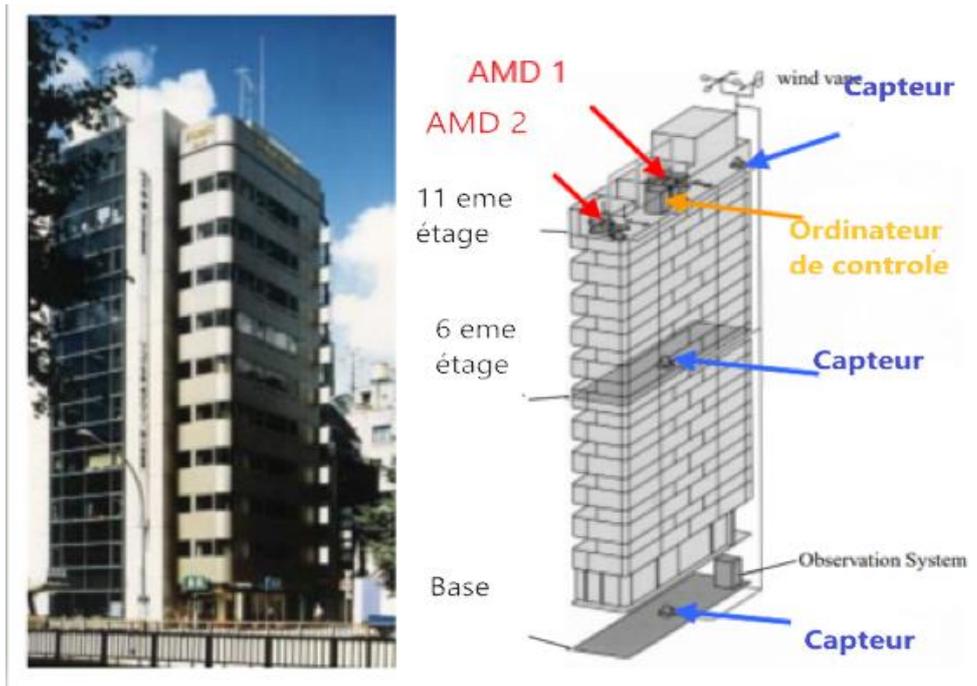
Le PFD est un dispositif utilisé dans le domaine de l'ingénierie structurale pour le contrôle des vibrations et de l'amortissement des bâtiments et des structures (figure 2.11 ). Ce dispositif combine les propriétés de la piézoélectricité et du frottement mécanique qui peut être généré entre différentes parties du dispositif pour atténuer les vibrations indésirables. Le PFD utilise la propriété piézoélectrique pour contrôler les propriétés de frottement du dispositif. Lorsque des vibrations sont détectées dans une structure, les capteurs piézoélectriques intégrés dans le dispositif génèrent une charge électrique en réponse aux mouvements. Cette charge électrique peut être utilisée pour ajuster le frottement dans le dispositif. En modifiant le frottement, le PFD peut absorber et dissiper l'énergie des vibrations indésirables, réduisant ainsi leur impact sur la structure. Le contrôle actif du frottement permet d'adapter l'amortissement en temps réel en fonction des conditions de vibration. Cela en fait une option attrayante pour le contrôle des vibrations dans les bâtiments et les structures sujettes à des charges dynamiques telles que le vent, les tremblements de terre, ou les mouvements humains .



**Figure2. 11.** Utilisation de matériaux piézoélectrique dans les bâtiments [16]

### c- Amortisseur à masse active

Les amortisseurs à masse active (AMD) ont fait l'objet d'études approfondies en vue d'atténuer les réponses des structures. Ces amortisseurs surpassent en efficacité les dispositifs d'amortissement à masse accordée (TMD) comme le montre la figure (2.12). Néanmoins, leur opération requiert une alimentation énergétique externe substantielle. Dans les systèmes AMD, la force est générée exclusivement par un actionneur de type hydraulique ou électrique qui connecte la masse mobile au reste de la structure.



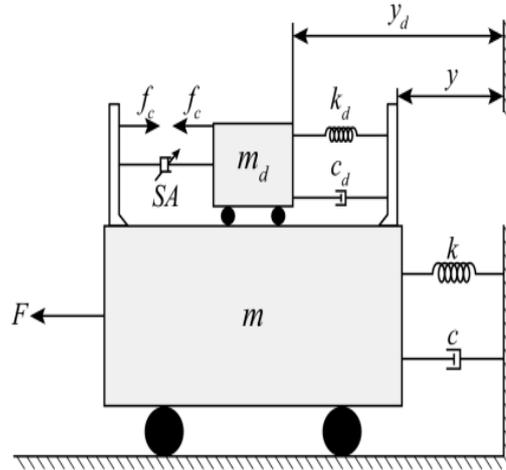
**Figure2. 12.** Structure de Kyobashi Seiwa à Tokyo.[17]

### 2.2.1.3. Contrôle semi-actif :

Le principe du système de contrôle semi actif couple le contrôle actif et passif, ceci permet une meilleure dissipation d'énergie. La dissipation se fait grâce au réglage de ces paramètres selon le choix d'un algorithme de contrôle en fonction de l'excitation ou/et de la force de contrôle. Le système semi actif nécessite aussi des capteurs et des actionneurs mais a besoin moins d'énergie, une simple batterie peut suffire pour lui donner cette énergie, ce qui le rend avantageux et lui permet de fonctionner même s'il y'a une panne électrique lors du séisme. Malgré sa complexité par rapport au contrôle passif le contrôle semi-actif est plus fiable avec un meilleur amortissement.[17]

#### a- Amortisseur à masse accordée semi-actif (TMD)

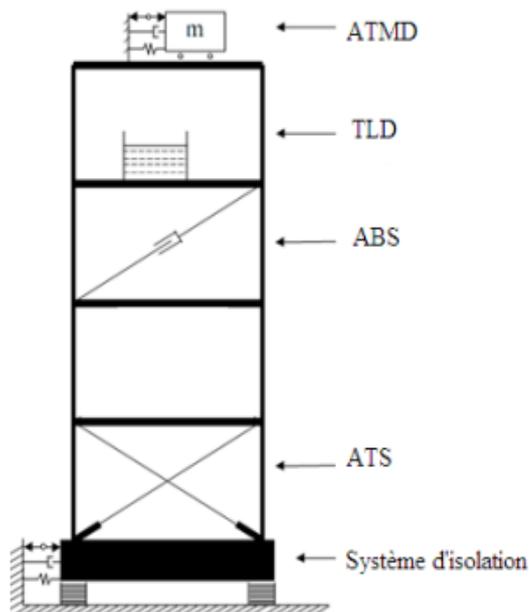
Il existe des amortisseurs à masse accordée qui fonctionnent avec un système semi -actif. Ce système est installé au sommet de la structure, il se compose d'un TMD passif et un actionneur qui a le rôle d'un générateur de force. L'actionneur, désigné par SA(figure 2.13), génère la force de contrôle  $f_c$  qui contribue à atténuer les vibrations structurales indésirables provoquées par l'excitation  $F$ .



**Figure2. 13.** Modèle mathématique de l'amortisseur de masse accordée semi-actif.[18]

#### 2.2.1.4. Contrôle hybride

Un système de contrôle structural hybride est une combinaison de techniques de contrôle passif, actif et semi actif. Avec deux techniques de contrôle en fonctionnement synchronisé, le système de contrôle hybride offre les mêmes avantages avec le système semi actif. La principale différence réside dans la façon dont les systèmes semi-actifs et hybrides gèrent les vibrations. Les systèmes semi-actifs ajustent les propriétés du dispositif pour contrôler les vibrations de manière plus économique en énergie, tandis que les systèmes hybrides combinent différentes techniques pour tirer parti des avantages de chaque approche. La figure 2.14 est un exemple typique du contrôle hybride qui englobe l'utilisation de l'ATMD , le TLD , ABS (amortisseur à barre actif ) et ATS ( amortisseur à câble actif )

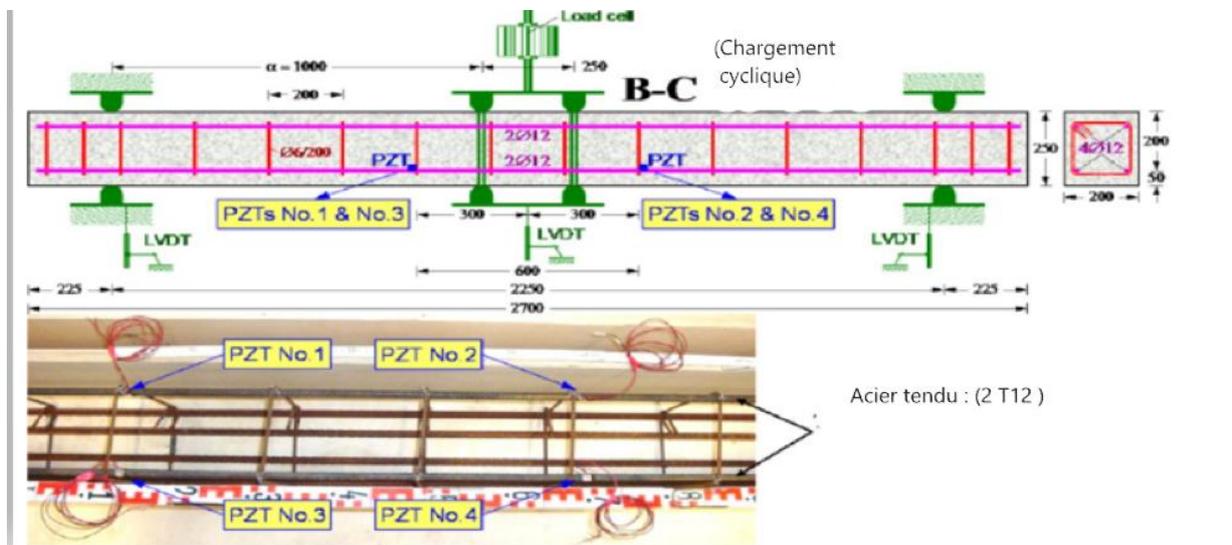


**Figure2. 14.** Schéma d'une structure avec contrôle hybride.

**2.2.1.5. Contrôle de la santé des structures**

Le contrôle de la santé des structures consiste en la surveillance des structures existantes en acier ou en béton armé dans les zones sismiques. L'évaluation des niveaux de dommages et de l'intégrité structurelle est possible grâce à des systèmes de surveillance efficaces, faciles à appliquer et peu coûteux. Ces systèmes de surveillance sont utilisés comme capteur en PVDF( piezo polyfluorure de vinylidène) qui peuvent être intégrés dans le système grâce à leur flexibilité, leur taille fine, et leur système sans fil pour surveiller les structures . Des transducteurs piézoélectriques ont été développés pour intégrer les PZT (**titano-zirconates de plomb** ), ils sont utilisés comme actionneurs et capteurs dans la structure. Il est possible avec ce type de capteur d'observer en particulier les dommages de type fissure de manière non destructive avec les ondes de Lamb(référence) qui sont une catégorie particulière d'ondes se propageant dans une plaque solide.

Alem et al. (2016) ont proposé une méthode d'identification des dommages dans les structures de plaques en utilisant des transducteurs piézoélectriques intégrés et les ondes de Lamb. L'indice d'endommagement a été déterminé pour détecter la présence et l'emplacement des fissures. Des PZT ont été posés dans une poutre afin d'atténuer les effets des sollicitations imposées à cette dernière. Un capteur en piezo mesure les ondes de Lamb quand la vitesse de l'onde baisse, ceci implique qu'il y'a une variation dans le signal ce qui signifiant la détection d'une fissuration (figure 2.15).



**Figure2. 15.** Contrôle de la santé des structures dans une poutre en béton armée[16]

**2.3. Définition des Alliages**

Le terme alliage est une combinaison d'un métal de base ( fer, cu , al ) avec un ou plusieurs éléments d'alliage ( nickel , carbone ) afin d'augmenter certaines propriétés mécaniques telle que la solidité , l'élasticité ou encore la résistance à la corrosion. Le premier alliage fut créé durant l'âge de bronze ( cuivre , étain) il y'a des milliers d'années

### 2.3.1. Historique des AMF

En 1932, Olander a été l'un des premiers à aborder le concept de "mémoire de forme. Cependant, il a fallu attendre jusqu'en 1941 pour que le terme "alliage à mémoire de forme" soit introduit par Vernon . À l'époque, seuls quelques alliages, tels que Cd Au, Cu Zn et Cu Al existaient

En 1963, Buehler a réalisé des études approfondies sur ces matériaux et a découvert l'effet de mémoire de forme (SME) dans l'alliage nickel-titane (NiTi) . Cette découverte marquante a été la base des recherches supplémentaires sur les alliages à mémoire de forme

Outre la composition chimique, la microstructure des matériaux, les procédés de fabrication et les traitements thermiques, tels que les recuits ont également un impact significatif sur les propriétés des alliages à mémoire de forme. Ces facteurs peuvent influencer la stabilité et la cinétique des transformations de phase.

Ainsi, la recherche continue dans ce domaine et sa permis de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents des alliages à mémoire de forme et a ouvert la voie au développement de nouveaux matériaux et de techniques de fabrication plus avancées pour exploiter pleinement leur potentiel.

Les recherches approfondies en laboratoire sur les alliages à mémoire de forme (AMF) ont permis de démontrer également leur remarquable capacité à se rétablir automatiquement de la déformation à température ambiante, phénomène connu sous le nom de superélasticité (SE). Cette découverte révolutionnaire a ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine des matériaux et a incité l'approfondissement et l'exploration des différentes classes et types d'AMF.

Parmi les AMF les plus avancés sur le plan pratique, le NiTi (également connu sous le nom de Nitinol en hommage au Naval Ordnance Laboratory où il a été découvert pour la première fois) a joué un rôle prépondérant. Son utilisation dans des applications commerciales réussies a été démontrée par l'assemblage de tubes pour l'aviation en 1969, développé par Kauffman et Mayo. Les recherches ultérieures ont permis d'étendre l'utilisation du NiTi à de nombreux domaines militaires et de génie civil, y compris les réacteurs nucléaires.

Dans le domaine biomédical, les AMF ont connu un essor à partir des années 1970, mais leur véritable percée commerciale a eu lieu dans les années 1990 avec le développement et leur utilisation dans différents secteurs tels que l'électricité, l'automobile, l'aérospatiale, la robotique et l'industrie pétrolière. Pour ces applications, il est souvent crucial que les AMF présentent des effets de mémoire de forme et de superélasticité, avec une large plage d'hystérésis de température/charge et un comportement matériel stable.

La croissance rapide des différentes classes d'AMF a également suscité un vif intérêt dans la communauté du génie civil à la fin des années 1990. Des efforts particuliers ont été déployés pour atténuer les effets des tremblements de terre sur les structures techniques, grâce à l'utilisation d'AMF spécifiques, comme le soulignent les travaux de Song et al. . Cette expansion des applications des AMF dans le génie civil a ouvert de nouvelles possibilités pour renforcer la résistance et la durabilité des structures soumises à des contraintes sismiques. [19]

### 2.3.2. Comportement des AMF

Les Alliages à mémoire de forme ont des capacités exceptionnelles qui sont distinctes par rapport aux autres alliages. Ils ont une déformation réversible supérieure aux autres matériaux grâce à leur effet super-élastique et ont aussi des propriétés thermomécaniques propres à eux tel que l'effet mémoire simple sens et l'effet mémoire double sens. Les AMF retrouvent leur forme initiale par chauffage ou refroidissement. Grâce à ces propriétés particulières, les AMF sont considérés comme des matériaux intelligents. Ils ont prouvé leur utilisation dans le contrôle passif, actif et hybride et sur les différents ouvrages comme les ossatures métalliques et en béton, les ouvrages d'art et la réhabilitation des constructions historiques. La différence entre l'utilisation des AMF dans le contrôle passif et actif est le fait que la première s'achève sur la réaction thermomécanique dans le contrôle de la structure, l'enjeu se détermine sur l'optimisation de la réaction « force-déplacement » de l'AMF lui-même selon la réponse de la structure pour atténuer l'excitation dynamique sans faire entrer aucune force externe hors que la force sismique. Par contre, dans le contrôle actif une force est exercée pour diminuer la force sismique. Cette force calculée durant le séisme est optimisée selon la réponse de la structure et l'excitation dynamique. Des études ont montré que les AMF sont bénéfiques pour déterminer cette force appliquée dans le contrôle actif. En outre, le contrôle hybride est un contrôle qui rassemble les deux contrôles précédents, les AMF ont prouvé des résultats remarquables à ce contrôle telle que leur utilisation dans les conceptions des dispositifs pour l'atténuation sismique. [20]

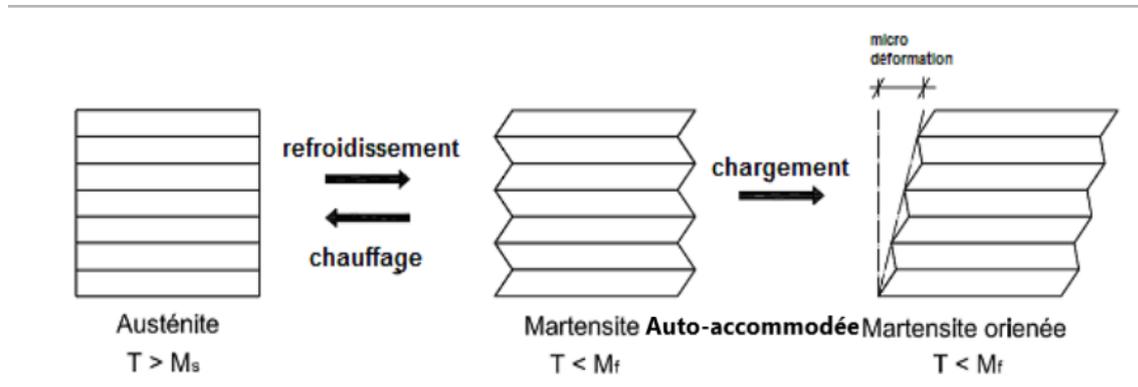
#### 2.3.2.1. Effet mémoire de forme

La mémoire de forme est une propriété exceptionnelle présente dans certains matériaux, qui leur permet de retrouver leur forme initiale après avoir subi un changement de température. En d'autres termes, ces matériaux sont capables de récupérer complètement les contraintes résiduelles en augmentant la température après une déformation mécanique, ce qui compense les contraintes appliquées à l'échelle macroscopique. Cette caractéristique est souvent associée aux alliages métalliques, mais on observe également ce phénomène dans d'autres types de composés tels que les céramiques et les polymères. La mémoire de forme découle de changements de phase à l'intérieur du matériau, entraînant un réarrangement de sa structure cristalline. Ce réarrangement atomique peut également se produire en réponse à l'application d'une contrainte sur le matériau. Pour les matériaux à mémoire de forme, il existe deux phases stables à basse température, la Martensite et à haute température, l'Austénite.

La martensite, phase stable à basse température, tire son nom du physicien allemand Adolf Martens. Elle se caractérise par une structure cristalline excentrique et hautement ordonnée, et présente deux formes distinctes. À l'origine, la martensite était une phase métastable d'acier obtenue par refroidissement rapide. La phase "chaude", appelée austénite, doit son nom au physicien britannique Charles Austin.

Les scientifiques des matériaux et les ingénieurs ont réalisé de nombreuses études sur la microstructure et la cristallographie des AMF. Ces matériaux se composent principalement de deux phases, la martensite et l'austénite. Il existe deux structures cristallines distinctes pour la martensite, la martensite auto-accommodée et la martensite orientée (figure). La capacité des AMF

à retrouver leur forme initiale après déformation est due à des transformations de phase réversibles entre l'austénite et la martensite. Ce mécanisme est attribué à une distorsion du réseau de cisaillement, plutôt qu'à la plasticité basée sur les dislocations observées dans d'autres métaux de construction tels que l'acier au carbone. ( figure 2.16 ) [21]



**Figure2. 16.**Etat de phase des AMF [21]

La transition de phase de l'austénite à la martensite est connue sous le nom de transformation directe, tandis que la transition de la martensite à l'austénite est appelée transformation inverse. Les processus de transformation sont associés à quatre températures caractéristiques : la température de début ( $M_s$ ) et de fin ( $M_f$ ) de la martensite , la température de début ( $A_s$ ) et de fin ( $A_f$ ) de l'austénite .

Un déséquilibre existe entre les températures de transformation directe et inverse, ce qui entraîne une hystérésis, une caractéristique de la dissipation d'énergie. Les plages de transformation, déterminées par les variations de température ( $M_s$ - $M_f$ ), sont causées par la libération d'énergie élastique lors de la transformation inverse (différence  $A_f$ - $A_s$ ) [21].

Pour un monocristal d'austénite, il existe plusieurs orientations possibles des plaquettes de martensite, connues sous le nom de variantes de martensite. Selon Patoor et Berveiller (1994), il existe 24 variantes possibles dans les alliages tels que NiTi et CuAlB .

#### **a- Marteniste auto-accommodée :**

La martensite auto-accommodée se forme lors du refroidissement en dessous de  $M_s$  dans des conditions sans contrainte. Dans la martensite auto-accommodée, il existe des domaines orientés à la taille du grain, dont les caractéristiques cristallographiques ne diffèrent que pour l'orientation locale. Nous appelons cette variante la martensite thermique.

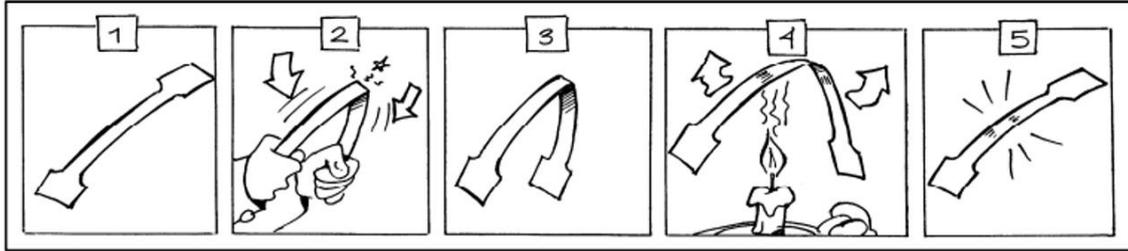
#### **b- Martensite orientée**

La martensite orientée se forme lors du refroidissement en dessous de la température  $M_s$  lorsque le matériau est soumis à une contrainte de compression ou de traction supérieure à un certain seuil. Dans de telles conditions, tous les domaines s'orientent selon la direction des contraintes appliquées, ce qui conduit à une grande déformation plastique caractéristique. Ce processus de réorientation est connu sous le nom de désaccommodation, car il entraîne la disparition de toutes les variantes orientées. Nous désignons cette variante comme étant la martensite contrainte [22].

L'effet mémoire de forme se divise en mémoire simple sens et double sens

### 2.3.2.2. Effet mémoire simple sens

La figure 17 explique simplement l'effet mémoire simple sens[23].

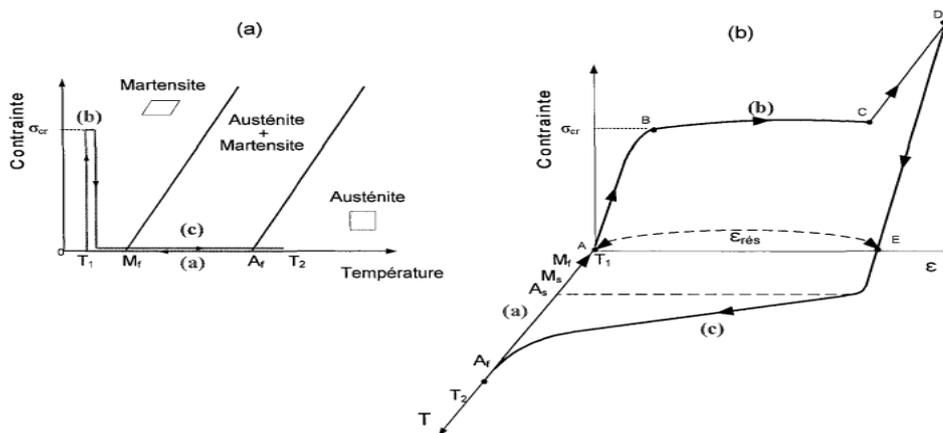


**Figure2. 17.** Schématisation de l'effet mémoire de forme simple sens [23]

Sur le plan expérimental l'échantillon d'AMF est refroidi sans contrainte à partir d'une température  $T_2$ , qui est supérieure à la température de transformation à l'état Af, jusqu'à une température  $T_1$  inférieure à la température de transformation martensitique  $M_f$ . Au cours de cette séquence, la martensite se forme, mais il n'y a pas de déformation de transformation macroscopique (aucune déformation visible à l'échelle macroscopique). À cette étape du cycle thermomécanique, la martensite obtenue est qualifiée d'auto-accommodante, et différentes variantes de martensite sont créées.

Une contrainte (charge et décharge) est appliquée à température constante ABCDE, séquence (b) de la figure 1.18; il n'y a pas de transformation de phase, mais une réorientation des variantes de la martensite pendant la charge et un retour élastique lors de la décharge (ce qui entraîne l'apparition d'une déformation résiduelle). Ainsi, la première partie de la courbe représente la déformation élastique de la martensite auto-accommodante (A-B). Ensuite, la martensite se réoriente à partir d'une contrainte critique de réorientation, formant un plateau de réorientation (B-C). Une augmentation ultérieure de la contrainte favorise la déformation élastique de la martensite orientée (C-D). Enfin, lors de la décharge (D-E), une déformation résiduelle se produit

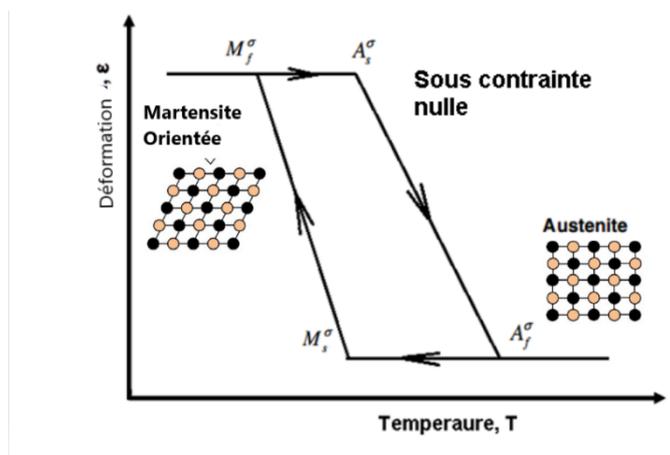
Dans la phase chauffage l'échantillon déformé est porté jusqu'à une température  $T_2$  sans appliquer de contrainte. Au cours de la séquence (c), la déformation résiduelle résultant de la décharge disparaît en raison de la transformation de phase inverse de la martensite à l'austénite, induite par un chauffage jusqu'à une température  $T_2$  supérieure à la température de transformation  $A_r$  (E-A). Pendant cette transformation, l'échantillon AMF retrouve sa forme initiale si aucune contrainte externe n'est appliquée pour empêcher cette reprise de forme (figure 2.18) [24].



**Figure2. 18.** Effet mémoire de forme simple sens (a) graphe contrainte température (b) graphe contrainte déformation. [22]

### 2.3.2.3. Effet mémoire double sens

La formation d'un AMF implique l'application répétée d'une charge thermomécanique, entraînant un changement de phase cyclique. Ce processus induit l'apparition de défauts au niveau de la microstructure, ce qui entraîne la formation de contraintes internes favorisant une orientation spécifique des variantes. L'AMF a la capacité d'avoir deux formes Austénite et Martensite orientée et de passer de l'une à l'autre par chauffage ou refroidissement (figure 2.19). La figure donne les différentes températures  $A_s^\sigma$  (température début Austénite)  $A_f^\sigma$  (température Austénite lors du chauffage)  $M_s^\sigma$  (Température début Martensite)  $M_f^\sigma$  (Température Martensite lors du refroidissement) [25].



**Figure2. 19.** Effet mémoire double sens

### 2.3.2.4. Effet super élastique

Le comportement superélastique (figure 2.20) est observé lors d'un chargement thermomécanique correspondant à la séquence "A ~ B ~ C ~ D".

La zone "A ~ B" représente le comportement purement élastique de la phase austénitique. La contrainte augmente depuis une charge nulle jusqu'à la contrainte d'initiation de la transformation

directe ( $\sigma_0 \Rightarrow \sigma_{Ms}$ ). Pendant la séquence "B ~ C", la déformation est réalisée par le mécanisme de transformation martensitique. La contrainte traverse les charges de début et de fin de la transformation de phase directe ( $\sigma_{Ms} \Rightarrow \sigma_{Mf}$ ). C'est à l'intérieur de cette zone que la transformation de l'austénite en martensite se produit. Une augmentation de la contrainte entraîne la déformation élastique de la martensite transformée (orientée) "C ~ D".

Lors de la séquence de déchargement "D ~ E ~ F ~ A", la martensite précédemment induite se retransforme en austénite et l'échantillon retrouve sa forme initiale.

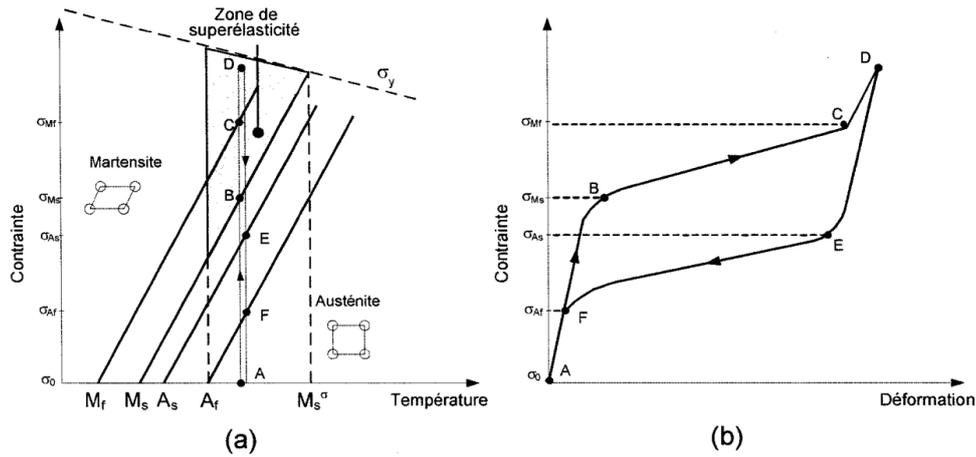


Figure 2. 20. Effet super-élastique [22]

La figure suivante (figure 2.21) englobe les principaux effets des AMF cités précédemment.

