

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Génie Civil

Spécialité : Risque sismique et vibrations des structures en génie civil

Par : BENKRALED Mohammed Ilyes

Sujet

Optimisation de la loi constitutive des alliages à mémoire de forme : Effet de la variation des vitesses de déformation et du chargement cyclique.

Soutenue publiquement, le 12/11/2022, devant le jury composé de :

M. MEGNOUNIF Abdellatif	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme. BENADLA Zahira	Professeur	Univ. Tlemcen	Directrice de thèse
M. HAMD AOUI Karim	Professeur	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de thèse
M. BOURDIM Sidi Mohammed El-Amine	MCA	Univ. Mostaganem	Examineur 1
M. KAZI TANI Nabil	Professeur	ESSAT	Examineur 2

Résumé

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des matériaux intelligents qui se différencient par leurs propriétés thermomécaniques dans l'atténuation sismique. La superélasticité de ces matériaux donne la capacité de faire dissiper une énergie importante, un recentrage presque total et de larges déformations. Ainsi, les AMF ont une forte sensibilité par rapport au chargement cyclique et la vitesse de déformation. Ces deux paramètres qui se manifestent pendant une excitation sismique.

L'objectif de cette thèse est de construire un modèle constitutif capable de prendre en compte ces deux paramètres. Le modèle proposé est fait à la base des deux modèles (d'Auricchio et de Tanaka). En plus, il prend en considération des variations de trois paramètres à savoir : la déformation résiduelle, les contraintes de transformation et la dissipation d'énergie.

Les résultats obtenus ont montré que la déformation résiduelle a été générée dès la fin du 1^{er} cycle à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2}/s$. En parallèle la contrainte de transformation de fin à la martensite a diminué dès le 1^{er} cycle jusqu'au 50^{ème} cycle. Cette capacité de maîtrise de ces variations dépendantes de la vitesse de chargement et des chargements cycliques a permis l'étranglement de la superélasticité, ainsi la diminution de l'énergie dissipée. Cette dernière va jusqu'à une chute de plus de 90% du 1^{er} cycle au 50^{ème} cycle pour de fortes vitesses de déformation.

En outre, en se basant sur le minimum de cycles fourni par la référence, une simulation numérique de la déformation résiduelle et les contraintes de transformation en fonction des charges de cycles sont proposées afin d'ajouter une capacité au modèle construit d'assurer une large variation de cycles.

Mots clés : Alliage à mémoire de forme, super élasticité, Vitesse de déformation, Charge cyclique, Loi constitutive 1D

Abstract

Shape memory alloys (SMA) are smart materials that differ in their thermomechanical properties in seismic attenuation. The superelasticity of these materials gives the ability to dissipate significant energy, almost total recentring and large deformations. Thus, SMAs have a high sensitivity with respect to cyclic loading and strain rate. These two parameters which appear during a seismic excitation.

The objective of this thesis is to build a constitutive model able to take into account these two parameters. The proposed model is made on the basis of the two models (of Auricchio and Tanaka). In addition, it takes into consideration variations of three parameters namely: residual deformation, transformation stresses and energy dissipation.

The results obtained showed that the residual strain was generated from the end of the 1st cycle at the strain rate of $3.3 \cdot 10^{-2}/s$. In parallel, the end transformation stress at martensite decreased from the 1st cycle to the 50th cycle. This ability to control these variations dependent on the loading speed and cyclic loadings has allowed the narrowing of the superelasticity, thus the reduction of the dissipated energy. The latter goes up to a drop of more than 90% from the 1st cycle to the 50th cycle for high strain rates.

In addition, based on the minimum cycles provided by the reference, a numerical simulation of the residual deformation and the transformation stresses as a function of the cycle loads are proposed in order to add a capacity to the constructed model to ensure a wide variation of cycles.

Keywords: Shape memory alloy, super elasticity, strain rate, cyclic load, 1D constitutive law

ملخص

سبائك ذاكرة الشكل (SMA) هي مواد ذكية تختلف في خصائصها الحرارية الميكانيكية في التوهين الزلزالي. تعطي المرونة الفائقة لهذه المواد القدرة على تبديد طاقة كبيرة ، وإعادة التمرکز بالكامل تقريبًا والتشوهات الكبيرة. وبالتالي، تتمتع SMAs بحساسية عالية فيما يتعلق بالتحميل الدوري ومعدل الإجهاد. هاتان المعلمتان اللتان تظهران أثناء الإثارة الزلزالية.

الهدف من هذه الأطروحة هو بناء نموذج تأسيسي قادر على مراعاة هاتين المعلمتين. تم وضع النموذج المقترح على أساس النموذجين (Tanaka و Auricchio). بالإضافة إلى ذلك، فإنه يأخذ في الاعتبار الاختلافات في ثلاثة معايير وهي: التشوه المتبقي، وضغوط التحول وتبديد الطاقة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن السلالة المتبقية تكونت من نهاية الدورة الأولى بمعدل إجهاد في $10^{-2} / 3,3$ ثانية. مع ذلك، انخفض إجهاد التحول النهائي في مارتينيسيت من الدورة الأولى إلى الدورة الخمسين. هذه القدرة على التحكم في هذه الاختلافات التي تعتمد على سرعة التحميل والتحميلات الدورية سمحت بتصديق المرونة الفائقة، وبالتالي تقليل الطاقة المشتتة. يرتفع هذا الأخير إلى انخفاض بنسبة تزيد عن 90 ٪ من الدورة الأولى إلى الدورة الخمسين لمعدلات الإجهاد العالية.

بالإضافة إلى ذلك، استنادًا إلى الحد الأدنى من الدورات التي يوفرها المرجع، يُقترح محاكاة عددية للتشوه المتبقي وضغوط التحول كدالة لأحمال الدورة من أجل إضافة سعة إلى النموذج المنشأ لضمان تباين واسع في الدورات.

الهدف من هذه الأطروحة هو بناء نموذج تأسيسي قادر على مراعاة تأثيرات معدل الإجهاد والتحميل الدوري. تم إنشاء النموذج المقترح بناءً على نموذجين موصى بهما بشدة في هذا المجال (طراز Auricchio ونموذج Tanaka). تم التحقق من صحة ذلك لاحقًا من خلال مرجع تجريبي أظهر بوضوح أن سلوك هذه المادة يتأثر بهاتين المعلمتين "معدل الإجهاد والأحمال الدورية".

أظهرت هذه التجربة أن معدل الانفعال والتحميل الدوري يؤثران على الإجهاد المتبقي وضغوط التحول وتبديد الطاقة.

لقد كفل النموذج المقترح "النموذج المبني" للتو بالإضافة إلى هذه النماذج الأساسية مراعاة الاختلافات في المعلمات الثلاثة المذكورة سابقًا ، حيث تم إنشاء التشوه المتبقي من 1.47 بعد الدورة الأولى إلى 4.44 بعد الدورة الخمسين في معدل السلالة $10^{-2} / 3,3$ ثانية ، انخفض إجهاد تحويل نهاية مارتينيسيت من 589.63 ميغا باسكال في الدورة الأولى إلى 464.58 ميغا باسكال في الدورة الخمسين ، وهذه القدرة على التحكم في هذه الاختلافات التي تعتمد على سرعة التحميل والتحميل الدوري سمح بالتصديق من المرونة الفائقة ، وبالتالي فإن الانخفاض في الطاقة المشتتة للأخير يستمر حتى انخفاض أكثر من 90 ٪ من الدورة الأولى إلى الدورة الخمسين لمعدلات الإجهاد المرتفعة.

بالإضافة إلى ذلك، تم اقتراح محاكاة عددية للتشوه المتبقي وضغوط التحول وفقًا لأحمال الدورات لغرض إضافة سعة إلى النموذج المصمم لضمان هذه الاختلافات في جميع الدورات الممكنة مع الاستناد إلى الحد الأدنى من النتائج التجريبية المستخدمة.

الكلمات المفتاحية: سبيكة ذاكرة الشكل، المرونة الفائقة، معدل الإجهاد، الحمل الدوري، القانون التأسيسي 1 البعد

Remerciement

Tout d'abord je remercie Allah de m'avoir guidé et m'avoir donné la force et le courage pour réussir ce travail.

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Professeur Zahira BENADLA et Professeur Karim HAMD AOUI, pour leurs grandes aides et leurs soutiens durant tout ce cycle, j'ai pleinement profité de leurs expériences et leurs disponibilités.

Je tiens à remercier le Professeur Abdelatif MEGNOUNIF pour sa présence et son guide apporté pour ce travail, un travail d'équipe qui était accompli avec mes directeurs de thèse m'a bien éclairci le chemin à prendre.

Je remercie vivement les membres de jury, le Professeur MEGNOUNIF Abdellatif qui a accepté de présider ma soutenance ainsi mes deux examinateurs le Docteur BOURDIM Sidi Mohammed El-Amine et le Docteur KAZI TANI Nabil qui ont accepté d'examiner cette thèse. Je veux remercier également tous les membres de notre laboratoire de recherche RISAM, spécialement son directeur le Professeur MATALLAH Mohammed.

Je remercie aussi le Professeur BOUMCHERA Nadir pour ses interventions et ses conseils apportés dans le cadre de ce travail.

Tous mes remerciements vont à mes enseignants de l'université d'ABOU BEKR BELKAID, exactement aux enseignants du département de génie civil, dont lequel j'ai eu l'honneur d'avoir tous mes diplômes universitaires.

Un grand remerciement au feu le Professeur Mustapha DJAFOUR, que dieu l'accueille dans son vaste paradis, un homme qui a fait nourrir l'amour de cette spécialité dans nos cœurs, son apprentissage et ses conseils resteront gravés éternellement, il compte parmi les causes majeures de mon obtention du concours de doctorat.

Je remercie pleinement tous mes enseignants durant le cycle éducatif ou universitaire, je leur dois tout le respect pour leurs efforts et leurs majestueux apprentissages. Un grand merci est adressé spécialement à mes enseignants, M. MEBREK, Mme Khadija MERAD et Mlle Djamila MERAD, ces enseignants dont j'ai profité de leur éducation jusqu'à ce jour.

À la fin je remercie mes parents que je leur dois tout le respect du monde. A ma femme qui m'a toujours soutenu dans ce travail, à mon enfant, et mes sœurs. Je remercie vivement ma petite, grande et belle famille en général, mes amis, et tous les gens qui m'ont aidé de près ou de loin pour réussir ce travail.

TABLE DES MATIERES

Table des matières.....	VI
Liste des Symboles	IX
Liste des tableaux	XI
Liste des figures	XII
Introduction générale.....	1
1 Chapitre (1) : État de l'art	4
1.1 Introduction	4
1.2 Les alliages à mémoire de forme.....	4
1.3 Transformations martensitiques	6
1.4 Propriétés thermomécaniques.....	8
1.4.1 Effet de mémoire simple sens	8
1.4.2 Effet de mémoire double sens.....	9
1.4.3 Effet amortissant	9
1.5 Utilisation des alliages à mémoires de forme dans l'atténuation sismique	12
1.5.1 Utilisation des AMF dans le contrôle passif	12
1.5.2 Utilisation des AMF dans le contrôle intelligent.....	15
2 Chapitre (2) : Les modèles constitutifs des alliages à mémoire de forme	27
2.1 Introduction	27
2.1.1 Effet superélastique.....	9
2.2 Modèle de Brinson	31
2.2.1 Conversion à la martensite.....	33
2.2.2 Conversion à l'austénite	34
2.3 Modèle de Chung et al	34
2.4 Modèle de Paulo Silva Lobo.....	37
2.5 Comportement des AMF à la variation des vitesses de déformation et charges cycliques à l'effet superélastique.....	39

2.5.1	Objectif de l'étude de Qianhua Kan et al [47]	40
2.5.2	Relation contrainte déformation à la variation de la vitesse de déformation et les charges cycliques	43
2.6	Conclusion	47
3	Chapitre (3) : Introduction de l'effet de la vitesse de déformation et les charges cycliques sur les lois constitutives.....	48
3.1	Introduction	48
3.2	Adaptation des contraintes de transformations.....	49
3.3	Introduction de la vitesse de déformation	51
3.4	Modèle numérique de la simulation de la déformation résiduelle et les contraintes de transformations en fonction du nombre de cycles	56
3.5	Fonction exponentielle	58
3.5.1	Modèle numérique de la déformation résiduelle	62
3.5.2	Modèle numérique des contraintes de transformation	65
3.6	Conclusion	68
4	Modèle construit « Algorithme Résultats Discussion ».....	69
4.1	Introduction	69
4.2	Synthèse du modèle construit	69
4.2.1	La loi constitutive.....	70
4.2.2	La déformation résiduelle	70
4.2.3	L'évolution de la fraction de la martensite à la base du modèle de Brinson	70
4.2.4	L'évolution de la fraction de la martensite à la base du modèle d'Auricchio.....	71
4.2.5	L'évolution de la déformation résiduelle.....	71
4.2.6	L'évolution de la contrainte de transformation	72
4.3	Algorithme	72
4.3.1	Modèle d'Auricchio	73
4.3.2	Modèle Brinson	76
4.3.3	Modèle construit.....	81
4.4	Résultat et discussions.....	85
4.5	conclusion	100

5	Conclusion générale.....	102
6	Références bibliographiques	104

LISTE DES SYMBOLES

- A_s : Température de fin à l'austénite
- A_f : Température de fin à l'austénite
- M_s : Température de début à la martensite
- M_f : Température de fin à la martensite
- L'indice $_0$: représente état initial
- L'indice A : représente l'état austénite
- L'indice M : représente l'état martensite
- L'indice s : représente la contrainte
- L'indice T : représente la température
- L'indice N : Nombre de cycles
- L'indice m : Cycle définie du cycle N
- E : Module d'élasticité
- E_A : Module d'élasticité à l'état austénite
- E_M : Module d'élasticité à l'état martensite
- ϵ : Déformation
- σ : Contrainte
- Ω : Coefficient de transformation de phase
- ξ : Volume de la martensite
- ξ_S : Volume de la martensite due à la contrainte
- ξ_T : Volume de la martensite due à la température
- θ : Module thermoélastique
- T : Température
- ϵ_L : Déformation inélastique
- σ_s^{CT} : Contrainte critique du début
- σ_f^{CT} : Contrainte critique de fin
- C_A : Coefficients d'influence des contraintes de l'austénite

C_M : Coefficients d'influence des contraintes de la martensite

σ_s^A : Contrainte de transformation du début à l'austénite

σ_f^A : Contrainte de transformation de fin à l'austénite

σ_s^M : Contrainte de transformation du début à la martensite

σ_f^M : Contrainte de transformation de fin à la martensite

ϵ_R : Déformation résiduelle

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Variation du volume de la martensite à des conditions initiales différentes pour le modèle de Brinson et Chung et al [64].....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2 Etat d'application des modèles constitutives	38

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 formation d'une plaquette de martensite [18].....	7
Figure 1-2 Températures de transformation. [3].....	8
Figure 1-3 : effet de mémoire de forme	8
Figure 1-4 Effets de mémoire double sens	9
Figure 1-5 Effet de la superélasticité	10
Figure 1-6 Mesure réelle du frottement interne Q^{-1} en fonction de la température dans un fil en Ni-Ti.[22].....	11
Figure 1-7 Prototype d'un isolateur de base (Dimension en cm).[28].....	14
Figure 1-8 Schéma général d'un dispositif semi activé à la base d'AMF. [39].....	15
Figure 1-9 Schéma de fonctionnement du dispositif de control de déplacement en AMF basé sur le control semi-actif. [39].....	16
Figure 1-10 Modèle d'éléments finis d'un amortisseur à 5 barres[42]	17
Figure 1-11 L'optimum du ratio AMF/Acier. [42].....	17
Figure 1-12 Modélisation du dispositif SCHD. [43].....	18
Figure 1-13 Détermination de l'optimum d'incorporation du pourcentage des AMF. [43].....	19
Figure 1-14 Position du dispositif SCHD sur la structure. [43].....	19
Figure 1-15 Dispositif d'amortissement. [44].....	20
Figure 1-16 Cumule de l'énergie dissipé en fonction des cycles pour chaque configuration du dispositif d'amortissement. [44].....	21
Figure 1-17 Recentrage normalisé en fonction des cycles pour chaque configuration du dispositif d'amortissement. [44].....	22
Figure 1-18 Valeur normalisé du recentrage et l'énergie dissipé en fonction du ration AMF/Acier. [44].....	22
Figure 1-19 Composants et assemblage de l'amortisseur hybride.[46].....	23
Figure 2-1 Le profil contrainte température critique, à droite est celui proposé par Tanaka et utilisé par Liang et Rogers et à gauche et celui proposé par Brinson.....	32
Figure 2-2 Illustration des contraintes de transformations, le palais de transformation et l'énergie dissiper.[47].....	40
Figure 2-3 Détermination des températures de transformation sous une contrainte σ_{ul} à l'aide de DSC.[47].....	41
Figure 2-4 dépendance de la courbe contrainte-déformation par rapport à la vitesse de déformation sur des différent cycle : 1 ^{er} cycle, 2 ^{ème} cycle, 5 ^{ème} cycle, 10 ^{ème} cycle, 20 ^{ème} cycle et 50 ^{ème} cycle.[47].....	42
Figure 2-5 Evolution de la courbe contrainte de transformation par rapport au nombre de cycles.[47]	43