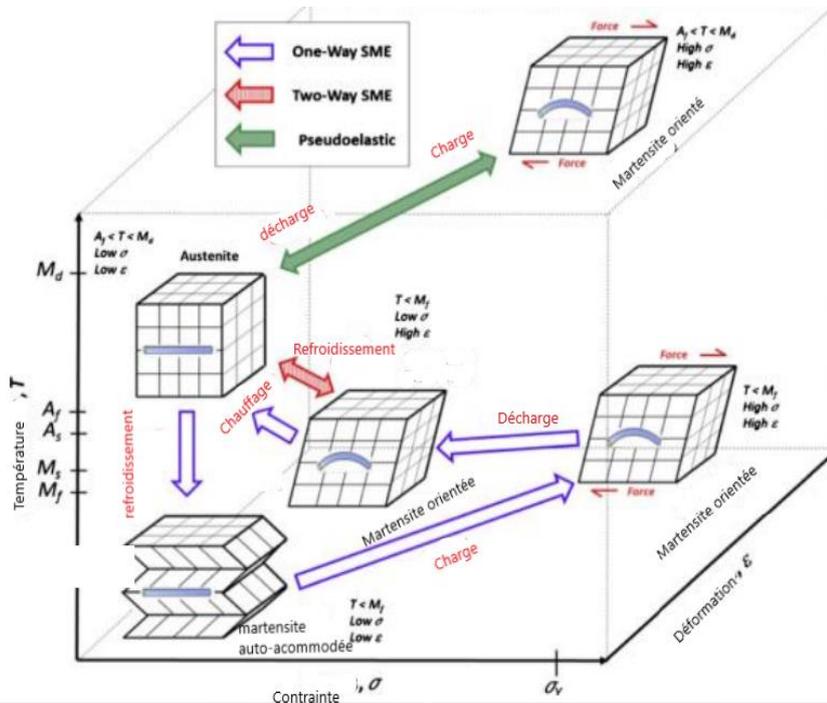


Figure 2. 21. Effet thermomécanique des AMF [25]

## 2.4. Type d'alliage existant

On rencontre une multitude de classe d'AMF, ceux à base d'argent (Ag-Cd) et d'or (Cu-Au-Zn, Au-Cu) sont moins commercialisés du fait de leur prix exorbitant .Par contre les AMF nickel Titane (Ni-Ti) et les AMF cuivreux (Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Be) ont d'excellentes propriétés thermomécaniques et des prix concurrentiels. D'autre type d'AMF à base de fer existent également, ils ont des prix plus abordables mais sont très sensibles à la corrosion.

### 2.4.1. AMF NiTi

À l'époque, le NiTi-AMF était particulièrement adapté aux recherches en laboratoire et semblait surpasser d'autres classes d'AMF, Cependant, les avancées continues de composition des alliages et les techniques de fabrication ont révélé un potentiel énorme pour les AMF à base de cuivre ou de fer. Ces alliages peuvent présenter un comportement comparable au NiTi-AMF ou offrir un compromis acceptable entre performances et réduction des coûts,

Les alliages à base de nickel-titane ont suscité un intérêt considérable parmi les chercheurs en génie en raison de leur capacité à récupérer complètement des déformations importantes pouvant atteindre jusqu'à 8%. Ces matériaux possèdent des propriétés super-élastiques qui facilitent la récupération des déformations en éliminant les contraintes mécaniques, et cela sans nécessiter de chauffage pour retrouver leur forme originale. Les alliages de nitinol, composés de nickel et de titane ont été développés au début des années 1960.

### 2.4.2. AMF à base de cuivre

Les alliages à mémoire de forme à base de cuivre sont des matériaux dotés de propriétés intéressantes de mémoire de forme et de superélasticité. Composés principalement de cuivre, ils contiennent également d'autres éléments d'alliage tels que l'aluminium (Al), le zinc (Zn), le nickel (Ni), le manganèse (Mn) et le barium (Br)

Le tableau suivant ( Tableau 2.2) récapitule les propriétés thermomécanique des différent AMF.

**Tableau2. 2.** propriétés thermomécanique des AMF .

Propriétés		NiTi	CuZnAl	CuAlNi	CuAlBe
Point de fusion (°C)		1260-1310	950-1020	1000-1050	970-990
Densité (Kg/m <sup>3</sup> )		6400-6500	7800-8000	7100-7200	970-990
Résistivité électrique ( $\Omega\cdot m \times 10^{-6}$ )		0,5-1,1	0,7-0,12	0,1-0,14	0,07-0,09
Conductivité thermique ( $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ )		10-18	120	75	-
Coefficient de dilatation ( $K^{-1}\times 10^{-6}$ )		6,6-10	17	17	-
Chaleur spécifique ( $J\cdot Kg^{-1}\cdot K^{-1}$ )		490	390	440	-
Enthalpie de transformation ( $J\cdot Kg^{-1}$ )		28000	7000	9000	7200
Module de Young (GPa)		95	70-100	80-100	90
Résistance à la traction (MPa)		800-1000	800-900	1000	900-1000
Allongement à la rupture (%)		30-50	15	8-10	15
Limite de fatigue (Etat austénite) (MPa)		350	270	350	-
Taille de grain ( $\mu m$ )		20-100	50-300	30-300	100-500
Domaine de transformation (°C)		-100 à 100	-100 à 100	-100 à 170	-200 à 150
Hystérésis ( $A_s-M_f$ ) (°C)		20-40	10-20	20-25	20-25
Etalement ( $A_f-A_s$ ) (°C)		30	10-20	20-30	15-20
Déformation maximale	Mémoire simple effet (%)	8	3-5	3-6	3-5
	Mémoire double effet (%)	5	2	3	2
	Cycle (N)=10 <sup>2</sup> (%)	5	1	1,2	-
	Cycle (N)=10 <sup>5</sup> (%)	2	0,8	0,8	-
	Cycle (N)=10 <sup>7</sup> (%)	0,5	0,5	0,5	-
Température max d'usage (1heure) (°C)		400	160	300	400
Déformation maximale (Superélasticité)	Polycristal (%)	4	2	2	3
	Monocristal (%)	10	10	10	10
Amortissement (SDC-%)		15	30	10	-
Résistance à la corrosion		Excellente	Moyenne	Bonne	Moyenne
Biocompatibilité		Bonne	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise

Les valeurs montrent que les alliages à mémoire de forme (AMF) à base de NiTi sont connus pour leurs performances élevées. Ils offrent des caractéristiques mécaniques satisfaisantes, une excellente résistance thermique et une bonne résistance à la corrosion. Cependant, leur principal inconvénient est leur prix élevé, en raison de problèmes d'usinage et de détérioration des propriétés mécaniques lors de la charge.

En ce qui concerne les AMF fabriqués en cuivre, tels que le CuZnAl, le CuAlNi et le CuAlBe, ils sont moins coûteux que les alliages NiTi. Ils présentent une bonne élasticité avec une faible hystérésis, et peuvent être utilisés sous forme de rubans et de fils. Cependant, ils ont des inconvénients similaires aux alliages NiTi.

Quant aux alliages à base de fer, ils sont moins chers que leurs prédécesseurs en raison de leur facilité d'usinage et du coût réduit du fer. Cependant, ils ont une large hystérésis et une faible superplasticité [26].

## 2.5. Fabrication des AMF

Les AMF peuvent être fabriqués de différentes manières pour obtenir les propriétés souhaitées. L'une des méthodes couramment utilisées est la fusion sous vide, qui permet d'obtenir un matériau homogène et de haute qualité. Cette technique consiste à chauffer les composants de l'alliage dans un environnement sous vide afin d'éliminer les impuretés et d'assurer une fusion uniforme (figure 2.22).

Outre la fusion sous vide, d'autres techniques de fusion sont également employées dans la fabrication des AMF. Par exemple, la fusion par faisceau d'électrons utilise un faisceau d'électrons haute énergie pour fondre les matériaux et créer l'alliage.

En ce qui concerne la fusion par induction sous vide, elle repose sur le principe de l'induction électromagnétique. Des courants de Foucault sont induits dans un creuset en graphite, ce qui

génère de la chaleur et permet la fusion du métal. Cette technique est souvent utilisée pour produire des échantillons d'AMF de petite taille et de haute pureté

## 2.6. Modèle mathématique des alliages à mémoire de forme

### 2.6.1. Modèle constitutif des alliages à mémoire de forme

Il existe un modèle réalisé par Hui Quan et al à partir du modèle de Graesser and Cozzarelli pour l'effet super-élastique ces derniers sont basés sur le modèle de Ozdemir afin de montrer la propriété dépendante du taux de déformation des matériaux AMF [27]

$$\dot{\sigma} = E \left[ \dot{\varepsilon} - |\dot{\varepsilon}| \left( \frac{\sigma - \beta}{Y} \right)^n \right] \quad (2.2)$$

où  $\sigma$  est la contrainte unidimensionnelle,  $\varepsilon$  est la déformation,  $E$  est le module d'élasticité,  $Y$  est la contrainte de transformation,  $n$  est une constante supposée être une valeur réelle positive et impaire qui contrôle la netteté de la transition de l'état élastique à la transformation de phase,  $\dot{\sigma}$  et  $\dot{\varepsilon}$ , respectivement, désignent la dérivée temporelle ordinaire de la contrainte et de la déformation, et  $\beta$  est la contrainte de rappel unidimensionnelle, donnée par :

$$\beta = E \alpha \left\{ \varepsilon_{in} + f_T |\varepsilon|^c \operatorname{erf}(\alpha \varepsilon) [u(-\varepsilon)] \right\} \quad (2.3)$$

$f_T$ ,  $\alpha$  et  $c$  sont des constantes matérielles qui contrôlent le type et la taille de l'hystérésis, la quantité de récupération élastique lors du déchargement, et la pente du plateau de contrainte de déchargement, respectivement.  $\alpha$  est une constante qui contrôle la pente de la courbe  $\sigma$ - $\varepsilon$  dans la plage inélastique, donnée par

$$\alpha = \frac{E_y}{E - E_y} \quad (2.4)$$

où  $E_y$  est la pente de la courbe  $\sigma$ - $\varepsilon$  dans la plage inélastique.  $\varepsilon_{in}$  est la déformation inélastique, donnée par :

$$\varepsilon_{in} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (2.5)$$

" $u(x)$ " est la fonction échelon unitaire définie comme.

((2.6

$$u(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ +1 & x \geq 0 \end{cases}$$

### 2.6.2. Tanaka model

Tanaka prend un alliage à mémoire de forme (AMF) unidimensionnel comme objet de recherche, et son équation constitutive est la suivante [28]:

$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi)(\varepsilon - \varepsilon_0) + \theta(T - T_0) + \Omega(\xi)(\xi - \xi_0) \quad (2.7)$$

Parmi ceux-ci,  $\sigma_0$  et  $\sigma$  indiquent la contrainte initiale et la contrainte à un certain état ;  $\varepsilon_0$  et  $\varepsilon$  indiquent la déformation initiale et la déformation à un certain état ;  $T_0$  et  $T$  indiquent la température initiale et la température à un certain état ;  $\xi_0$  et  $\xi$  indiquent le nombre de volume

initial de la transformation martensitique et le nombre de volume de transformation à un certain état ;  $E(\xi)$  est le module de Young du matériau,  $E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A)$  (2.8)

$E_A$  et  $E_M$  sont les modules d'élasticité respectivement en austénite et en martensite.  $\theta$  est le coefficient thermique ;  $\varepsilon_L$  est la déformation maximale de transformation ;  $\Omega(\xi)$  est le coefficient de transformation:  $\Omega(\xi) = -\varepsilon_L E(\xi)$ . la variable interne  $\xi$ , qui reflète le changement de la transformation du matériau, est un paramètre très important. Sa valeur est déterminée par l'équation dynamique de transformation.

Lorsque la transformation martensitique se produit, c'est-à-dire la transformation de la phase austénitique A à la phase martensitique M "

$$\xi = 1 - e^{\alpha_M(Ms-T)+b_M\sigma} \quad (2.9)$$

Lorsque la transformation en austénite se produit, c'est-à-dire la transformation de la phase martensitique M à la phase austénitique A.

$$\xi = e^{\alpha_A(As-T)+b_A\sigma} \quad (2.10)$$

nous avons

$$\alpha_A = \frac{\ln(0.01)}{A_s - A_f} \quad (2.11)$$

$$\alpha_M = \frac{\ln(0.01)}{M_s - M_f} \quad (2.12)$$

$$b_A = -\frac{a_A}{c_A} \quad (2.13)$$

$$b_M = -\frac{a_M}{c_M} \quad (2.14)$$

$C_A$  et  $C_M$  sont les coefficients de transformation équivalents de la contrainte et de la température lorsque l'austénite se transforme en martensite et lorsque la martensite se transforme en austénite respectivement ;  $M_s$  et  $M_f$  sont les températures de début et de fin de la transformation en martensite respectivement ;  $A_s$  et  $A_f$  sont les températures de début et de fin de la transformation en austénite respectivement.

### 2.6.3. Liang and Rogers model

Le modèle de Tanaka [29] a été amélioré par Liang et Rogers, principalement en se reflétant dans l'équation cinétique de la transformation martensitique. La relation cosinus entre les variables internes  $\xi$  (fraction volumique de la transformation martensitique) avec la température et la contrainte a été proposée. La fonction cosinus a été utilisée dans l'équation de transformation, et l'influence des conditions initiales des variables internes sur la transformation martensitique et la transformation austénitique a également été prise en compte. Lorsque la transformation martensitique se produit, c'est-à-dire la transformation de la phase austénitique A en phase martensitique M :

$$\xi = \frac{1-\xi_A}{2} \cos [ a_M(T - M_f) + b_M\sigma ] + \frac{1+\xi_A}{2} \quad (2.15)$$

La transformation de la martensite à l'austénite se produit

$$\xi = \frac{\xi_M}{2} \cos[ a_A(T - A_s) + b_A\sigma + 1 ] \quad (2.16)$$

$$\text{avec } a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s} \quad (2.17)$$

$$a_M = \frac{\pi}{M_s - M_f} \quad (2.18)$$

$$b_A = -\frac{a_A}{c_A} \quad (2.19)$$

$$b_M = -\frac{a_M}{c_M} \quad (2.20)$$

et  $\xi_M$  représentent respectivement les nombres de volume de transformation initiaux de  $A \rightarrow M$  et  $M \rightarrow A$  ;

Les autres symboles sont les mêmes que précédemment. L'équation de transformation de phase est une simulation phénoménologique basée sur la forme de la courbe expérimentale.

#### 2.6.4. Brinson model

Dans le modèle constitutif proposé par Tanaka et Liang, la réorientation de la phase martensitique ne peut pas être résolue à basse température. Pour résoudre ce problème, Brinson divise le nombre de volume  $\xi$  de la transformation martensitique en deux parties : l'une est le nombre de transformation martensitique  $\xi_T$  induite par le changement de température, l'autre est le nombre de transformation martensitique  $\xi_S$  induite par le changement de contrainte. [30] L'équation constitutive est la suivante :

$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi) \varepsilon - \varepsilon_0 + \theta(T - T_0) + \Omega(\xi)\xi_s - (\xi_0)\xi_{s0} \quad (2.21)$$

Nous avons  $\xi = \xi_s + \xi_T$  Lorsque le matériau est dans un état hyperélastique ( $T > A_f$ ), l'équation de transformation de phase de la variable interne ( $\xi_T, \xi_T$ ) "

Quand la transformation martensitique se produit de la phase austénite A à la phase martensite M

$$\xi_s = \frac{1 - \xi_s}{2} \cos \left[ \frac{\pi}{\sigma_{ms} - \sigma_{mf}} (\sigma - \sigma_{mf} - c_M(T - M_f)) + \frac{1 + \xi_{s0}}{2} \right] \quad (2.22)$$

Quand la transformation austénite se produit ; de la phase martensite M à la phase austénite A

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \cos[ \alpha_A(T - A_s - \frac{\sigma}{c_A}) + 1 ] \quad (2.23)$$

$$\xi_s = \xi_{s0} - \frac{\xi_{s0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad (2.24)$$

#### Conclusion

La 1ere partie de chapitre donne des définitions sur les structures intelligentes en énumérant les différents types qu'elle englobe tel que le contrôle passif, actif, semi actif ou hybride en se penchant sur ce qui a été utilisé dans la littérature. La 2eme partie du chapitre se focalise sur les alliages à mémoire de forme qui font partie des matériaux intelligents en parlant des différents

effets propres à ces matériaux tel que l'effet mémoire de forme simple sens ou l'effet mémoire de forme double sens ainsi que l'effet super élastique qui sera utilisé dans le chapitre 4 et 5 de ce travail. Les différents types de matériaux seront aussi abordés dans ce chapitre tel que les AMF à base de cuivre de fer ou Nickel-Titane. L'AMF à base de Nickel-Titane sera utilisé dans la suite du travail.

## 2.7. Références

- [1] Li, A. (n.d.). *Springer Tracts in Civil Engineering Vibration Control for Building Structures Theory and Applications*. <http://www.springer.com/series/15088>
- [2] Symans, M. D., Asce, A. M., Charney, F. A., Asce, F., Whittaker, ; A S, Asce, M., Constantinou, ; M C, Kircher, ; C A, Johnson, ; M W, & Mcnamara, R. J. (n.d.). *Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94452008134:13>
- [3] Ikeda, Y. (2009). Active and semi-active vibration control of buildings in Japan-practical applications and verification. *Structural Control and Health Monitoring*, 16(7–8), 703–723. <https://doi.org/10.1002/stc.315>
- [4] Li, A. (n.d.). *Springer Tracts in Civil Engineering Vibration Control for Building Structures Theory and Applications*. <http://www.springer.com/series/15088>
- [5] Duc-Chuan VU *Contrôle sismique des structures*. (n.d.).
- [6] Isolateur sismique en élastomère (<http://www.archiexpo.fr>)
- [7] Victor Davidovici Conception-construction parasismique : Traité d'application de l'Eurocode 8
- [8] Isolateur sismique à glissement (<http://www.archiexpo.fr>)
- [9] Ucke, C., & Schlichting, | Hans-Joachim. (2008). *Originally published in the German journal 'Physik in unserer Zeit* (Vol. 39). <http://www.ucke.de/christian/physik/ftp/lectures/flipflop4.wmv>
- [10] Allani, A. (n.d.). *Conception et optimisation d'amortisseurs à masse accordée pour les structures du génie civil*. <https://pastel.hal.science/tel-01291427>
- [11] Ucke, C., & Schlichting, | Hans-Joachim. (2008). *Originally published in the German journal 'Physik in unserer Zeit* (Vol. 39). <http://www.ucke.de/christian/physik/ftp/lectures/flipflop4.wmv>
- [12]Alotaibi, F., & Sinclair, B. (2017). *Tall buildings, high expectations, towering responsibilities*. 535–542. <https://doi.org/10.1201/9781315226255-82>

- [13] Constantinescu, D., & Köber, D. (2013). The Minaret of the Great Mosque in Algiers, a Structural Challenge. *Open Journal of Civil Engineering*, 03(02), 27–39.  
<https://doi.org/10.4236/ojce.2013.32a004>
- [14] <https://structurae.net/fr/produits-services/500-ans-de-protection-sismique-pour-la-grande-mosquee-d-alger>
- [15] Aydin, A. C., & Çelebi, O. (2023). Piezoelectric Materials in Civil Engineering Applications: A Review. In *ACS Omega* (Vol. 8, Issue 22, pp. 19168–19193). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00672>
- [16] Aydin, A. C., & Çelebi, O. (2023). Piezoelectric Materials in Civil Engineering Applications: A Review. In *ACS Omega* (Vol. 8, Issue 22, pp. 19168–19193). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00672>
- [17] Benzina F " contribution à l'étude des structures intelligentes " magistère en génie civil 2013 Université Tlemcen
- [18] Madhekar, S., & Matsagar, V. (n.d.). *Passive Vibration Control of Structures*.
- [19] W Housner, B. G., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., Skelton, R. E., Soong, T. T., Member, S., Spencer, B. F., P Yao, J. T., & Member, IO. (n.d.). *STRUCTURAL CONTROL: PAST, PRESENT, AND FUTURE*.
- [20] BENKRALED.M.I *Optimisation de la loi constitutive des alliages à mémoire de forme : Effet de la variation des vitesses de déformation et du chargement cyclique*. 2022 . Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen 'These de doctorat '
- [21] Aleksandra Dębska Andrzej SERUGA, M., Piotr GWOŹDZIEWICZ, M., & Associé, P. (n.d.). "UTILISATION D'ALLIAGES A MEMOIRE DE FORME POUR LA CREATION D'EFFETS DE PRECONTRAINTE DANS DES COMPOSANTS EN BETON" Co-encadrant.
- [22] Elena Bastarash structure et propriétés des alliages à mémoire de forme titane-nickel nanocristallins obtenus par traitements thermomécaniques l'école de technologie supérieure Montréal 2006
- [23] Thomas GEORGES développement d'un outil de conception pour les actionneurs AMF à rappel passif et actif prenant en compte l'influence des traitements thermomécaniques l'école de technologie supérieure université du Québec 2012
- [24] MEDDOUR Belkacem "modelisation et simulation du comportement thermomecanique des alliages a memoire de forme" thèse doctorat Université Hadj Lakhdar de Batna 2016
- [25] Naresh, C., Bose, P. S. C., & Rao, C. S. P. (2016). Shape memory alloys: A state of art review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 149(1).  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/149/1/012054>

- [26] Ikeda, Y. (2009). Active and semi-active vibration control of buildings in Japan-practical applications and verification. *Structural Control and Health Monitoring*, 16(7–8), 703–723. <https://doi.org/10.1002/stc.315>
- [27] Ren, W., Li, H., & Song, G. (2007). A one-dimensional strain-rate-dependent constitutive model for superelastic shape memory alloys. *Smart Materials and Structures*, 16(1), 191–197. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/1/023>
- [28] Sayyaadi, H., Zakerzadeh, M. R., & Salehi, H. (2012). A comparative analysis of some one-dimensional shape memory alloy constitutive models based on experimental tests. *Scientia Iranica*, 19(2), 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.01.005>
- [29] C. LIANG and C.A. ROGERS A multi-dimensional constitutive model for shape memory alloys. (1992). In *Journal of Engineering Mathematics* (Vol. 26). Kluwer Academic Publishers.
- [30] Benkraled, M. I., & Benadla, Z. (2021). Introduction of the strain rate and cyclic loading effects on shape memory alloys constitutive law models. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00412-w>

# **Chapitre 3 : Etat de l'art sur l'utilisation du contrôle passif et actif dans les structures intelligentes dans le génie civil**

## **3.1. Introduction**

L'ingénierie sismique a toujours pris en compte l'effet du séisme sur la structure suite aux dommages occasionnés en termes de moyen humain et matériel. Le contrôle sismique s'est développé que récemment et a commencé les dernières décennies du siècle dernier. Le but principal est d'augmenter la sécurité des personnes et apporter plus de longévité aux infrastructures. Les spécialistes du bâtiment ont alors utilisé différentes techniques depuis les années 70 comme les amortisseurs à frottement. Il faut noter que grâce à la recherche on remarque une évolution croissante des différents systèmes de contrôle. Ce contrôle concerne aussi bien les nouvelles habitations que la réhabilitation des anciennes structures. L'un des premiers systèmes de contrôle des années 70 est l'amortisseur à frottement visqueux, c'est un dispositif qui utilise un liquide visqueux comme l'huile dans le but de dissiper l'énergie sismique. Une avancé non négligeable dans les années 90 est à noter suite à l'utilisation de nouvelles techniques comme les isolateurs sismiques. Lors d'un séisme ces nouveaux dispositifs permettent aux structures de se déplacer de manière contrôlée. Ils furent utilisés principalement pour les infrastructures importantes et les bâtiments historiques comme le colisée et la Tour de Pise. Le contrôle actif a vu le jour également dans les années 90. Plus récemment grâce aux avancés technologique on observe l'utilisation de système actif avancé. Ces systèmes utilisent des capteurs pour détecter le mouvement sismique à temps réel et contrôler la réponse sismique par les actionneurs. Le contrôle passif et actif peut utiliser les AMF ; ces AMF étant la base de notre travail nous allons faire un état de l'art de leur utilisation dans le génie civil.

Nous allons dans une première phase présenter quelques exemples d'utilisation de contrôle passif sans AMF en prenant le cas du CTC de Ain Defla et la grande mosquée d'Alger. Dans une seconde phase nous décrivons par une revue de littérature les possibilités qu'offrent l'utilisation des AMF le contrôle actif et passif dans le génie civil.

## **3.2. Contrôle de vibration sans AMF**

Le type de contrôle utilisé dans les structures suivantes est le contrôle passif

### 3.2.1. Contrôle de vibration dans le siège du CTC de AIN defla

La 1<sup>ère</sup> utilisation des appuis en élastomère encrés dans la structure remonte à 1969 . Ces appuis ont une grande rigidité dans la direction verticale de l'ordre de 400 à 1000 fois supérieur à la rigidité horizontale, et leur fréquence se situe dans un éventail entre 0.3 Hz et 1 Hz. Parmi les réalisations faites en Algérie avec cette technologie on peut citer le projet du siège de l'organisme du contrôle technique de la construction (CTC) de Ain defla. Pour sa réalisation en plus d'une entreprise moyenne de construction locale ont été associés un laboratoire anglais, une société malaisienne productrice des isolateurs, auxquels s'est adjoint un bureau d'études italien (figure 3.1) [1]



**Figure3. 1.** Siege du CTC Ain Defla en Algérie [1]

### 3.2.2. Contrôle de vibration dans la grande mosquée d'Alger

#### 3.2.2.1. Salle de prière

Avec le projet de la "Grande Mosquée d'Algérie" (figure 3.2), l'état Algérien a lancé un processus de développement d'un nouveau bâtiment emblématique. La mosquée elle-même sera la troisième plus grande au monde. Pour la surface brute disponible de 400 000 m<sup>2</sup>, environ 120 000 visiteurs sont attendus chaque jour. Le complexe, situé à environ 500 mètres de la côte méditerranéenne, comprendra également un centre de congrès, une bibliothèque et une université.



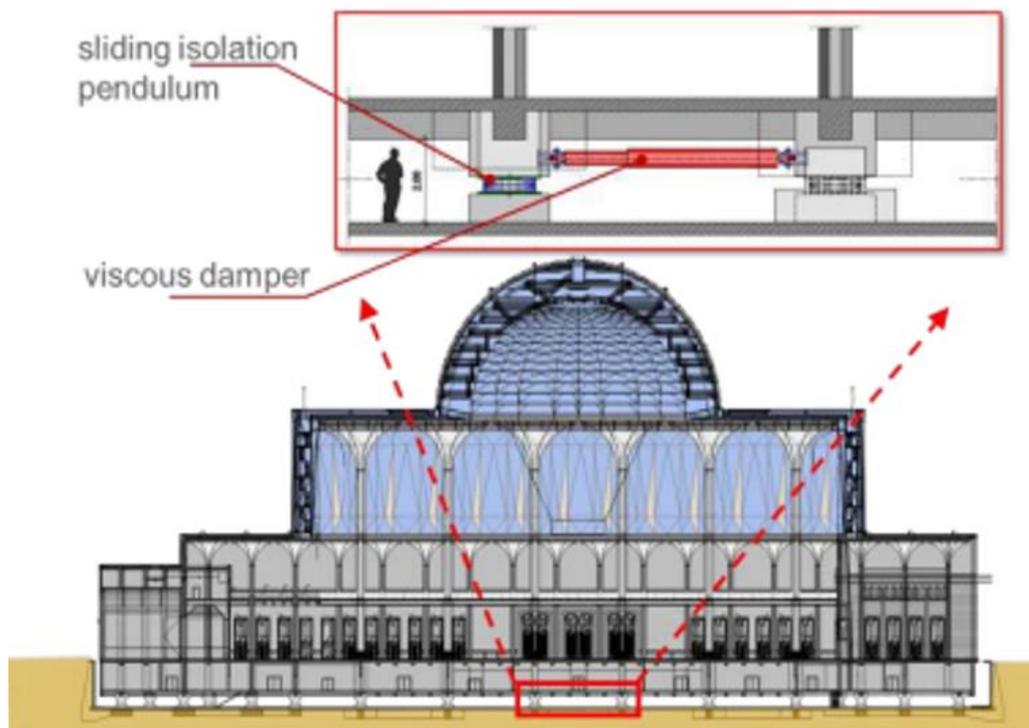
**Figure3. 2.**La grande mosquée d’Alger

Pour ce type de contrôle de vibration, deux niveaux sismiques de conception ont été considérés pour la région d’Alger, l’évènement modéré DBE ( design Basic Earthquake ) et l’évènement fort MCE ( maximum considered Earthquake )

Afin de répondre aux deux types de contraintes possibles, une solution hybride a été élaborée, combinant des paliers et des amortisseurs. Les détails de cette solution sont les suivants :

**a- Les paliers oscillants à glissement**

246 paliers oscillants à glissement (SIP - Sliding Isolation Pendulum) ont été mis en place pour créer une isolation horizontale entre le bâtiment et le sol comme illustré dans la figure 3.3



**Figure3. 3.** Système de contrôle sismique dans la salle de prière [2]

Ces paliers sont utilisés pour absorber et dissiper les forces sismiques générées par un tremblement de terre en permettant des mouvements angulaires et axiaux limités. Cela aide à réduire les charges sismiques transmises à la structure, contribuant ainsi à la protection de la structure elle-même et des équipements qu'elle contient. [2]

La flexibilité des paliers oscillants à glissement va permettre à la structure de suivre les mouvements du sol pendant un séisme, réduisant ainsi les contraintes et les déformations potentielles. Cela peut être particulièrement important dans le cas de bâtiments à plusieurs étages.

Les paliers SIP (figure 3.4) de dimension 1360 x1360 mm, mis en place en dessous des poteaux supportent la charge verticale du bâtiment, pouvant atteindre 2.730 tonnes par palier, tout en maintenant une stabilité à l'abri des défaillances, même sous des charges maximales élevées et des déviations importantes. Ces paliers intègrent des surfaces de glissement qui autorisent des mouvements horizontaux jusqu'à  $\pm 655$  mm, dissipant l'énergie cinétique sous forme de chaleur. En isolant la mosquée du sol, l'isolateur rend immobile la superstructure et laisse la fondation osciller



**Figure3. 4.**Palier oscillant à glissement dans la salle de prière [3]

#### **b- Amortisseurs hydrauliques**

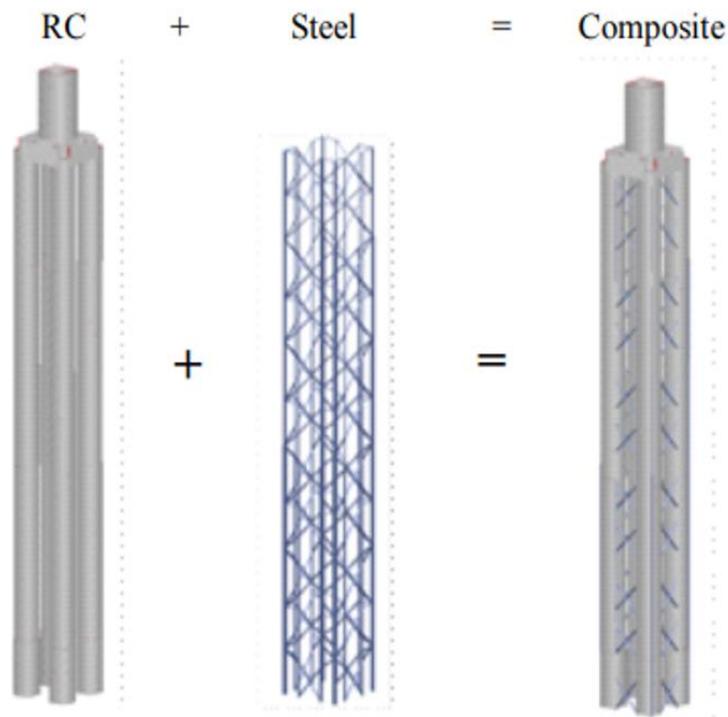
80 amortisseurs hydrauliques à effet horizontal ont été intégrés pour contrôler le mouvement de la structure et limiter les déplacements à une plage de  $\pm 655$  mm.

Les amortisseurs hydrauliques consistent généralement en un cylindre rempli d'huile ou d'un fluide visqueux et équipé d'un piston. Lorsque la structure subit des vibrations sismiques, le piston se déplace à l'intérieur du cylindre, forçant le fluide à passer à travers des orifices étroits. Cette action génère une résistance visqueuse qui absorbe l'énergie du séisme et ralentit les mouvements de la structure. [3]

#### **3.2.2.2. Le minaret**

Le minaret de la mosquée d'Alger, le plus haut du monde a une hauteur de 265m et une longueur de côté de 26.5 m. Comparée à sa hauteur la structure est considérée comme mince et peut être sensible a des épisodes sismiques de forte intensité.

Le système antisismique du minaret est constitué de noyaux centraux et d'une charpente métallique intégrée à l'extérieur de cette structure comme le montre la figure 3.5 [4]

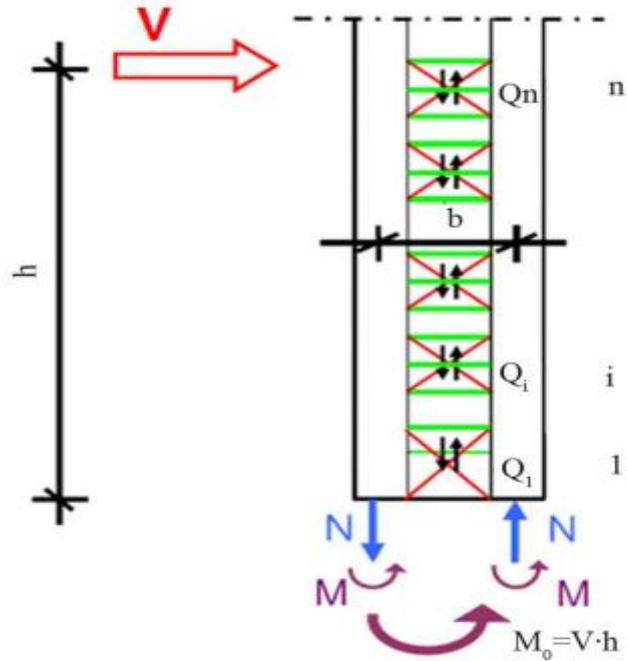


**Figure3. 5.** Système parasismique en noyau central et en charpente métallique utilisé dans la grande mosquée d'Alger [4]

-Charpente métallique du minaret

Des diagonales de contreventement en charpente métallique ont été posés dans la partie extérieure du mur

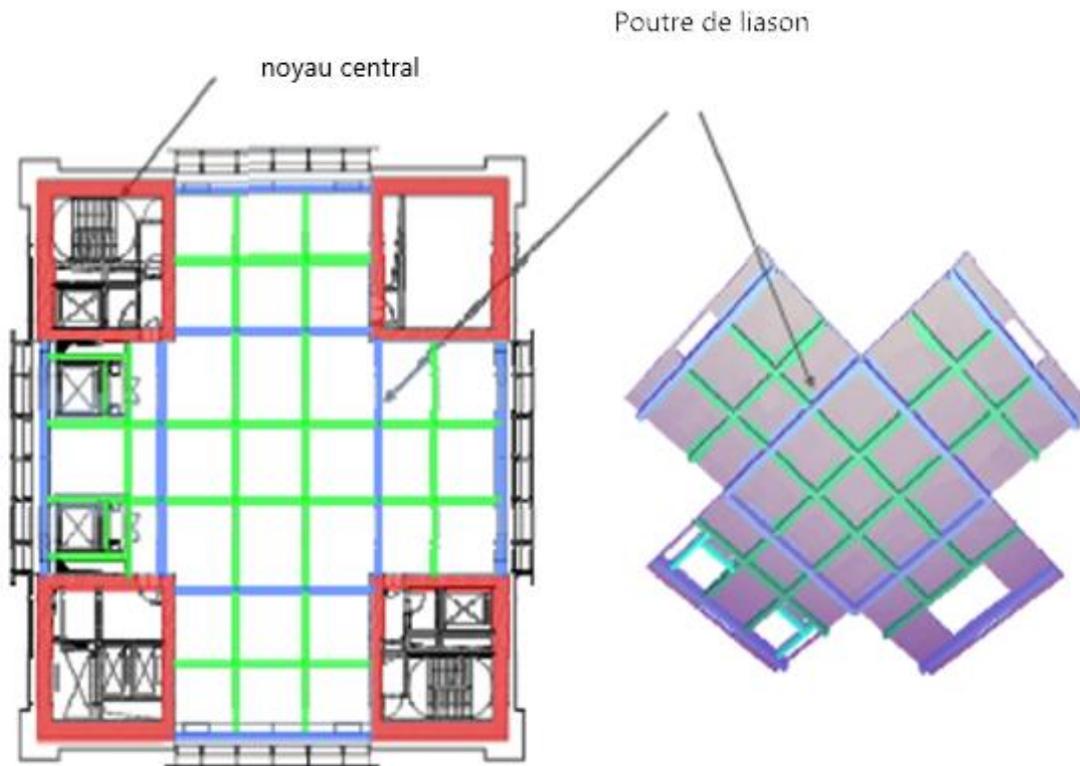
Les efforts reçus par les diagonales sont dus aux forces sismiques qui vont créer des forces externes  $V$  ; ceci va entraîner des moments de flexion internes  $M$  et des efforts internes  $N$  comme on peut le voir dans la figure suivante (figure 2.6). Le système de contreventement va alors dissiper près des  $\frac{3}{4}$  de l'énergie sismique.



**Figure3. 6.** Répartitions des efforts externes et internes dans la charpente du minaret de la grande mosquée d'Alger [4]

-Noyaux centraux

4 noyaux centraux de forme carrée de 7.5 m en béton armé (figure 2.7). Il y'a un système de raidissement par poutre, les poutres principales sont représentées en bleu dans la figure. Les noyaux d'angle en béton armé ont des murs qui ont des épaisseurs de 1 m dans le bas de la structure a est une épaisseur de 45 cm vers le haut.



**Figure3. 7.** Noyaux centraux dans le minaret de la grande mosquée d'Alger [4]

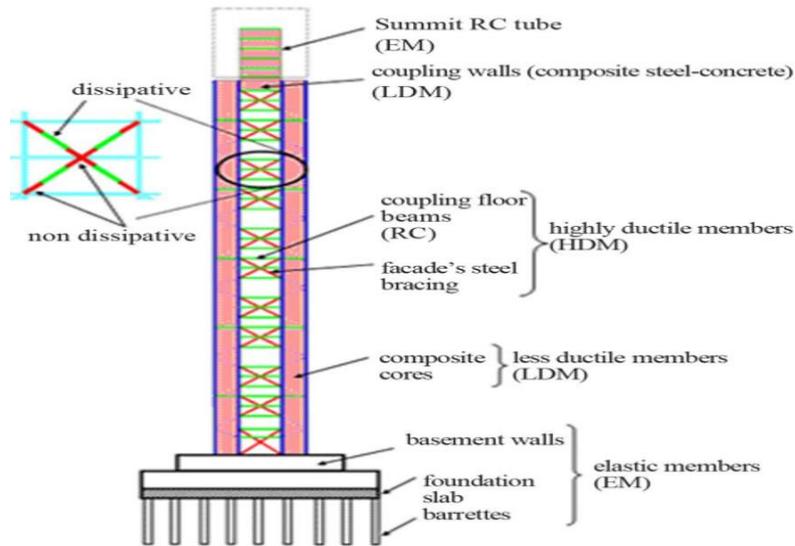
La charpente métallique et les noyaux centraux constituant la partie résistante de la structure ont été divisé en :

-Membres hautement dissipatifs (HDM) : Ce sont les éléments structuraux qui seront les premiers à céder et doivent avoir une grande ductilité. Ils dissiperont la majeure partie de l'énergie induite lors d'un fort séisme et agiront également comme des "fusibles" à l'intérieur de la structure en limitant l'ampleur des forces internes induites.

-Membres moins dissipatifs (LDM) : Ce sont des éléments structuraux qui subiront une déformation plastique faible ou modérée lors du séisme.

-Membres élastiques (EM) : Ce sont des éléments structuraux qui doivent rester élastiques lors du séisme. La capacité de support de charge de ces membres doit être dimensionnée de manière à ce que plus le risque d'effondrement fragile est élevé, plus la résistance existante est élevée.

La figure 3.8 retrace ces différentes parties résistantes au séisme

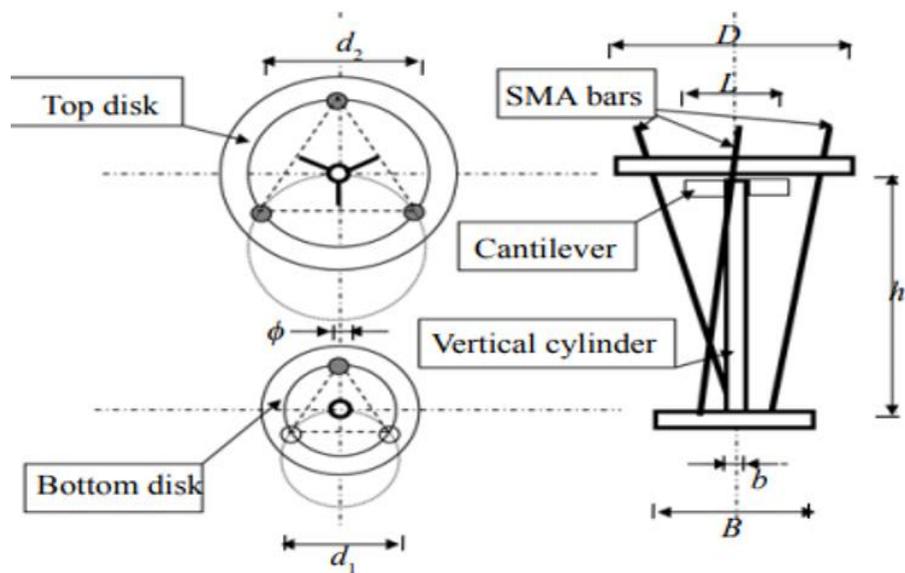


**Figure3. 8.** Classification des éléments anti sismique selon leur efficacité [4]

### 3.3. Contrôle passif en utilisant les AMF

#### 3.3.1. Performance des isolateurs à la base en utilisant les AMF

Casciati, F et al ont développé un nouveau et innovant dispositif d'isolation a vu le jour, c'est un isolateur à la base en utilisant les AMF. Un prototype du dispositif (Figure 3.9) a été construit et testé expérimentalement sur une table vibrante. Le nouveau dispositif d'isolation de base se compose de deux disques, d'un cylindre vertical avec un élargissement supérieur soutenu par trois porte-à-faux horizontaux, et d'au moins trois barres inclinées en alliage à mémoire de forme [5].

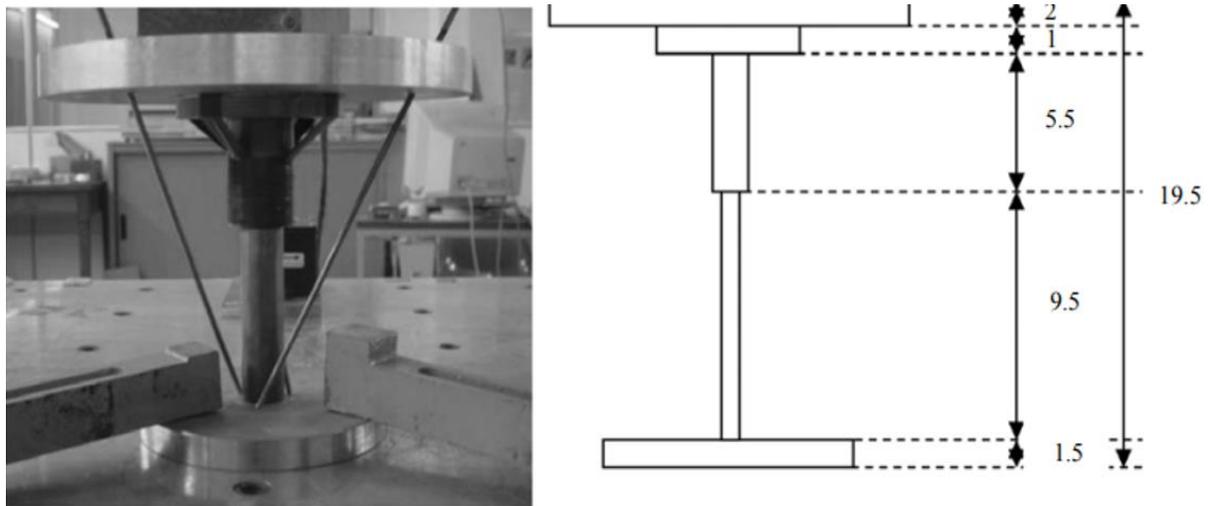


**Figure3. 9.**Géométrie de l'isolateur à la base qui utilise les AMF [5]

Le rôle des barres AMF est de limiter le mouvement relatif entre la base et la superstructure, de dissiper l'énergie selon leur loi constitutive super-élastique et de garantir le recentrage du dispositif. Pour vérifier les performances attendues, un prototype a été construit et testé sous des chargements sinusoïdales de déplacement de fréquence croissante avec différentes amplitudes. Il est démontré que la caractéristique principale du dispositif d'isolation de base proposé réside dans le fait que, lors de sollicitations cycliques, le comportement super-élastique de l'alliage entraîne de larges boucles charge-déplacement, où une grande quantité d'énergie est dissipée.

Le concept d'un isolateur de base peut être simplement mis en œuvre dans un support coulissant (figure 3.10 ). De nombreux dispositifs sont disponibles sur le marché, allant des tout petits dispositifs de taille micro aux grands dispositifs utilisés dans les applications du génie civil. Dans les applications d'ingénierie, les fabricants se concentrent principalement sur les isolateurs de base en caoutchouc car la technologie impliquée est simple et bien comprise.

Cependant ces dispositifs n'assurent pas certains critères. Le glissement ne devrait pas se produire sous des excitations de faible intensité pour contrer les actions statiques. Les isolateurs construits en superposant plusieurs ensembles de disques en acier et en caoutchouc sont dangereux. L'isolateur avait été obtenu dans le passé en insérant une inclusion de plomb, mais le plomb n'est plus utilisé dans les applications technologiques en raison de sa toxicité. Les alliages à mémoire de forme (AMF) ont été étudiés comme remplacement du plomb



**Figure3. 10.** Prototype de l'isolateur à la base qui utilise les AMF [5]

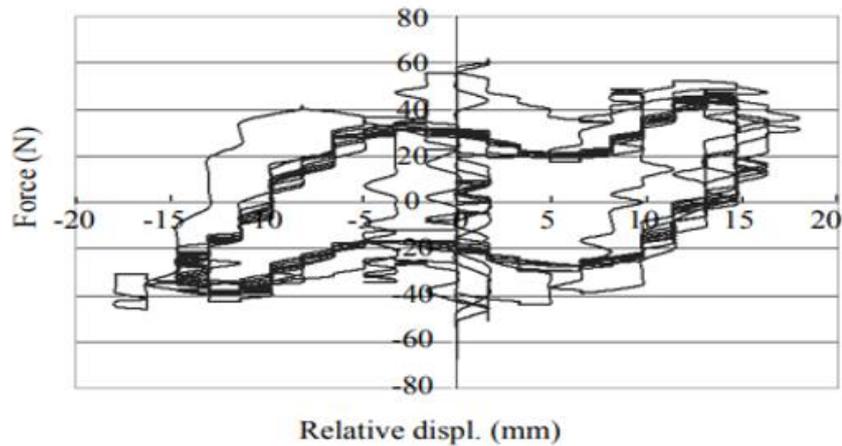
Lorsque les AMF subissent des cycles de déformation et de récupération thermique, un comportement hystérésis peut se manifester. L'essai a débuté à une fréquence de 2 Hz pour atteindre doucement 4 Hz par incrément de 0.05 et ensuite de 0.5

Initialement, aucun déplacement relatif significatif entre le disque supérieur et le disque inférieur n'a été détecté. En d'autres termes, la force supérieure était inférieure à la force de frottement entre le côté supérieur du cylindre vertical et la plaque en aluminium. À la fréquence de 2,20 Hz (figure 3.11), la plaque supérieure se déplace indépendamment du disque inférieur ;

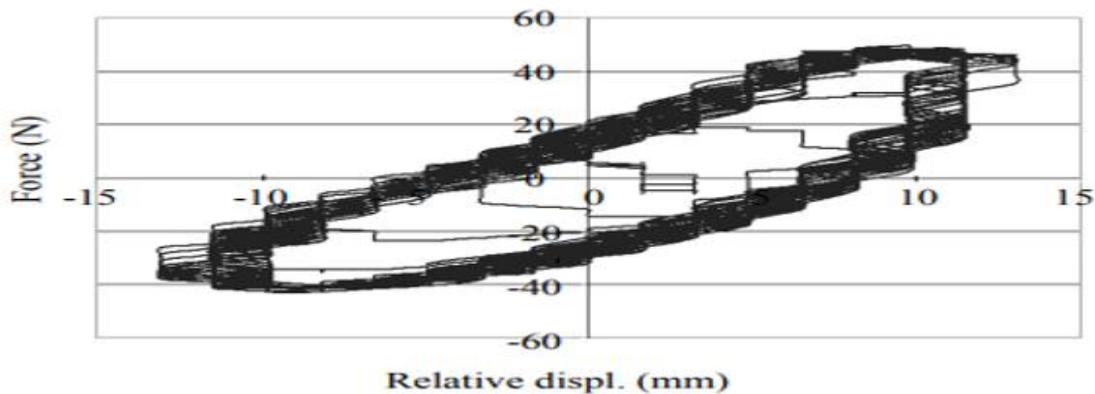
La force varie d'abord, pour des déplacements relatifs négligeables en dessous du seuil négatif. Ensuite, le seuil est atteint et le graphique suit quelques boucles irrégulières jusqu'à ce que le mouvement se stabilise le long des cycles stationnaires. Chaque cycle montre de faibles forces à des déplacements nuls et des valeurs de crête d'environ 40 N (et -40 N)

À mesure que la fréquence augmente, deux étapes se produisent ; tout d'abord, l'accélération et la force augmentent, puis l'isolation à la base se produit réellement.

Lorsque la fréquence est encore augmentée, une isolation totale est atteinte. L'hystérésis prend la forme illustrée dans la Figure 3.12, tracée pour une fréquence de 4 Hz, et la valeur maximale du déplacement relatif est inférieure aux valeurs des plus basses fréquences.



**Figure3. 11.** Force en fonction du déplacement à une fréquence de 2.2 hz [5]



**Figure3. 12.** Force en fonction du déplacement dans l'état final à une fréquence de 4 hz . [5]

### 3.3.2. L'exemple de l'église S.Giorgio

L'utilisation de dispositifs basés sur des AMF superélastiques s'est révélée également très efficace pour améliorer la résistance sismique des structures en maçonnerie. De tels dispositifs ont été étudiés pour répondre à différents besoins structurels. Par exemple, les dispositifs à mémoire de forme peuvent être utilisés pour précontraindre la maçonnerie. Ces AMF peuvent être posés horizontalement pour renforcer la résistance sismique hors plan des murs, comme ceux des façades d'église. Les AMF peuvent être conçus sur mesure en tenant compte des caractéristiques uniques de chaque monument. [6]

Le développement de ces techniques de réhabilitation innovantes et de ces dispositifs a inclus des études théoriques et numériques. La modélisation numérique de différents éléments structuraux et de structures réelles a été réalisée aussi à l'aide de méthodes d'éléments finis par des logiciels qui tiennent compte de la nature des structures en maçonnerie. Les études numériques et les résultats expérimentaux montrent que les AMF peuvent augmenter considérablement la stabilité des structures en maçonnerie exposées à un séisme. Par exemple,

des essais de secousses hors plan sur des maquettes de maçonnerie montrent que la structure protégée par des attaches d'AMF peut rester intacte après un séisme d'une intensité d'au moins 50 % supérieure à celle ayant provoqué l'effondrement d'une structure renforcée avec des attaches en acier traditionnelles.

Les résultats fructueux du projet de recherche ont conduit à une application de restauration du clocher de l'église S.Giorgio en Italie, endommagé lors du séisme d'octobre 1996

L'idée de base était de connecter les parois extérieures aux planchers, aux parois perpendiculaires au sol ou au toit à l'aide d'un dispositif à mémoire de forme. Le dispositif reste rigide d'une façon similaire aux connexions en acier traditionnel, ne permettant pas de déplacements significatifs. Sous des actions horizontales de plus grande intensité (forts séismes par exemple), la rigidité du dispositif diminue, permettant des "déplacements contrôlés". Ces déplacements contrôlés devraient réduire l'amplification des accélérations, ceci en exploitant l'élasticité des parois en maçonnerie pour permettre ensuite de dissiper une partie de l'énergie transmise par le séisme. En conséquence, la structure devrait être capable de supporter un séisme de forte intensité sans s'effondrer, bien qu'elle subisse quelques dommages mineurs.

Les résultats nous donnent le comportement du clocher pour la même accélération du sol avec quatre possibilités. La première avec un clocher sans aucun type de renforcement, la deuxième avec deux câbles verticaux reliant la partie supérieure au sol, et la troisième et la quatrième avec des câbles horizontaux supplémentaires

Il est constaté que le clocher sans aucun renforcement s'effondre totalement. Dans le cas du renforcement vertical, on peut observer des dommages répandus mais le clocher reste debout. Ces dommages sont plus visibles dans la zone immédiatement en dessous des ouvertures des fenêtres. Dans le cas où un renforcement horizontal est placé immédiatement en dessous des ouvertures des fenêtres, on peut observer très peu de dommages dans la structure et elle serait capable de résister à des niveaux d'accélération beaucoup plus élevés. Enfin, l'introduction des six câbles horizontaux empêche presque totalement l'apparition de dommages, sauf dans la partie supérieure du clocher où des dommages localisés se produisent comme c'est montré dans la figure 3.13

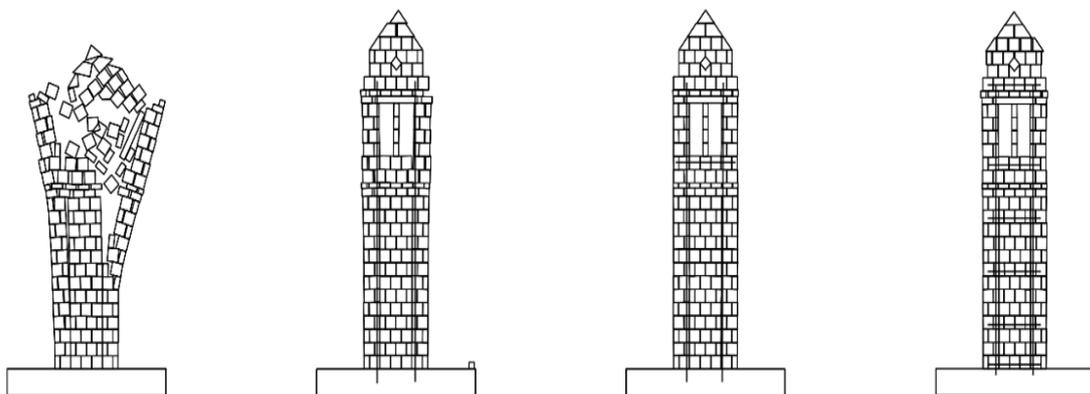


Figure3. 13 . Eglise de saint Giorgio avec et sans AMF [6]

### 3.3.3. Dans les assemblages poteau poutre

Dans la conception sismique classique des structures en béton armé, les barres d'armature sont censées céder afin de dissiper l'énergie, ce qui entraîne des déformations permanentes dues aux propriétés plastiques des barres d'acier d'armature. Si des alliages à mémoire de forme pouvaient être utilisés comme barres d'armature, ces matériaux récents pourraient subir de grandes déformations inélastiques et retrouver leur forme d'origine par élimination de la contrainte, atténuant ainsi le problème des déformations permanentes. Ainsi, lorsqu'ils sont utilisés comme renforts dans des éléments structuraux en combinaison avec de l'acier conventionnel, les AMF peuvent subir de grandes déformations inélastiques causées par les charges sismiques, mais potentiellement récupérer les déformations à la fin du tremblement de terre

La conception sismique des ossatures résistantes aux moments vise à contraindre la structure à adopter une action de poteau fort-poutre faible, dans laquelle des rotules plastiques sont attendues à se former dans les poutres aux faces des poteaux. Les zones rotules sont conçues de manière à permet à déformer les barres d'acier longitudinales, ce qui permet de dissiper l'énergie sismique. Si des AMF sont utilisés comme renforcement à la place de l'acier dans les zones rotules souhaitées des poutres, ils seront non seulement capables de dissiper une quantité adéquate d'énergie sismique, mais ils retrouveront également leur forme originale après un événement sismique. En raison de son coût plus élevé par rapport à d'autres matériaux de construction, les barres d'armature longitudinales AMF pourraient être utilisées en complément des barres d'acier dans les zones rotules des poutres. De tels assemblages poteau-poutre pourraient permettre aux ingénieurs structurels de concevoir des connexions présentant peu de dommages et réduisant les réparations des joints après un séisme. Un bâtiment en béton armé de huit étages a été pris comme exemple (figure 3.14).[7]

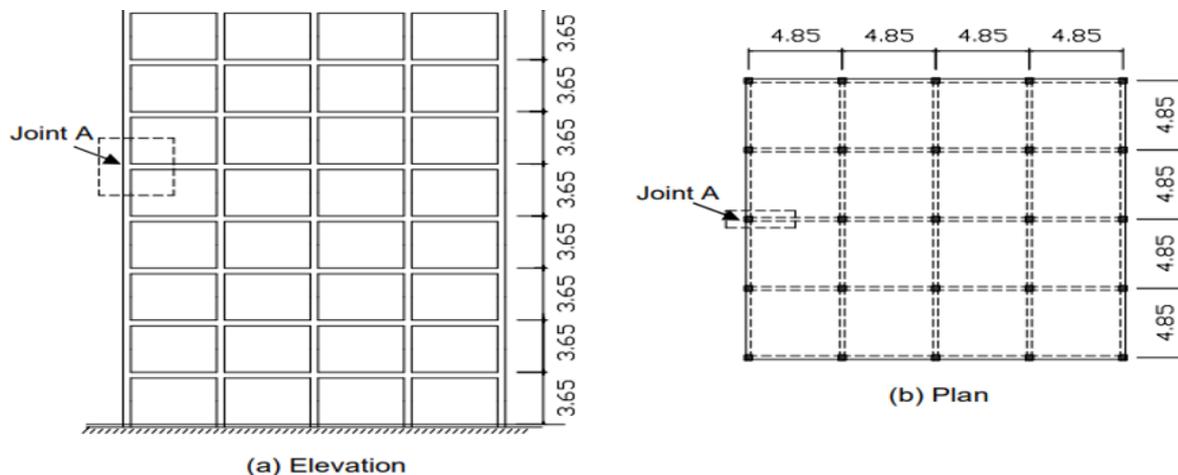
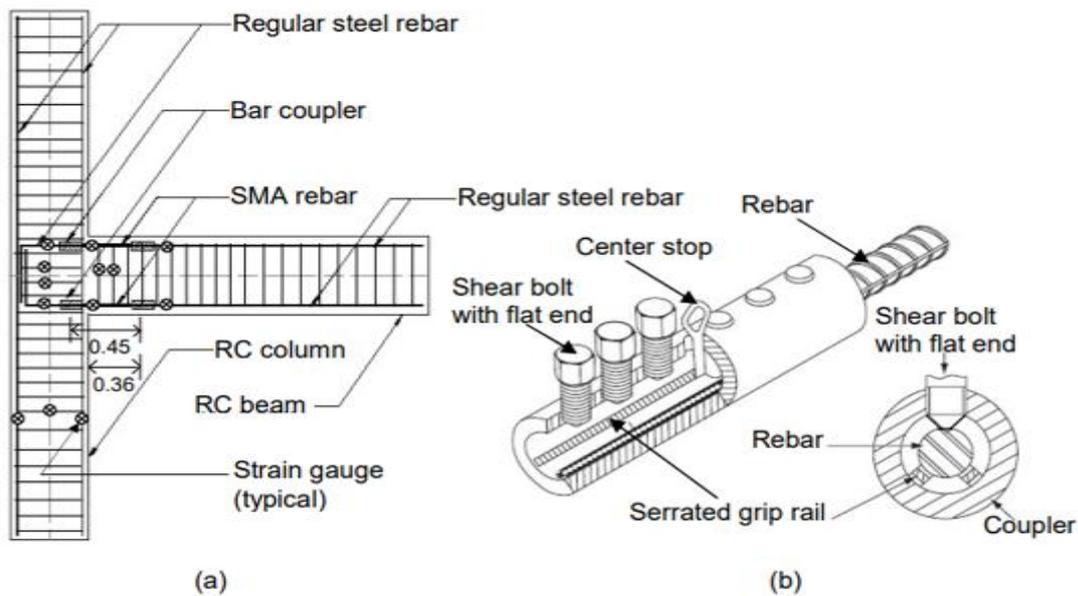


Figure3. 14. Vue en plan et en élévation de la structure à 8 étages [7]

Un assemblage poteau-poutre extérieur a été isolé au niveau des points des moments fléchissants élevés. Il existe deux types d'assemblage poteaux poutres BCJ1 et BCJ2 (Figure 2.15) Les poutres de JBC-1 et JBC-2 sont similaires en termes de géométrie ainsi que de quantité et d'arrangement de l'armature transversale. Elles diffèrent au niveau de l'armature longitudinale dans la zone de rotule plastique, où les AMF ont été utilisés dans JBC-2 (figure 2.16) tandis que de l'acier ordinaire a été utilisé dans JBC-1.



**Figure3. 15.** Mise en place des assemblages poteau poutre avec utilisation des AMF : a : assemblage poteau poutre. b : coupleur [7]



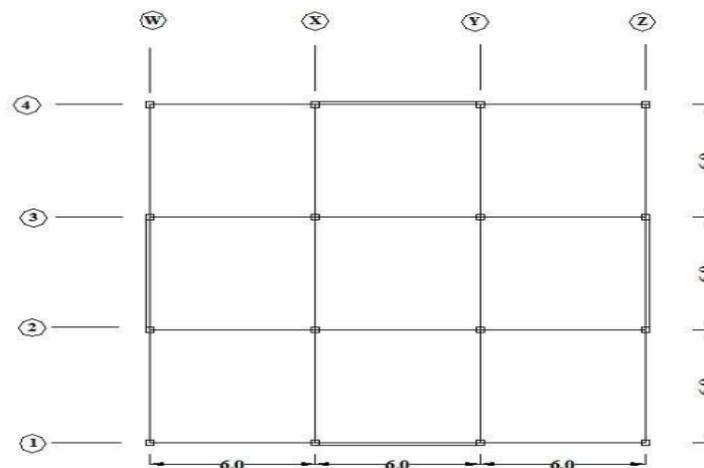
**Figure3. 16.** Assemblage poteau poutre avec AMF à l'état réel [7]

Bien que les AMF aient un potentiel significatif comme armature dans le béton, leur coût élevé constitue un frein majeur. Cependant, les prix du Ni-Ti ont considérablement baissé ces dernières

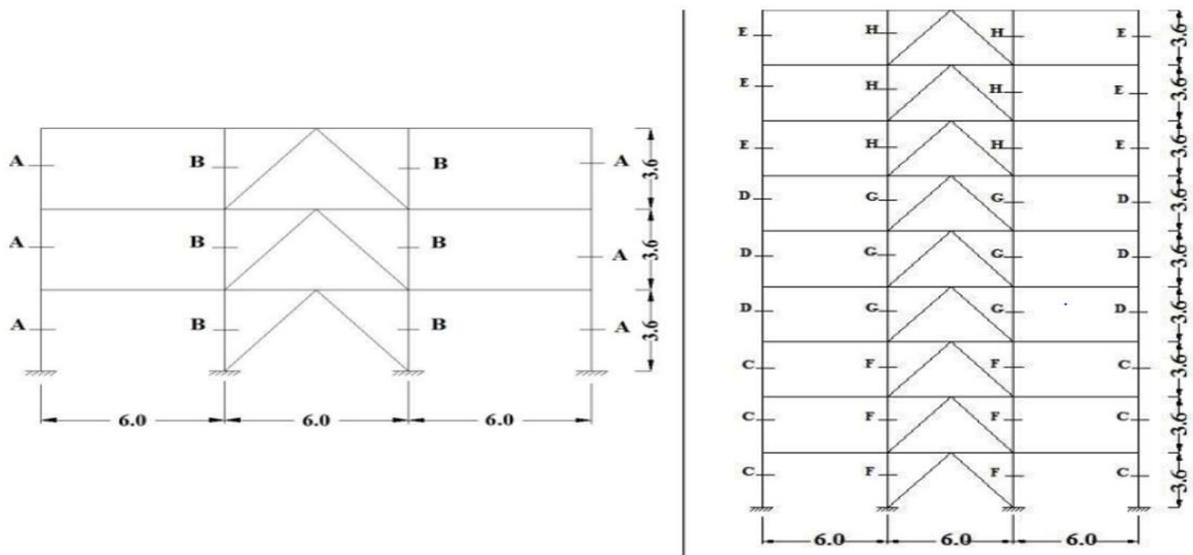
années, passant de plus de 1000 USD à moins de 150 USD par kg actuellement. Néanmoins, leur coût reste plus élevé que celui d'autres matériaux de construction. Une approche hybride où les AMF sont utilisés conjointement avec l'acier pourrait être compétitive en termes de coûts et offrir des avantages en performances. Des accouplements à vis, coûtant environ 60 USD après usinage, sont utilisés pour connecter les AMF avec l'acier. Cette méthode présente plusieurs avantages par rapport aux accouplements filetés, car elle ne nécessite pas de filetage ni de traitement spécial des extrémités des barres d'armature. Elle permet une installation rapide et économique, idéale pour la nouvelle construction.