Figure 2-6 Evolution de la courbe de changement en contrainte de transformation par rapport au nombre de cycles. [47]	44
Figure 2-7 Evolution de la déformation résiduelle en fonction de nombre de cycle.[47]	45
Figure 2-8 Evolution de la déformation résiduelle en fonction la vitesse de déformation.[47]	45
Figure 2-9 Evolution de la dissipation d'énergie en fonction de nombre de cycle.[47].....	46
Figure 2-10 Evolution de la dissipation d'énergie en fonction de la vitesse de déformation.[47]	46
Figure 3-1 Profil Contrainte-Température critique. [40].....	50
Figure 3-2 Comparatif entre le modèle non construit, modèle construit et l'expérimentale de la courbe contrainte -déformation pour cycle 1 à droite et 2 à gauche	55
Figure 3-3 Déformation résiduelle en fonction des nombres de cycles à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2}$ /s.....	57
Figure 3-4 Contrainte de transformation de début à la martensite en fonction des nombres de cycles.	58
Figure 3-5 Courbes de la loi exponentielle $y = aebx$	59
Figure 3-6 Courbes de la loi exponentielle $y = ae - bx$	59
Figure 3-7 Courbes de la loi exponentielle générale $y = a1 - e - bx$	61
Figure 3-8 Comparaison entre l'expérimentale et le numérique de la courbe déformation résiduelle-nombre de cycle à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2}$ /s.	64
Figure 3-9 Comparaison entre l'expérimentale et le numérique de la courbe contrainte de transformation-nombre de cycle à la vitesse de déformation.	67
Figure 4-1 Comparaison entre le modèle non construit, le modèle et l'expérimental de la courbe contrainte-déformation à la vitesse de déformation $1,1 \cdot 10^{-3}$	87
Figure 4-2 Comparaison entre le modèle non construit, le modèle et l'expérimental de la courbe contrainte-déformation à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2}$	89
Figure 4-3 Comparaison de l'expérimentale et simulation numérique de la relation Déformation résiduelle-nombre de cycles pour $m=2,5$ et 10 à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2}$	90
Figure 4-4 Comparaison de l'expérimentale et simulation numérique de la relation Déformation résiduelle-nombre de cycles pour $m=2,5$ et 10 à la vitesse de déformation $1,1 \cdot 10^{-2}$	91
Figure 4-5 Comparaison de l'expérimentale et simulation numérique de la relation Déformation résiduelle-nombre de cycles pour $m=2,5$ et 10 à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-3}$	91
Figure 4-6 Comparaison de l'expérimentale et simulation numérique de la relation Déformation résiduelle-nombre de cycles pour $m=2,5$ et 10 à la vitesse de déformation $1,1 \cdot 10^{-3}$	92

Figure 4-7 Comparatif entre l'expérimentale de KAN et la simulation numérique pour $m=2,5$ et 10 de la relation Contrainte de transformation-nombre de cycle « cas début à la martensite ».	93
Figure 4-8 Comparatif entre l'expérimentale de KAN et la simulation numérique pour $m=2,5$ et 10 de la relation Contrainte de transformation-nombre de cycle « cas fin à la martensite ».	93
Figure 4-9 Comparatif entre l'expérimentale de KAN et la simulation numérique pour $m=2,5$ et 10 de la relation Contrainte de transformation-nombre de cycle « cas début à l'austénite ».	94
Figure 4-10 Comparatif entre l'expérimentale de KAN et la simulation numérique pour $m=2,5$ et 10 de la relation Contrainte de transformation-nombre de cycle « cas fin à l'austénite ».	94
Figure 4-11 Relation contrainte-déformation du modèle construit à la vitesse $3,3 \cdot 10^{-2}$, avec les valeurs m expérimentale, $m=2$, $m=5$ et $m=10$, sur les cycles 1, 2, 5, 10, 20 et 50.	95
Figure 4-12 Comparaison de la relation contrainte-déformation entre l'expérimentale et le modèle construit « $m=10$ » à la vitesse de déformation $1,0 \cdot 10^{-3}/s$.	96
Figure 4-13 Comparaison de la relation contrainte-déformation entre l'expérimentale et le modèle construit « $m=10$ » à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2}/s$.	98
Figure 4-14 Relation contrainte-déformation du modèle construit, $m=10$, vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2}$, cycle $N=1:25,30,35,40,45,50$.	99

INTRODUCTION GENERALE

L'ingénieur civil a connu une ère révolutionnaire où il y'avait des structures hyper-élancées, des ponts qui ont relié deux points assez éloignés sur des topographies montagneuses ou sur de larges marines, des barrages titanesques, des tunnels kilométriques et même la réhabilitation des constructions anciennes. Toutes ces catégories d'ouvrages ont eu la capacité de s'autoporter et de résister aux différentes menaces extérieures grâce à des conceptions ingénieuses et avec des matériaux innovants.

Ce développement s'est déclenché avec la connaissance minutieuse des comportements des structures, en outre le comportement des matériaux utilisés en particulier. Le béton armé compte parmi les premiers matériaux qui ont fait progresser la conception des ouvrages. À la même époque, la charpente métallique a aussi donné des solutions innovantes par ces sections optimisées et leurs résistances élevées.

La science ne s'était pas arrêtée sur ces deux matériaux, mais aussi à l'utilisation des matériaux intelligents qui ont des capacités particulières et remarquables par rapport aux matériaux conventionnels, ils ont même facilité le développement des contrôles des structures qui s'est étendu du contrôle passif au contrôle actif et enfin au contrôle hybride.

Les alliages à mémoire de forme « AMF » font partie de ces matériaux intelligents, récemment découverts, ils ont des capacités favorables où ils ne dépassent pas les 20 ans de leurs découvertes pour qu'ils soient concrètement utilisés dans l'industrie, principalement dans le domaine de l'aérodynamique.

Ce matériau s'est fait remarquer par ces propriétés thermomécaniques exceptionnelles et innovantes dans l'ingénierie, en particulier en génie civil. Les chercheurs ont montré son efficacité dans l'atténuation des dégâts sismiques sur de multiples ouvrages comme étant un matériau passif dans la structure, et il était aussi montré qu'il est très efficace dans les contrôles intelligents « actif, semi-actif et hybride ».

L'enjeu des AMF se trouve dans leur comportement complexe et instable par rapport à plusieurs sur constance. Ils dépendent de plusieurs paramètres, comme ils manifestent plusieurs effets, tout dépend de l'état métallurgique du matériau, la température extérieure, traitement industriel et les contraintes thermomécaniques appliquées précédemment, et la découverte de son comportement ne cesse toujours pas de se développer. Cette divergence de propriété lui permet d'être utilisé à plusieurs finalités, sauf que le changement vital de son comportement peut faire échapper à l'objectif réellement souhaité. Pour ces causes-là, les

AMF ont présenté toujours une énigme dans leur utilisation malgré les résultats marquants de ces matériaux dans l'ingénierie.

Dans le domaine du parasismique, les AMF montrent une forte efficacité dans les différents contrôles de structures. Dans le contrôle hybride, ils sont utilisés comme étant des barres et aussi des fils dans des dispositifs composés et relativement petit vis-à-vis de la structure elle-même pour avoir un prix de revient réduit vu la cherté du matériau. Ils sont favorables dans ce domaine à cause de leurs capacités de dissiper une énergie importante et de prouver un recentrage très efficace et même complet à la fin d'une excitation sismique, sauf que ces dispositifs cherchent toujours une configuration optimale qui satisfera ces deux finalités ou favoriser proportionnellement l'une par rapport à l'autre. Cet optimum dépend du taux de participation de l'AMF au dispositif, de la géométrie des pièces et aussi des propriétés thermomécaniques de l'AMF puisqu'il est la cause principale de l'obtention de l'énergie dissipée et le recentrage. En outre le dévoilement du comportement expérimental des AMF par rapport aux multiples circonstances et la définition des lois de comportement fait partie des attentions des chercheurs pour permettre une simulation numérique qui tend à la réalité.

Cette thèse est rédigée pour but de rendre les lois de comportement dépendant de deux paramètres primordiaux qui apparaîtront dans une excitation sismique « la vitesse de déformation et le chargement cyclique ». Cette introduction va permettre aux chercheurs et concepteurs de dispositif de simuler plus correctement ce matériau exceptionnellement à la recherche d'une configuration convenable qui acquies la capacité de dissipation et/ou le recentrage.

Dans le premier chapitre, une présentation des transformations mères des AMF est présentée et aussi le mécanisme de ces propriétés thermomécaniques. Une autre section s'est consacrée sur les travaux antérieurs de l'utilisation des AMF dans l'atténuation sismique par des dispositifs, divisée principalement sur les systèmes qui se basent sur le contrôle passif et l'autre sur le contrôle hybride.

Le deuxième chapitre se constitue d'un état de l'art sur les modèles des lois constitutives, plus précisément les modèles destinés pour l'ingénierie mécanique et civile. Trois modèles ont été profondément présentés, ils ont prouvé leurs fiabilités et leurs robustesses à être utilisés dans les logiciels de calcul numérique. Le chapitre s'est suivi par une synthèse d'une étude expérimentale publiée en 2016 par Kan et al, elle a montré clairement le changement de comportement de l'alliage Nickel-Titane « NiTi » par la variation des vitesses de déformation et les chargements cycliques.

Le troisième chapitre est la partie clé de ce travail, il illustre la construction d'un nouveau modèle constitutif à partir de deux modèles les plus recommandés pour qu'ils puissent prendre en compte l'effet de la vitesse de déformation et les chargements cycliques.

Le quatrième chapitre est dédié à une synthèse du modèle construit et l'algorithme qui lui convient. Les résultats numériques ont été montrés pour voir l'efficacité de ce modèle construit par rapport au modèle original puis la discussion des résultats par rapport aux conclusions tirées par l'étude expérimentale.

1 CHAPITRE (1) : ÉTAT DE L'ART

1.1 INTRODUCTION

Les matériaux font partie des enjeux primordiaux dans l'innovation des constructions au fil des temps. La découverte des alliages à mémoire de forme (AMF) ne dépasse pas une centaine d'années, et leur intégration dans le domaine industriel et de l'ingénierie ne s'arrête pas de progresser à cause de leurs propriétés remarquables et particulières par rapport à d'autres matériaux.

Dans ce chapitre, un historique sur la découverte des AMF et leurs phénomènes thermomécaniques seront abordés. Ainsi que leurs utilisations dans le domaine du génie civil.

1.2 LES ALLIAGES A MEMOIRE DE FORME

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des matériaux composés de plusieurs matériaux métallurgiques. Leur nom se dérive à partir de l'une de ces propriétés remarquables, l'effet mémoire de forme (SME). Cette propriété donne la capacité à ce matériau de retrouver sa forme initiale après un simple échauffement. En outre, une deuxième propriété qui rend les AMF si exceptionnels, c'est la superélasticité. Cette propriété tolère une large déformation qui va se dissimuler après le relâchement de la contrainte appliquée. Ces propriétés sont redevables à une transformation réversible classée parmi les transformations displacives appelée transformation martensitique. Cette transformation se fait de la phase austénite « appelée phase mère » à la phase martensite.[1] [2] [3]

La première observation de l'effet mémoire de forme a été faite en 1932 par Change et Read sur un alliage or-cadmium. Après quelques années, une autre observation de cet effet s'est révélée en 1938 sur un alliage cuivre-zinc.[4]

La découverte de l'effet mémoire de forme sur l'alliage Nickel-titanium qui fait la plus large déformation a eu lieu en 1962 par Buehler et Wiley du laboratoire « Naval Ordnance Laboratory » d'où la nomination Nitinol. À partir de cette découverte que la recherche scientifique a commencé de se focaliser sur ce matériau et un début de sa commercialisation. Même si son prix est très élevé et son comportement étant complexe, il

n'a pas été encore bien identifié à cette ère par les chercheurs. En revanche, ses caractéristiques très remarquables lui ont permis d'être industrialisé pour la première fois dans le domaine de l'aéronautique. Plus exactement, sur un manchon pour des conduits hydrauliques sur l'avion F14., tout en profitant de l'effet mémoire de forme.[5]

Les recherches sur la connaissance des comportements, macroscopique et microscopique, des AMF se sont explosées dans les années 80. Après une multitude d'innovations, ils ont été conçus pour être exploités dans plusieurs domaines, tels que les domaines du paramédical, la robotique, capteurs thermique, chirurgical, dentaire. Dans le domaine du génie civil, ils sont utilisés plus spécialement dans la conception des structures intelligentes.

Il existe de multiples variétés des alliages à mémoire de forme. En effet, de multitude d'alliages peuvent subir une transformation martensitique réversible. Parmi ces alliages, les trois principales familles sont les alliages à base de Nickel-Titan (NiTi), les alliages à base de cuivre et les alliages à base de fer.

Même si les effets prouvés par les AMF sont identiques pour les trois familles, reste les propriétés thermomécaniques qui se différencient d'une famille à une autre, et à d'un alliage à un autre. Les alliages à base de NiTi sont les premiers à être découverts et sont les plus performants. Ils ont une capacité de 600 MPa de contrainte mécanique recouvrable et ils peuvent développer de large déformation réversible qui atteint les 8%. Ces alliages présentent une forte résistance à la corrosion et à la fatigue. Le seul inconvénient pour cette famille est son prix très élevé qui la rend limitée dans l'utilisation industrielle.[6] [8] [5]

Les alliages à base de cuivre présentent aussi des caractéristiques mécaniques importantes. Ainsi, ils peuvent développer de large déformation et une bonne conductivité électrique. Leur prix est moins élevé que celui de la famille NiTi. Leur inconvénient reste dans leur faible tenue au vieillissement.[7] [8]

La famille à base de Fer donne des alliages moins chers par rapport aux autres familles, mais leurs caractéristiques sont moins satisfaisantes. Ils ne développent pas de déformation aussi large que les alliages à base de NiTi et les alliages à base de cuivre. Comme ils ont une faible résistance à la corrosion. Ces raisons ne favorisent pas leur utilisation dans plusieurs domaines, tels que le biomédical. En outre, leur utilisation dans le domaine du génie civil commence à donner ses fruits, spécialement comme étant des amortisseurs.[3] [5]

Les alliages à mémoire de forme se différencient dans leur performance thermomécanique ainsi dans leurs capacités d'affronter certaines pathologies, soit environnementales ou autres. Par contre, ils se réunissent à une transformation martensitique, qu'elle est une transformation

réversible, et elle est l'origine de l'effet mémoire simple et double sens, l'effet superélastique ... etc.

1.3 TRANSFORMATIONS MARTENSITIQUES

La transformation martensitique était observée pour la première fois en 1879 par le scientifique allemand Martens au cours de la trempe de l'acier ; cette transformation est produite à partir d'une phase haute température appelée « Austénite » à une phase basse température appelée « Martensite ». Ces termes de la martensite et de l'austénite ont été élargis par la suite sur les AMF.[3][5] Ces matériaux ont été essentiellement marqués par cette transformation réversible, cette dernière est l'agent principal de multiples propriétés.

En 1979, dans un congrès en USA sur la classification des phases displacives, la transformation martensitique s'est clairement expliquée de la façon suivante « *c'est une transformation displacive du premier ordre, virtuellement sans diffusion et caractérisée par une déformation homogène du réseau cristallographique, constitué principalement par un cisaillement et dont la cinétique et la microstructure sont dominées par l'énergie de déformation* ». [1]

Cette transformation est produite sans diffusion, ni une destruction ou reconstruction des liaisons et ni une modification de la composition chimique, mais c'est une transformation displacive à l'état solide. À l'échelle microscopique, c'est un déplacement coopératif des atomes à l'ordre de dixième d'une distance atomique. Les deux structures se séparent par un plan invariant appelé « plan d'habitat ou plan de cisaillement », et le réseau cristallin va subir une déformation homogène selon ce plan et suivant une direction définie. La martensite se constitue par des plaquettes qui ont de multiples orientations possibles Figure 1-1. Ces orientations sont appelées « variantes de la martensite », pour les alliages NiTi et Cu Albe, 24 variantes sont possibles.[10][11][12][13][14]

La transformation martensitique peut être provoquée sans application d'une contrainte extérieure. Elle est appelée transformation auto accommodée ou la martensite jumelée « *twinning martensite* ». Cette transformation est la conséquence de refroidissement d'un monocristal d'austénite. À l'échelle microscopique, les orientations des variantes sont différentes dans l'espace, mais le réseau cristallin est conservé. Durant une variation de température et une contrainte mécanique nulle, les variantes se regroupent d'une façon où la déformation globale est faible, et c'est la raison pour qu'à l'échelle macroscopique rien ne soit observé. [15] [16]

La transformation martensite peut être induite par l'application d'une contrainte, c'est la martensite orientée et appelée aussi la martensite déjumelée « detwinned martensite ». Les variantes vont dans le sens de la contrainte appliquée et à l'échelle macroscopique la déformation est importante.