### 3.3.4. Utilisation des AMF dans les contreventements

Les éléments de Contreventement à Alliage à Mémoire de Forme se sont révélés efficaces pour réduire le déplacement résiduel en hauteur des étages et la rotation des poteaux par rapport aux éléments de contreventement en acier traditionnels. Auricchio et al en 2006 ont comparé les performances sismiques des contreventements en acier avec les AMF lorsqu'ils étaient mis en œuvre dans des bâtiments en acier de trois et de neuf étages. Ils ont constaté que les bâtiments avec des AMF présentaient des déplacements résiduels réduits., les cadres extérieurs des deux bâtiments ont été supposés être contreventés selon un motif en forme de V inversé. La hauteur d'étage était de 3,6 mètres. La figure 3.17 donne une vue en plan et en élévation pour trois et neuf étages. [8]

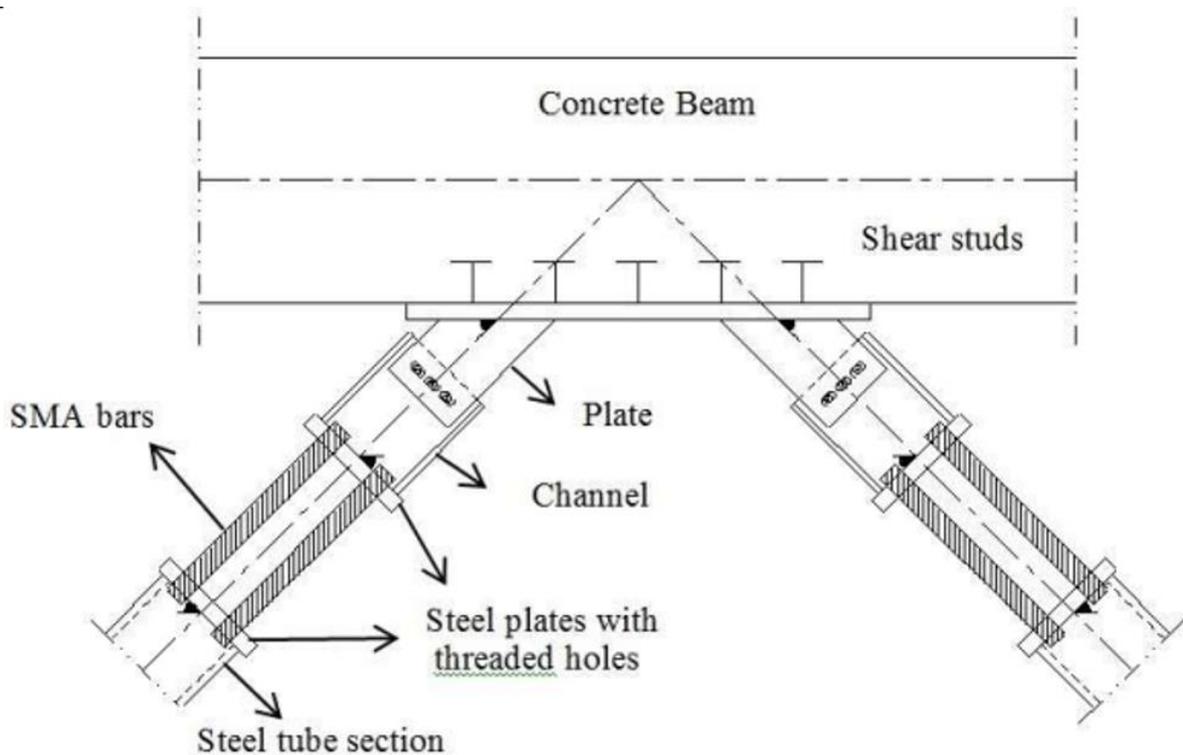


**Figure3. 17.** Vue en plan des structures [8]



**Figure3. 18.** Vue en élévation des structures à 3 et 9 étages[8]

Les éléments rigides sont reliés au cadre à l'aide de barres AMF. Un détail de connexion proposé est présenté dans la Figure 3.19 Les longueurs et les sections requises des barres le nombre et le diamètre des barres AMF est fait de manière à ce qu'elles ne subissent pas de flambage. [9]

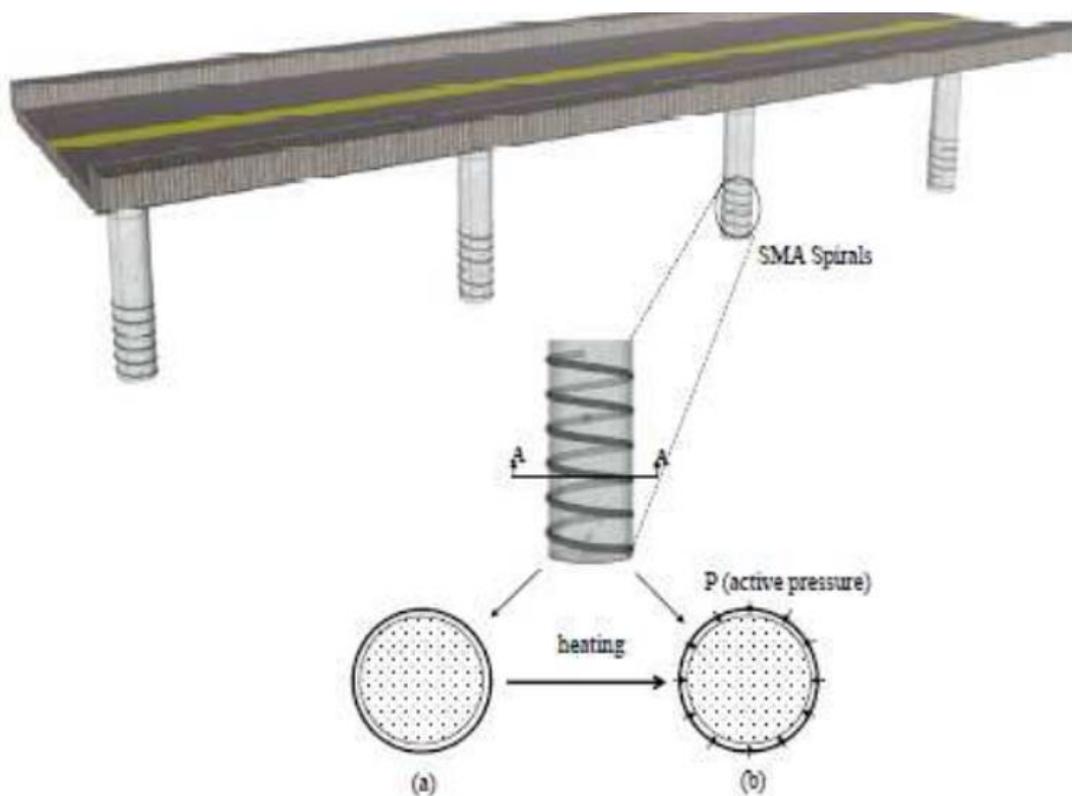


**Figure3. 19 .** Mise en place des AMF dans les contreventements en V inversé [8]

L'utilisation de barres AMF a réduit les déformations résiduelles du toit d'environ 50 %. . Pour les systèmes d'ancrage en forme de V inversé superposés avec des AMF, le positionnement des barres de renfort AMF à tous les emplacements prévus des rotules plastiques semble produire la plus grande réduction des déformations résiduelles sismiques.

### 3.3.5. Utilisation des AMF dans la précontrainte du béton

Les alliages à mémoire de forme (AMF) présentent des capacités intéressantes pour générer des précontraintes au sein des structures de construction. Dans de nombreuses études antérieures, des idées novatrices ont été émises quant à l'utilisation de ces matériaux en tant qu'armatures pour renforcer des éléments en béton. Une approche particulièrement prometteuse de l'utilisation des fils AMF Ni-Ti-Nb a été exposée dans la référence [9]. Cette méthode propose une nouvelle manière de réparer des structures en béton qui ont subi des dommages en employant l'enroulement en spirale d'un fil d'AMF autour des composantes en béton nécessitant un renforcement comme illustré dans la figure (3.20).



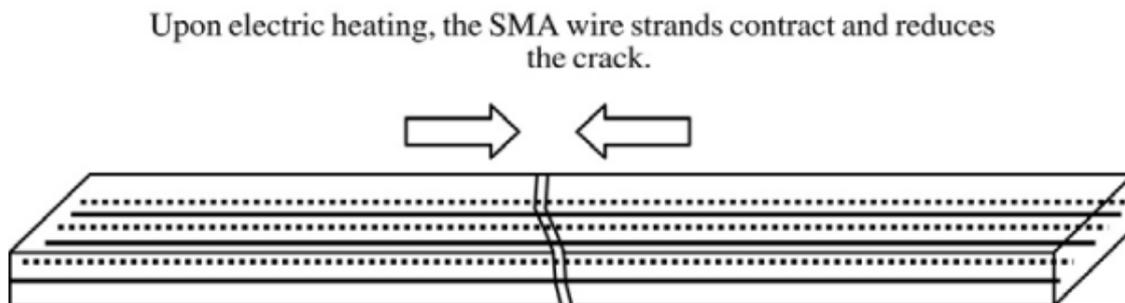
**Figure3. 20.** Schéma de précontrainte des cylindres en béton par AMF sous la forme d'une spire a) avant chauffage b) après chauffage [9]

Lors de l'application de cette technique, le fil joue un rôle d'armature active et son action se déroule en deux étapes distinctes. Dans un premier temps, le fil Ni-Ti-Nb est soumis à une déformation préalable maximale de 6 %, induisant une déformation résiduelle dans le matériau (état martensitique). Par la suite, le fil à mémoire de forme est enroulé autour de la partie endommagée de la structure en béton comme illustré dans la figure 3.20a. En le chauffant à une température précise, il entre en état d'austénite et cherche à se raccourcir, reprenant ainsi sa forme originale (figure 3.20.b). Cependant, le fil ne peut pas revenir à sa forme initiale en raison de sa fixation à la structure, générant ainsi des contraintes dans le matériau.

En mettant en pratique la méthode décrite ci-dessus, des chercheurs tels que M. Shin et B. Andrawes [10] ont renforcé avec succès des colonnes en béton (ayant des dimensions de  $h = 127$  cm et  $\Phi = 25,4$  cm). Les phases de réparation et les tests sur des échantillons ont été menés en seulement 24 heures. Les résultats obtenus ont indiqué que le renforcement latéral permettait d'éliminer complètement les dommages. De plus, une augmentation de 21 % de la résistance des éléments testés a été observée, malgré une légère diminution de la rigidité, d'environ 15 %

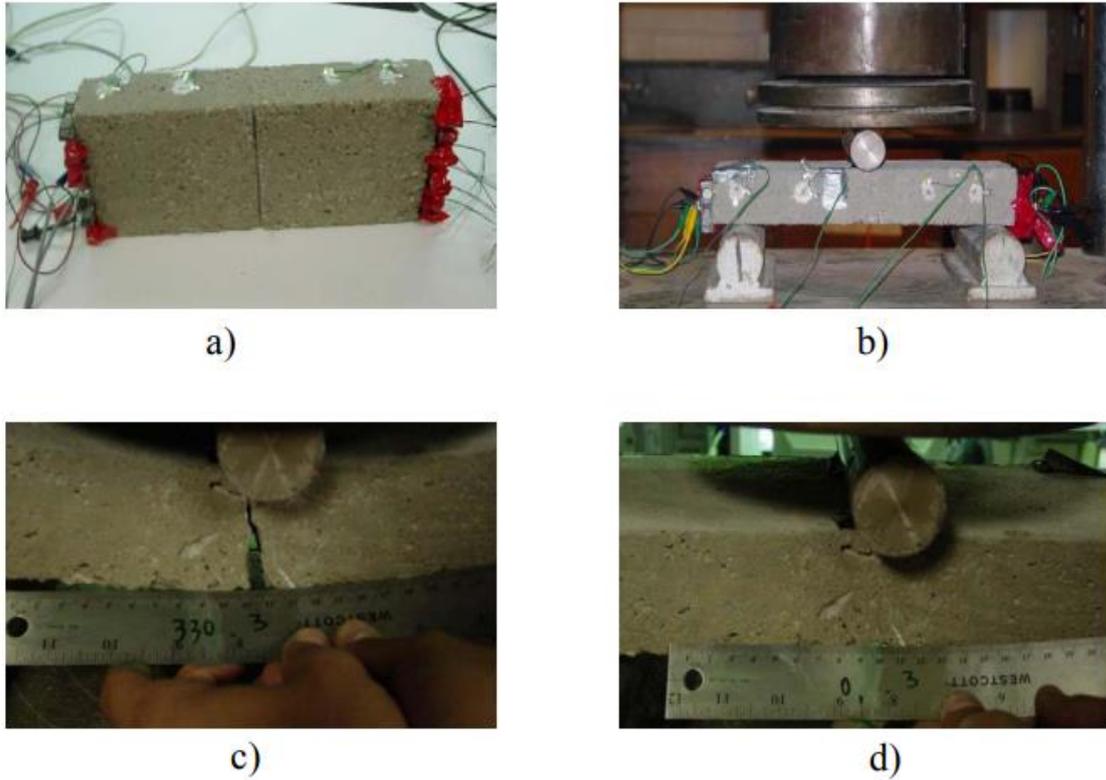
### 3.3.6. Applications pour la fermeture de fissures dans le béton.

Song et ses collaborateurs ont mis en place une approche novatrice pour le béton armé, le dotant d'une capacité "intelligente" en exploitant l'activation de l'effet de mémoire des alliages à mémoire de forme (AMF), comme illustré dans la Figure 3.21 . Les fils d'AMF, initialement dans un état martensitique, sont employés pour introduire une précontrainte grâce à un processus de chauffage. Cette technique permet, par exemple, de réduire la largeur des fissures dans un élément en béton, représentant ainsi une forme d'auto-réhabilitation.

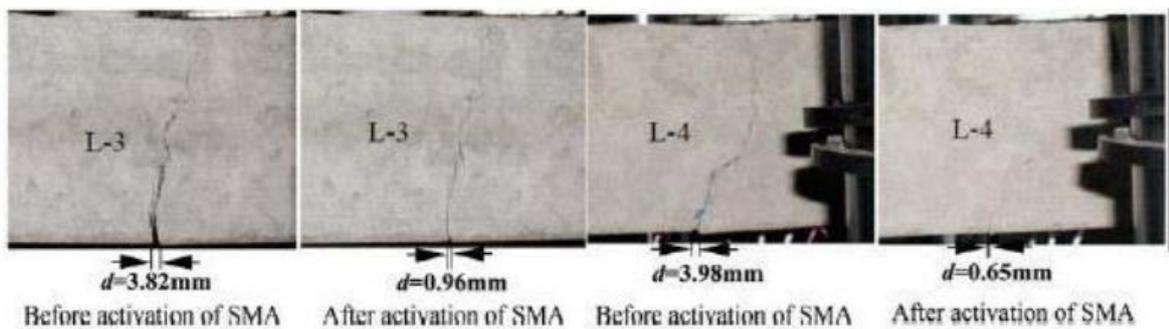


**Figure3. 21.** Principe du béton intelligent

Pour illustrer ce principe, Song et al ont mené une étude sur une poutre en flexion reposant sur deux appuis. Les fils en alliage à mémoire de forme ont été intégrés à la poutre. Un dispositif électrique a été utilisé pour chauffer les fils par effet Joule, comme illustré dans la Figure 3.22-a. Une charge a été appliquée à mi-portée, provoquant l'apparition de fissures, telles que présentées dans les Figures 3.22-b et 3.22-c. Sans décharger la poutre, un courant électrique a été appliqué aux fils AMF, qui ont alors cherché à se contracter. La Figure 3.22-d démontre clairement la fermeture effective des fissures. En 2008, une étude similaire a été réalisée par Li et ses collaborateurs (voir Figure 3.23) [11].



**Figure3. 22.** Applications pour la fermeture de fissures dans le béton. 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 [12]

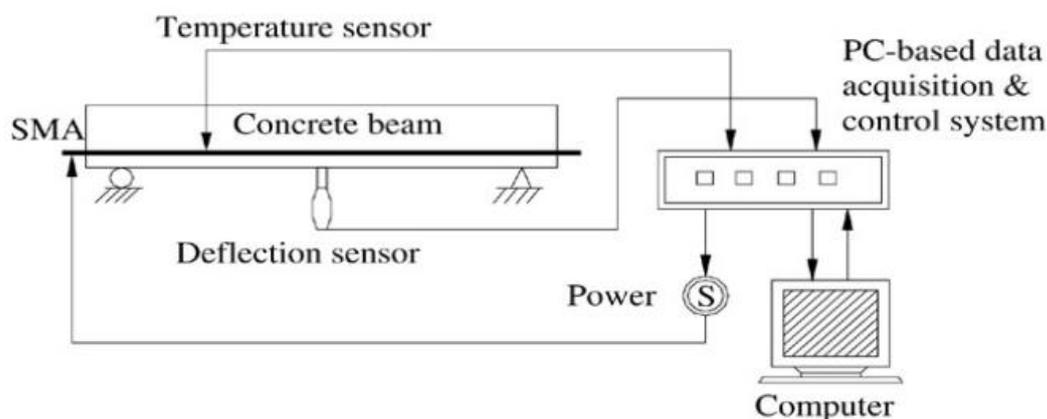


**Figure3. 23.** Evolution d'une fissure lors de l'activation thermique de fils AMF insérés dans une poutrelle en béton

### 3.4. Contrôle actif des vibrations dans les structures en utilisant les AMF

Deng et son équipe ont également mené des études sur la régulation de la déformation d'une poutre en béton en utilisant des fils à mémoire de forme, comme cela est illustré dans la Figure 3.24 [12]. Ces fils, initialement dans un état martensitique, ont été incorporés dans la structure de la poutre. La déformation de la poutre a été mesurée en temps réel à son point médian.

Par la suite, une charge a été appliquée. Dès lors que la déformation mesurée a dépassé la valeur prédéfinie, le système a commencé à acheminer un courant électrique à travers le fil afin déclencher thermiquement l'effet mémoire de forme .



**Figure3. 24.** Système de contrôle de la flexion d'une poutre à l'aide d'un fil AMF [12]

### 3.5. Conclusion :

Cette conclusion synthétise remarquablement les avancées actuelles dans le domaine des structures intelligentes appliquées au génie civil, en mettant en lumière des exemples concrets, notamment en Algérie. Les techniques de contrôle passif et actif, ainsi que l'utilisation novatrice des capteurs piezo, sont soulignées comme des éléments essentiels de cette évolution. De plus, l'accent est mis sur l'importance des matériaux à mémoire de forme (AMF), tant dans leur utilisation traditionnelle comme éléments de renfort et de stabilisation que dans des applications plus innovantes, telles que la dissipation d'énergie sismique et la réparation des fissures. Cette conclusion met en évidence la diversité des applications possibles des structures intelligentes dans le domaine du génie civil, tout en soulignant leur pertinence croissante dans des contextes variés, de l'Algérie à l'Italie.

### 3.6. Références

- [1] <https://www.vitamedz.com/fr/Algerie/centre-commercial-de-ain-defla-95638-Photos-0-0-1.html>
- [2] Akkermann, J., Kiefer, K. +, & Hewener, A. (2014). The Great Mosque of Algeria – Seismic Design of a Monument The Great Mosque of Algeria-Seismic Design of a Monument. In *IABSE Madrid Symposium Report* (Vol. 102).
- [3] Structurae : 500 ans de protection sismique pour la Grande Mosquée d'Alger
- [4] Constantinescu, D., & Köber, D. (2013). The Minaret of the Great Mosque in Algiers, a Structural Challenge. *Open Journal of Civil Engineering*, 03(02), 27–39. <https://doi.org/10.4236/ojce.2013.32a004>

[5] Casciati, F., Faravelli, L., & Hamdaoui, K. (2007). Performance of a base isolator with shape memory alloy bars. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 6(4), 401–408. <https://doi.org/10.1007/s11803-007-0787-2>

[6] Sincaian, G., Castellano FIP Industriale SpA, M., Indirli, I. M., Martelli ENEA, A., Azevedo, I. J., Sincaian Istituto Superior Técnico, G., Tirelli, P. D., Renda, V., Croci University, G., Sapienza, L., Biritognolo, I. M., Bonci, A., & Viskovic, A. (n.d.). 1999 .*Seismic Protection of Cultural Heritage Using Shape Memory Alloy Devices-An EC Funded Project (ISTECH)*. <https://www.researchgate.net/publication/259900824>

[7] Youssef, M. A., Alam, M., & Nehdi, M. (n.d.). *Experimental Investigation on the Seismic Behaviour of Beam-Column Joints Reinforced with Superelastic Shape Memory Alloys*.

[8] Meshaly, M. E., Youssef, M. A., & Elfath, H. M. A. (n.d.). *USE OF SMA BARS TO ENHANCE THE SEISMIC PERFORMANCE OF SMA BRACED RC FRAMES*.“Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, Canada, N6A 5B9

[9] Aleksandra Dębska Andrzej SERUGA, M., Piotr GWOŹDZIEWICZ, M., & Associé, P. (n.d.). “*UTILISATION D’ALLIAGES A MEMOIRE DE FORME POUR LA CREATION D’EFFETS DE PRECONTRAINTE DANS DES COMPOSANTS EN BETON*” *Co-encadrant*.

[10] Andrawes, B., & Shin, M. (2008). Seismic retrofitting of bridge columns using shape memory alloys. *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2008*, 6928, 69281K. <https://doi.org/10.1117/12.775480>

[11] Li, H., Liu, Z. qiang, & Ou, J. ping. (2008). Experimental study of a simple reinforced concrete beam temporarily strengthened by SMA wires followed by permanent strengthening with CFRP plates. *Engineering Structures*, 30(3), 716–723. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.05.020>

[12] Adoum Waibaye. *Création de structures actives à l’aide d’alliages à mémoire de forme*. Autre. Université Blaise Pascal- Clermont-Ferrand II, 2016

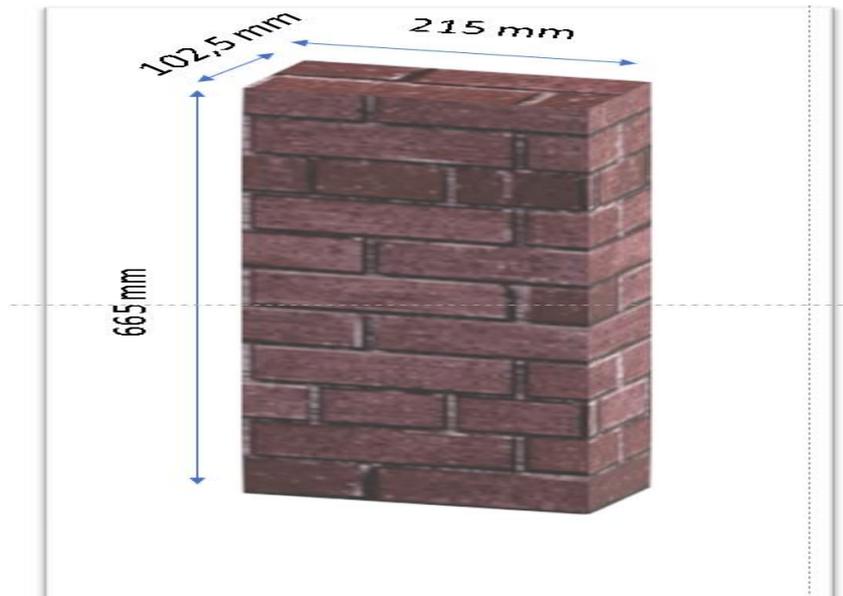
# Chapitre 4 : Contrôle passif en utilisant les AMF pour le cas d'un mur en maçonnerie

## 4.1. Introduction

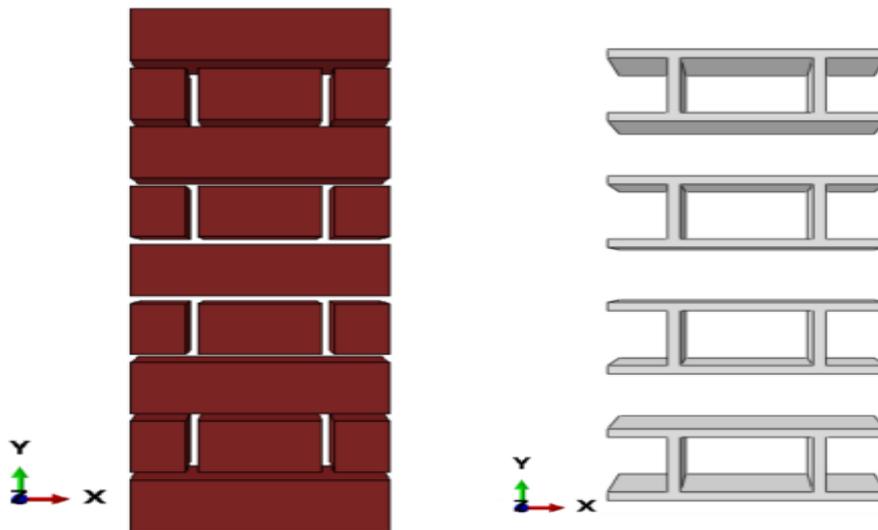
Les murs en maçonnerie, éléments cruciaux de nombreuses structures bâties, sont souvent exposés à des sollicitations sévères, telles que des excitations sismiques ou des vents forts. Afin d'assurer la stabilité et la sécurité de ces murs, plusieurs méthodes de renforcement ont été développées. Parmi ces méthodes, l'utilisation d'isolateurs à la base est bien connue. Dans ce chapitre, nous explorerons une technique innovante de renforcement, en équipant un mur en maçonnerie d'un alliage à mémoire de forme (AMF) fixé à son extrémité. L'AMF choisi est un alliage de nickel-titane, caractérisé par ses propriétés superélastiques, permettant de revenir à sa position initiale après une déformation. Ce comportement est particulièrement avantageux pour le renforcement sismique, car il assure la réversibilité des déformations subies par le mur. L'alliage utilisé a un diamètre de 2 mm et une largeur de 40 mm. L'objectif de cette étude est de comprendre les variations des contraintes normales et de la contrainte de von Mises dans le mur en présence de l'AMF. La contrainte de von Mises est utilisée pour prédire le début de la déformation plastique des matériaux ductiles, ce qui est crucial pour évaluer la performance du renforcement. La propriété superélastique des AMF sera analysée pour vérifier leur capacité à atténuer les déformations et à revenir à leur état initial après un chargement. Pour évaluer l'efficacité de l'AMF, le mur sera soumis à un cycle de chargement et de déchargement. Cette méthode permettra d'observer la réponse du mur renforcé en termes de contraintes et de déformation. L'analyse portera également sur la réaction en fonction du déplacement, pour déterminer si les AMF permettent de réduire significativement les effets des charges appliquées. Ainsi, ce chapitre vise à démontrer l'efficacité des alliages à mémoire de forme pour renforcer les murs en maçonnerie contre les charges dynamiques, en s'appuyant sur une étude détaillée des variations de contraintes et des comportements mécaniques sous des conditions de chargement cyclique.