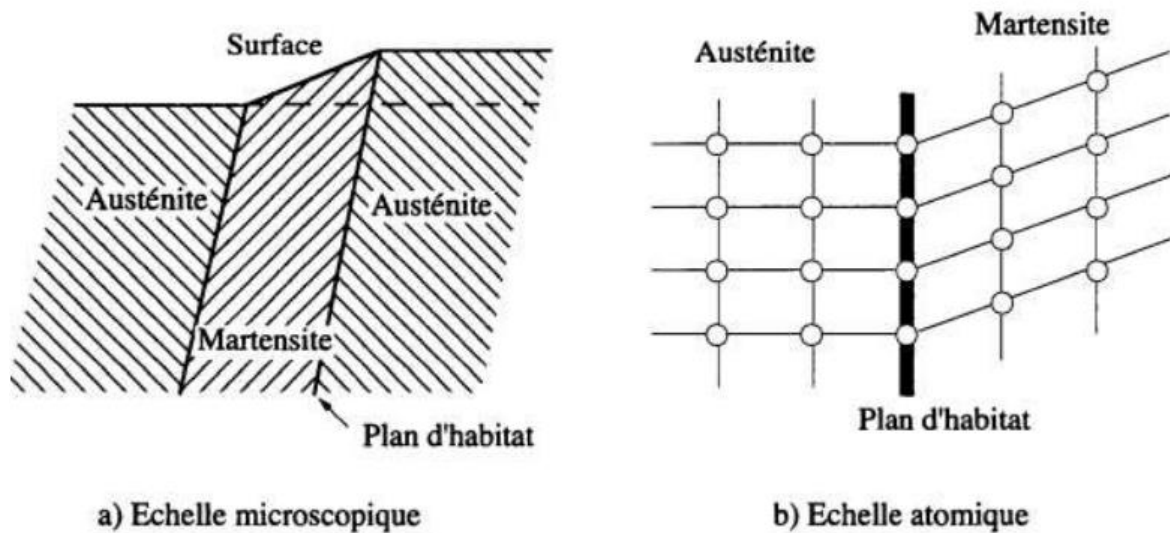


Figure 1-1 formation d'une plaquette de martensite [18].

À l'absence d'une contrainte mécanique, quatre points de température caractérisent le début et la fin de la transformation et transformation inverse M_s , M_f , A_s , et A_f (Figure 1-2). M_s (Martensite start) est la température du début de la transformation à la martensite (To martensite) et cette transformation se termine et devient totalement martensitique à M_f (Martensite fin). La transformation à l'austénite (To austénite) et appelée aussi transformation inverse se débutera par la température A_s (Austenite start) et se termine à A_f (Austenite fin) pour qu'il se retourne à son état mère totalement austénite. Lors d'une transformation d'un état à un état, les deux phases existent.[17]

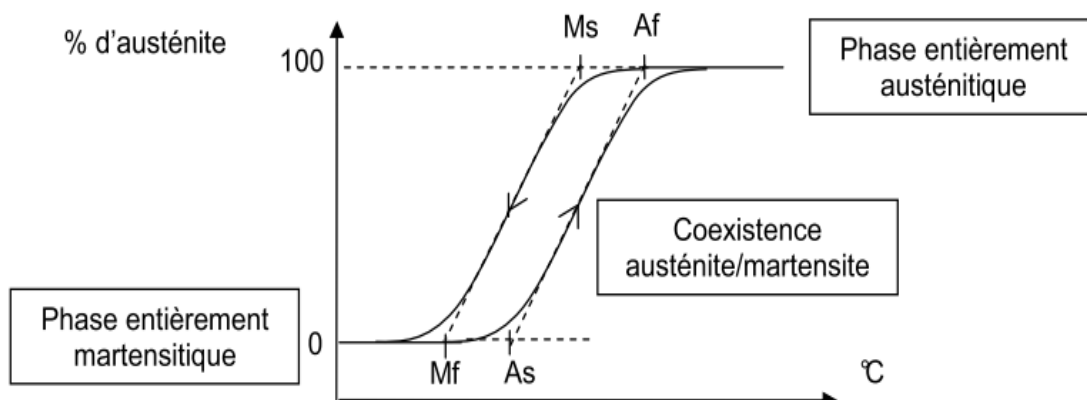


Figure 1-2 Températures de transformation. [3]

Les AMF ont un comportement hystérique caractérisé par une dissipation d'énergie importante durant la transformation et la transformation inverse. L'hystérésis est due au décalage entre les températures de ces deux transformations.[18]

1.4 PROPRIETES THERMOMECHANIQUES

La transformation martensitique est à l'origine de toutes les propriétés thermomécaniques des AMF, elle peut être orientée et provoquée par une contrainte extérieure comme elle peut être auto-accommodée par un refroidissement. À ces transformations l'observation va être sur l'échelle microscopique ou/et à l'échelle macroscopique.

Les propriétés des AMF vont avoir une relation directe avec la phase initiale, la variation de la température et l'application d'une contrainte, et aussi comment et quand ces paramètres vont être procédés.

1.4.1 Effet de mémoire simple sens

Cette propriété est à l'origine de la nomination des AMF parce qu'elle a la capacité de reconnaître sa forme initiale après un simple échauffement. À une phase totalement austénitique « $T \geq A_f$ », une baisse de température à $T \leq M_f$ implique une martensite auto accommodée de l'AMF, aucun changement macroscopique « déformation nulle ».

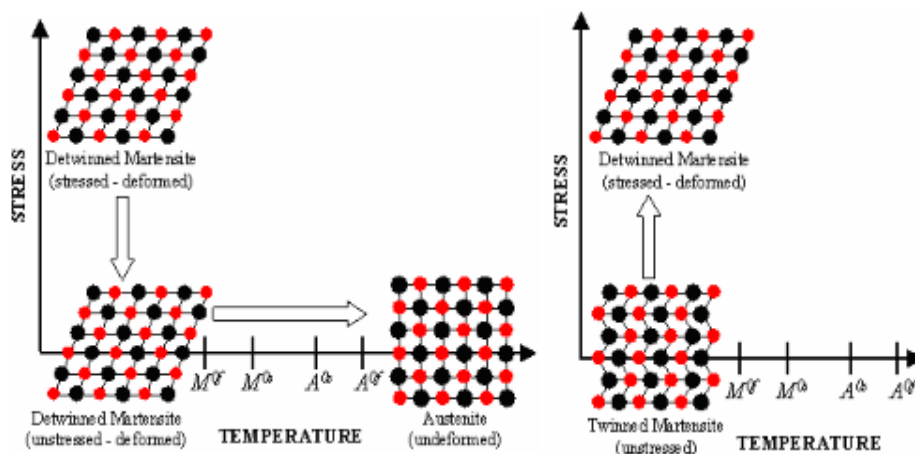


Figure 1-3 : effet de mémoire de forme

Mais à l'échelle microscopique, les déformations des variants se compensent et ils sont équiprobables. Une application d'une contrainte à cet état va provoquer une martensite orientée, les variantes vont vers le sens de la contrainte et une déformation résiduelle importante apparut à l'échelle macroscopique « jusqu'à 8% pour NiTi » après une déformation élastique. Cette déformation résiduelle restera jusqu'à un réchauffement

« $T \geq A_f$ » pour que l'AMF se retourne à son état mère « état austénitique » Figure 1-3.[19]
[3]

1.4.2 Effet de mémoire double sens

Contrairement à l'effet de mémoire simple sens, qui nécessite une contrainte pour faire apparaître une déformation à l'échelle macroscopique, cette propriété donne la possibilité de reconnaître une forme à une basse température et une autre à haute température sans aucune application de contrainte. Cet effet est obtenu après un conditionnement du matériau.[6] Ce conditionnement se résume à un protocole de cycle qui commence par une application d'une contrainte dans le domaine élastique et à $T \geq A_f$ « État austénite », puis un refroidissement jusqu'à $T \leq M_f$ avec le maintien de la contrainte pour qu'il devienne martensitique avec un changement de forme. Après le relâchement de la contrainte, la déformation de basse température est toujours réservée, pour qu'à la suite d'un échauffement à $T \geq A_f$ pour que l'AMF retrouve sa forme initiale (Figure 1-4). Ce procédé est répété à certains nombres de cycles nécessaires jusqu'à ce que l'AMF garde une forme à haute et basse température.[3]

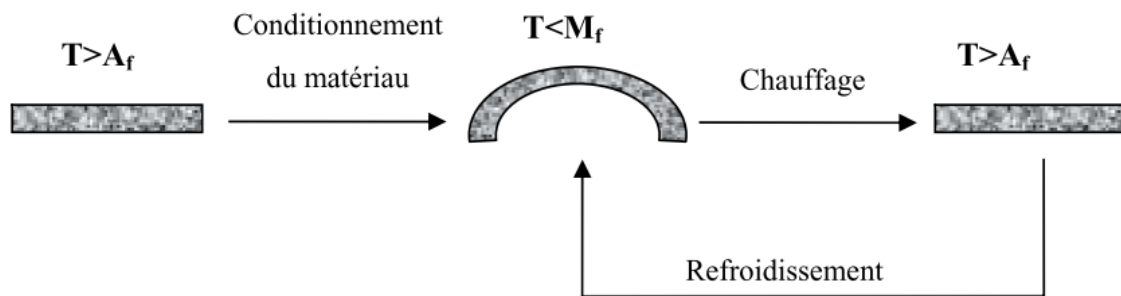


Figure 1-4 Effets de mémoire double sens

1.4.3 Effet superélastique

L'effet superélastique se produit suite à une application de contrainte à l'état austénite $T \geq A_f$ qui va provoquer une martensite orientée, une déformation importante et un comportement hystérique qui donne la possibilité à une dissipation d'énergie remarquable durant cet effet.

La transformation et la transformation inverse sont déclenchées à l'effet superélastique par l'application de la contrainte et son relâchement respectivement.[20] [21]

À un état totalement austénitique, la contrainte appliquée causera une déformation élastique « domaine A-B », (Figure 1-5) le module de Young à cette phase est noté E_a , l'AMF reste toujours austénite jusqu'à ce qu'il atteigne une contrainte critique « contrainte de début de transformation à la martensite ». À partir de cette contrainte, la martensite orientée est entamée « domaine B-C », les deux états coexistent à cette phase et une large déformation

est approuvée jusqu'à ce qu'il devienne totalement martensitique à la prochaine contrainte critique de transformation « contrainte de fin de la transformation à la martensite ». L'AMF reste dans la martensite « domaine C-D » avec un comportement élastique où le module de Young est noté à cette phase E_m .

Au relâchement de la contrainte appliquée, l'AMF reste toujours dans l'état martensite au retour « domaine D-E » et avec le même module de Young E_m jusqu'à une autre contrainte critique inférieure que les contraintes précédentes, elle est notée « contrainte de transformation du début de l'austénite ». Suite à cette dernière, la transformation à l'austénite, appelée aussi la transformation inverse, commencera « domaine E-F ». Le chemin de cette transformation est inférieur au chemin de la transformation directe et la large déformation prise par avant va être récupérée. Ces deux derniers qui sont à l'origine du comportement hystérique. Les deux états coexistent à cette phase jusqu'à ce que l'AMF devienne complètement austénite à partir de la contrainte critique finale « contrainte de transformation de fin de l'austénite ».

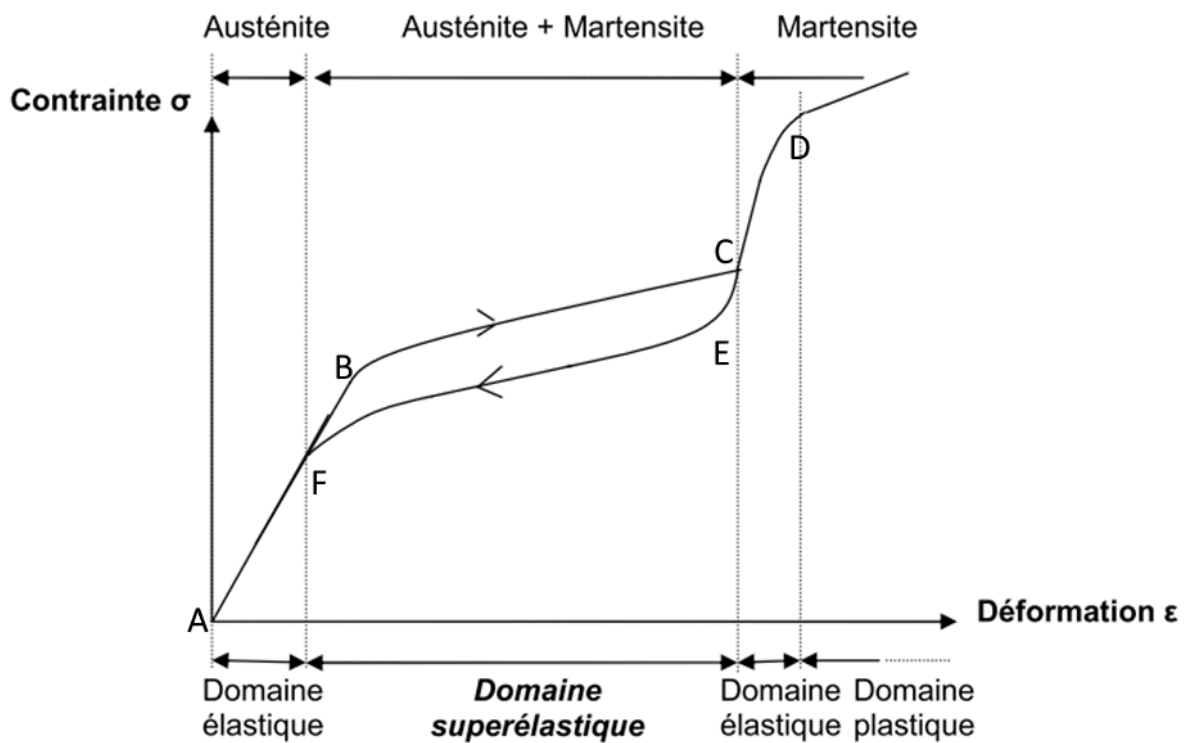


Figure 1-5 Effet de la superélasticité

Le retour à l'état austénite « état mère » « domaine F-A » est la phase finale de l'effet superélastique, le comportement est élastique avec le module de Young E_A et la déformation s'annulera après le relâchement total de la contrainte appliquée.[3]

Les contraintes critiques sont variables en fonction de la température et le module de Young à la phase de transformation et en fonction de fraction de volume de la martensite et les modules de Young E_A et E_M .

1.4.4 Effet amortissant

Le comportement hystérique des AMF leur donne la capacité de dissiper une énergie importante durant une excitation mécanique externe, ce qui engendre un amortissement. Ce phénomène est aussi appelé frottement interne, Q^{-1} , dû à l'utilisation des AMF dans les applications en génie civil.

La formation sous contrainte de multiples plaquettes de martensite cause la création et le mouvement d'interfaces entre l'austénite et la martensite et entre les variants, une dissipation de l'énergie par frottement est causée par cette dernière, ce qui explique un amortissement important durant la phase de transformation et transformation inverse.[22]

La figure suivante (Figure 1-6) représente une mesure réelle du frottement Q^{-1} d'un alliage NiTi.