## 4.2. Etude du cas

Dans notre étude nous avons considéré un mur en maçonnerie dont les dimensions sont affichées dans la figure 4.1 . La figure 4.2 montre de quoi se compose le mur en maçonnerie

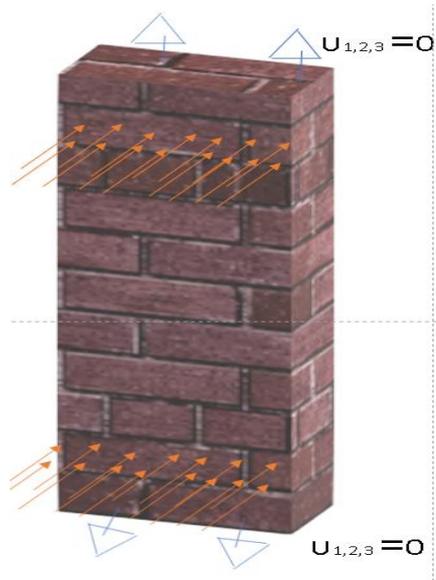


**Figure 4. 1** Cas du mur étudié



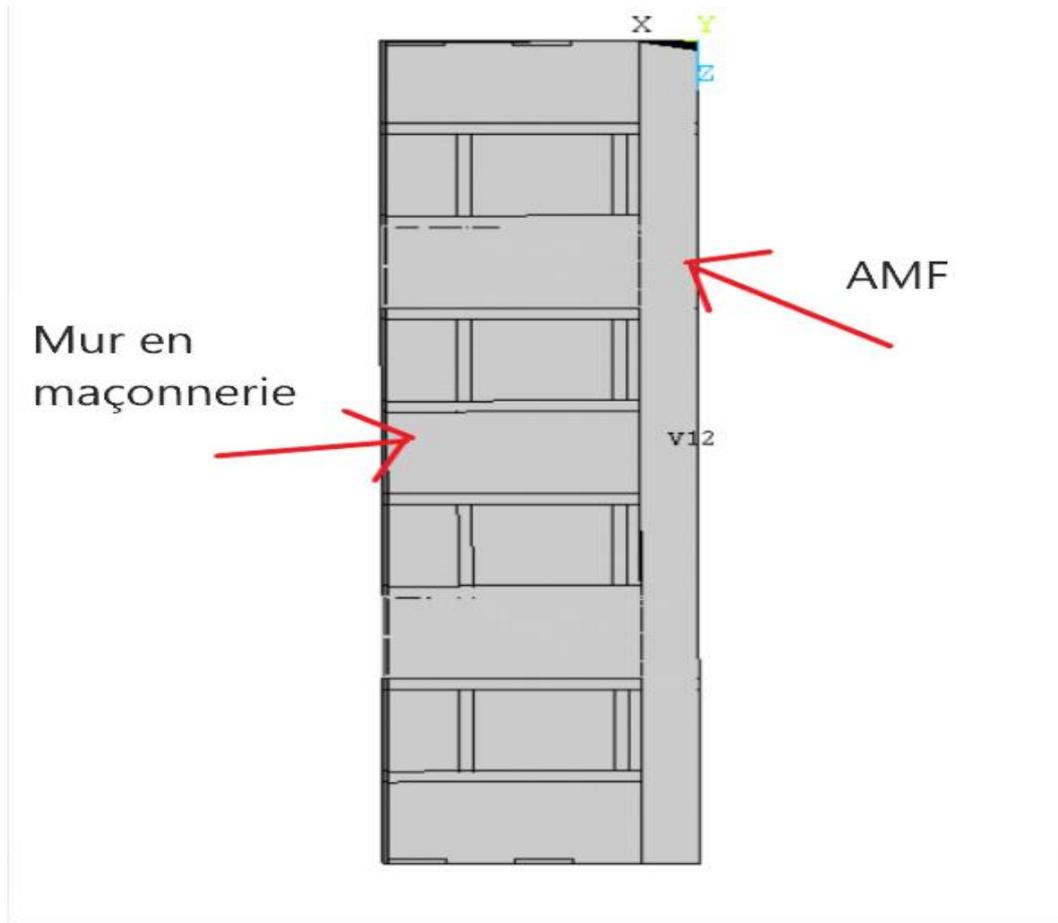
**Figure 4. 2.** Vue en 3d de la brique et le mortier [1]

Lors de cette étude nous avons considéré un mur en maçonnerie auquel il va être imposé un cycle de charge décharge dans un laps de 100 secondes où le pic sera de  $200 \text{ kN} / \text{m}^2$  à 10 secondes sous forme de charge surfacique en bas et en haut. Les conditions aux limites sont affichées dans la figure 4.3 comme ceux utilisé dans la référence [1]. Cependant la charge n'est pas la même car l'auteur nous a transmis la valeur de l'incrément qu'il a utilisé après que nous l'avons contacté



**Figure 4. 3.** Chargement et condition au limite du mur

Après les différentes études menées auparavant il a été constaté qu'un nombre d'alliage plus important donne une très faible réduction du déplacement et de la contrainte et que l'utilisation des NiTi était plus efficace que les alliages à base de cuivre. À partir de cette déduction nous avons utilisé donc dans notre recherche un seul AMF en Niti pour des raisons d'efficacité et des soucis économiques. la figure 4.4 montre le model étudié avec un AMF dans le logiciel Ansys APDL



**Figure 4. 4.** Mur en maçonnerie équipé d'un AMF

Le concept de la super-élasticité se base sur la transformation de phase des matériaux qui donne un comportement hystérétique ; les caractéristiques élastiques sont dérivées de la phase de transition à partir du module de Young de la phase Austénite et Martensite

$$E = EA + \zeta(EM - EA) \quad (4.1)$$

$$v = vA + \zeta(vM - vA) \quad (4.2)$$

où  $\zeta$  indique la proportion de martensite EA est le module young à la phase Austénite EM est une représentation de module de young à la phase martensitique  $vA$   $vM$  font respectivement référence coefficient de poisson à la phase Austénite et à la phase Martensite . L'incrément de la déformation est calculé dans la manière suivante :

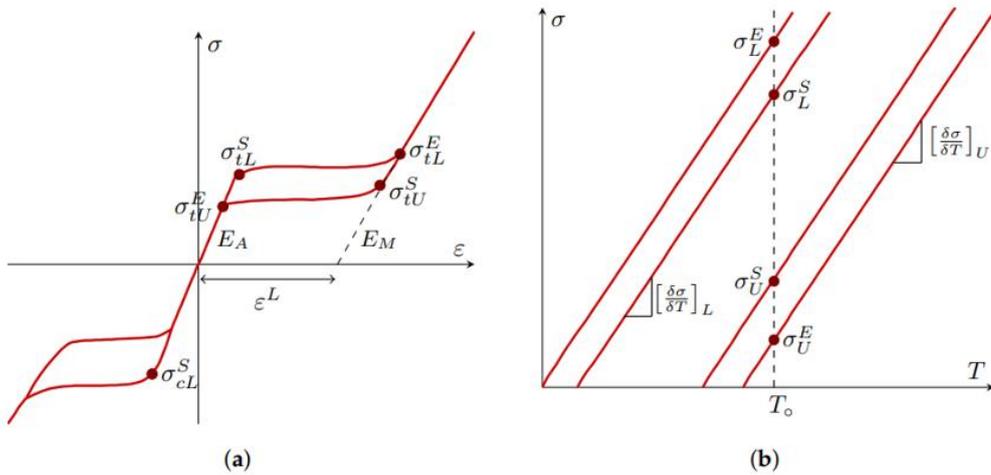
$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{el} + \Delta \varepsilon_{tr} \quad (4.3)$$

$$\Delta \varepsilon_{tr} = \Delta \zeta \frac{\partial G^{tr}}{\partial \sigma} \quad (4.4)$$

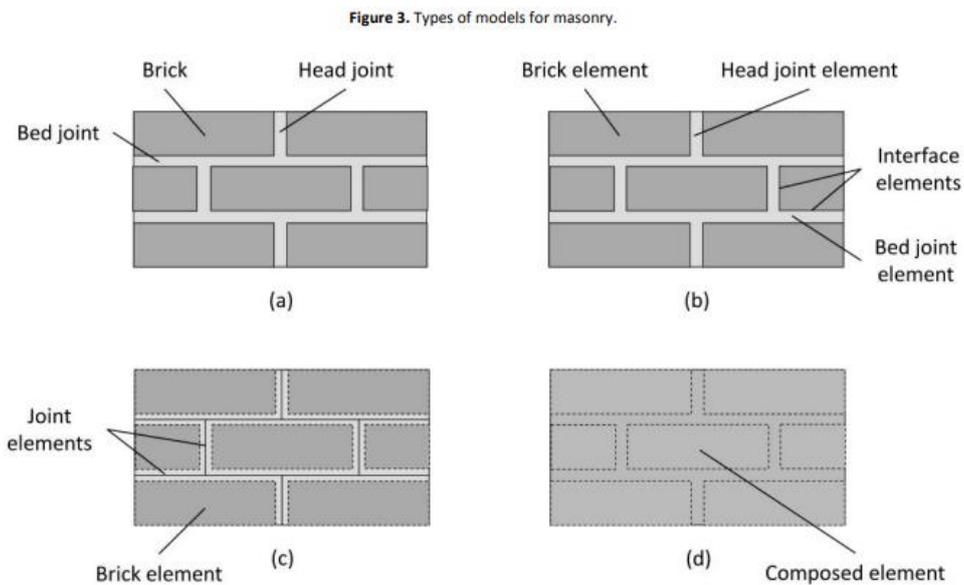
$$G_{tr} = q - p \tan \psi \quad (4.5)$$

$$\text{avec } P = -\frac{1}{3} \quad q = \sqrt{\frac{2}{3} S : S}$$

La figure 4.5 montre ces paramètres lors de la déformation des AMF

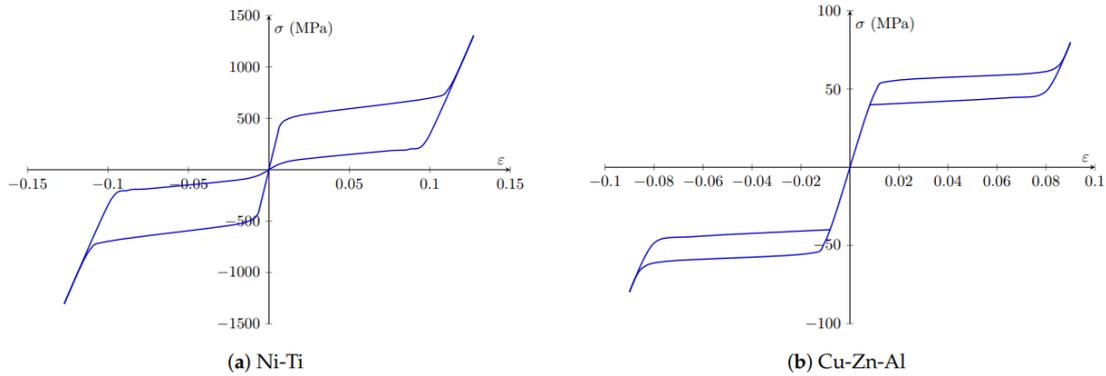


**Figure 4. 5.** a :réponse super-élastique des AMF b : courbe contrainte température des AMF



**Figure 4. 6.** Les différents composants du mur en maçonnerie [1]

La figure suivante (Figure 4.12) illustre les divers types de joints présents dans les murs en brique, où le mortier constituant le joint est particulièrement sensible à la rupture. Le "bed joint" correspond au joint horizontal situé sous une brique ou un bloc de maçonnerie, tandis que le "head joint" désigne le joint vertical entre les briques ou les blocs adjacents. Ces deux types de joints jouent un rôle essentiel dans la construction d'une maçonnerie robuste et stable.



**Figure 4. 7.** Courbe contrainte déformation des AMF à base a : De Ni-Ti b : Cu-Zn-Al

Les AMF à base de nickel-titane offrent une plage de température de transformation plus étendue et une excellente résistance à la corrosion. Ils présentent d'importantes déformations élastiques réversibles et une faible hystérésis, comme illustré dans la figure 4.13 Cependant, leur inconvénient réside dans leur coût élevé et leur sensibilité à la fatigue lors de cycles de charge et décharge. En revanche, les AMF à base de cuivre sont plus économiques, mais ils présentent une déformation élastique différente [2].

Les Tableaux 4.1 et 4.2 exposent les propriétés mécaniques de la brique et du mortier.

**Tableau4. 1 Propriété de la brique**

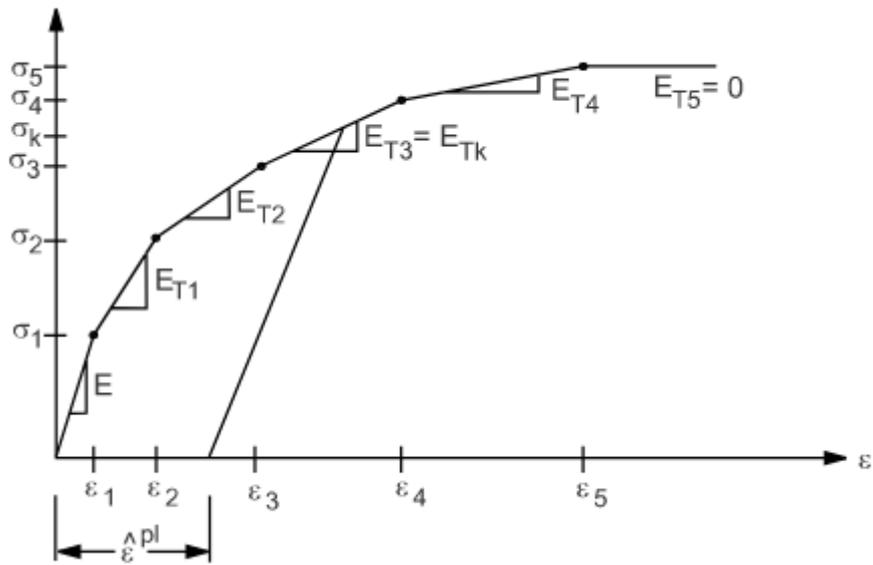
Propriété	Value	Units
Brique		
Densité	2200	Kg/m <sup>3</sup>
Module de young	32470	N/mm <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson	0.26	

**Tableau4. 2 Propriété du mortier**

Propriété	Value	Units
Mortier		
Densité	2170	Kg/m <sup>3</sup>
Module de young	19850	N/mm <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson	0.20	

#### 4.2.1. Méthode utilisée

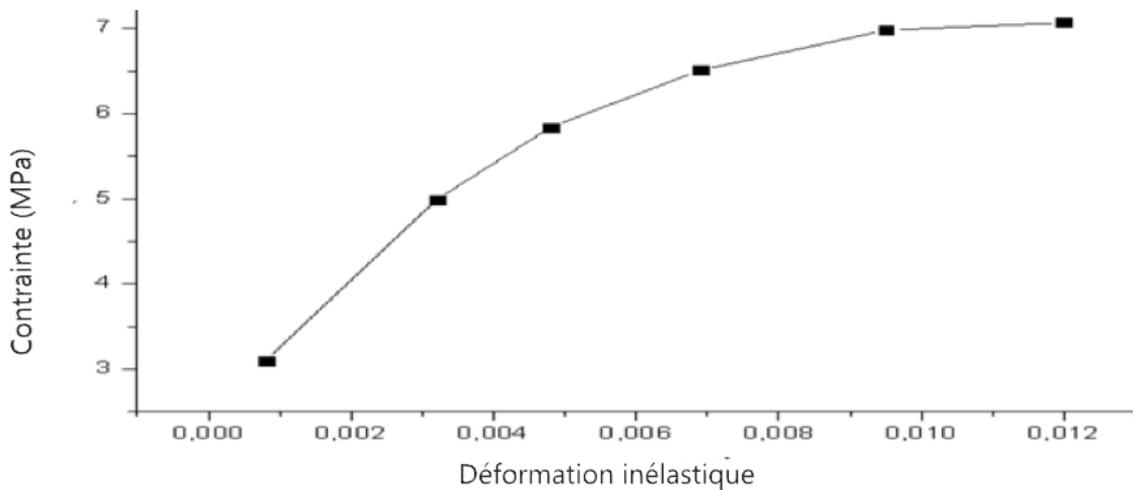
Rate-Independent plasticity est définie par la déformation irréversible qui se produit dans un matériau une fois qu'un certain niveau de contrainte est atteint. Les déformations plastiques sont supposées se développer instantanément, c'est-à-dire, indépendamment du temps (figure 4.8)



**Figure 4. 8.** Valeur de la contrainte en fonction de la déformation pour le mortier

**Tableau4. 3.** Valeur de contrainte déformation pour le mortier

Yield stress	Inelastic strain
3.1	0.0008
4.99	0.0032
5.84	0.0048
6.51	0.0069
6.98	0.0095
7.07	0.0120

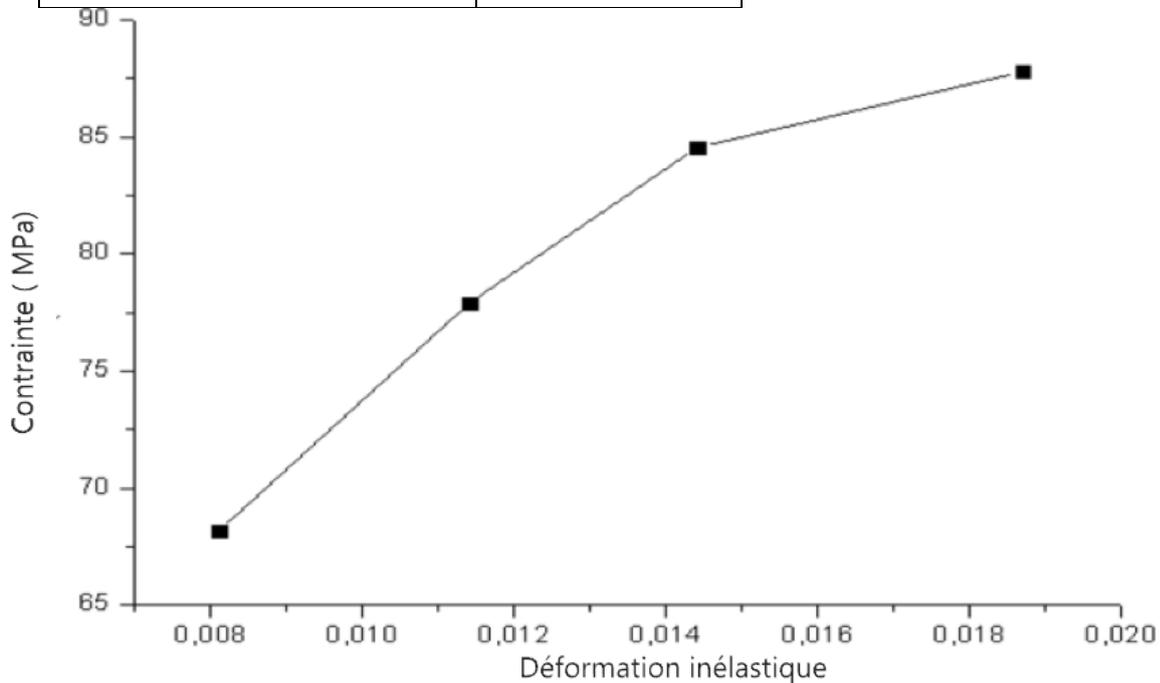


**Figure 4. 9.** Courbe contrainte déformation pour le mortier

Les figures 4.9, 4.10 et les tableaux 4.3 et 4.4 montrent les valeurs des contraintes déformation introduit dans le logiciel Ansys pour mettre en évidence l'aspect non linéaire du mur en maçonnerie

**Tableau4. 4.** Valeurs des contraintes déformations pour la brique

Contrainte en compression	Déformation inélastique
26.12	0
68.16	0.0081
77.89	0.0114
84.54	0.0144
87.78	0.0187



**Figure 4. 10.** Courbe contrainte déformation pour la brique

Le tableau 4.5 montre les propriétés des Niti (nickel Titane )

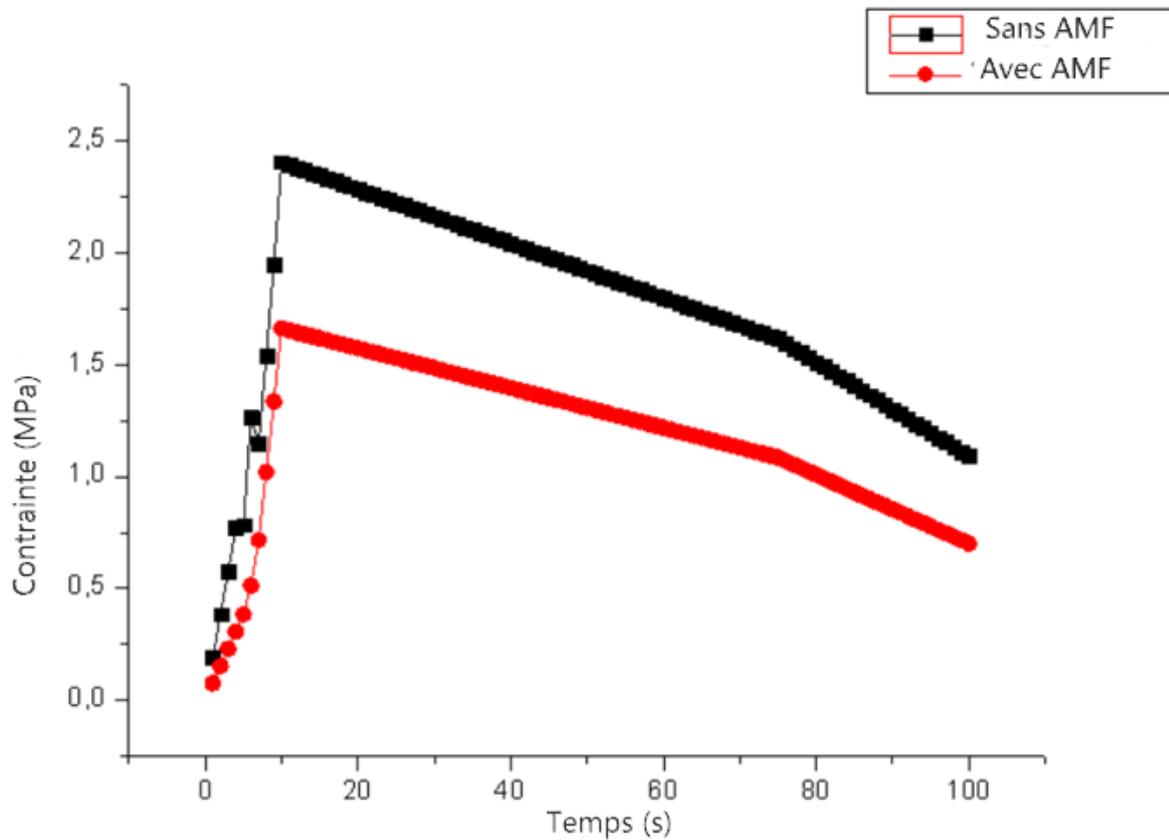
**Tableau4. 5.** Propriété des des AMF à base de NiTi

Propriété	Valeur	Unité
Nitinol		
Densité	6450	Kg/m <sup>3</sup>
Module de young	90,000	MPa
Coefficient de Poisson	0.3	
Limite d'élasticité en traction	1000	MPa
Contrainte maximum en compression	1400	MPa

### Superélasticité

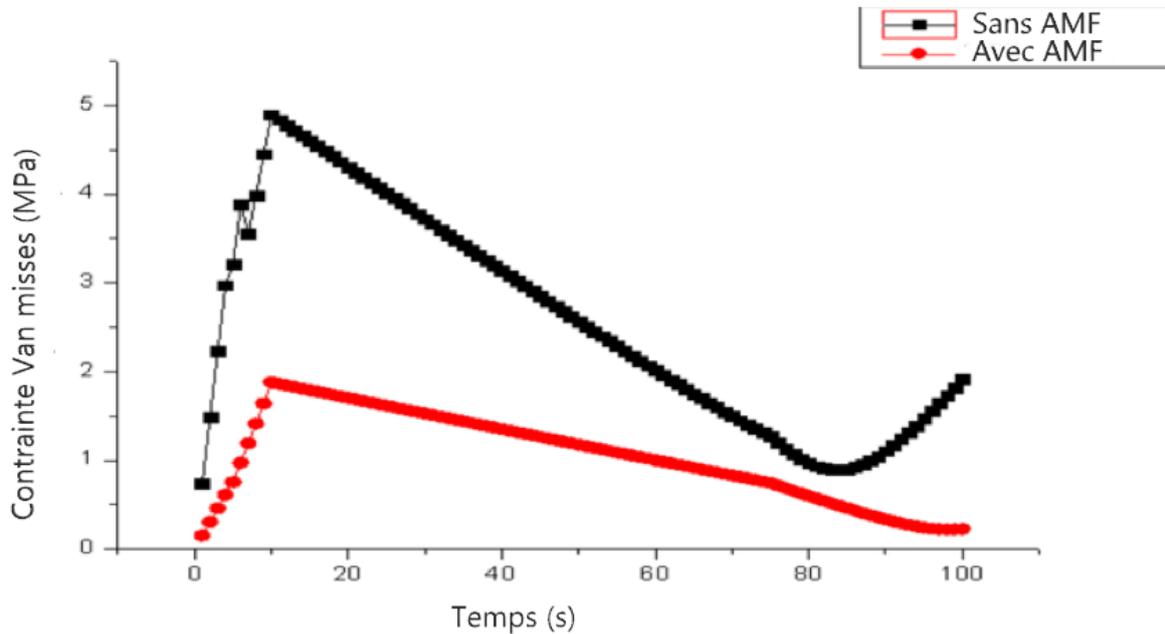
Sigma SAS	520	MPa
Sigma FAS	600	MPa
Sigma SSA	300	MPa
Sigma FSA	200	MPa
Epsilon	0.063	mm <sup>-1</sup>
A	0.09	

### 4.3. Résultats et discussions



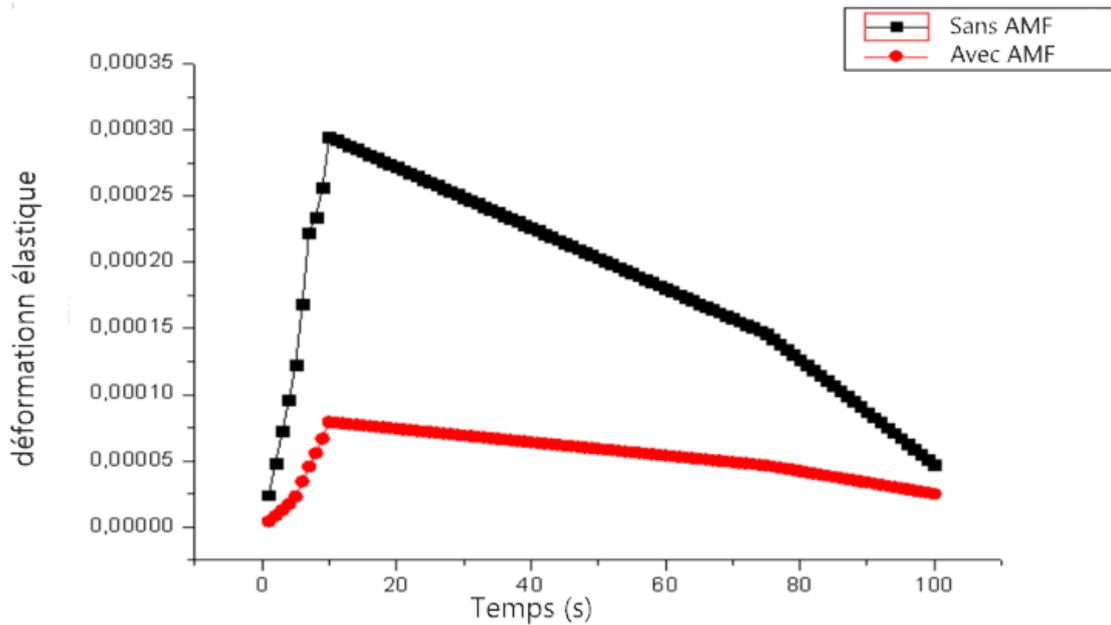
**Figure 4. 11.** Courbe contrainte en fonction du temps pour le mur en maçonnerie avec et sans AMF

Nous observons une diminution de la contrainte lors de l'application des AMF (figure 4.11). Ce phénomène est attribuable à des changements cristallographiques réversibles à l'échelle microscopique, démontrant ainsi la capacité de ces derniers à dissiper de l'énergie et à absorber les contraintes tout en préservant l'intégrité structurelle. Cette caractéristique s'avère particulièrement bénéfique pour la stabilité de la structure.



**Figure 4. 12.** Courbe contrainte de Van mises en fonction du temps pour le mur en maçonnerie avec et sans AMF

Nous notons une diminution de plus de deux fois du pic de la contrainte de Von Mises lors de l'utilisation d'un AMF (figure 4.12). Cette mesure évalue le seuil de déformation plastique en se basant sur la contrainte principale. La diminution de la contrainte de Von Mises avec l'utilisation d'un AMF indique une résistance à la déformation plastique, attribuable à leur capacité à retrouver leur position initiale après une déformation élastique, grâce à leur effet super-élastique. De plus, ils peuvent retrouver leur forme initiale suite à une déformation plastique lorsqu'ils sont chauffés, subissant un changement de phase de l'état martensitique à basse température à un état austénitique à haute température, ce chauffage pouvant être induit par exemple par effet Joule. Nos observations concordent avec des travaux antérieurs qui ont démontré une diminution des contraintes lors de l'utilisation d'AMF, notamment lorsqu'ils sont soumis à un événement sismique tel que le séisme de Boumerdress [3].



**Figure 4. 13.** Déformation élastique en fonction du temps avec et sans AMF

Le résultat montre que la déformation élastique baisse ( figure 4.19 ) quand on utilise les alliages ce qui le rend plus efficace que beaucoup d'autres amortisseurs .

Calcul du coup :

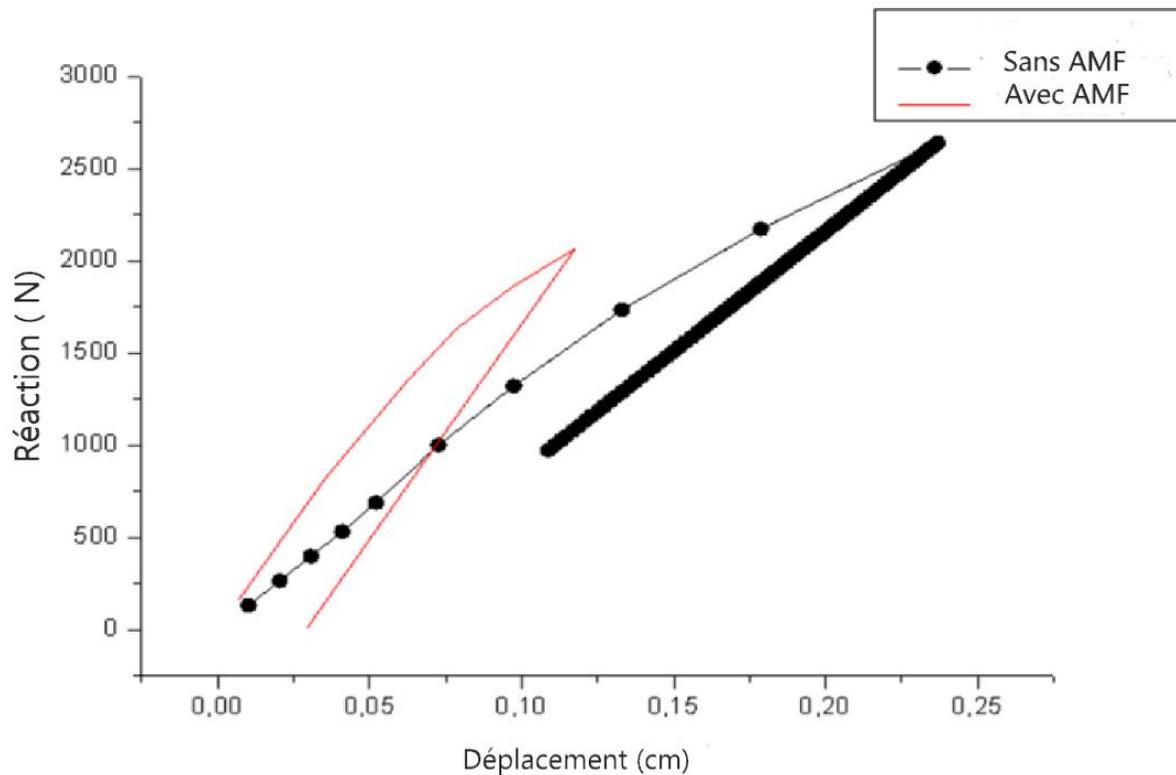
$$V = 0.04 \text{ m} \times 0.002 \text{ m} \times 0.665 \text{ m} = 0.0000532 \text{ m}^3 \quad (4.6)$$

$$\text{Poid} = 0.0000532 \times 6450 = 0.341 \text{ kg} \quad (4.7)$$

$$\text{Prix} = 38 \$ \times 0.341 = 12.958 \$ \quad (4.8)$$

V : Volume d'AMF utilisé

Le prix pour un amortisseur parasismique est de 4000 \$ et il réduit de deux fois le déplacement



**Figure 4. 14.** Courbe force déplacement avec et sans AMF

Nous observons une réduction d'environ deux fois des déplacements lors de l'utilisation des AMF au cours d'un cycle de charge et de décharge (figure4. 14), confirmant ainsi les nombreux avantages qu'ils offrent pour atténuer les contraintes dans les structures.

#### 4.4. Conclusion

En conclusion, notre étude s'est concentrée sur un mur en maçonnerie soumis à des forces de pression, avec l'objectif de le renforcer en utilisant des AMF afin d'atténuer les effets néfastes que peut subir un mur de ce type dans une structure réelle. Ce rapprochement sera exploré plus en détail dans des travaux complémentaires à cette recherche préliminaire. Nous avons constaté que lorsque les AMF sont méticuleusement intégrés dans un mur en maçonnerie, ils réduisent efficacement les déformations élastiques en exploitant l'effet super-élastique. De plus, ils diminuent les contraintes dans leurs différents états, ce qui peut prévenir la formation de rotules plastiques et ainsi éviter la rupture d'un élément structurel ou même de la structure entière.

Notre étude comparative a également démontré qu'un seul alliage peut être aussi efficace que l'utilisation de plusieurs alliages, offrant ainsi une solution économique, un facteur crucial dans toute recherche. De plus, nous avons effectué une étude de cas comparant l'efficacité d'un amortisseur ordinaire à celle d'un AMF, montrant une convergence dans les résultats de réduction des déplacements, avec l'avantage d'un coût relativement faible pour les AMF par rapport aux amortisseurs ordinaires.

#### 4.5. Référence

[1] Tabrizikahou, A., Kuczma, M., & Łasecka-Plura, M. (2022). Out-of-Plane Behavior of Masonry Prisms Retrofitted with Shape Memory Alloy Stripes: Numerical and Parametric Analysis. *Sensors*, 22(20). <https://doi.org/10.3390/s22208004>

[2] Dauda, J. A., Silva, L. C., Lourenço, P. B., & Iuorio, O. (2021). Out-of-plane loaded masonry walls retrofitted with oriented strand boards: Numerical analysis and influencing parameters. *Engineering Structures*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112683>

[3] Matari, Z., Bourdim, S. M. E. A., Rodrigues, H., & Kadri, T. (2023). Earthquake Analysis of an Old RC Minaret Retrofitted with Shape Memory Alloy. *Buildings*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/buildings13051121>

# **Chapitre 5 : Analyse sismique et Réhabilitation d'une ancienne mosquée en Algérie avec des AMF**

## **5.1. Introduction :**

Lors de ce chapitre, le logiciel Ansys APDL a été utilisé pour mettre en évidence le comportement des alliages à mémoire de forme (AMF). Notre recherche s'est axée, dans un premier temps, sur la modélisation de la mosquée El Badr située à Mostaganem. Nous l'avons équipée d'AMF verticaux, en variant leur nombre et leur position, afin d'étudier leur impact sur la réponse sismique en termes de contraintes, de déplacements et d'accélération. Les résultats de cette recherche ont fait l'objet d'une publication dans une revue internationale.

La procédure de calcul s'appuie sur une étude modale bien connue, ainsi qu'une analyse transitoire. Les étapes de cette méthode seront expliquées dans la prochaine partie du chapitre.

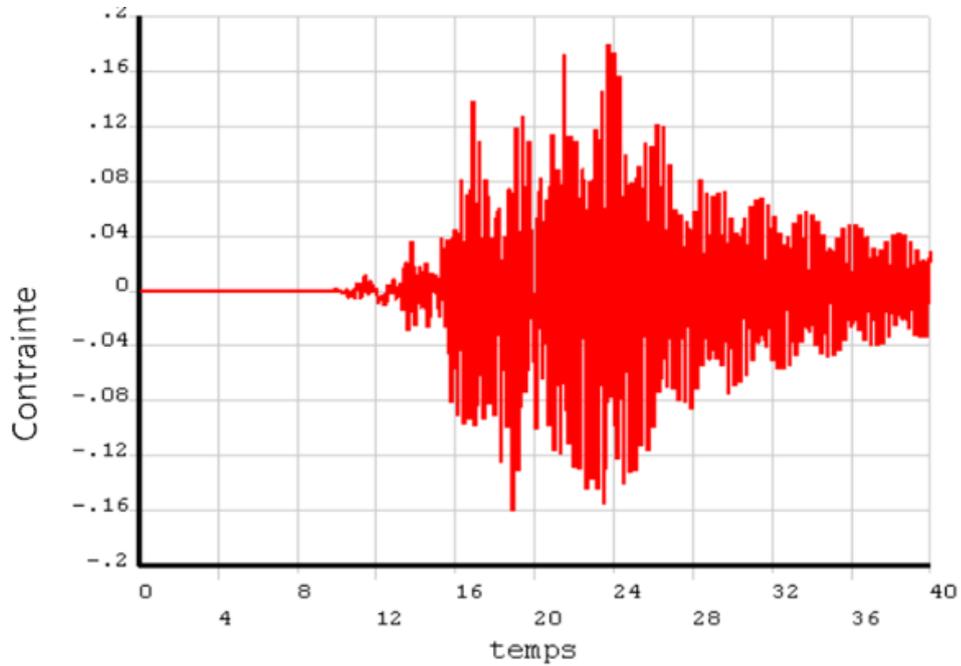
## **5.2. Analyse transitoire dans le logiciel Ansys**

Toute analyse transitoire débute par une modélisation géométrique du système ; cette modélisation utilise par exemple le logiciel Ansys comme ça va être fait dans notre travail. La structure va être discrétisée en éléments finis pour représenter la géométrie à qui va être associé un certain nombre de données d'entrée comme la densité, le module d'Young, la conductivité thermique, etc

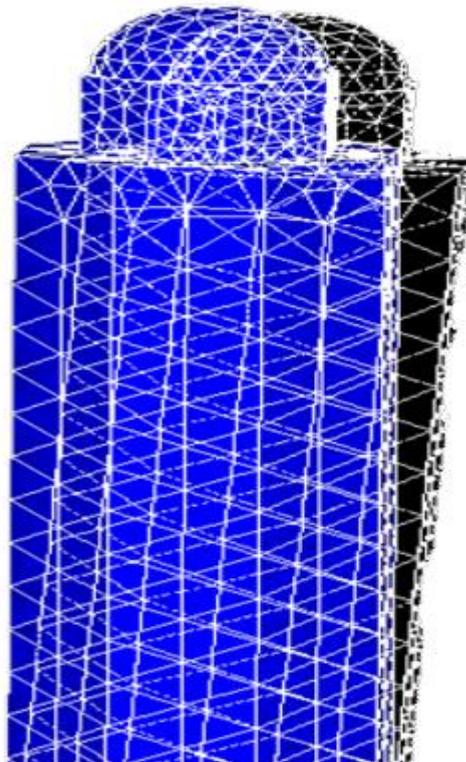
Les conditions initiales ou aux limites sont spécifiées, comme les déplacements et vitesses initiales ou toute autre paramètre qui décrit l'état initial du système.

Des charges variables peuvent être appliquées durant la simulation numérique, telles que des forces, des moments ou différentes charges dynamiques. Le logiciel Ansys APDL (Ansys Parametric Design Language) permet de montrer comment les charges évoluent durant l'analyse transitoire par pas de temps. Un court pas de temps permet d'obtenir des résultats plus précis, mais rend les calculs plus complexes et plus longs. Nous avons utilisé un pas de 0,2 s pour la mosquée El Badr. La méthode de calcul est itérative. À chaque pas de temps, le logiciel effectue une résolution des équations dynamiques et détermine les déformations et les contraintes en fonction du type de charge appliquée. On peut citer la charge harmonique qui se présente sous forme sinusoïdale, comme c'est le cas dans les équipements mécaniques. Il existe aussi les charges impulsionnelles, caractérisées par des pics élevés sur un court intervalle de temps, comme les explosions et les chocs. En ce qui concerne les séismes et les vents, les charges sont aléatoires et leur variation n'obéit pas à un modèle bien précis.

Après l'étape de calcul, le logiciel Ansys nous fournit des résultats sous plusieurs formes, telles que des courbes (Figure 5.1), des animations (Figure 5.2), nous permettant d'observer les déformations, les contraintes, les déplacements, les vitesses et les accélérations (Figure 5.3), afin de nous aider à prendre des décisions.



**Figure5. 1 .** Exemple de courbe donnée par logiciel Ansys

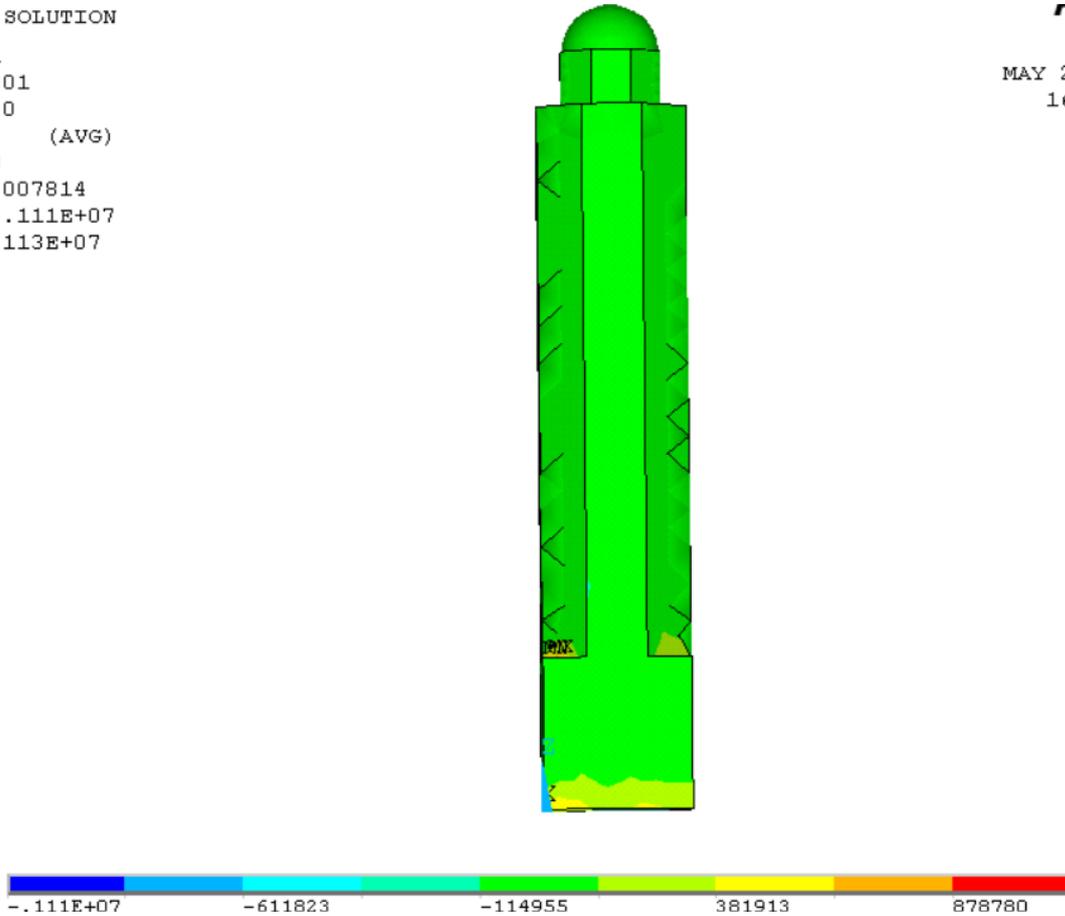


**Figure5. 2.** La déformée sur le logiciel Ansys

```

MODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =201
TIME=40
EX      (AVG)
RSYS=0
CMX =.007814
SMN =-.111E+07
SMX =.113E+07
    
```

ANSYS  
R19  
MAY 24 2024  
16:05:57



**Figure5. 3.** Résultats donnés par le logiciel Ansys

ANSYS utilise diverses méthodes numériques pour effectuer des analyses transitoires. L'une des méthodes couramment utilisées est la méthode de Newmark, mais d'autres méthodes sont également disponibles en fonction des besoins de l'analyse. Le tableau suivant (Tableau5.1) explicite les méthodes utilisées dans ANSYS pour les analyses transitoires .

**Tableau5. 1.** Différentes méthodes pour l'analyse transitoire

Méthodes	Caractéristiques	Avantages	Inconvénients
<b>De Newmark</b>	Elle a la capacité d'intégrer les équations temporellement d'une façon implicite. Elle discrétise temporellement les équations de	Stable numériquement. Elle est adaptée aux grands et petits pas de temps	Elle a besoin de moyens de calcul plus performant et son utilisation est plus complexe pour les problèmes transitoires rapides

	mouvement. Elle est adaptée aux analyses sismiques et aux dynamiques des structures		
<b>Explicite</b>	Elle est d'un type de résolution où l'intégral d'un pas donné est calculé par rapport à la valeur du pas précédent elle est appliquée à la dynamique rapide ( tel que les chocs ) et non linéaire	Elle peut gérer la non linéarité et elle a une efficacité au calcul dynamique rapide	Elle nécessite un grand temps de calcul ; elle est limitée pour les basses fréquences
<b>De Wilson-Theta</b>	Elle a un mode d'intégration implicite, elle permet de réduire le nombre de degré de liberté. Elle s'applique à la dynamique des structures	Elle donne une précision modérée et elle gère la non-linéarité	Ajustement de paramètres (valeur de Theta), nécessite plus de calcul que l'explicite.
<b>Différences finies dans le domaine temporel</b>	Traite une large gamme d'équations aux dérivées partielles et cela par le biais de la discrétisation des équations. Elle est utilisée dans les simulations à temps réel et dans le traitement de PDE (problèmes de transfert de chaleur, électromagnétisme, etc.).	Précision élevée	Demande plus de temps que les autres analyses

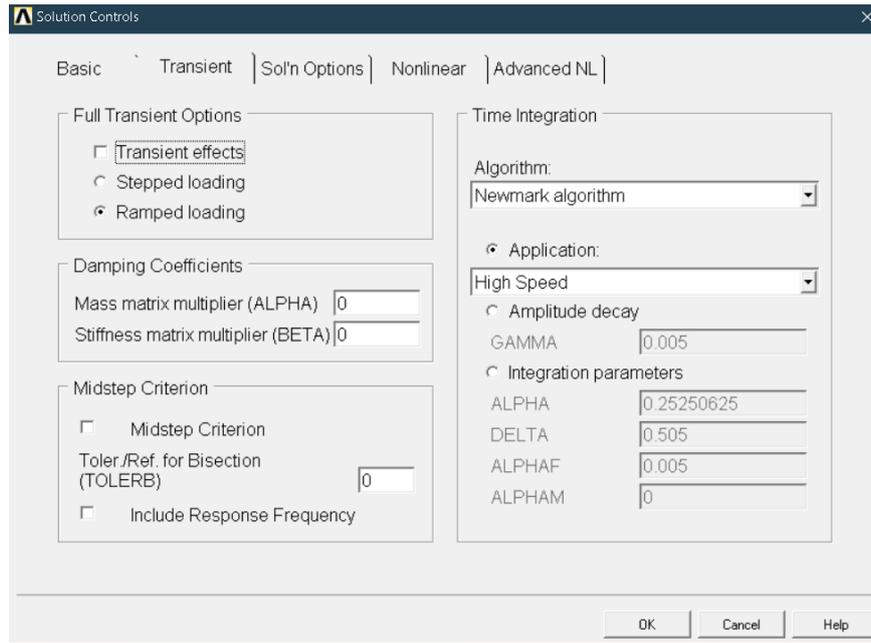
<b>Méthode spectrale</b>	Elle analyse les différentes fonctions en termes de ses composantes harmoniques (les série de fourier).	Haute précision	Limitée aux problèmes périodiques, moins appropriée pour les problèmes transitoires généraux.
--------------------------	---	-----------------	---

Le choix de la méthode va dépendre du problème lui-même, des moyens informatiques existants, de la complexité du modèle pris en compte, et du but de la simulation.

### 5.3. Méthode utilisée dans notre travail

1. **La méthode de Newmark** (figure 5.4 ) est une technique de résolution numérique pour les équations différentielles du second ordre. Elle peut être utilisée pour résoudre des systèmes différentiels, qu'ils soient linéaires ou fortement non linéaires. Cette méthode est adaptée pour des systèmes qui impliquent une matrice de masse et une force appliquée dépendant à la fois de la position et du temps. Dans le le domaine du sismique elle permet de déterminer les déplacements résultants en utilisant l'accélérogramme approprié.
2. **Schéma d'intégration temporelle** : Il considère l'accélération, la vitesse et le déplacement. Les équations de mouvement sont discrétisées en utilisant un pas de temps  $\Delta t$ . Ce qui implique qu'il prend en compte l'accélération au temps  $t + \Delta t$  pour calculer les déplacements au temps  $t + \Delta t$ .
3. **Paramètres Newmark** : La méthode de Newmark utilise deux paramètres principaux, souvent notés comme  $\beta$  et  $\gamma$ , qui sont respectivement relatif à la vitesse et à l'accélération et influencent le comportement de la méthode. Les valeurs de  $\beta$  et  $\gamma$  permettent de contrôler la stabilité numérique. Les valeurs courantes pour ces paramètres sont généralement  $\beta = 0.25$  et  $\gamma = 0.5$ , mais elles peuvent être ajustées en fonction des besoins de l'analyse.

Utilisation dans le logiciel Ansys : pour voir la méthode utilisée dans le logiciel Ansys la commande importante se trouve ‘ dans solution contrôle ‘



**Figure5. 4.** Choix du type de méthode utilisée sur logiciel Ansys Apdl

Les équations de mouvement utilisées dans la méthode de Newmark pour l'analyse dynamique transitoire sont généralement des équations différentielles ordinaires (EDO) qui montrent le comportement dynamique d'une structure. Les équations prises en compte peuvent varier en fonction du problème et des conditions aux limites. Une formulation générale des équations de mouvement est la suivante : [1]

$$\text{On a } \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.1)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (5.2)$$

$$C = 2m \omega \xi \quad u(0) = 0 \quad \dot{u}(0) = 0 \quad (5.3)$$

$$m\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P \quad (5.4)$$

$$m\ddot{u}(0) + C\dot{u}(0) + Ku(0) = P(0) \quad (5.5)$$

$$\ddot{u}(0) = \frac{P(0) - C\dot{u}(0) - Ku(0)}{m} = \frac{P(0)}{m} \quad (5.6)$$

Ce qui est équivalent à la force P(t) :

$$P(t) = \ddot{u}g(t).m \quad (5.7) \quad \text{avec une taille du pas } <\frac{T}{10}$$

$$\text{Nous avons : } a_1 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} m + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)^2} c \quad (5.8)$$

$$a_2 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} m \left( \frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) c \quad (5.9)$$

$$a_3 = \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) m + \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \quad (5.10)$$

Avec  $\left\{ \gamma = 0.5, \beta = \frac{1}{6} \right\}$

Nous allons ensuite calculer  $\hat{k} = k + a1$ . (5.11)

T1 = 0      T2=0.01      T3 = 0.02      T4 = 0.03 jusqu'à arriver à Tn

On calcul

$$\hat{p} = p_{i+1} + a_1 u_i + a_2 \dot{u}_i + a_3 \ddot{u}_i \quad (5.12)$$

$$u_{i+1} = \frac{\hat{p}_{i+1}}{\hat{k}} \quad (5.13)$$

$$\dot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}(u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{u}_i \quad (5.14)$$

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)^2}(u_{i+1} - u_i) + \frac{1}{\beta\Delta t} \dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \ddot{u}_i \quad (5.15)$$

$\hat{k}$  : raideur effective

$m$  : Masse

$k$  : raideur

$C$  : amortissement

$a$ : contribution de l'accélération due aux charges d'inertie

$\hat{p}_{i+1}$ : force résultante à l'instant  $i+1$

$p_{i+1}$  : force appliquée à l'instant  $i+1$

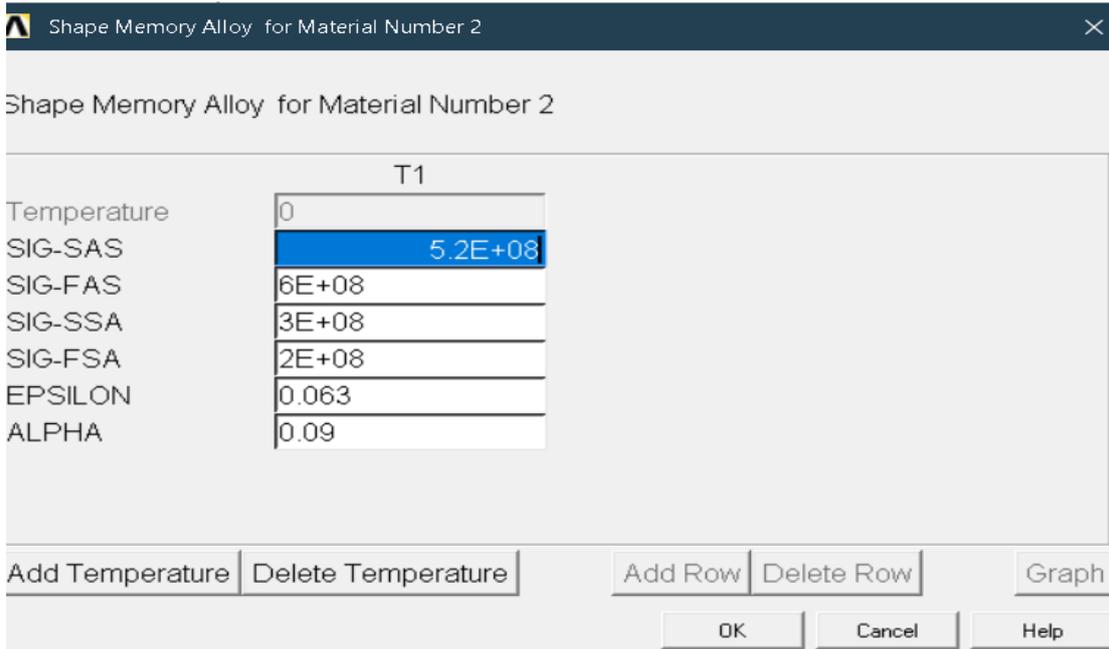
$\beta$  et  $\gamma$  sont les paramètres de Newmark.

Ces équations itératives sont résolues séquentiellement pour chaque pas de temps pour obtenir la réponse transitoire du système. La connaissance des valeurs de déplacement, de vitesse et d'accélération à chaque étape de temps permet d'analyser comment le système évolue dans le temps en réponse aux charges appliquées.

Les équations peuvent être plus complexes en 2D ou 3D pour les structures tridimensionnelles, et elles peuvent également inclure des termes d'amortissement visqueux, des conditions aux limites spécifiques, etc. Cependant, la formulation générale repose sur l'équilibre des forces et l'intégration temporelle pour suivre l'évolution du système.

#### 5.4. Modélisation des AMF

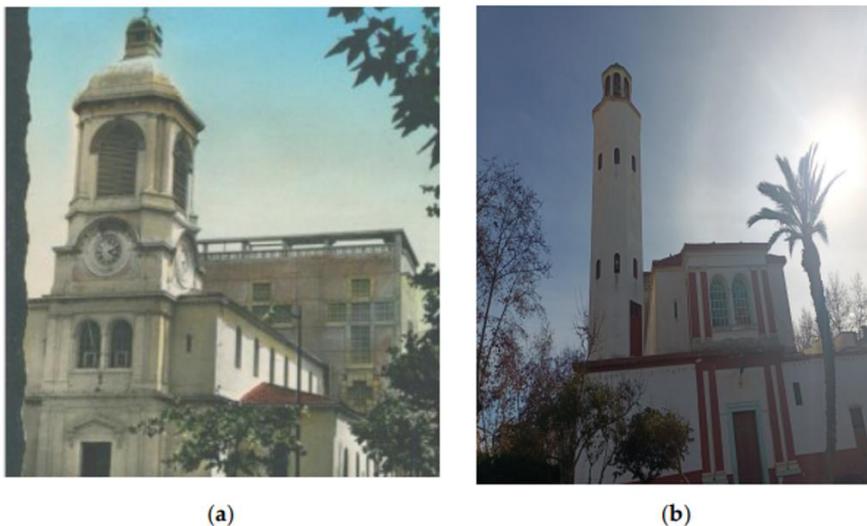
Le logiciel Ansys Apdl permet de modéliser les AMF en tant qu'élément et de leurs intégrer leurs caractéristiques thermomécaniques dans la commande suivante (Figure 5.5)



**Figure5. 5.** Utilisation des AMF dans le logiciel Ansys

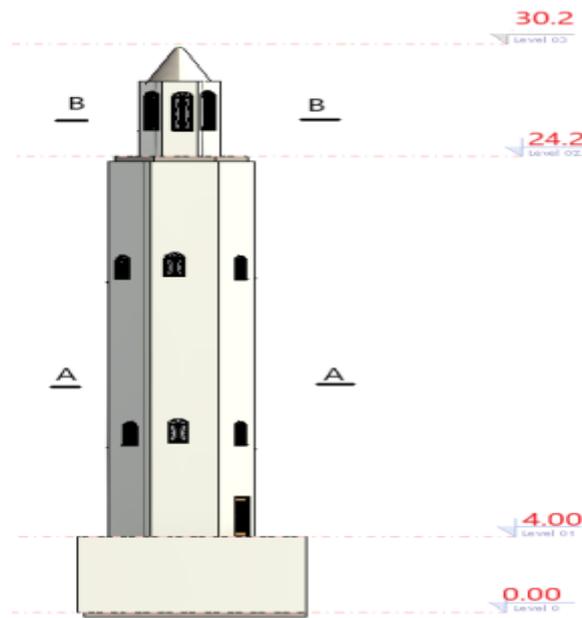
### 5.5. Présentation du cas étudié

La Mosquée El-Badr est une ancienne église précédemment appelée Église de Saint-Jean-Baptiste située dans le centre-ville de Mostaganem en Algérie. L'Église de Saint-Jean-Baptiste a été construite en 1839 et restaurée en 1953, puis transformée en mosquée après la modification du clocher en minaret (Figure 5.6). Elle a reçu le nom de Mosquée El-Badr dans les années 1970. D'autres cas de mosquée ont été étudiés en Algérie comme la mosquée de Mansourah [2]

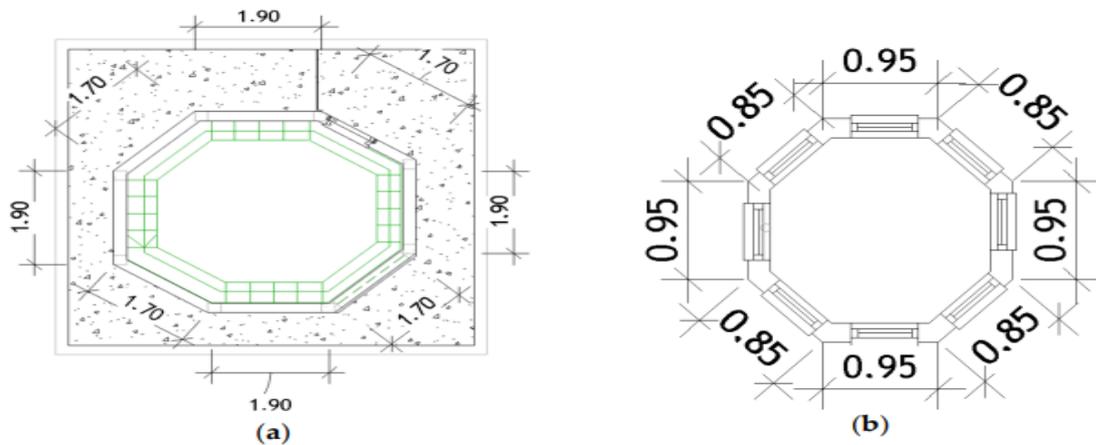


**Figure5. 6.** Mosquée El-Badr (a) Avant transformation ; (b) Après transformation

Le minaret a une hauteur totale de 30,2 m (voir Figure 5.7) et se compose d'une partie rectangulaire d'une hauteur de 4 m avec une porte, au-dessus de laquelle se trouve une tour polygonale à huit côtés, d'une largeur maximale de 3,4 m et d'une hauteur de 20,2 m, ainsi qu'une autre tour d'une hauteur de 4 m. L'ensemble de la structure compte 24 fenêtres. La Figure 5.12 montre la section transversale du minaret.



**Figure5. 7.** Vue en élévation du minaret



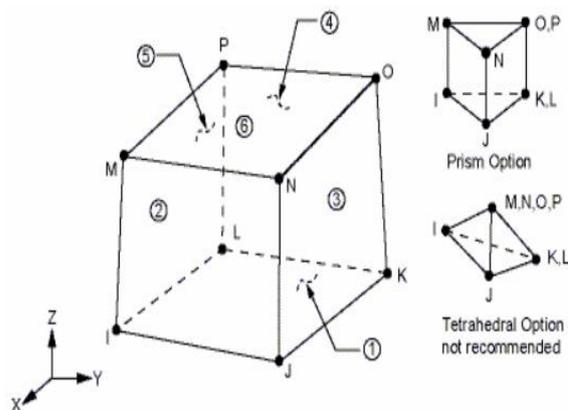
**Figure5. 8.** Vue en plans du minaret ; (a) coupe A-A (b) Coupe B-B

**Tableau5. 2.** Propriété mécanique du béton armé du minaret

Module de young (MPa)	Poids volumique (kN/m <sup>3</sup> )	Coefficient de poisson	Résistance à la compression (MPa)
13.000	23	0.2	25

### 5.6. Modèle Numérique du Minaret

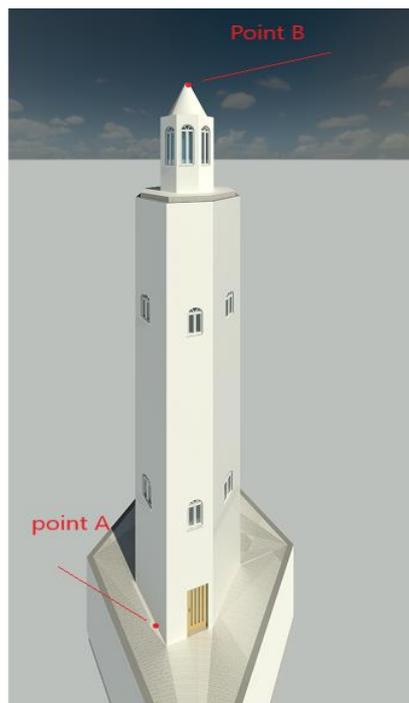
Le choix d'Ansys Apdl a été fait car il offre la possibilité d'intégrer les AMF en introduisant leurs propriétés thermomécaniques. Les AMF ont été fixés entre leurs deux côtés avec une ceinture métallique. Pour modéliser la structure, l'élément solide 45 a été utilisé pour la structure en béton armé et l'élément solide 185 pour les AMF et la ceinture métallique. Les AMF peuvent être modélisés avec des éléments plans ou solides (PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187 et SOLSH190), disponibles dans le logiciel Ansys [3]. Ainsi, l'élément solide structurale à huit nœuds en 3-D SOLID185, avec une hauteur de 4 m au point A, est illustré dans la Figure 5.9.



**Figure5. 9.** Solid 185 model

La méthode utilisée pour le maillage était une méthode de maillage tétraédrique avec un maillage libre en volume. La commande "vmesh" a été utilisée pour la partie en béton armé ainsi que pour l'alliage à mémoire de forme (AMF).

Dans une première phase, nous avons considéré le modèle modal obtenu par la méthode des éléments finis afin de déterminer les fréquences et les modes de formes de la structure étudiée. Ensuite, une analyse transitoire a été développée pour calculer la réponse sismique de la structure en termes de contraintes, de déplacements et d'accélération. Deux points d'étude ont été choisis sur le minaret. Le point A, qui représente une forte concentration de contrainte, est situé à une hauteur de 4 m. Le point B se trouve au sommet de la structure, à 30,2 m de hauteur, à l'endroit des déplacements maximums (Figure 5.10).



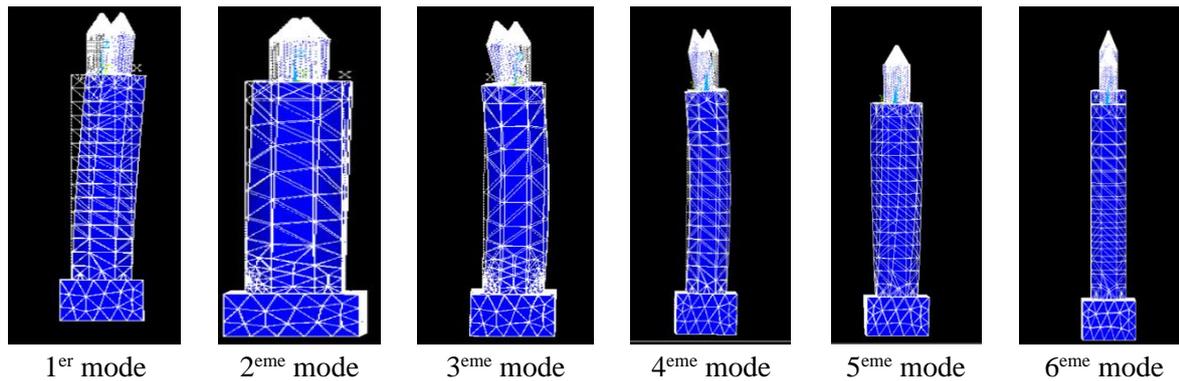
**Figure5. 10.** Positions des points A et B.