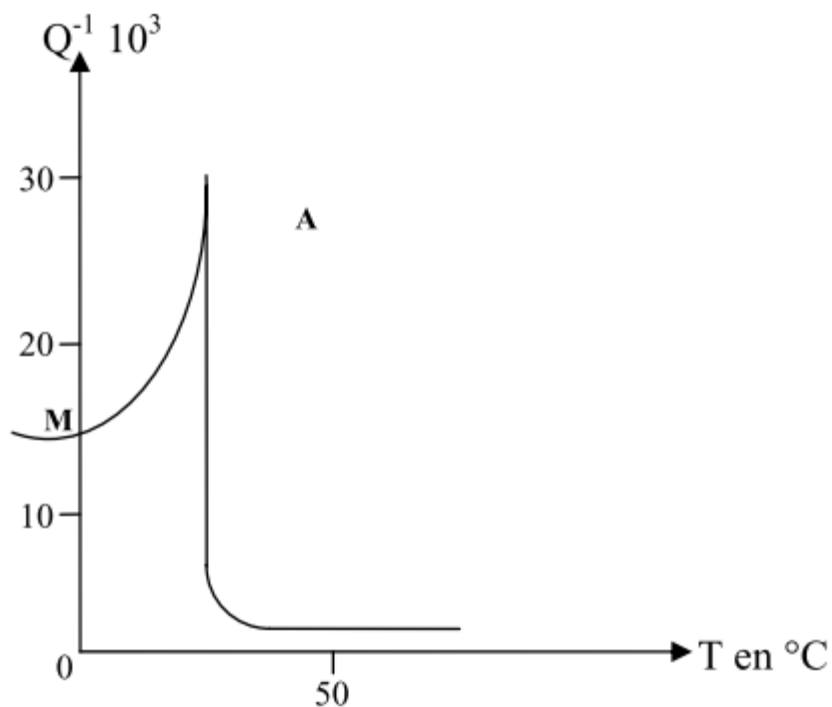


Figure 1-6 Mesure réelle du frottement interne Q^{-1} en fonction de la température dans un fil en Ni-Ti.[22]

1.5 UTILISATION DES ALLIAGES A MEMOIRES DE FORME DANS L'ATTENUATION SISMIQUE

L'intention des chercheurs s'est orientée à l'utilisation des AMF dans l'isolation sismique à la fin des années 80. D'un autre point de vue, les lois de comportements proposées à cette période ont montré que ce matériau a un comportement hystérique qui permet de dissiper une énergie importante durant un chargement cyclique. Cette propriété qui fait inspirer à utiliser les AMF dans ce domaine. D'autres propriétés qui favorisent leur l'utilisation, telle que la superplasticité et la mémoire de forme, où l'AMF peut développer une large déformation et retourner à sa forme initiale, comme il a une forte résistance à la corrosion par rapport à d'autres métaux tels que l'acier ...etc.

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.

1.5.1 Utilisation des AMF dans le contrôle passif

En 1991, Graesser and F.A. Cozzarelli, ont fait une étude expérimentale afin de voir le comportement hystérique et la déformation inélastique des AMF, aussi de montrer la capacité à une dissipation d'énergie importante durant les chargements cycliques sans entamer la phase plastique. Ils ont conclu que ce matériau est utile dans l'amortissement passif et l'ingénierie sismique.[23] En 1995 et 1996, les AMF sont utilisés sous forme de fils pour réduire les déplacements et les accélérations (Sweeney et Hayes [12] et Clark et al. [13]) et ils ont remarqué que cette réduction différée sur plusieurs études. [24] En 1999,

Adachi et Unjoh ont conclu dans une étude à l'échelle réduite que l'efficacité des AMF à l'état martensite est meilleure qu'à l'état austénite.[25]

Les alliages à mémoire de forme ont une polyvalence remarquable. Ils obtiennent une large déformation durant tout leur chargement cyclique. Ils ont une résistance à la fatigue à cycle de déformation élargie, où ils permettent le recentrage des structures et le retour des dispositifs à l'état initial après la fin du séisme. Ils dissipent une énergie importante et interviennent à la réduction de l'accélération et le déplacement maximums. Leur bonne résistance à la corrosion leur donne une excellente durabilité.

En 2000, Mauro Dolce et al ont exploité cette polyvalence et ils ont proposé deux dispositifs à deux familles différentes du contrôle passifs pour qu'ils soient utilisés à l'atténuation sismique dans les bâtiments et les ponts.[26]

La vulnérabilité des tabliers des ponts peut être réduite avec l'utilisation des barres en AMF. En 2002 R. Desroches et M. Delemont ont fait une étude analytique et comparative sur un pont déjà réalisé en trois cas d'étude analytiques. La première variante est l'étude numérique du pont sans dispositif en acier ou en AMF « c'est la variante du pont tel qu'il est construit réellement sur ces lieux », et les deux autres études numériques avec l'ajout d'un dispositif en barres en aciers et la troisième variante avec des barres en AMF, deux excitations sismiques différentes ont été introduit, la première est celui de El Centro 1940 et la deuxième est celui de Kobe Earthquake 1995.[27]

Les résultats ont montré que les dispositifs en AMF ont pu réduire le déplacement de 42% alors que le dispositif en acier n'a donné qu'une réduction de 24% par rapport au déplacement du pont sans dispositif. Cette capacité est due à la superplasticité des AMF et le maintien de la rigidité effective pendant un chargement cyclique. Les dispositifs conventionnels en acier perdent leur efficacité après un certain temps. Ceci à cause de la déformation résiduelle acquise, où la réponse devient comme celle du pont sans dispositif. La capacité des AMF à recouvrir la déformation inélastique donne la possibilité de réduire le déplacement même après plusieurs cycles de charge.

En 2007, un nouveau dispositif des isolateurs de base a été proposé (Figure 1-7). Celui-ci est composé de deux plaques en acier reliées par des barres inclinées en AMF qui servent à la dissipation d'énergie, la limitation des mouvements et le recentrage.[28]

Ce dispositif a été testé expérimentalement, où les résultats ont montré qu'il fournit une rigidité contre une faible intensité, approuvant de très grands déplacements en plus de sa capacité de recentrage et de la dissipation de l'énergie.

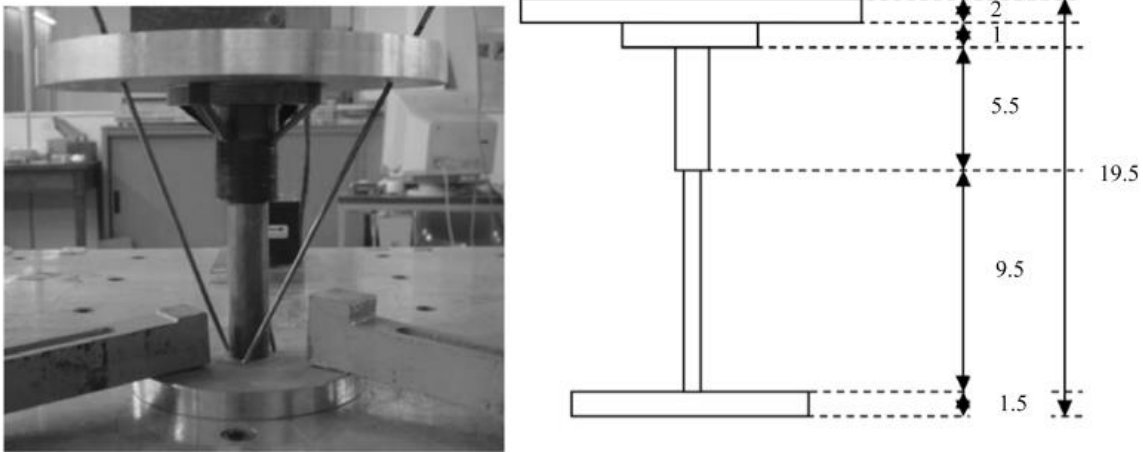


Figure 1-7 Prototype d'un isolateur de base (Dimension en cm).[28]

En 2008, les fils des AMF ont été utilisés dans deux mécanismes pour une approche de contrôle passif des plaques minces et déformables par cisaillement, il était conclu que pour une fréquence fondamentale de la plaque sans tenir compte du fil est proche de la fréquence du mouvement. Le mécanisme qui résiste à la déflexion et agit comme une fondation élastique, est le mécanisme dominant, tandis qu'à une fréquence fondamentale plus élevée que la fréquence du mouvement, proche de la résonance, le mécanisme dominant est le mécanisme qui dissipe de l'énergie avec un comportement d'amortissement hystérique. Ces plaques sont efficaces dans le contrôle passif à la condition de connaître le spectre de réponse.[29]

L'utilisation des fils en AMF dans les monuments historiques a donné des solutions considérables, principalement ceux qui se trouvent dans des zones sismiques ou les monuments qui sont bâtis sur des sols non stables par les changements climatiques et influencés par les effets saisonniers.

K. Hamdaoui et al en 2009 ont fait une étude expérimentale sur un mur avec les mêmes caractéristiques du minaret de Mansourah avec plusieurs configurations de fils en AMF, le signal d'El Centro 1940 a été introduit dans cette étude sur le monument tel qu'il est et avec les fils des AMF. Il a été conclu que la précontrainte doit arriver à la phase superélastique, la dissipation d'énergie entre les blocs des monuments existe et une autre est supplémentaire avec la boucle hystérique de l'AMF, les AMF ont le pouvoir de se recentrer à la fin sans aucun déplacement résiduel.[30] En 2014 et sur le même minaret, une étude numérique est faite avec l'utilisation des AMF à base du cuivre. Les signaux sismiques introduits sont ceux d'Ain Temouchent 1999 et de Boumerdes 2003.[31] Il a été conclu que les fils AMF réduisent l'accélération, le déplacement et la fréquence pour les deux signaux introduits. K. Hamdaoui et Z. Benadla. La même équipe a fait une étude analytique en 2019 sur le minaret de Ajloun.

Cette étude se concentre sur la dissipation de l'énergie avec les dispositifs en AMF. Le minaret a été calibré et validé selon l'étude expérimentale. La modélisation a été faite en utilisant le logiciel de calcul Ansys en introduisant le signal de EI-Centro. L'étude s'est focalisée sur le comportement de trois points sensibles du minaret avec et sans AMF sous plusieurs cas d'études.[32]

1.5.2 Utilisation des AMF dans le contrôle intelligent

Les propriétés remarquables des AMF ne donnent pas une solution que dans le contrôle passif, mais aussi dans le contrôle intelligent des structures. Leurs capacités à modifier la forme de la structure, leurs capacités de recentrage, leurs capacités de stockage une énergie importante et prouver une large déformation font favoriser ce matériau par rapport à d'autres matériaux intelligents. Les scientifiques ont fait des études à l'utilisation des AMF dans le contrôle actif comme des actionneurs, dans le contrôle semi-actif comme des dissipateurs d'énergie et dans le contrôle hybride. Leur utilisation est jumelée avec un pourcentage acier-AMF pour le recentrage des structures et la dissipation d'énergie.[33] [34] [35] [36] [37]

Un système de structure intelligent a été étudié en 2014, composé de plaques tissées en fibres de verre et stratifié avec un actionneur en AMF. Cette étude a un objectif d'augmenter avec précision la déformation de la plaque composée. La position des actionneurs est déduite à partir une modélisation avec la méthode des éléments finis. La non-linéarité des AMF a mené pour une utilisation d'un contrôleur proportionnel-intégral-dérivé (PID) pour contrôler la déformation. Le modèle constitutif utilisé dans cette étude est dérivé de Jayender à partir du modèle de Liang. Ce modèle qui prend en compte le comportement thermomécanique tout en évitant les paramètres difficiles utilise des constantes de matériaux d'ingénierie bien définies. Les résultats ont montré qu'une puissance de 2,5 watts a produit une déflexion de 1,2, une puissance noblement petite et favorisée à l'utilisation des AMF. Le choix du matériau est important pour réaliser un système de contrôle intelligent d'où le choix des chercheurs pour l'utilisation des actionneurs en AMF dans cette étude.[38]

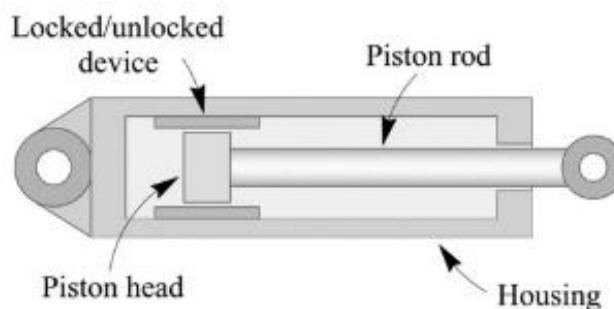


Figure 1-8 Schéma général d'un dispositif semi-actif à la base d'AMF. [39]

La capacité de recentrage des AMF et d'autres propriétés font démarquer ce matériau pour qu'il soit utilisé dans le contrôle semi-actif. Un dispositif d'amortissement avec un système de ce type de contrôle est développé en 2015 pour arriver à des atténuations sismiques remarquables par rapport à d'autres contrôles tout en utilisant les AMF superélastiques (Figure 1-8). Le système est composé principalement de 6 points, et dans chaque point se trouve un support semi-actif avec barre en AMF de type verrouillé – déverrouillé. Ce support a un comportement de frein contrôlé par une action extérieure. Chaque point a un rôle différent des autres pour arriver à un système intelligent, optimisé et bien développé (Figure 1-9). Ces rôles sont bien détaillés dans l'article de [silvalobo2015](#). [39]

L'étude numérique de ce contrôle est effectuée à partir d'un modèle constitutif très utilisé dans le domaine de l'ingénierie, qui est le modèle de Brinson. Ce modèle a été proposé en 1993 et il a été dérivé à partir du modèle de Tanaka 1986. Ces modèles vont être détaillés par la suite. Les tests sont effectués sur une simulation d'un pont qui se comporte à la longitudinale. Les résultats ont montré que les déplacements ont été remarquablement réduits avec une dissipation d'énergie importante sans dommage de la structure et une capacité de recentrage à la fin du séisme. Il a été conclu que le comportement de ce dispositif est meilleur par rapport à d'autres amortisseurs visqueux linéaires. Il a la capacité de recentrer la structure contrairement à ce dernier. [40] [41]

La particularité de ce dispositif est la capacité de retourner à l'état initial après la fin d'excitation et sans dommage causé dans le système, donc l'appareil peut reprendre son travail en cas d'autres séismes. Comme il peut appliquer des efforts de recentrage en cas de déplacement résiduel du fait de l'effet superélastique.

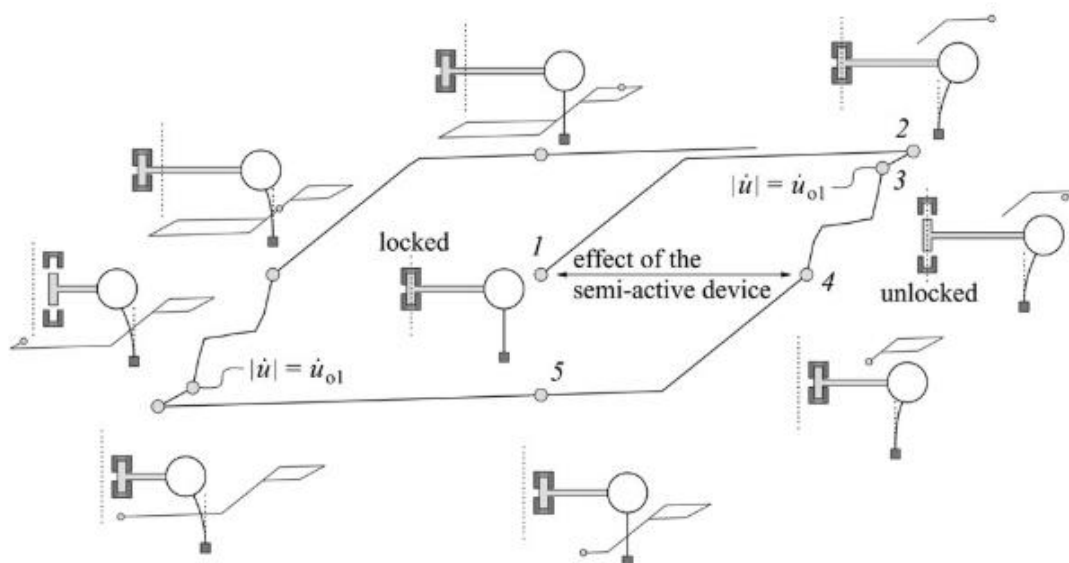


Figure 1-9 Schéma de fonctionnement du dispositif de control de déplacement en AMF basé sur le control semi-actif. [39]

La capacité de recentrage et la dissipation d'énergie restent toujours un sujet à exploiter dans l'atténuation sismique. Les AMF offrent une autre fois cette possibilité dans le contrôle hybride du contrôle des structures.

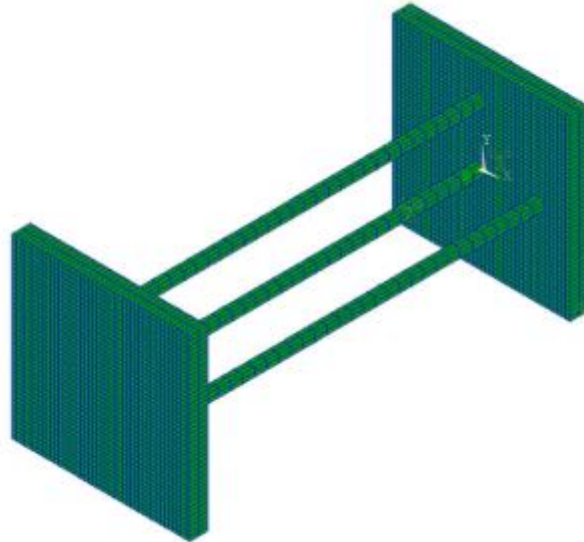


Figure 1-10 Modèle d'éléments finis d'un amortisseur à 5 barres[42]

Un système de ce type de contrôle a été proposé en 2013 par Jalaeefer et al. Ce dispositif est conçu pour avoir la capacité d'atténuer les dommages causés par un séisme. Le dispositif a été modélisé par le logiciel Ansys sous le modèle « SOLID185 » Figure 1-10 Le choix de la proportionnalité AMF-Acier est déduit à partir d'une analyse de divers modèles.[42]

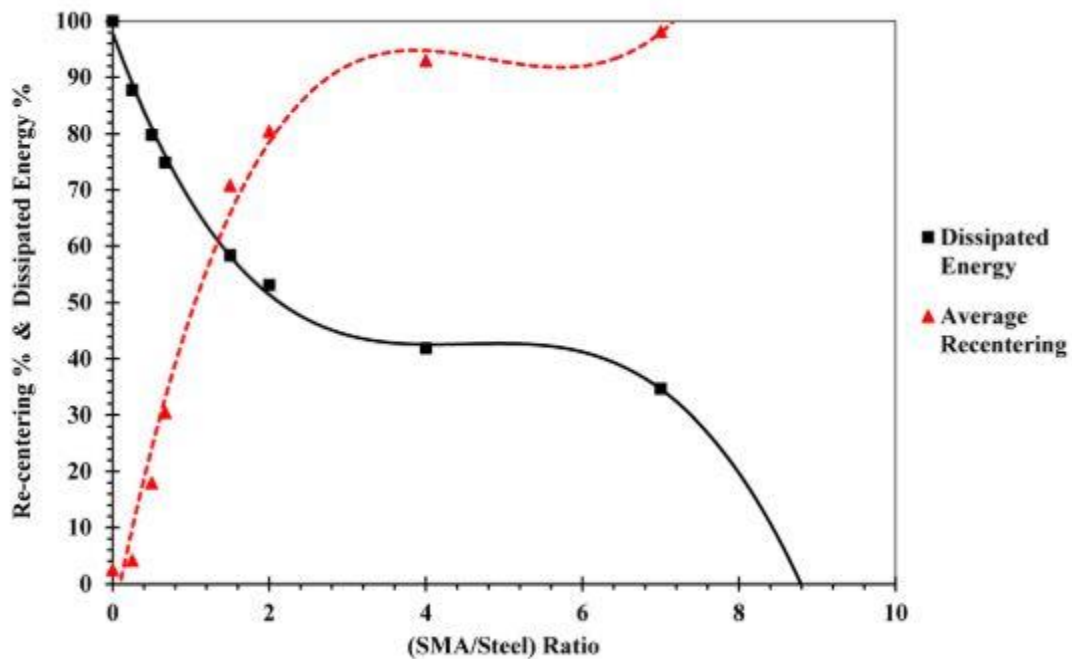


Figure 1-11 L'optimum du ratio AMF/Acier. [42]

Il a été conclu que l'augmentation du rapport AMF / acier diminue la déformation plastique permanente et diminue la quantité d'énergie dissipée. L'optimisation de ces deux dernières se trouve à un rapport AMF / Acier de 1,33 et qui varie légèrement au changement des propriétés du matériau. La Figure 1-11 montre la variation du pourcentage du recentrage et la dissipation d'énergie en fonction du ratio (AMF/Acier), le point d'intersection entre les deux figures représente le ratio optimum de 1,33.

En 2016, une autre innovation a été proposée par Behrouz Asgarian et al, appelée amortisseur hybride à recentrage automatique « self-centering hybrid damper » (SCHD), ce dispositif se compose d'un tuyau en acier et de deux paires de fils identiques en AMF plus deux plaques à l'extrémité qui font l'exercice des conditions aux limites.[43]

La simulation des AMF a été faite par le logiciel ABAQUS à l'aide du programmeur FORTRAN puisqu'il manque dans la librairie des matériaux, la relation contrainte-déformation, donnée par Jalaeefar et Asgarian, la Figure 1-12 montre la modélisation de ce dispositif.

La réponse structurelle souhaitable est fournie à partir de la charge de conception, la hauteur de tuyau, l'inclinaison des fils et le pourcentage d'incorporation des AMF. Une étude paramétrique a déterminé la configuration du SCHD la plus efficace et le pourcentage des AMF optimal pour un équilibre entre la dissipation de l'énergie et le recentrage.

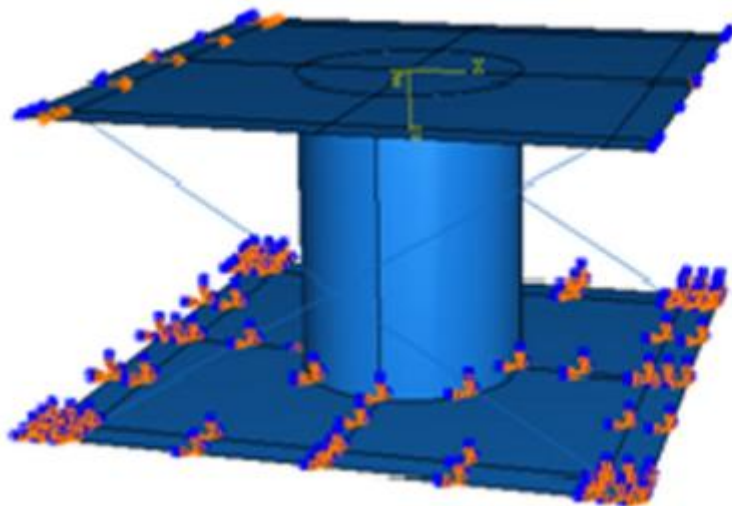


Figure 1-12 Modélisation du dispositif SCHD. [43]

Pour montrer une synthèse significative sur l'importance d'incorporation des AMF dans l'optimisation de l'énergie dissipée et le recentrage, la Figure 1-13 représente la variation de l'énergie dissipée et le recentrage en fonction du pourcentage des AMF pour le dispositif

SCHD, sachant que les autres paramètres n'ont pas varié durant tout cette étude de cas. Le choix du pourcentage d'incorporation a été spécialement étudié parce qu'il est le paramètre le plus sensible dans l'optimisation du dispositif, ainsi qu'il est le paramètre clé qui lui rend plus économique vu l'importance du prix des AMF.

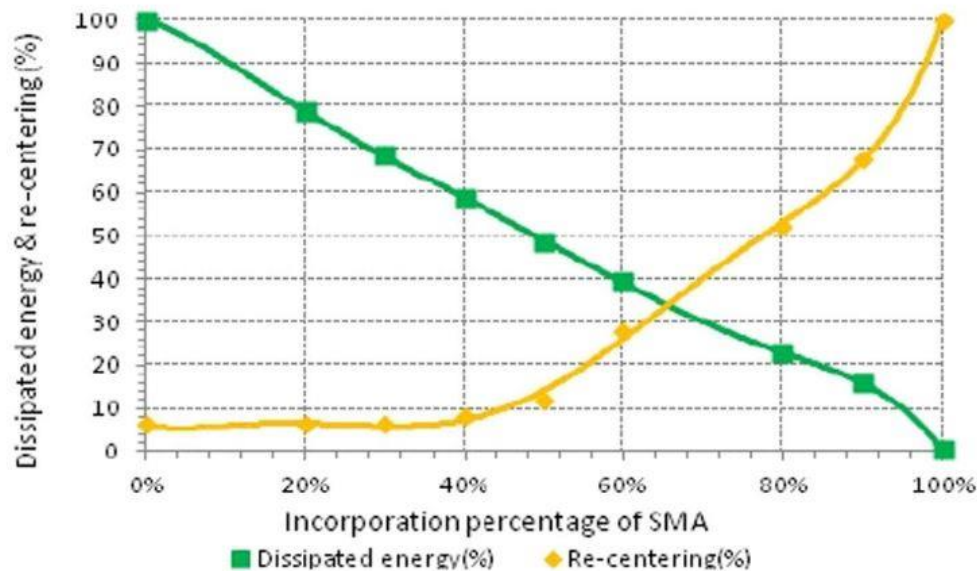


Figure 1-13 Détermination de l'optimum d'incorporation du pourcentage des AMF. [43]

Le dispositif SCHD atteint un recentrage maximum dans le cas où l'incorporation du pourcentage des AMF est élevée, avec l'élimination de cette incorporation, le recentrage devient très faible. Contrairement pour la dissipation d'énergie, elle joint le maximal dans le cas où le pourcentage d'incorporation d'AMF est nul et elle est affaiblie avec son incorporation.

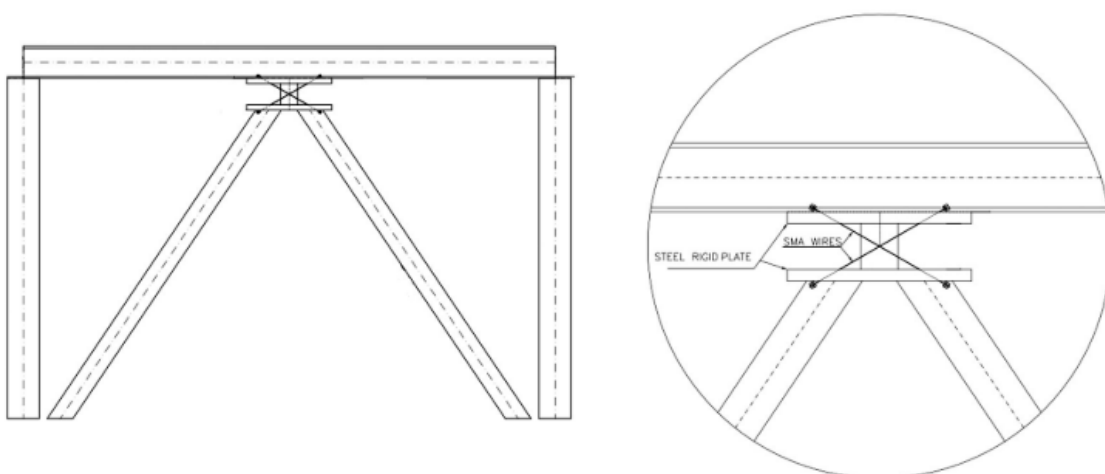


Figure 1-14 Position du dispositif SCHD sur la structure. [43]

Le dispositif a l'aptitude de garder un optimum pour qu'il acquit l'avantage du recentrage et la dissipation d'énergie, cet optimum se trouve exactement à 63% d'incorporation des AMF

où il est habilité à un recentrage et une dissipation d'énergie supérieure à 30%. Cet optimum peut être défini à un autre point puisque le dispositif adapte sa conception selon la performance voulue.

Un taux d'incorporation inférieur à 40% reste couteux, car le dispositif n'aura pas la capacité de réduire les déplacements permanents.

Le dispositif a été modélisé pour une analyse non linéaire sur une structure de 5 étages. La Figure 1-14 montre la position du dispositif avec les contreventements. Il a été conclu qu'il a une dissipation d'énergie importante, une capacité à réduire les déplacements maximaux et une capacité à réduire l'accélération au toit. La définition de la loi de comportement est importante pour tous les contrôles.

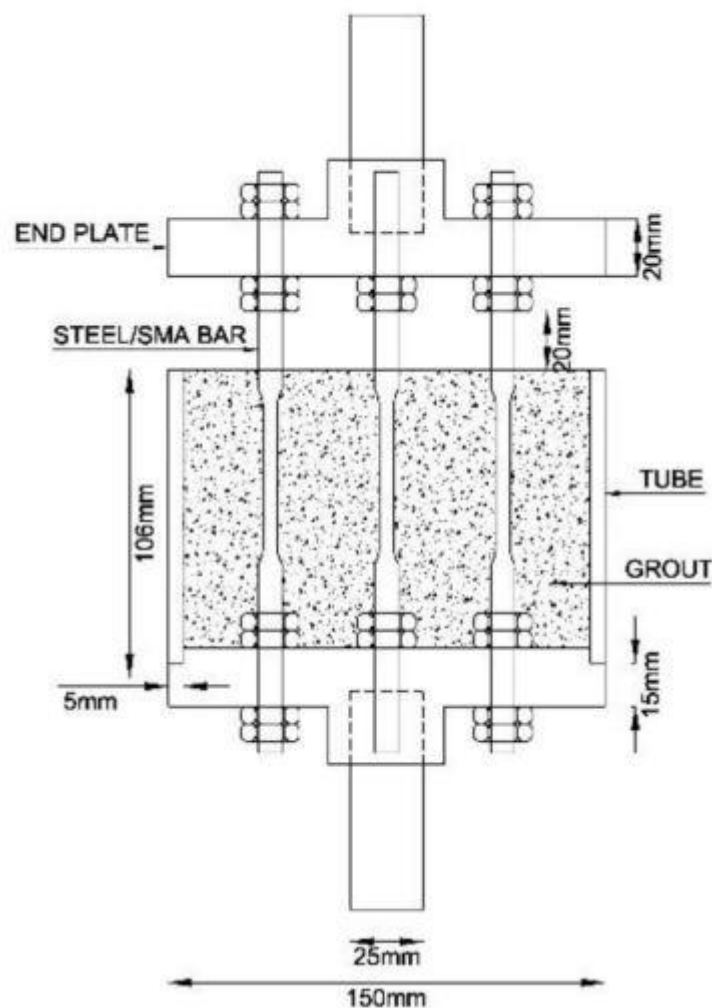


Figure 1-15 Dispositif d'amortissement. [44]

Dans le même contexte de l'innovation des systèmes hybride à la base d'une combinaison AMF-Acier, et l'optimisation du ratio de ce dernier pour réussir le recentrage de la structure et la dissipation d'énergie à la fois, un nouveau dispositif a été innové en 2020 sous forme de

fusible, composé en acier et des barres en AMF « Ni-Ti », la Figure 1-15 est un schéma représentatif de la configuration de ce dispositif d'amortissement.[44]

Ce fusible a été paramétré sur six configurations « S1 à S6 », chaque configuration se diffère de l'autre sur le ratio AMF/Acier qui varie de 0 à 2, les courbes contrainte-déformation ont été effectuées sur le dispositif et puis analysées pour chaque configuration.

L'analyse s'est enroulée sur deux points essentiels, le premier est la dissipation d'énergie qui joue un rôle important dans l'atténuation sismique, cette dernière est la surface comprise entre le palais de chargement et de déchargement sur un cycle complet. Le deuxième point est le recentrage, c'est la caractéristique originaire des AMF, elle donne la possession au dispositif hybride de se recentrer et d'être capable à affronter d'autre séisme subit. Le recentrage ou la déformation récupéré représente la différence entre déformation imposé et la déformation résiduelle.

La Figure 1-16 et la Figure 1-17 représentent respectivement le cumule de l'énergie dissipé et le recentrage normalisé en fonction des cycles de chargement pour les six configurations du dispositif d'amortissement.

Le but principal de ce paramétrage est d'optimiser la capacité de recentrage et l'énergie dissipé. Il a été conclu que le dispositif a une capacité de récupération de déformation et de dissipation d'énergie importante, la capacité de recentrage augmente avec l'augmentation de l'AMF et diminue avec l'augmentation de l'acier, tandis que l'énergie dissipé augmente avec l'augmentation de l'acier et diminue avec l'augmentation de l'AMF.