### 5.7. Analyse modale

L'analyse modale a été réalisée à l'aide du logiciel Ansys, et les résultats sont décrits dans le Tableau 5.3 et sur la Figure 5.11. Les différents modes avec leurs fréquences et les directions de leur déplacement sont représentés. Les modes 5 et 6 correspondent à la torsion et à la translation le long de l'axe z ; les modes 1, 3, 7 et 2, 4, 8 correspondent respectivement à la translation le long des axes x et y. La période fondamentale est de 0,331 s.

**Tableau5. 3.** Liste des périodes et fréquences sans AMF

Mode	Fréquence(hz)	Période (s)	Type de mode
1	3.019	0.331	Translation x
2	3.049	0.327	Translation y
3	16.698	0.059	Translation x
4	16.919	0.059	Translation y
5	21.293	0.046	Torsion
6	24.529	0.040	Translation z
7	29.517	0.033	Translation x
8	29.851	0.0219	Translation y



**Figure5. 11.** Mode de vibration du minaret

Le Tableau 5.4 montre qu'il y avait une très petite variation de la période entre l'état initial de la structure et l'état avec 4 et 6 AMF dans les modes fondamentales. De plus, la période a augmenté dans les autres modes.

**Tableau5. 4** Liste des périodes avec les AMF

Mode	Période		
	sans AMF (s)	4 AMF (s)	6 AMF (s)
1	0.331	0.348	0.348
2	0.327	0.33	0.338
3	0.059	0.326	0.336
4	0.059	0.315	0.315
5	0.046	0.305	0.305
6	0.040	0.283	0.283
7	0.033	0.283	0.268
8	0.0219	0.243	0.243

### 5.8. Analyse transitoire du minaret sans AMF

Afin d'observer la réponse du minaret pendant un tremblement de terre sans prendre en compte les AMF, nous avons réalisé une analyse transitoire, qui est non linéaire en raison du comportement des AMF. Nous avons utilisé le séisme de Boumerdes, qui s'est produit en Algérie dans la ville de Boumerdes le 21 mai 2003 et qui a été le plus violent depuis le séisme d'El Asnam en 1980. L'accélérogramme de ce séisme est fourni par le Centre de Recherche Appliquée en Génie Sismique (CGS) à Alger, comme le montre la figure suivante (Figure 5.12). Il n'existe toujours pas de moyen fiable de prédire la sismicité d'une région à l'avance. La recherche de signes avant-coureurs n'a pas évolué, mais il est possible de recueillir des informations sismiques historiques grâce aux données instrumentales qui ont commencé il y a environ un siècle ; on peut donc calculer la probabilité que l'intensité atteigne ou dépasse un certain seuil. Cependant, le

nombre de séismes de forte intensité est assez limité pour une analyse statistique. Le calcul d'une accélération maximale au sol (PGA) de  $PGA = 0,58 \text{ g}$  [4] pour le séisme de Boumerdes a été déterminé à partir

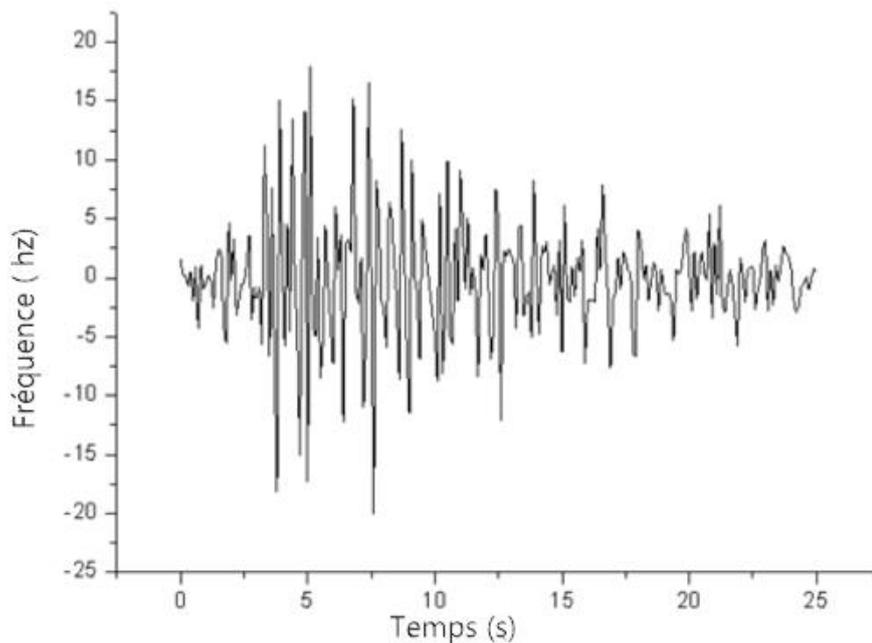
$$T = \frac{t}{\log(1-P)} \quad (5.16)$$

P: la probabilité que l'événement se produise ; t : temps d'exposition ; T : période de retour moyenne Pour le calcul du MCE (séisme maximal envisagé) :

$$MCE = 3,81 + 1,920 \log L = 6,77 \quad (5.17)$$

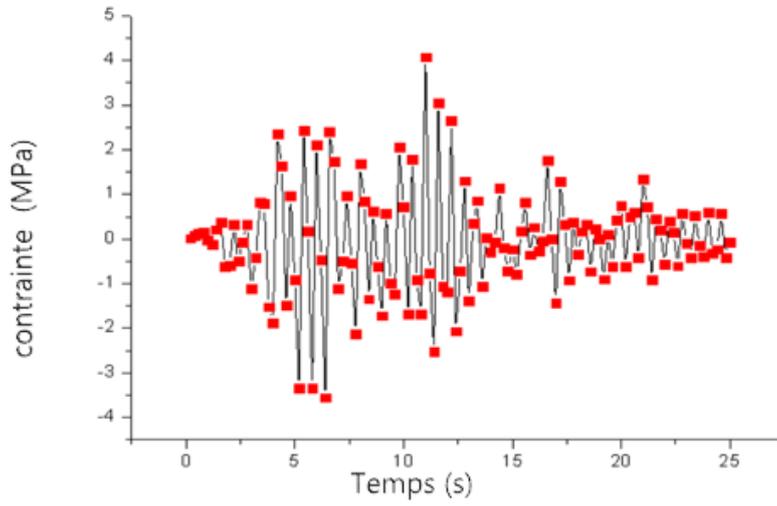
Avec L = longueur de la faille de Thénia/Boumerdes ; L = 35 km

$$DBE = (2 \text{ MCE}) / 3 = 4,51 \quad (5.18)$$

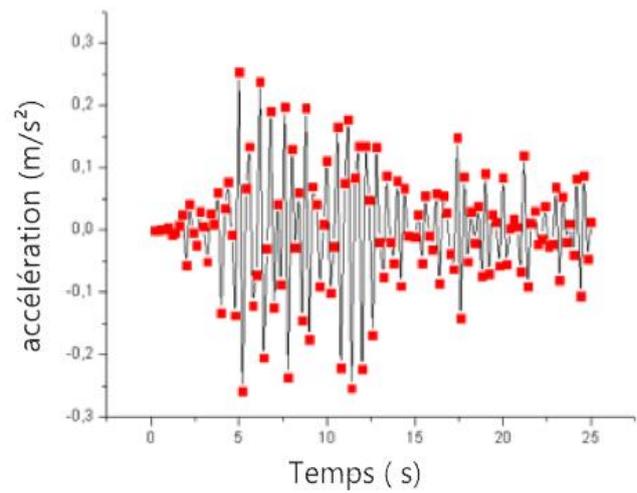
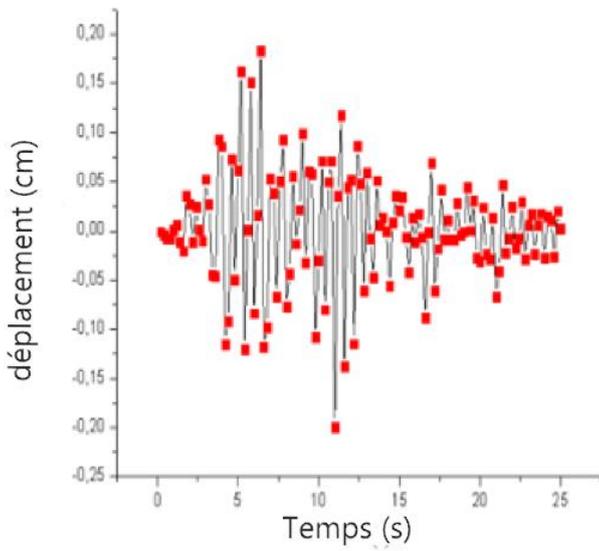


**Figure5. 12.** Enregistrement réel du séisme de Boumerdes en 2003 selon la composante E-O (Est-Ouest).

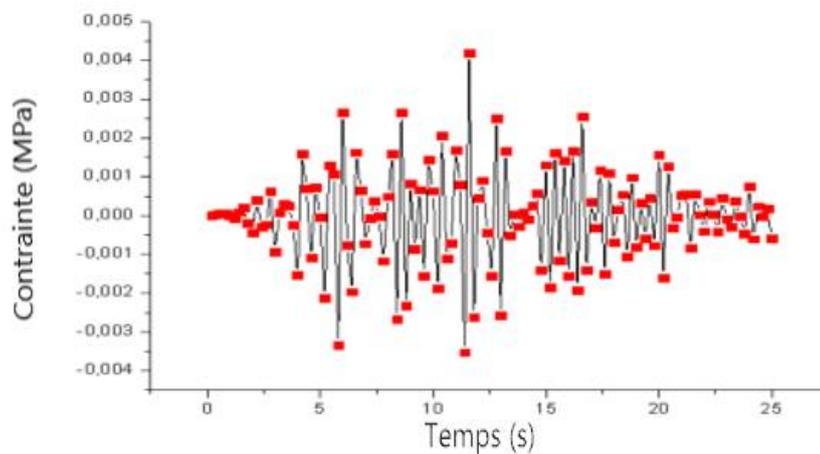
La réponse sismique du minaret est schématisée par les courbes suivantes (Figures 5.13 et 5.14), représentant les contraintes de déplacement et les accélérations aux points A et B.



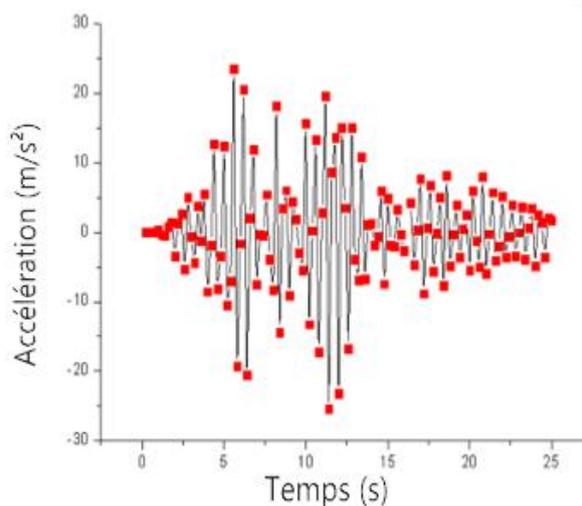
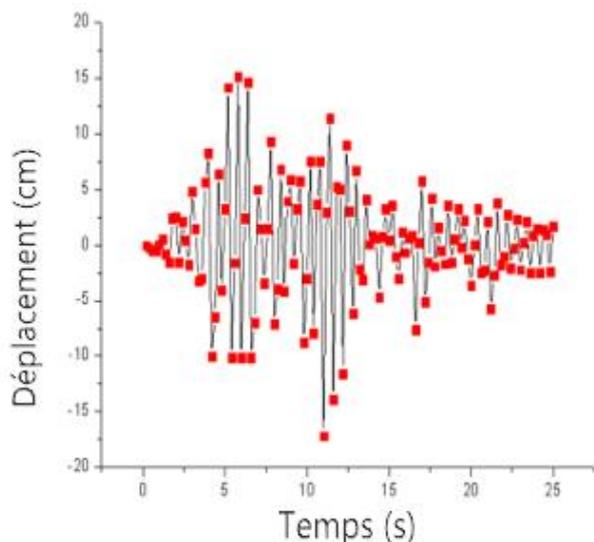
(a)



**Figure5. 13.** Déplacement, contrainte et accélération au point A ; (a) contrainte ; (b) déplacement ; (c) accélération



(a)



**Figure5. 14.** Déplacement, contrainte et accélération au point B ; (a) contrainte ; (b) déplacement ; (c) accélération.

Tableau 5.5 donne les valeurs maximales de déplacement ( $U_{x,max}$ ), de contrainte ( $\sigma_{x,max}$ ) et d'accélération ( $A_{x,max}$ ) de la structure. On peut constater qu'au point A, la contrainte est plus élevée et le déplacement est plus faible ; cependant, au point B, c'est l'inverse.

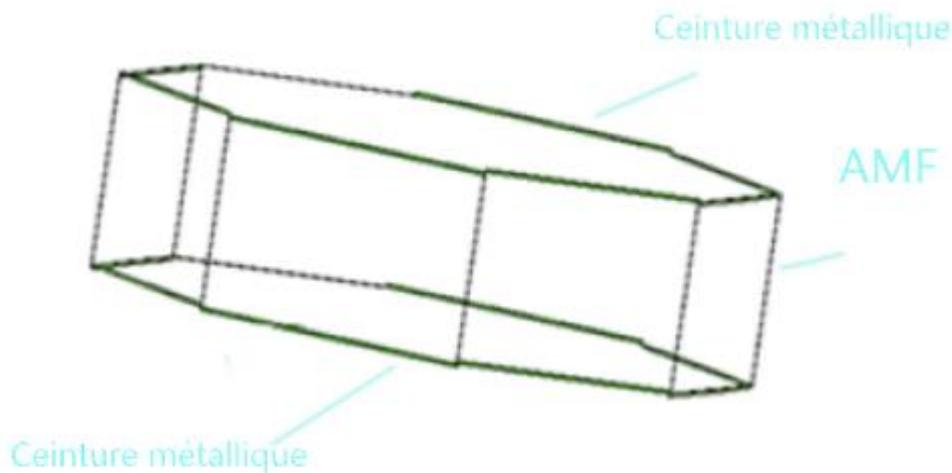
**Tableau5. 5.** Réponse sismique maximale aux points A et B sans AMF.

Position	Sizes	Value
Point A	$U_{x,max}$ (cm)	0.19907
	$A_{x,max}$ (m/s <sup>2</sup> )	0.3531
	$\sigma_{x,max}$ (MPa)	4.0814
Point B	$U_{x,max}$ (cm)	17.1712

$A_{x_{max}}$ (m/s <sup>2</sup> )	23.4494
$\sigma_{x_{max}}$ (MPa)	0.00418

### 5.9. Avec AMF

Dans cette partie, nous décrivons comment notre minaret a été équipé de AMF. Une ceinture métallique polygonale (Figure 5.15) fixait l'alliage à la structure en béton. Une solution innovante suggère d'exploiter les caractéristiques spéciales du comportement super-élastique des AMF sous l'excitation dynamique. Des fils ou des treillis AMF précontraints peuvent être installés entre les composants en brique, ce qui a pour effet de limiter les déplacements relatifs provoqués par les vibrations et, en même temps, de permettre la dissipation d'énergie. Dans un premier cas, 4 AMF ont été fixés à une hauteur de 4 m au bas de la partie polygonale du minaret. Dans un deuxième cas, 6 AMF ont été fixés au même endroit un cas similaire a été étudié par Hamdaoui et al [5]. Dans un dernier test, 6 AMF ont été utilisés avec une répartition différente : 4 AMF ont été fixés à une hauteur de 4 m et deux autres à une hauteur de 24,2 m. Des AMF en nickel-titane ont été utilisés. Les alliages avaient une longueur de 1,20 m et un diamètre de 40 mm.



**Figure5. 15.** Ceinture métallique pour le placement des alliages.

Les caractéristiques physiques et mécaniques de l'alliage nickel-titane AMF considéré dans notre étude sont présentées dans le Tableau 5.6 et sont basées sur les propriétés physiques et mécaniques de l'alliage Ni-Ti AMF utilisé [3]. Le modèle de comportement est illustré dans un diagramme de contrainte par rapport à la déformation dans la Figure5.16 et le Tableau 5.6.

**Tableau5. 6.** Propriétés mécaniques du Nitinol

Propriété	Valeur	Unité
Nitinol		
Densité	6450	Kg/m <sup>3</sup>
Module de young	90,000	MPa
Coefficient de Poisson	0.3	
Limite d'élasticité en traction	1000	MPa
Contrainte maximum en compression	1400	MPa
Superelasticité		
Sigma SAS	520	MPa
Sigma FAS	600	MPa
Sigma SSA	300	MPa
Sigma FSA	200	MPa
Epsilon	0.063	mm <sup>-1</sup>
A	0.09	

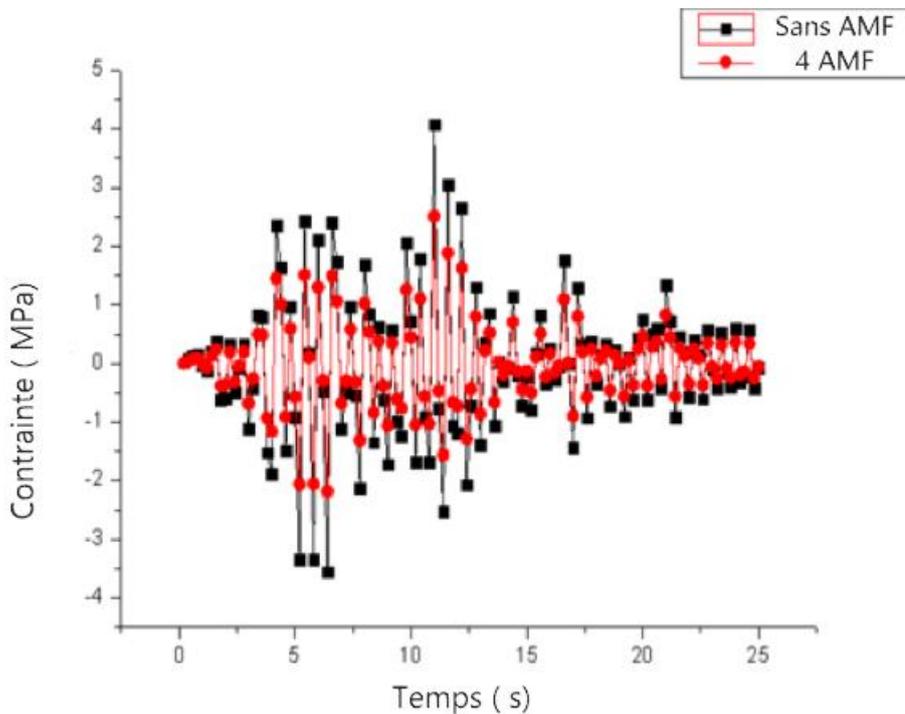
Les valeurs des contraintes de chargement et de déchargement dans l'état initial ( $\sigma_s^{AS}, \sigma_s^{SA}$ ) par rapport à la valeur finale ( $\sigma_f^{AS}, \sigma_f^{SA}$ ) sont représentées ; on observe également la déformation résiduelle maximale ( $\epsilon_L$ ) et le paramètre de compatibilité du matériau en tension et en compression ( $\alpha$ ), ainsi que les caractéristiques mécaniques de l'AMF. La réponse sismique est comparée sans AMF et avec AMF (4 AMF et 6 AMF). L'AMF a été installé à une hauteur de 4 mètres de la base. Le Tableau 5.7 montre les différences relatives entre les résultats du modèle sans alliages et ceux avec 4 AMF, ainsi qu'entre le cas sans alliages et celui avec 6 AMF.

**Tableau 5. 7.** Réponse sismique maximum des minarets au point A et B pour 4, 6 et sans AMF

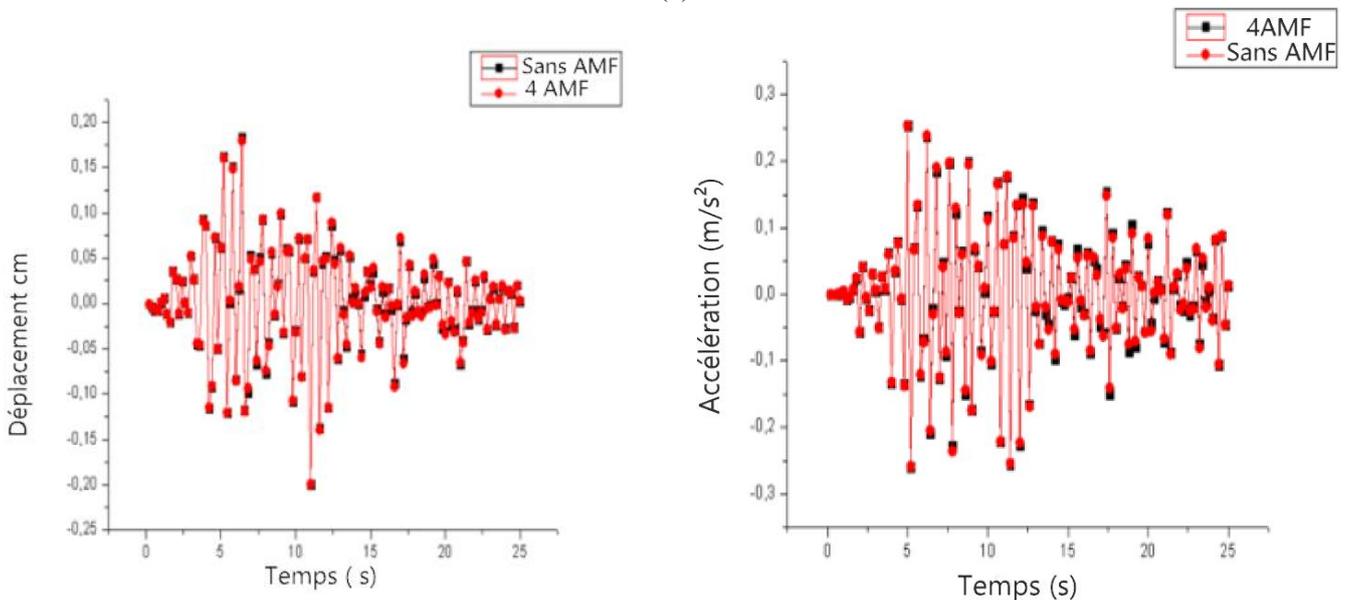
Position	Parametre	Sans AMF (1)	AMF 4 (2)	AMF 6 (3)	Difference (ET 2 1)	Difference (ET 3 1)	Difference (ET 3 2)
Point A	$U_{x_{max}}$ (cm)	0.19907	0.19936	0.20134	0.00029-	0.00227-	0.0019-
	$A_{x_{max}}$ (m/s <sup>2</sup> )	0.3531	0.2530	0.250016	0.1001	0.103084	0.0029..0
	$\sigma_{x_{max}}$ (MPa)	4.0814	2.5152	2.1836	1.5662	1.8978	0.3316
Point B	$U_{x_{max}}$ (cm)	17.1712	17.1431	18.2512	0.0281+	1.08-	1.1081-
	$A_{x_{max}}$ (m/s <sup>2</sup> )	23.4494	23.2067	25.922	0.2427	2.4726-	2.7153-

$\sigma_{X_{max}}$ (MPa)	0.00418	0.00425	0.004316	0	0.00013-	0
--------------------------	---------	---------	----------	---	----------	---

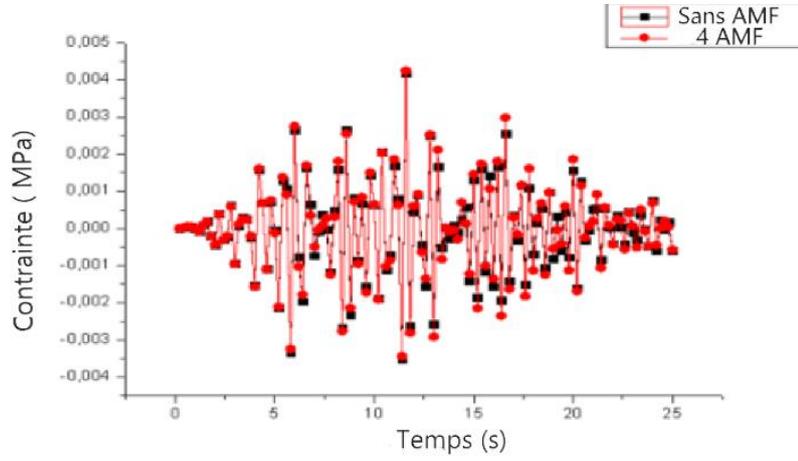
Les différentes courbes montrent la variation des quantités mentionnées ci-dessus en fonction du temps. Les résultats montrent une diminution de la contrainte pour les 4 AMF aux points A et B par rapport à la structure sans alliage (Figures 5.17 et 5.18). Cela montre que la structure est moins soumise à des contraintes, moins sujette à l'effondrement ; pour les 6 AMF, les résultats sont assez similaires (Figures 5.19 et 5.20), sauf la diminution de la contrainte au point A et l'augmentation du déplacement et de l'accélération au point B sont probablement dus à la non-linéarité du matériau. Le tableau montre également qu'au-delà de 4 AMF, les variations des quantités sont très faibles.



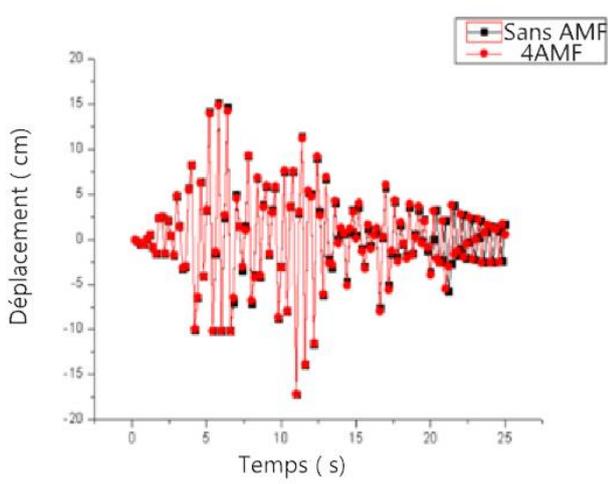
(a)



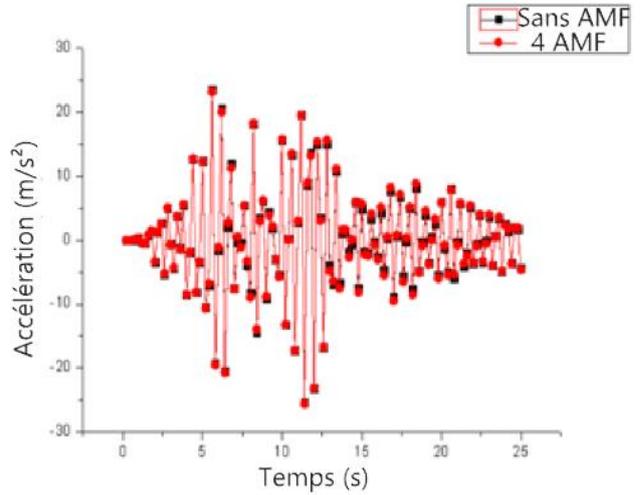
(b) (c)  
**Figure5. 16.** Variation de la réponse sismique ; (a) contrainte, (b)déplacement, (c) accélération au point A entre sans AMF et 4 AMF.



(a)

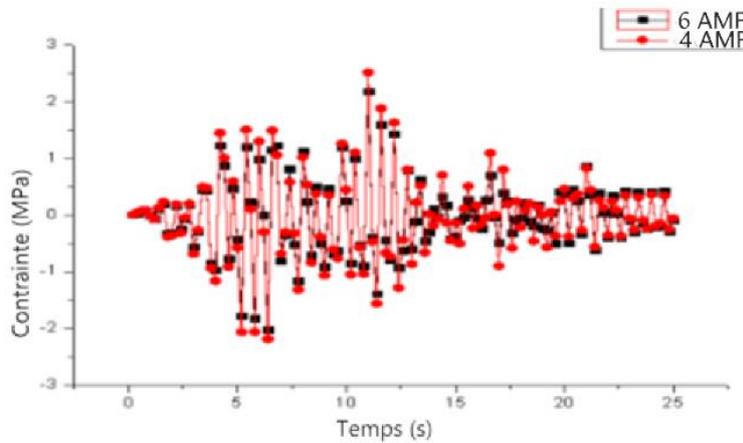


(b)

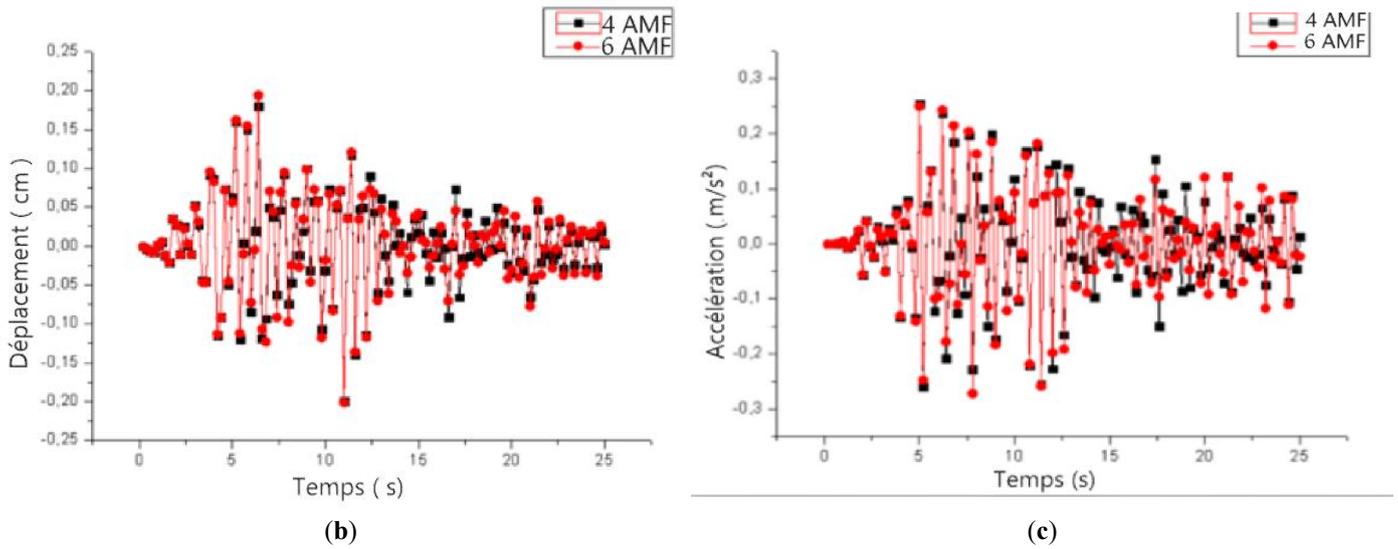


(c)

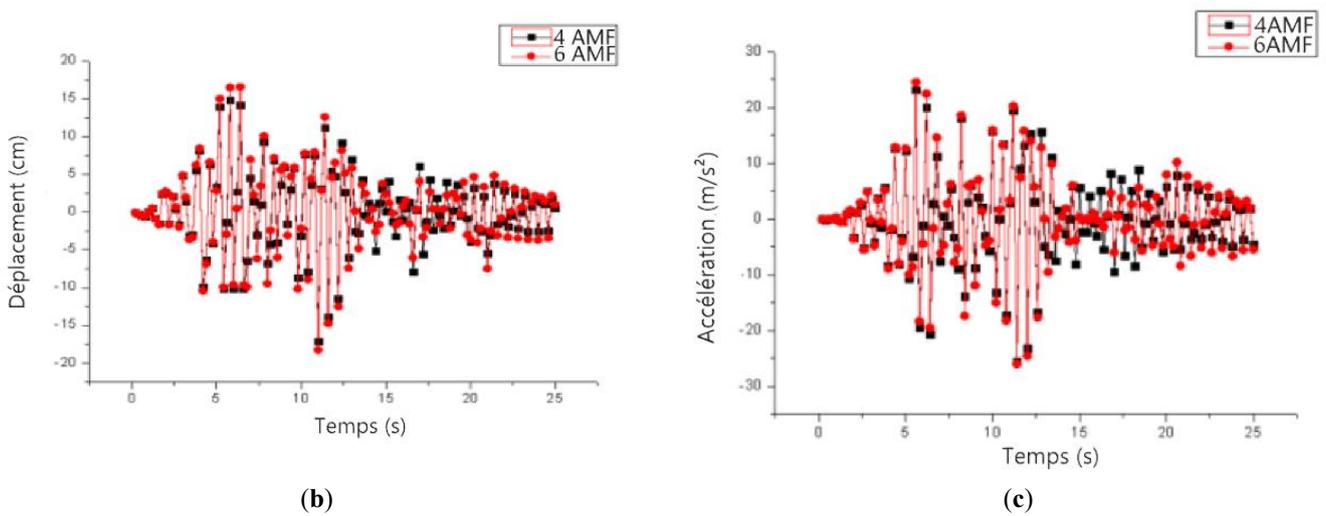
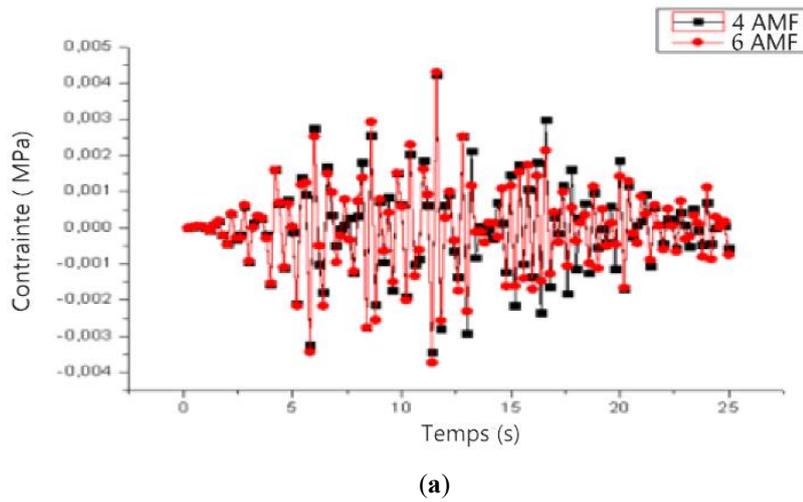
**Figure5. 17.** Variation de la réponse sismique ; (a) contrainte, (b) déplacement, (c) accélération au point B entre sans AMF et 4 AMF..