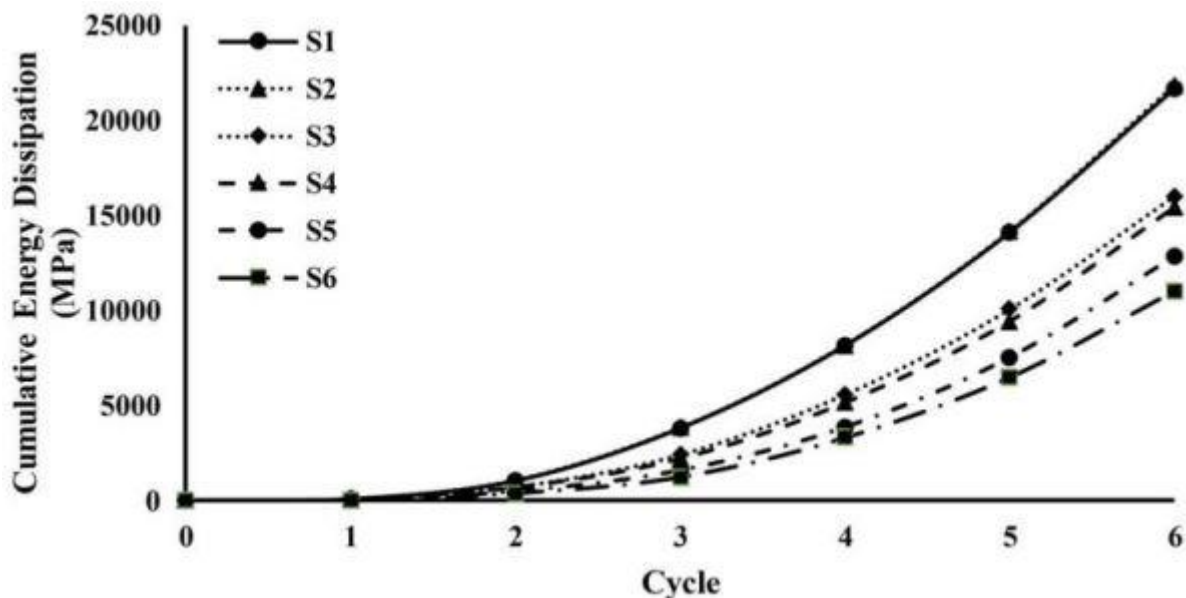


Figure 1-16 Cumule de l'énergie dissipée en fonction des cycles pour chaque configuration du dispositif d'amortissement. [44]

SS

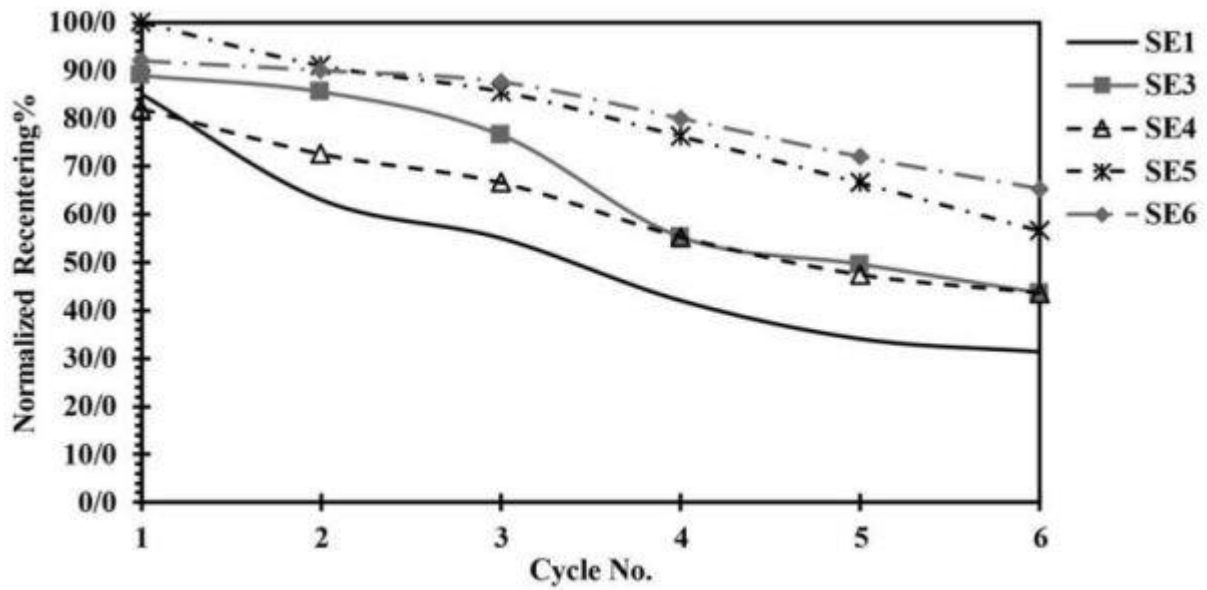


Figure 1-17 Recentrage normalisé en fonction des cycles pour chaque configuration du dispositif d'amortissement. [44]

Afin de déterminer l'optimum du ratio AMF/Acier qui favorise la dissipation d'énergie et le recentrage, la Figure 1-18 représente la valeur normalisée en fonction du ratio de ces deux paramètres.

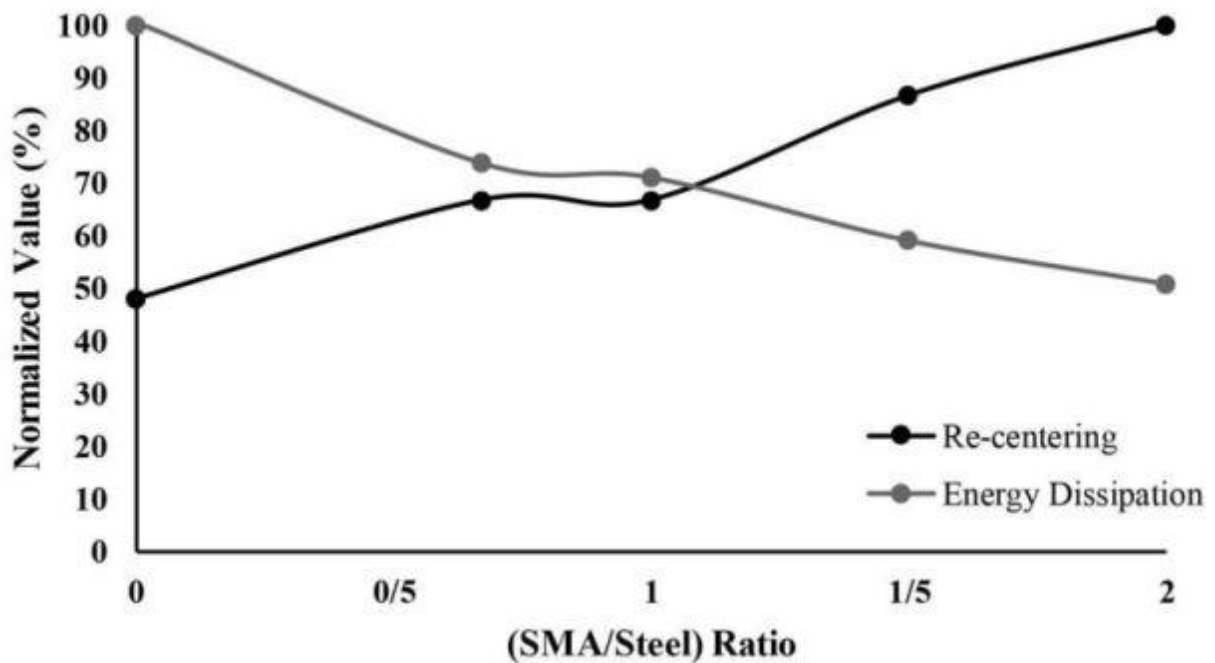


Figure 1-18 Valeur normalisé du recentrage et l'énergie dissipé en fonction du ration AMF/Acier. [44]

L'intervalle du ratio compris entre 1,00 et 1,5 AMF/Acier est l'optimum où le dispositif va avoir une grande capacité à recentrer et dissiper de l'énergie à la fois.

Les systèmes hybride AMF-Acier ont été étendu sur les ouvrages d'art afin de trouver un équilibre entre le recentrage et la dissipation d'énergie, aussi d'atteindre des performances meilleures que la conventionnelle dans l'atténuation sismique. En 2019 une étude numérique comparatif a été publié par Jize Mao et son équipe sur un pont renforcé par les aciers conventionnels, les alliages à mémoire de forme et un renforcement hybride AMF-Acier. Cette étude comparative s'est focalisée principalement sur le comportement durant et après un séisme pour les trois configurations du pont et à d'autres performances. [45]

Il a été conclu que le pont hybride présente une solution meilleure qu'elle va jumeler entre la dissipation d'énergie et le déplacement résiduelle, tandis que le pont en AMF a des faibles déplacements résiduels et de dissipation d'énergie, et le cas opposé se manifeste pour le pont en acier. En ce qui concerne la capacité du pont envers les charges statiques et la résistance au milieu agressif, la configuration hybride a montré des performances plus considérables.

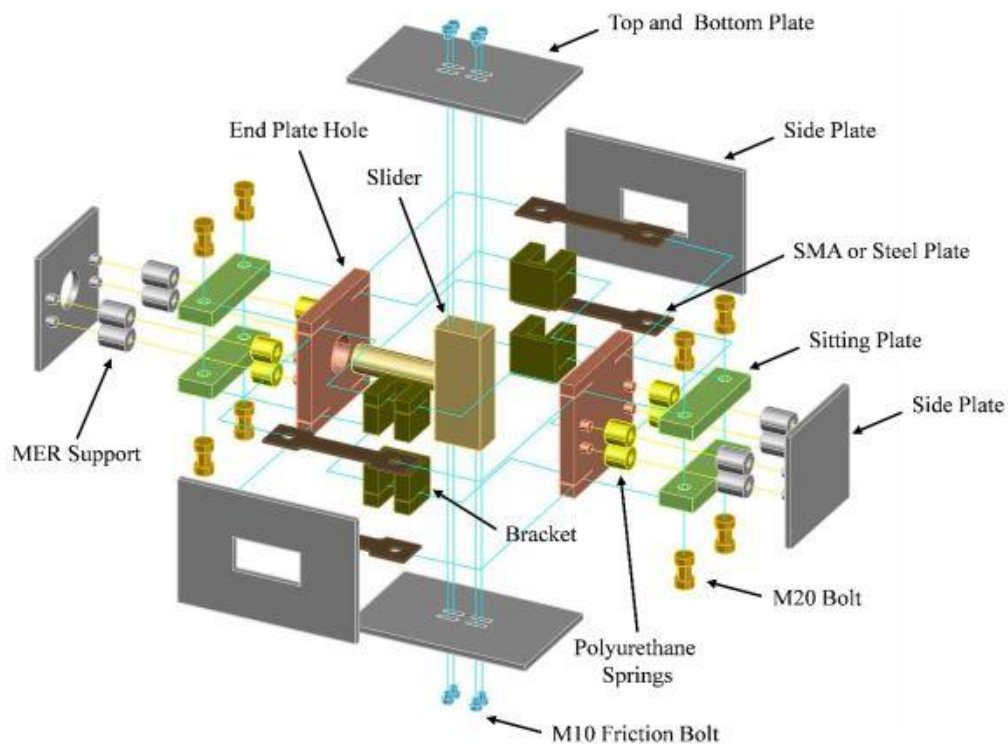


Figure 1-19 Composants et assemblage de l'amortisseur hybride.[46]

En 2020 Nadia M. Mirzai et son équipe proposent un amortisseurs intelligents hybrides peut être utilisé pour les nouvelles structures comme pour but de réhabilitation, exactement pour les cadres à contreventement centrée « Figure 1-19 ». Ils contribuent principalement dans la réduction de déformation résiduelle et la minimisation des dommages causés par les

tremblements de terre. Cet amortisseur est composé de matériau peu couteux exceptionnellement les AMF et il a été étudié à huit cas de configuration pour trouver la composition optimale de ce dispositif.[46]

L'étude paramétrique s'est basée sur un expérimentale de chargement cyclique quasi-statique, les quatre premiers cas ont été conçu par les AMF, les autres quatre cas ont été remplacé par de l'acier afin de comprendre et de montrer l'impact des AMF dans le recentrage. Cette étude a principalement montré que l'amortisseur en AMF a une capacité de recentrage meilleur et une dissipation d'énergie stable par rapport à l'amortisseur en acier, comme il a une contribution active pour qu'il n'y aura pas de flambement local. Tandis que les quatre cas d'amortisseurs en AMF se différent dans leur capacité de recentrage et l'énergie à dissiper, deux configurations ont une capacité de recentrage qui touchent la totalité s'il n'y avait pas les erreurs de l'expérimental. Les deux autres cas n'ont pas cette capacité de recentrage mais elle avoisine les 50%, par contre leur capacité de dissipation d'énergie reste importante.

Les amortisseurs ont aussi pu être donné un impact dans la réduction des déformations résiduelle et la minimisation des dommages causés par les séismes

Ces études présentées ci-dessus récapitulent l'impact des AMF dans l'atténuation sismique sur les différents contrôles « passive, active, semi-active et hybride » et sur les différents types d'ouvrage génie civil. Ils ont une capacité remarquable par rapport à d'autre matériau similaire dans le contrôle passive, exactement dans le recentrage, la dissipation d'énergie, la diminution des déplacements résiduelle dans la structure et dans la réhabilitation des monuments, ils ont aussi des capacités meilleures à la résistance à l'effet extérieurs tel que la corrosion. Les caractéristiques thermomécaniques des AMF leurs favorisent dans le contrôle active à cause leurs puissance conductivité.

Ils ont aussi montré un grand intérêt dans le contrôle hybride, généralement avec de l'acier. Ce type de contrôle qui en cours de progresse a favorisé des systèmes efficaces et économique à la fois, il arrive à réduire des déplacements résiduels importante, énergie dissiper remarquable, des recentrages qui atteint dans certains cas les 95%, comme il donne la capacité au dispositif d'être réutilisé à d'autre excitation tout en gardant efficacité et la capacité à éliminer les dommages dans les ouvrages.

Les dispositifs hybride en AMF et généralement avec de l'acier revendiquent des sensibilités importantes à l'incorporation du pourcentage des AMF ou en d'autres termes le ratio AMF/Acier dans le dispositif, ce dernier va mettre de l'équilibre pour avoir un dispositif optimum qui rassemble tous les avantages désignés (recentrage-dissipation d'énergie) ou né-moins favorisé partiellement ou totalement l'objectif voulu.

Les AMF présentent de plusieurs effets et de nombreuses caractéristiques dans leurs comportements thermomécaniques qui dépend de plusieurs paramètres ; tels que les constantes du matériau, qui sont eux-mêmes variable par rapport à l'état de l'AMF, la température, la contrainte, la vitesse de chargement ou de déformation, le chargement cyclique et l'état initial de l'AMF. Ces derniers offrent des solutions remarquables dans l'atténuation sismique pour tous les contrôles des structures quel que soit passif ou intelligent.

L'atténuation sismique par des dispositifs en alliages à mémoire de forme a un enjeu important sur le recentrage et la dissipation d'énergie, cet enjeu se confirme pour le contrôle passive mais il est aussi sensible pour le contrôle hybride. Sur le point de vue comportement thermomécanique des AMF, cet enjeu se résume à l'acquis de la déformation résiduelle et l'étalement de la courbe contrainte-déformation à cause de l'effet de la vitesse de déformation et les chargements cycliques, ces deux effets qui sont très favorables durant une excitation sismique.

L'objectif de ce travail est de faire intégrer ces deux effets « l'effet de la vitesse de déformation et le chargement cyclique » dans les modèles constitutifs les plus solides et utilisés dans l'ingénierie des structures « spécialement dans les contrôles passif et hybride des structures ». Cela va permettre une définition plus significative de simulation du comportement des AMF dans le domaine parasismique. En outre, une possibilité de faire intégrer cette loi constitutive dans les logiciels de calcul puisque les modèles originels ont été déjà utilisés sur ce sens-là.

La compréhension du comportement des AMF sur tous leurs effets y compris les relations mathématiques va offrir une intégration de la loi constitutive sur les simulateurs numérique facile, maniable, robuste, et plus adjacente au cas réel, comme elle facilite la création des dispositifs en AMF du cas numérique au cas expérimental. Dans le chapitre 2 une synthèse sur les lois constitutives des AMF, aussi leurs comportements à la variation des vitesses de déformation et les chargements cycliques.

Les alliages à mémoire de forme sont des matériaux récents, ils ont montré un comportement complexe mais à la fois innovant et à multitudes effets et d'avantages. Les chercheurs et les scientifiques ont été attiré par ces particularité et ils ont pu innover avec ce matériau à plusieurs domaines (aérodynamique, biomédical, l'ingénierie mécanique, parasismique spécialement et dans le contrôle intelligent des structure). Les AMF ont prouvé leur efficacité dans les différents contrôles de structure et le prouve toujours dans le contrôle hybride, où ils arrivent à une combinaison « recentrage-dissipation d'énergie » remarquable, en outre leurs la connaissance de leurs comportement complexe reste toujours en

développement, et les scientifiques cherchent les paramètres et les effets qui influent sur ce matériau et améliorent les lois constitutives qui vont avec. À la suite, un chapitre va se focaliser sur une synthèse détaillée des modèles constitutifs les plus utilisés et une étude expérimentale qui a traité l'effet de la vitesse de déformation des chargements cycliques sur l'AMF NiTi, pour qu'à la suite deux chapitres vont présenter l'introduction de ces deux derniers effets au modèles constitutifs.

2 CHAPITRE (2) : LES MODELES CONSTITUTIFS DES ALLIAGES A MEMOIRE DE FORME

Les alliages à mémoire de forme sont des matériaux intelligents et complexes récemment découverts qui possèdent de multiples propriétés, et qui ont un comportement sensible vis-à-vis de plusieurs paramètres. Ces derniers ont poussé les chercheurs d'être en quête continue dans le but de déterminer leurs comportements, d'une manière précise et détaillée à travers des études expérimentales. Aussi, ils ont relevé des défis pour simuler ce comportement complexe et définir ses lois constitutives sur toutes ces propriétés et en fonction de tous les paramètres qui les influent.

2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, un aperçu sur l'évolution des lois constitutives recommandées dans l'ingénierie civile

, est présenté. Il est suivi d'une présentation détaillée des modèles utilisés dans notre travail. Aussi, l'effet de la vitesse de déformation et les charges cycliques sur le comportement des AMF est étudié, tout en se focalisant sur l'étude expérimentale de [Qianhua Kan et al 2016](#) « Experimental observations on rate-dependent cyclic deformation of super-elastic NiTi shape memory alloy ».[47]

La modélisation numérique du comportement des AMF a débuté par l'utilisation des lois constitutives destinées pour les matériaux qui ont un comportement hystérique en général. Un modèle de ce genre a été proposé en 1976 par [Ozdemir](#) et son extension a été faite par [Bonc-Wen](#).[48] Cette dernière a été exploitée par [Graesser et all en 1991](#) dans une étude qui recommande les AMF dans l'atténuation sismique. Les premiers modèles unidimensionnels proposés dans la littérature, destinés spécialement aux AMF sont les suivants : (Tanaka et Nagaki 1982, Tanaka 1986, Liang et Rogers 1990).[49] [41] [50]

Le modèle de Tanaka 1986 a visé la simulation du comportement superélastique, la révolution dans ce modèle a été débutée dans la prise en compte de l'effet thermomécanique (contrainte-température), et aussi de proposer un profil contrainte-température critique. Une proposition première dans son genre pour déterminer les points de transformation (austénite-martensite et martensite-austénite) afin d'être utilisés dans les équations cinétiques. Cette innovation a été suivie par la prise en compte du volume de la

fraction de la martensite et de représenter le module d'élasticité en fonction de cette dernière et le module d'élasticité à la martensite et l'austénite. À la fin le modèle de Tanaka vient définir le comportement des AMF en fonction de la contrainte, de la température, de la fraction du volume de la martensite, et du module d'élasticité à l'austénite et la martensite, et la simulation des lois cinétiques ont été représentées avec la fonction exponentielle. Ce modèle a réussi à déclencher l'évolution des lois constitutives et la connaissance approfondie des AMF qui ont un rapport direct avec la température et le volume de la fraction de la martensite. [41]

Le modèle de [Liang et Roger](#) proposé en 1990 est la succession du modèle de Tanaka, ce modèle a utilisé la même loi constitutive contrainte-déformation du modèle de Tanaka. En outre, les équations cinétiques ont été modélisées par la formule cosinus, et la simulation de l'effet de mémoire de forme a été prise en compte et développée dans ce modèle par rapport au précédent.[50] En 1993, le modèle de [Brinson](#) vient améliorer la simulation de l'effet de mémoire de forme et simplifier la loi constitutive.[40] Les particularités dans ce modèle étaient dans la division de la fraction du volume de martensite en deux. La première est la fraction du volume de martensite dû à la contrainte et la deuxième est la fraction du volume de martensite dû à la température. Ainsi, la seconde particularité était dans l'amélioration du profil contrainte de température proposée par Tanaka pour que le nouveau modèle soit robuste dans l'identification de l'état austénite, martensite ou état de transformation et transformation réversible, et aussi de le rendre plus simple et fluide dans le calcul pratique de l'ingénierie. La valeur ajoutée dans ce modèle est de donner la possibilité aux lois constitutives de simuler les alliages sur ces deux effets primordiaux « l'effet superélastique et l'effet de mémoire de forme » et aussi de simplifier et solidifier le modèle de telle sorte qu'il soit utilisé dans les applications qui se basent sur la méthode des éléments finis. En 1994 Ivshin et Pence ont proposé un modèle thermomécanique, la variante principale dans les lois cinétiques de la fraction de la martensite est le volume d'austénite contrairement des autres modèles qui ont utilisé la fraction du volume de la martensite (Ivshin et Pence),[51] ce modèle s'est montré plus fiable à la variation de l'isotherme (Brinson 1996). A cette même année, Boyd et Lagoudas ont proposé un modèle tridimensionnel à la base d'un modèle unidimensionnel qui utilise les lois exponentielles pour la définition du volume de la fraction de martensite.[52] En 1996 [Brinson et al](#) propose un autre modèle qui se dérive des trois premiers modèles précédents, et à partir de ces derniers la loi constitutive a été modifiée avec des développements mathématiques, le modèle a été plus simplifié pour qu'il soit plus utilisable dans l'ingénierie puis il a été comparé avec le modèle de Tanaka, de Liang et Roger, de Lagoudas, de Pence et de Brinson 1993.[53][54]

En 1997 un modèle unidimensionnel proposé par Auricchio pour simuler la superplasticité. Il est basé principalement sur une variante singulière, qui est la fraction de la martensite. Les équations évolutionnaires « appelées aussi les équations cinétiques dans d'autres modèles » ont été proposées en termes de taux de martensite. Cette évolution est considérée comme une évolution linéaire. La particularité de ce modèle était aussi dans l'intégration du temps pour avoir la capacité de proposer un algorithme robuste qui peut être modifié dans le cas de transformation des phases des AMF.[55] À la fin, ce modèle avait la capacité de reproduire des cas expérimentaux pour de différents matériaux et aussi de décrire des réponses historiques charge-décharge sur des cas complexes (avant et après l'achèvement de la transformation à la martensite). La simplicité et la robustesse de ce modèle se définissent dans deux lourdes raisons. La première est de prendre une seule variante singulière et la deuxième raison est l'intégration de la notion du temps dans le modèle pour que l'algorithme corresponde aura la capacité d'être facilement synchronisé dans les simulations numériques transitoires. Ces derniers ont donné la possibilité au simulateur ANSYS « mécanique APDL » d'intégrer les AMF sous le modèle d'Auricchio dans sa bibliothèque pour faciliter à l'utilisateur la simulation thermomécanique de cet intelligent matériau.

En 2006 Chung et al ont cherché à améliorer le modèle de Brinson proposé dix ans plus tôt (en 1996) pour représenter un volume de fraction de martensite correcte sur toutes les situations, quel que soit l'état initial de l'AMF ou sur les différentes phases qui va aborder.[56]

Les solutions apportées par les AMF dans l'ingénierie mécanique et civile ont provoqué les chercheurs à définir des lois de comportement tridimensionnelles afin d'apporter un plus sur la simulation numérique en éléments finis. Ainsi, concevoir la réaction de ce matériau sur des ouvrages d'une grande importance, tels que les monuments historiques et les bâtiments élancés. En 2002, Brocca et al ont proposé un modèle 3D étendu à partir d'un modèle 1D capable d'illustrer l'effet asymétrique « traction – compression » et aussi des transformations non complètes et des chargements historiques complexes.[57] La considération de la transformation martensitique est prise dans tous les plans, comme la transformation provoquée par cisaillement. Les études sur le comportement des AMF face au cisaillement ont été élargies à cette décennie, en 2002 Auricchio et Petrini ont proposé un modèle tridimensionnel qui a décrit les transformations en phase solide induites par les contraintes avec une considération algorithmique 2007 le modèle de Panico et Brinson a augmenté la précision sur ce type de charge.[58] Arghavani et al font décrire un cisaillement pour le cas de l'alliage CuAlZnMn dans un modèle proposé en 2010,[59] la combinaison traction-cisaillement pour la simulation de la réorientation de la martensite a été proposée en 2011

par [Saleeb et al.](#)[60] Ces types de modèles font la possibilité de simuler les AMF avec des chargements non proportionnels et multiaxiaux y compris les efforts de cisaillement.

Le comportement des AMF a une sensibilité envers la vitesse de chargement, exceptionnellement quand l'usage est dans le domaine du paraismique, l'influence de cette sensibilité va se manifester sur les points de transformations, la déformation résiduelle et la relation contrainte-déformation tout entière, comme cette dernière va être plus étroite. En 2007, [Auricchio et al](#) ont fait progresser le modèle proposé d'Auricchio 1997 pour faire intégrer principalement la dépendance à la vitesse de chargement-déchargement, l'évolution des équations de transformation s'est proposée en exponentiel, en puissance et en linéaire.[61] Cette évolution sur le modèle a été menée tout en gardant l'efficacité du modèle origine qui s'intitule sur la variante singulière « fraction de la martensite », les différentes propriétés du matériau entre l'austénite et la martensite et aussi l'intégration du temps évolutionnaire qui facilite la solution algorithmique du modèle. En 2009, un modèle a été proposé par [Vikash K. Jha et al](#) qui a été modifié à partir du modèle de Brinson 1993 pour qu'il prenne en compte l'effet de vitesse de chargement.[62] En 2011 [Y.J. He](#) et [Q.P. Sun](#) proposent un modèle thermomécanique non monotone qui vise la prise en compte de la vitesse de déformation induite par la contrainte avec libération et absorption de la chaleur latente pour le comportement superélastique des barres en AMF, l'étude s'est focalisée sur la phase de transformation et transformation réversible d'où la présence de l'effet superélastique.[63]

En 2015, [Paulo Silva](#) a fait un review qui résume et simplifie le modèle d'Auricchio pour simuler la superplasticité. Comme il a proposé l'évolution du volume de la fraction de la martensite, en exponentiel à partir du modèle de Tanaka. Aussi, en cosinus à partir du modèle de Brinson et linéaire à partir du modèle d'Auricchio. Cette proposition a fait intégrer le temps discret discontinu pour garder l'efficacité du modèle origine.[64]

Le modèle de Brinson développé à partir du modèle de Tanka et le modèle de Liang et Roger est le modèle le plus fortement utilisé dans l'ingénierie. Également, il représente le modèle de base, dont la majorité des modèles évolués et ceux qui visent la simulation tridimensionnelle. Tous ses avantages sont dus à sa robustesse et son fluide exploitation. Ce privilège est aussi partagé avec le modèle d'Auricchio, qui offre la capacité d'intégrer la loi de comportement dans les logiciels de calcul à cause de son intégration du temps discret, qui donne un algorithme robuste et qui utilise une variante singulière.

Dans les sections qui suivent, une synthèse sur le modèle de Brinson, du Brinson amélioré par Chung et al et le modèle d'Auricchio simplifié par Paulo Silva vont être présentés pour

les exploiter. Enfin, l'introduction de l'effet de variation des vitesses de déformation et les charges cycliques sera examinée.

2.2 MODELE DE BRINSON

Ce modèle constitutif unidimensionnel du comportement thermomécanique des alliages à mémoire de forme est proposé en 1996, il a été développé à partir des travaux antérieurs de Liang et Tanaka (K. Tanaka, S. Kobayashi 1986), de Liang et Roger (C.LIANG 1990) et aussi de (BRINSON 1993). Les lois de comportement de ce présent modèle sont formulées pour qu'elles soient utilisées sur d'autres applications et calculs d'ingénierie pratiques.[40]

Les modèles de Liang et al et Tanaka et al ne pouvait pas résoudre l'effet de mémoire de forme des AMF. Cet effet provoqué par la conversion à martensite induite par la contrainte et conversion à martensite induite par la température. Le modèle de Brinson a résolu ce phénomène en devisant la fraction du volume de la martensite ξ en première composante induite par la contrainte ξ_s et la seconde composante induite par la température ξ_T , le volume de la fraction de martensite total devient la somme des deux $\xi = \xi_s + \xi_T$. [64]

La fraction du volume de la martensite, induite par la contrainte représente l'ampleur de la transformation en une seule variante martensitique orientée avec le sens du chargement [64]. A la découverte de nouveaux résultats expérimentaux, l'extension de ce modèle est relative aux contraintes critiques de conversion à la martensite (BRINSON 1993).

Avec des développements et des démonstrations mathématiques, Brinson a simplifié l'évolution de la contrainte proposée par Tanaka pour qu'elle ne soit pas en fonction de la contrainte initiale. [64]

L'équation originale de Tanka est :

$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi)\epsilon - E(\xi_0)\xi_s + \Omega(\xi)\xi_s - \Omega(\xi_0)\xi_{s0} + \theta(T - T_0) \quad 2-1$$

L'équation proposée par Brinson à partir de l'équation originale de Tanaka :

$$\sigma = E(\xi)(\epsilon - \epsilon_L \xi_s) + \theta(T - T_0) \quad 2-2$$

L'indice 0 indique l'état initial, ϵ_L est la déformation résiduelle maximale, Ω est le coefficient de transformation de phase et θ est le module thermoélastique. $E(\xi)$ est le module de Young qui est défini en fonction du volume de la fraction de la martensite. σ , ϵ et T sont respectivement la contrainte, la déformation et la température.

T_0 est la température à laquelle la déformation thermique est définie comme étant nulle si le composant de déformation thermique est négligé puisqu'il est inférieur à la déformation de transformation par ordre de grandeur. [40]

L'évolution de la contrainte devient :

$$\sigma = E(\xi)(\epsilon - \epsilon_L \xi_S) \quad 2-3$$

Le module de Young utilisé dans le modèle de Brinson est la même utilisé dans le modèle de Tanaka et Liang (BRINSON 1993) :

$$E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad 2-4$$

Où E_M est le module d'élasticité à l'état martensite pure et E_A est le module d'élasticité à l'état austénite pure.

En tant que force motrice, l'énergie libre des substances chimiques gouverne la transformation entre l'austénite et la martensite qui est en fonction de la température et la contrainte. [40]

Un modèle cosinus empirique du volume de la fraction de martensite est proposé par (C.LIANG 1990) en fonction de la contrainte et la température, ce modèle contient des variables d'ingénierie mesurable ce que lui permet d'être pratique pour qu'il soit implanté dans les modèles de calcul. [40]

Dans le modèle de Brinson, l'équation du volume de la fraction de la martensite ξ est progressé à partir du modèle de Liang et Rogers 1990. En effet, cette progression se résume à la division de ce volume en deux, volume de la fraction de la martensite dû à la contrainte ξ_s et volume de la fraction de la martensite à la température ξ_T , sachant que la contrainte prend l'ampleur vis-à-vis de la température. La représentation du profil de la contrainte-température critique a été modifiée, où les contraintes critiques à $T < M_s$ sont devenues constantes, σ_s^{cr} et σ_f^{cr} qui représentent la contrainte critique du début et de fin de la transformation à la martensite respectivement. [40].

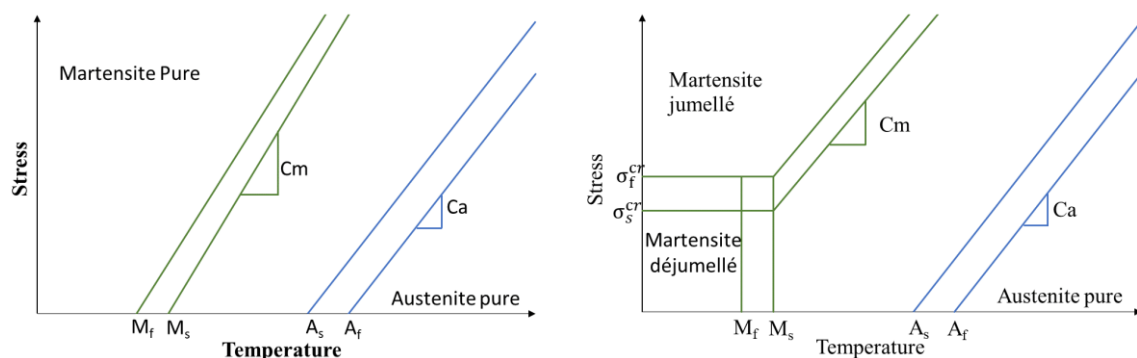


Figure 2-1 Le profil contrainte température critique, à droite est celui proposé par Tanaka et utilisé par Liang et Rogers et à gauche et celui proposé par Brinson. [40]

La Figure 2-1 montre la comparaison entre la représentation du profil contrainte-température critique, proposé par Tanaka et utilisé dans le modèle Liang et Rogers 1990 et le profil contrainte-température critique, proposé par Brinson en 1993.