(a)



**Figure5. 18.** Variation de la réponse sismique ; (a) contrainte, (b) déplacement, (c) accélération au point A entre 4AMF et 6 AMF.



**Figure5. 19.** Variation de la réponse sismique ; (a) contrainte, (b) déplacement, (c) accélération au point B entre 4AMF et 6 AMF

Le Tableau 5.8 présente les résultats de l'agencement des 4 AMF à une hauteur de 4 m comme précédemment, ainsi qu'avec l'ajout de 2 AMF à une hauteur de 24,2 m (4+2 AMF).

**Tableau 5.8.** Réponse maximal au point A et B pour 4 AMF et 4 +2 AMF

Position	Sizes	AMF 4	AMF 4+2	Différence
Point A	$U_{x_{max}}$ (cm)	0.19936	0.19957	0.00021-
	$A_{x_{max}}$ (m/s <sup>2</sup> )	0.2530	0.2642	0.0112-
	$\sigma_{x_{max}}$ (MPa)	2.5152	2.1884	0.3268
Point B	$U_{x_{max}}$ (cm)	17.1431	17.1901	0.047-
	$A_{x_{max}}$ (m/s <sup>2</sup> )	23.2067	25.437	2.2303-
	$\sigma_{x_{max}}$ (MPa)		0.003591	0.00066

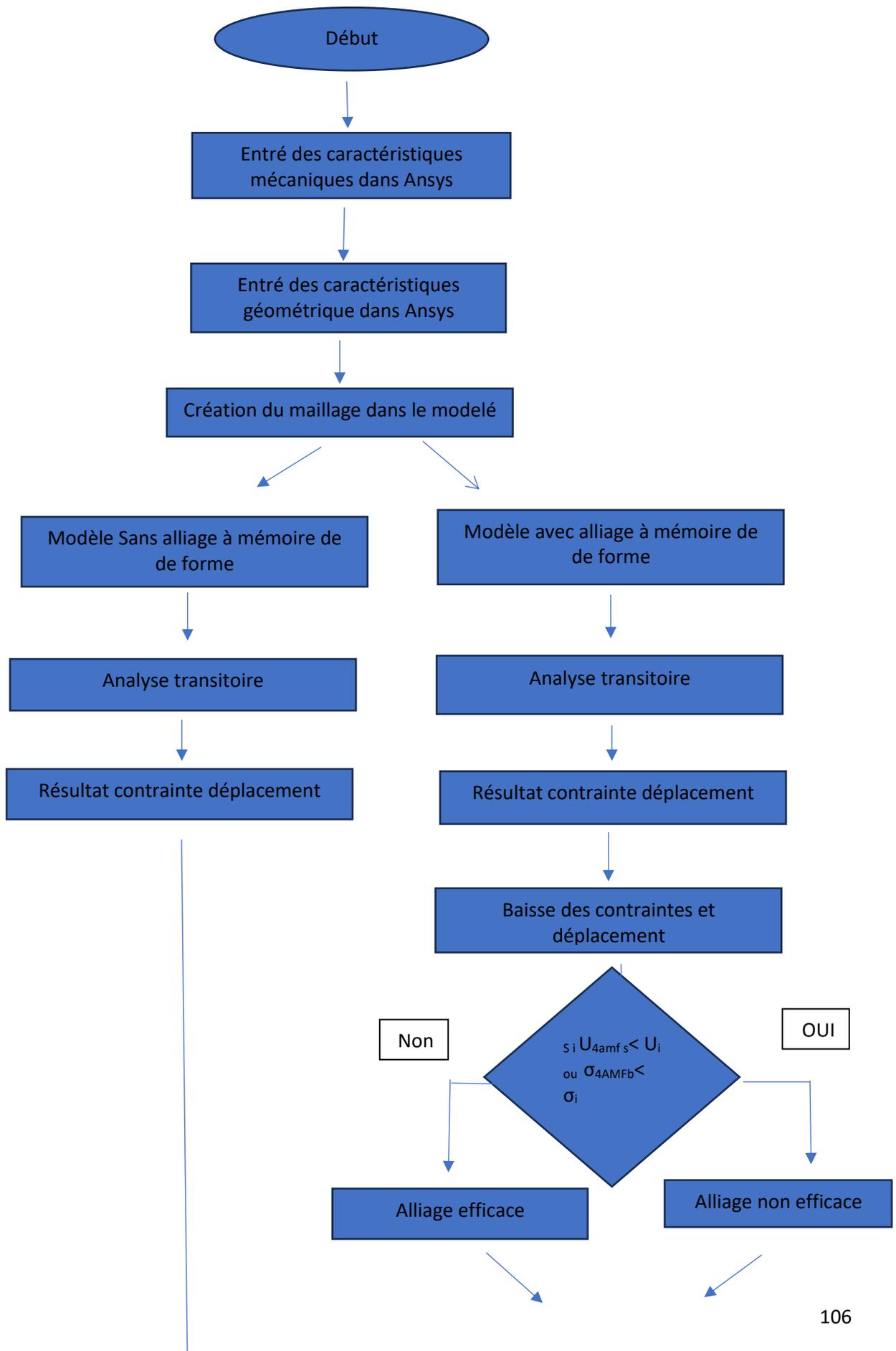
Nous avons constaté une différence très faible entre les amplitudes aux points A et B. Cela nous montre que l'utilisation d'un plus grand nombre de AMF n'atténue pas la réponse sismique. Dans un dernier cas, 4 AMF ont été placés à une hauteur de 24 m, et les résultats ont été comparés à ceux de 4 AMF à une hauteur de 4 m (Tableau 5.9)

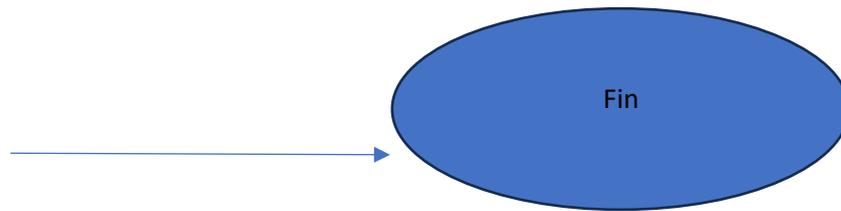
**Tableau 5.9.** Réponse sismique maximale pour 4 AMF dans la position A et B.

Position	Sizes	AMF 4 (M4)	AMF 4 (M 24)	Difference
Point A	$U_{x_{max}}$ (cm)	0.19936	0.1878	0.01156
	$A_{x_{max}}$ (m/s <sup>2</sup> )	0.2530	0.284	0.031-
	$\sigma_{x_{max}}$ (MPa)	2.5152	2.148	0.3672
Point B	$U_{x_{max}}$ (cm)	17.1431	13.034	4.109
	$A_{x_{max}}$ (m/s <sup>2</sup> )	23.2067	20.611	2.595-
	$\sigma_{x_{max}}$ (MPa)	0.00425	0.00323	0.00102

Les résultats montrent que l'utilisation des AMF à une hauteur de 24 m est très efficace et montre la meilleure atténuation de la contrainte et du déplacement aux points A et B ; cela démontre que cette variante est plus efficace.

On peut résumer ce phénomène dans cet organigramme en nommant  $U_i$  le déplacement sans AMF et  $U_{4amf}$  le déplacement avec 4 AMF au sommet et  $\sigma_i$  la contrainte sans AMF et  $\sigma_{4amfb}$  la contrainte avec 4 AMF à la base





**Figure5. 20** : Organigramme sur l'utilisation des AMF pour la réduction des contraintes et déplacement

### 5.10. conclusion

En raison de leurs propriétés mécaniques, les AMF sont de plus en plus utilisées dans le domaine du génie sismique. L'application de fil de nickel-titane sur le minaret de la mosquée El-Badr, grâce au logiciel Ansys Apdl, a démontré l'intérêt de ces alliages. Nous avons soumis notre structure à une excitation sismique représentée par l'enregistrement réel du séisme de Boumerdes en 2003, et avons comparé la réponse sismique du minaret en termes de contraintes, de déplacements et d'accélération dans son état initial (sans alliage) et avec 4 et 6 alliages de type Ni-Ti disposés de différentes manières. Les résultats montrent que l'utilisation de 4 AMF a entraîné une réduction significative des contraintes au point A, tandis qu'au point B, la diminution était plus faible. Une légère variation des déplacements et des accélérations a été observée. Un plus grand nombre de AMF a également été envisagé ; 6 AMF ont été placées à une hauteur de 4 m et 2 AMF ont été placées à une hauteur de 24 m avec 4 autres AMF à une hauteur de 4 m. Les résultats montrent qu'ajouter plus de AMF par rapport aux 4 initialement envisagées n'entraîne pas de variation significative. Dans une dernière configuration, nous avons positionné les 4 AMF à une hauteur de 24 m. Les conclusions révèlent une importante réduction des contraintes et des déplacements aux points A et B. En général, il apparaît que les AMF réduisent considérablement la réponse sismique, en particulier en termes de contraintes, lorsqu'elles sont judicieusement placées en nombre bien déterminé. Le choix de 4 AMF à une hauteur de 24 m est approprié.

### 5.11. Référence

[1] Wu, J. Y., Nguyen, V. P., Nguyen, C. T., Sutula, D., Sinaie, S., & Bordas, S. P. A. (2020). Phase-field modeling of fracture. In *Advances in Applied Mechanics* (Vol. 53, pp. 1–183). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.aams.2019.08.001>

Bourdim, S.M.A.; Hamdaoui, K.; Marcellini, A. *Diagnosis and Seismic Analysis of [2] the Mansourah Minaret in Tlemcen, Algeria. Int. J. Civil Eng. Res. 2013, 4, 153–175*

[3] Karim Hamdaoui Advisor, T., Casciati Revisor, F., & Marcellini, A. (n.d.). *Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile Graduate School in Civil Engineering Experimental Applications on Cu-based Shape Memory Alloys: Retrofitting of Historical Monuments and Base Isolation.*

[4] Bouhadad, Y., Slimani, A., & Laouami, N. (2006). *PREDICTED AND OBSERVED PGA VALUES IN THE BOUMERDES (ALGERIA) AREA.*

<https://www.researchgate.net/publication/277712041>

[5] Hamdaoui, K.; Benadla, Z.; Chitaoui, H.; Benallal, A. *Dynamic Behavior of A Seven Century Historical Monument Reinforced by Shape Memory Alloy Wires. Smart Struct. Syst.* 2019, 23, 337–345

## **Conclusion générale**

La valeur d'un ingénieur en génie civil s'exprime par la valeur ajoutée qu'il offre, ceci se faisant par un apport de sécurité aux structures tout en optimisant ce gain de sécurité par un calcul économique qui favorise la compétitivité. Le moyen le plus sûr et le plus efficace est le développement des codes et normes de calcul, l'utilisation de moyens technologiques, ainsi qu'une bonne maîtrise des règles de l'art du génie civil en général.

Dans cette thèse, nous nous intéressons au domaine du génie parasismique, qui peut sembler fastidieux, mais revêt une grande importance auprès des spécialistes du bâtiment en raison des risques auxquels les citoyens pourraient être exposés en cas de catastrophe. Cela est particulièrement pertinent dans les zones à forte sismicité en Algérie, notamment dans les régions du nord.

Pour remédier à cette dangerosité latente de la nature, nous avons recouru, dans cette thèse, à l'utilisation de systèmes nouveaux, innovants et efficaces. Nous avons pu expliquer leur utilisation générale dans le monde à travers divers exemples de contrôle actif et passif, en mettant en évidence leur développement dans le temps. Dans certains cas, nous avons souligné les gains que peuvent procurer certains matériaux intelligents, en corrélant leur adéquation aux structures intelligentes.

La diversité des moyens antisismiques qui s'offrent à nous nous pousse à nous interroger sur le choix des moyens à utiliser. Pour une étude paramétrique, nous avons traité deux sujets. Le premier concerne l'utilisation des alliages à mémoire de forme comme moyen de contrôle passif dans une mosquée en Algérie. D'abord quatre AMF ont été utilisés à la base ensuite 6 AMF ont été posés. Les résultats ont montré une forte baisse de la contrainte après l'application de ce système novateur au point A qui est à la base par contre la contrainte n'a pas beaucoup varié idem pour le déplacement. L'autre configuration est de mettre 4 AMF au sommet et dans ce cas nous avons une faible baisse de la contrainte et une forte baisse du déplacement au sommet. La deuxième étude consistait à ajouter des alliages à mémoire de forme à des murs en maçonnerie, fortement sollicités par les charges extérieures. Les résultats ont montré l'efficacité de ces derniers, permettant de tirer une conclusion générale partielle. Bien que cette conclusion n'englobe pas tous les cas possibles, elle a été efficace dans les tests effectués, et nous pouvons affirmer que leur utilisation fournira un gain potentiel à l'ingénieur en réduisant les réponses aux charges extérieures, qu'elles soient statiques ou dynamiques.

## Perspective

- Utiliser les capteurs piezo dans des poutres pour réduire les contraintes.
- Développer un programme Matlab qui décrit la loi de comportement des AMF.
- Appliquer l'étude faite dans ce travail sur le terrain.
- Utiliser les capteur et actionneur piezo pour fermer les fissurations dans les éléments en béton armé.
- Utiliser les AMF dans les assemblages poteau poutre.
- Reproduire le travail fait sur thèse dans un bâtiment à habitation.
- Changer le type de matériaux utilisé dans la composition des AMF et voir la différence.
- Changer le diamètre des AMF et voir la différence.
- Appliquer le chauffage des AMF pour par exemple réduire les fissurations dans les éléments en béton armée.
- Faire une étude comparative entre les capteurs piezo et les AMF.
- Surveillance continue et maintenance prédictive
- Réparation et renforcement en temps réel

## Annexe

### Code Matlab qui met en évidence le comportement des AMF

```
%% [s,dynprop] = lagoudas_modified_2D(e,T,dynprop,matprop)

%INPUT:
%e:      [epsilon ; gamma]. Normal strain (epsilon) and shear
%        strain (gamma) at current time step.
%T:      Material temperature in degrees Celsius at current time
%        step.
%dynprop: 1x7 vector with internal variables. The initial value can be
%        [0 0 0 0 0 0 Tinf[K] ] for zero load, where Tinf[K] is the
%        environmental temperature in Kelvin. See below for
%        specification.
%matprop: 1x17 vector with material properties:
```

```

%      [H E_A E_M nu C_A C_M A_S A_f M_s M_f n_1^f n_2^f n_1^r n_2^r p]
%      See below for specification.

%OUTPUT:
%s:      [sigma ; tau]. Normal stress (sigma) and shear stress
%      (tau) at current time step.
%dynprop: Updated internal variables. To be transferred to the function
%      in next time step.

%% Initialization
% Material parameters
H = matprop(1); %Maximum transformation strain. Constant (m/m)
EA = matprop(2); %Elastic modulus of austenite (Pa)
EM = matprop(3); %Elastic modulus of martensite (Pa)
nu = matprop(4); %Poisson's ratio
CA = matprop(5); %Slope of austenite formation surface in sigma-T-plane at zero
sigma (Pa/K)
CM = matprop(6); %Slope of martensite formation surface in sigma-T-plane at zero
sigma (Pa/K)
As = matprop(7); %Austenite start temperature (degrees C)
Af = matprop(8); %Austenite finish temperature (degrees C)
Ms = matprop(9); %Martensite start temperature (degrees C)
Mf = matprop(10); %Martensite finish temperature (degrees C)
n = matprop(11:14); %Hardening curvature controlling parameters (0,1)
p = matprop(15); %Sub-loop curvature controlling parameter (-1,1)

% Internal parameters
rhods0 = -2*CM*CA*H/(CM+CA);
D = (CM-CA)/(CM+CA);
a1 = -rhods0*(Ms-Mf); %Hardening function parameter
a2 = -rhods0*(Af-As); %Hardening function parameter
a3 = -.05*a1*(3*(n(1)-n(2))+5) + .05*a2*(3*(n(3)-n(4))+5); %Hardening function
parameter
Y = .5*rhods0*(Ms-Af) - a3; %Yield surface
rhodu0 = .5*rhods0*(Ms+Af + 2*273.15);
SA = [1/EA 0; 0 2*(1+nu)/EA]; %Austenitic compliance matrix
SM = [1/EM 0; 0 2*(1+nu)/EM]; %Martensitic compliance matrix
DS = SM-SA; %Difference in compliance
T = T + 273.15; %Convert temperature to Kelvin for internal use

```

```

% Numerics
tol = 1e-3; %Tolerance of Phi
iters = 100; %Maximum number of iterations

% Variables at former time step
xi00 = dynprop(1); %Sub-loop variable and direction
xi0 = dynprop(2); %Martensitic volume fraction
e0 = dynprop(3:4); %Strain
et0 = dynprop(5:6); %Transformation strain
T0 = dynprop(7) + 273.15; %Temperature converted to Kelvin

%% Thermoelastic prediction
xi = xi0; %No change in xi
et = et0; %No change in transformation stain

S = SA + xi*DS; %Compliance
s = S\*(e - et); %Stress

%% Preferred direction of transformation
if xi == 0
    di = 1; %Only forward transformation admissible
    xi00 = 0;
elseif xi == 1
    di = -1; %Only reverse transformation admissible
    xi00 = 1;
else
    if xi00 < 0 %Reverse transformation preferred in former step
        di = -1; %Continue reverse
        xi00 = -xi00; %Change sign to actual value
    else %Forward transformation in former step
        di = 1; %Continue forward
    end
end

%% Thermodynamic force Phi
[sl,dsl,dx] = subloop(xi,xi00,p,di); %Sub-loop function
if di > 0 %Forward transformation preferred
    [f,dfdsl] = hardening(sl,a1,a3,n(1:2)); %Hardening function
    L = H*[s(1) ; 3*s(2)]/realsqrt(s(1)^2 + 3*s(2)^2); %Transformation direction
vector

```

```

Phi    = (1-D)*L*s + .5*s'*DS*s + rhods0*T - rhodu0 - f - Y;
else %Reverse transformation preferred
[f,dfdsl] = hardening(s1,a2,-a3,n(3:4)); %Hardening function
L        = et0/xi0; %Transformation direction vector
Phi      = -(1+D)*L*s - .5*s'*DS*s - rhods0*T + rhodu0 + f - Y;
end

%% Detection of turning point
% If Kuhn-Tuck condition not violated (Phi < 0) and turn is admissible,
% then there is a turn.
if Phi < 0 && xi ~ 0 && xi ~ 1
    di = -di; %Change direction
    S0 = SA + xi0*DS; %Compliance at former time step
    s0 = S0\(\e0 - et0); %Stress at former time step

    if di > 0 %From reverse to forward
        % Determine turning point variable, xi00
        L0 = H*[s0(1) ; 3*s0(2)]/realsqrt(s0(1)^2 + 3*s0(2)^2); %Transformation
direction vector at former time step
        f0 = (1-D)*L0*s0 + .5*s0'*DS*s0 + rhods0*T0 - rhodu0 - Y; %Phi0 = 0 at
former time step
        sl0 = invhardening((f0-a3)/a1,n(1:2)); %Inverse hardening function
        xi00 = invsubloop(xi0,sl0,p,di); %Inverse sub-loop function

        % Thermodynamic function, Phi, in new direction
        [sl,dslldxi] = subloop(xi,xi00,p,di);
        [f,dfdsl] = hardening(sl,a1,a3,n(1:2));
        L = H*[s(1) ; 3*s(2)]/realsqrt(s(1)^2 + 3*s(2)^2);
        Phi = (1-D)*L*s + .5*s'*DS*s + rhods0*T - rhodu0 - f - Y;
    else %From forward to reverse
        % Determine xi00
        L0 = et0/xi0; %Transformation direction vector at former time step
        f0 = (1+D)*L0*s0 + .5*s0'*DS*s0 + rhods0*T0 - rhodu0 + Y; %Phi0 = 0 at
former time step
        sl0 = invhardening((f0+a3)/a2,n(3:4)); %Inverse hardening function
        xi00 = invsubloop(xi0,sl0,p,di); %Inverse sub-loop function

        % Thermodynamic function, Phi, in new direction
        [sl,dslldxi] = subloop(xi,xi00,p,di);
        [f,dfdsl] = hardening(sl,a2,-a3,n(3:4));
    end
end

```

```

L = L0;
Phi = -(1+D)*L*s - .5*s'*DS*s - rhods0*T + rhodu0 + f - Y;
end
end

%% Transformation correction
%%If Kuhn-Tucker condition is violated (Phi > 0), then correct.
if Phi > 0

    persist = 0; %To check if solution persistently encounter the boundary.
    iter = 0; %No. of iterations
    while abs(Phi) > tol && persist <= 1 && iter <= iters

        % Derivatives
        if di > 0
            dPds = (1-D)*L' + s'*DS;
            dPdx = -dfdsl*dsldxi;
        else
            dPds = -(1+D)*L' - s'*DS;
            dPdx = dfdsl*dsldxi;
        end

        % Step in xi
        Dxi = -Phi/(dPdx - dPds*(S/(DS*s+L)));

        % Correct at boundaries
        if xi+Dxi > 1
            Dxi = 1-xi;
            persist = persist + 1;
        elseif xi+Dxi < 0
            Dxi = -xi;
            persist = persist + 1;
        end

        % Update xi and et
        xi = xi + Dxi;
        et = et + Dxi*L;

        % Evaluate iteration
        S = SA + xi*DS;

```

```

s = S\(\e - et);

% Thermodynamic function
[sl,dsl,dxi] = subloop(xi,xi00,p,di);
if di > 0
    [f,dfdsl] = hardening(sl,a1,a3,n(1:2));
    L = H*[s(1) ; 3*s(2)]/realsqrt(s(1)^2 + 3*s(2)^2);
    Phi = (1-D)*L*s + .5*s'*DS*s + rhods0*T - rhodu0 - f - Y;
else
    [f,dfdsl] = hardening(sl,a2,-a3,n(3:4));
    % L is unchanged
    Phi = -(1+D)*L*s - .5*s'*DS*s - rhods0*T + rhodu0 + f - Y;
end

iter = iter + 1;
end

if iter > iters-1
    disp('Transformation correction did not converge. Maybe the tolerances should be
reconsidered.');
```

```

end
end

if di < 0 %If reverse transformation...
    xi00 = -xi00; %... then change sign for handling only.
end

dynprop(1) = xi00;
dynprop(2) = xi;
dynprop(3:4) = e';
dynprop(5:6) = et';
dynprop(7) = T - 273.15; %Convert back to degrees C

end

function [f,dfds] = hardening(sl,mult,add,n)
%Cubic Bezier hardening function. Determine f from s. Also the derivative
%of f with respect to s is found.
%[F,DFDS] = hardening(SL,MULT,ADD,N)
%SL: sub-loop function output.
```

%MULT: multiplier, cf.  $F = \text{MULT}*[F \text{ normalized}] + \text{ADD}$ . Either a1 or a2.  
 %ADD: additive, cf.  $F = \text{MULT}*[F \text{ normalized}] + \text{ADD}$ . Either +a3 or -a3.  
 %N: 1x2 vector with curvature controlling parameters for the given  
 %direction.

delta = 1e-4;

tt = realsqrt((1-delta)/(1-3\*delta));

t = .5 - tt\*cos((acos((1-2\*sl)/(tt\*(1-delta))) + pi)/3);

f = mult\*((3\*n(1)-2+3\*n(2))\*t^3 + (-6\*n(1)+3-3\*n(2))\*t^2 + 3\*n(1)\*t) + add;

dfds = mult\*(3\*(3\*n(1)-2+3\*n(2))\*t^2 + 2\*(-6\*n(1)+3-3\*n(2))\*t + 3\*n(1))/...  
 (-3\*(2-6\*delta)\*t^2 + 2\*(3-9\*delta)\*t + 3\*delta);

end

function sl = invhardening(f,n)

%Inverse cubic Bezier hardening function. Determine s from f.

%SL = invhardening(F,N)

%F: normalized hardening function value. [0,1].

%N: 1x2 vector with curvature controlling parameters for the given  
 %direction.

%SL: output value to inverse sub-loop function.

if f >= 1

sl = 1;

elseif f <= 0

sl = 0;

else

delta = 1e-4; %numerically aiding parameter

a = 3\*(n(1)+n(2))-2;

b = 3\*(1-2\*n(1)-n(2));

c = 3\*n(1);

d = -f;

if a ~= 0 %third order polynomial

p1 = (3\*a\*c-b^2)/(3\*a^2);

p2 = (2\*b^3-9\*a\*b\*c+27\*a^2\*d)/(27\*a^3);

if p1 > 0

```

    t = -2*realsqrt(p1/3)*sinh(asinh(3*p2/(2*p1)*realsqrt(3/p1))/3) - b/(3*a);
elseif 4*p1^3+27*p2^2 <= 0
    i = -1;
    t = Inf;
    while t > 1 || t < 0
        i = i + 1;
        t = 2*realsqrt(-p1/3)*cos(acos(3*p2/(2*p1)*realsqrt(-3/p1))/3 - 2/3*i*pi) -
b/(3*a);
    end
else
    t = -2*sign(p2)*realsqrt(-p1/3)*cosh(acosh(-3*abs(p2)/(2*p1)*realsqrt(-
3/p1))/3) - b/(3*a);
end
elseif b ~= 0 %second order polynomial
    t = (-c + realsqrt(c^2-4*b*d))/(2*b);
else %first order polynomial
    t = -d/c;
end
sl = -(2-6*delta)*t^3 + (3-9*delta)*t^2 + 3*delta*t;
end
end

```

```

function [sl,dslDXI] = subloop(xi,xi00,p,di)
%Quadratic Bezier subloop function. Determine s from xi and xi00. Also the
%derivative of s with respect to xi is found.
%[S,DSDXI] = subloop(XI,XI00,P,DI)
%XI: Martensitic volume fraction. [0,1].
%XI00: Turning point variable. [0,1].
%P: Curvature controlling parameter. (-1,1).
%DI: Direction of transformation. -1 or 1.
%SL: Sub-loop output
%DSLDXI: Derivative of SL with respect to XI.

```

```

a = p*(1-2*xi00);
b = 1-a;
if di > 0 %forward transformation
    c = p*(1-xi00);
    d = (1-p)*(1-xi00);
    e = xi00;
else %di == -1, reverse transformation

```

```

c = -p*xi00;
d = (1+p)*xi00;
e = 0;
end

if c ~= 0 %second order polynomial
    t = (-d+realsqrt(d^2-4*c*(e-xi)))/(2*c);
else %first order polynomial
    t = (xi-e)/d;
end

sl = a*t^2 + b*t;
dsldxi = (2*a*t + b)/(2*c*t + d);

end

function xi00 = invsubloop(xi,sl,p,di)
%Inverse Quadratic Bezier sub-loop function. Determine xi00 from xi and s.
%XI00 = invsubloop(XI,SL,P,DI)
%XI: Value of xi at current step. [0,1].
%SL: Value of sub-loop function at current step. [0,1].
%P: Curvature controlling parameter. (-1,1).
%DI: Direction of transformation. -1 or 1.
%XI00: Turning point variable.

if di > 0 %forward transformation
    if sl <= 0
        xi00 = xi;
    elseif sl >= 1
        xi00 = 1;
    elseif sl >= xi
        xi00 = 0;
    elseif p ~= 0 %third order polynomial
        c = p*(1+sl-2*xi)-1;
        p1 = 1/3 - c/p^2;
        p2 = (c+3*sl)/(3*p^2) - 2/27;
        p3 = realsqrt(p1/3);

        t = 1/3 + 2*p3*cos((acos(3*p2/(2*p3*p1)) + pi)/3);
        xi00 = (xi-sl)/((1-p*t)*(1-t));
    end
end

```

```

else %k = 0, first order polynomial
    xi00 = (xi-sl)/(1-sl);
end
else %di == -1, reverse transformation
    if sl >= 1
        xi00 = xi;
    elseif sl <= 0
        xi00 = 0;
    elseif sl <= xi
        xi00 = 1;
    elseif p ~= 0 %third order polynomial
        c = 2*p*xi-p*sl-1;
        p1 = 1/3 - c/p^2;
        p2 = (c-3*sl+3)/(3*p^2) - 2/27;
        p3 = realsqrt(p1/3);

        t = 2/3 - 2*p3*cos((acos(3*p2/(2*p3*p1)) + pi)/3);
        xi00 = 1 + (xi-sl)/(1-(1-t)*(1+p*t));
    else %k = 0, first order polynomial
        xi00 = xi/sl;
    end
end
end
end

```