Les constantes de matériaux C_A et C_M sont les coefficients d'influence des contraintes de l'austénite et la martensite respectivement. Ces deux paramètres sont déduits expérimentalement. La différence entre les deux modèles est que le modèle de Brinson prend en considération la martensite dé-jumelée à $T < A_s$. Autrement dit, l'effet de mémoire de forme sera simulé correctement. En revanche, dans ce cas de modèle de Tanaka, la représentation de l'effet de la mémoire de forme n'est pas tout à fait correcte. [64]

La problématique de la simulation de l'effet de la superélasticité et de la mémoire de forme se résout dans la définition du volume de la fraction de la martensite, cette dernière se divise en deux cas, la première est la définition de l'évolution de la fraction de la martensite dans le cas de la conversion à martensite et la deuxième dans le cas de la conversion à l'austénite

Dans le modèle de Brinson, l'évolution de la fraction de la martensite est la suivante :

2.2.1 Conversion à la martensite

Pour $T > M_s$ et $\sigma_s^\sigma + C_M(T - M_s) < \sigma < \sigma_f^\sigma + C_M(T - M_s)$

$$\xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_s)] \right\} + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \quad 2-5$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) \quad 2-6$$

$$\xi = \xi_s + \xi_T$$

Pour $T < M_s$ et $\sigma_s^\sigma < \sigma < \sigma_f^\sigma$

$$\xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr}] \right] + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \quad 2-7$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) + \Delta_{T\varepsilon} \quad 2-8$$

$$\text{si } M_f < T < M_s \text{ et } T < T_0$$

$$\Delta_{T\varepsilon} = \frac{1-\xi_{T0}}{2} \{ \cos[a_M(T - M_f)] + 1 \}$$

Sinon

$$\Delta_{T\varepsilon} = 0$$

2.2.2 Conversion à l'austénite

Pour $T > A_s$ et $C_A(T - A_f) < \sigma < C_A(T - A_s)$

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \left\{ \cos \left[a_A \left(T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] + 1 \right\} \quad 2-9$$

$$\xi_s = \xi_{s0} - \frac{\xi_{s0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad 2-10$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad 2-11$$

$a_M = \pi / (M_s - M_f)$ et ξ_0 est le volume de la martensite précédente, avec ce paramètre que les petits cycles sont intrinsèquement modélisés.

Le modèle de Brinson a résolu la définition du comportement des AMF à l'effet superélastique et à l'effet de mémoire de forme. Comme il est simplifié et formulé pour qu'il puisse être utilisé dans des applications de calcul d'ingénierie. Ses capacités le rendent un modèle robuste et très utilisé dans le calcul et la modélisation des structures contenant les AMF. Mais à certains cas critiques et spécialement dans le cas de la simulation de l'effet mémoire de forme, les équations qui représentent l'évolution de la fraction de la martensite donnent des résultats inadmissibles, qui se trouvent supérieurs à 1, valeur qui n'est pas logique pour une fraction de volume.[65] Un autre modèle vient par la suite rectifier cette valeur inadmissible, proposé par Chung et al. Dans ce dernier, les équations de la transformation à la martensite, notamment, les régions ($M_f < T < M_s$ et $\sigma_s^{cr} < \sigma < \sigma_f^{cr}$) ont été modifiées.[56]

2.3 MODELE DE CHUNG ET AL

Celui-ci est un modèle unidimensionnel du comportement thermomécanique AMF de Brinson modifié. Les modifications ajoutées par rapport au modèle original ont eu l'objet de décrire la fraction du volume de la martensite correctement dans le cas de basse température $T < M_s$. Le principe est que la transformation de l'austénite en martensite induite par la température, avec une diminution de la température, est couplée à une transformation austénite ou martensite induite par la température en martensite induite par la contrainte, en raison de l'augmentation de la contrainte. [56]

La modification faite par Chung est appropriée sur l'équation $\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) + \Delta_{T\varepsilon}$ du modèle de Brinson comme suit :

Pour $T < M_s$ et $\sigma_s^\sigma < \sigma < \sigma_f^\sigma$

$$\xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr}] \right] + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \quad 2-12$$

$$\xi_T = \Delta_{T\varepsilon} - \frac{\Delta_{T\varepsilon}}{1-\xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) \quad 2-13$$

Si $M_f < T < M_s$ et $T < T_0$

$$\Delta_{T\varepsilon} = \frac{1-\xi_{s0}-\xi_{T0}}{2} \cos[a_M(T - M_f)] + \frac{1-\xi_{s0}+\xi_{T0}}{2}$$

Sinon

$$\Delta_{T\varepsilon} = \xi_{T0}$$

La modification de ces équations permet au modèle de ne pas avoir des résultats inadmissibles, et font de ce modèle plus robuste et fiable, Sayyaadi et al ont montré cette fiabilité avec une étude paramétrique. [64].

Dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, nous présentons une comparaison entre le modèle de Brinson et le modèle modifié par Chun et al pour trois cas de transformation complète à la martensite. Les trois étudiés sont présentés sur trois différents cas, pour le premier cas, la température est fixé à $T = M_s$ et la contrainte varie de σ_s^{cr} à σ_f^{cr} , pour le second cas, la contrainte est fixé à $\sigma = \sigma_s^{cr}$ et la température varie de M_s à M_f et le troisièm et le dernier cas, la température varie de M_s à M_f et la contrainte varie de σ_s^{cr} à σ_f^{cr} .

Pour chaque cas, nous avons 6 configurations pour la variation du volume de la fraction de martensite initiale due à la contrainte et/ou la température.

$$\xi_{s0} = 0 \ \& \ \xi_{T0} = 1 \quad - \quad \xi_{s0} = 0.5 \ \& \ \xi_{T0} = 0.2$$

$$\xi_{s0} = 0.5 \ \& \ \xi_{T0} = 0.5 \quad - \quad \xi_{s0} = 0.2 \ \& \ \xi_{T0} = 0.5$$

$$\xi_{s0} = 1 \ \& \ \xi_{T0} = 0 \quad - \quad \xi_{s0} = 0 \ \& \ \xi_{T0} = 0$$

Le modèle de Brinson a donné sur la majorité des cas de l'effet de mémoire de forme des valeurs inadmissibles. Cependant le modèle modifié par Chung et al a réussi d'avoir des résultats admissibles pour tous les cas étudiés.

Avec le modèle modifié par Chung et al, le modèle de Brinson est devenu plus robuste et plus apte pour simuler le comportement thermodynamique des AMF à l'effet superélastique et aussi à l'effet de mémoire de forme.

Tableau 2-1 Variation du volume de la martensite à des conditions initiales différentes pour le modèle de Brinson et Chung et al [64]

Conditions Initiales	Processus	Modèle Brinson	Modèle Chung et al
$\xi_{s0} = 0$ $\xi_{T0} = 1$	Cas 1	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
	Cas2	$\begin{cases} \xi_s = 0 \\ \xi_T = 1 \end{cases} \xi = 1$	$\begin{cases} \xi_s = 0 \\ \xi_T = 1 \end{cases} \xi = 1$
	Cas3	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
$\xi_{s0} = 0.5$ $\xi_{T0} = 0.2$	Cas 1	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
	Cas2	$\begin{cases} \xi_s = 0.5 \\ \xi_T = 1 \end{cases} \xi = 1.5$	$\begin{cases} \xi_s = 0.5 \\ \xi_T = 0.5 \end{cases} \xi = 1$
	Cas3	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0.8 \end{cases} \xi = 1.8$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
$\xi_{s0} = 0.5$ $\xi_{T0} = 0.5$	Cas 1	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
	Cas2	$\begin{cases} \xi_s = 0.5 \\ \xi_T = 1 \end{cases} \xi = 1.5$	$\begin{cases} \xi_s = 0.5 \\ \xi_T = 0.5 \end{cases} \xi = 1$
	Cas3	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0.5 \end{cases} \xi = 1.5$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
$\xi_{s0} = 0.2$ $\xi_{T0} = 0.5$	Cas 1	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
	Cas2	$\begin{cases} \xi_s = 0.2 \\ \xi_T = 1 \end{cases} \xi = 1.2$	$\begin{cases} \xi_s = 0.2 \\ \xi_T = 0.8 \end{cases} \xi = 1$
	Cas3	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0.5 \end{cases} \xi = 1.5$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
$\xi_{s0} = 1$ $\xi_{T0} = 0$	Cas 1	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
	Cas2	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 1 \end{cases} \xi = 2$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
	Cas3	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 1 \end{cases} \xi = 2$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
$\xi_{s0} = 0$ $\xi_{T0} = 0$	Cas 1	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$
	Cas2	$\begin{cases} \xi_s = 0 \\ \xi_T = 1 \end{cases} \xi = 1$	$\begin{cases} \xi_s = 0 \\ \xi_T = 0.5 \end{cases} \xi = 1$
	Cas3	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 1 \end{cases} \xi = 2$	$\begin{cases} \xi_s = 1 \\ \xi_T = 0 \end{cases} \xi = 1$

2.4 MODELE DE PAULO SILVA LOBO

Une revue bibliographique sur les caractéristiques et les modèles constitutif uni-axial du comportement macroscopique des AMF est présenté dans le travail de P. Silva et al (Silva 2015). A partir de cette revue bibliographique, une simplification et une synthèse sur le comportement superélastique des AMF est proposée à partir de trois modèles les plus utilisés et les plus fréquents dans la littérature. L'intérêt major de ce modèle est l'application numérique basée sur l'utilisation des AMF comme étant des barres et des fils.

La majorité des lois mécaniques uni-axiales peut être dérivée à partir du modèle de Tanaka et al, dans le temps continue la loi mécanique du comportement superélastique est comme suit (Silva 2015):

$$\sigma = E(\xi)(\epsilon - \epsilon_L \xi) + \theta(T - T_0) \quad 2-14$$

Le module d'élasticité dans ce modèle est représenté avec l'équation proposé dans le modèle de Brinson « équation » 2-4

L'évolution de la fraction du volume de la martensite est proposée et simplifiée à partir de trois modèles : le modèle exponentiel qui est adopté par Tanaka et al, le modèle cosinus développé par Liang et Rogers et adapté par Brinson et le modèle de Brinson et enfin, le modèle linéaire adapté par Auricchio et Sacco.

Le modèle cosinus de la transformation et la transformation réversible définie comme suit :

$$\xi = \frac{1-\xi_0}{2} \left\{ \cos \left[a_M \left(T - M_f - \frac{\sigma}{c_M} \right) \right] + \frac{1+\xi_0}{2} \right\} \quad 2-15$$

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \left\{ \cos \left[a_A \left(T - A_s - \frac{\sigma}{c_A} \right) \right] + 1 \right\} \quad 2-16$$

Avec $a_M = \pi/(M_s - M_f)$ et $a_A = \pi/(A_f - A_s)$

Le modèle exponentiel de la transformation et la transformation réversible proposée par Tanaka est redéfini par Koistinen et Mar burger (D. Koistinen 1959) et Wang et Inoue (Wang 1983) est comme suit :

$$\xi = (\xi_0 - 1)e^{[a_M(M_s - T) + b_M \sigma]} + 1 \quad 2-17$$

$$\xi = \xi_0 e^{[a_A(A_s - T) + b_M \sigma]} \quad 2-18$$

Avec $a_M = -2\ln(10)/(M_s - M_f)$, $b_M = a_M(M_s - M_f)/(\Delta\sigma_M)$, $a_A = 2\ln(10)/(A_s - A_f)$ et $b_A = a_A(A_s - A_f)/(\Delta\sigma_A)$

$\Delta\sigma_A$ et $\Delta\sigma_M$ sont la largeur du long de l'axe de la contrainte des bandes de transformation austénite et martensitique, quand $\xi = 0,99$, la transformation sera considérée comme étant terminée.

Le modèle linéaire de la transformation est la transformation réversible adaptée par Auricchio et Sacco est com e suit :

$$\xi = (1 - \xi_0) \frac{\sigma - \sigma_s^M}{\sigma_f^M - \sigma_s^M} + \xi_0 \quad 2-19$$

$$\xi = \xi_0 \frac{\sigma - \sigma_f^A}{\sigma_s^A - \sigma_f^A} \quad 2-20$$

Pour une procédure itérative permettant l'évaluation de la déformation à chaque instant, la méthode de Newton-Raphson peut être choisie. L'équation s'écrit com e suit :

$$\epsilon_n^{j+1} = \epsilon_n^j + \frac{\partial \epsilon(\sigma_n^j)}{\partial \sigma} (\sigma_n^{j+1} - \sigma_n^j) \quad 2-21$$

Le symbole « n » indique l'instant, et « j » le pas d'itération.

Avec l'utilisation de la méthode d'Euler (A. Vitiello, G. Giorleo 2005) (C. Cismas, iu 2008) , et l'introduction des itérations, la loi thermique peut être couplée dans le temps et intégrée dans le temps.

$$T_n^{j+1} = T_{n-1} + \Delta t \left[\frac{b_n}{\rho c_p} - \frac{hA [T_n^j - T_0]}{\rho c_p V} \right] \quad 2-22$$

Dans le tableau suivant, nous allons présenter une comparaison entre les trois modèles présentés précédemment. En termes de fonctionnalité ainsi que leurs utilisations numériques.

Tableau 2-2 Etat d'application des modèles constitutives

Modèle	Superélasticité	Effet mémoire de forme	Subroutines et algorithmes	Intégration dans le temps	Intégration dans des logiciels
Brinson	Applicable	Inadmissible	Existe	/	/
Chung et al.	Applicable	Applicable	/	/	/
Auricchio simplifié (Paulo Silva Lobo)	Applicable	Non applicable	Existe	Applicable	Ansys

Les trois modèles ont la capacité de simuler correctement l'effet superélastique. Cet effet qui va être, par la suite l'objectif de notre travail. L'effet de mémoire de forme peut être simulé avec le modèle de Brinson, mais avec des valeurs inadmissibles. Or, le modèle de Chung et al. est venu pour améliorer le modèle de Brinson afin de le rendre capable de communiquer des valeurs admissibles sur tous les cas de cet effet. Par contre, le modèle d'Auricchio n'a

pas visé l'effet de mémoire de forme et il s'est focalisé sur l'intégration du temps pour rendre le modèle fluide dans les algorithmes.

Les deux modèles mères « Brinson et Auricchio » ont connu une forte utilisation dans les simulations numériques. N'empêche que le modèle de Chung et al. peut avoir un privilège puisqu'il vient améliorer le modèle de Brinson. Le modèle d'Auricchio a eu l'opportunité d'être utilisé dans le logiciel de calcul ANSYS, à cause de sa simplicité et son intégration dans le temps, ce qui donne un algorithme robuste et maniable dans les logiciels de calcul en méthode des éléments finis.

2.5 COMPORTEMENT DES AMF A LA VARIATION DES VITESSES DE DEFORMATION ET CHARGES CYCLIQUES A L'EFFET SUPERELASTIQUE

L'effet superélastique se provoque à une température $T > A_f$ « état austénite » par une contrainte mécanique pour qu'une déformation inélastique importante apparait puis disparaître après le relâchement de cette contrainte, Une hystérésis est présente à cet effet qui fait une dissipation d'énergie importante.

Ce phénomène présente des solutions remarquables dans l'atténuation sismique des structures pour assurer leurs recentrages et faire dissiper de l'énergie, comme il est présenté dans le chapitre1. En parallèle, la majorité des AMF a une température de fin de transformation à l'austénite « A_f » supérieure à la température normale de l'environnement, ce qui facilite la provocation de cet effet. Dans le cas contraire, il y'a des techniques pour assurer cette température dans l'environnement des AMF.

En revanche, cet effet lui-même a un comportement complexe et il dépend de plusieurs paramètres, parmi eux les constantes du matériaux « module élastique à l'austénite et la martensite », les coefficients d'influence de contrainte C_A et C_M , de la martensite, les températures de transformation et les contraintes de transformation, et aussi d'autre paramètres comme le volume de la fraction de la martensite, la température et la contrainte. Ces derniers sont pris en compte dans la majorité des modèles constitutifs qui représentent l'effet superélastique, tels que le modèle de Brinson et d'Auricchio. En outre, des recherches et des études expérimentales ont montré et justifié que ce comportement dépend aussi d'une façon importante de deux autres paramètres. Il s'agit de la variation de la vitesse de chargement ou la vitesse de déformation d'une autre manière et le chargement cyclique. Ces deux paramètres qui ne peuvent pas être négligés à l'utilisation des AMF dans le domaine du parasismique, d'où l'impulsion est importante et les charges sont sinusoïdales.

En 2016, une étude paramétrique expérimentale a été faite par Qianhua Kan et al. (Kan et al. 2016) dans le but d'étudier le comportement de l'AMF (NiTi) sous l'effet de la variation de la vitesse de déformation et les chargements cycliques, la section suivante va se focaliser sur une présentation détaillée de cette étude pour qu'à la suite un modèle constitutif soit développé et construit pour qu'il prenne en compte ces deux effets « l'effet de la vitesse de déformation et le chargement cyclique ».

2.5.1 Objectif de l'étude de Qianhua Kan et al [47]

Cette étude expérimentale s'est basée principalement sur des tests uni-axiaux cycliques (charge-décharge) à des multitudes de vitesses de déformation contrôlées. Les expériences sont effectuées sur l'alliage Nickel-Titane (Ni-Ti) à une température $T > A_f$ « état austénite », afin que le spécimen soit sous l'effet superélastique. Le pourcentage du Nickel dans l'échantillon expérimenté est de 50,32 %.

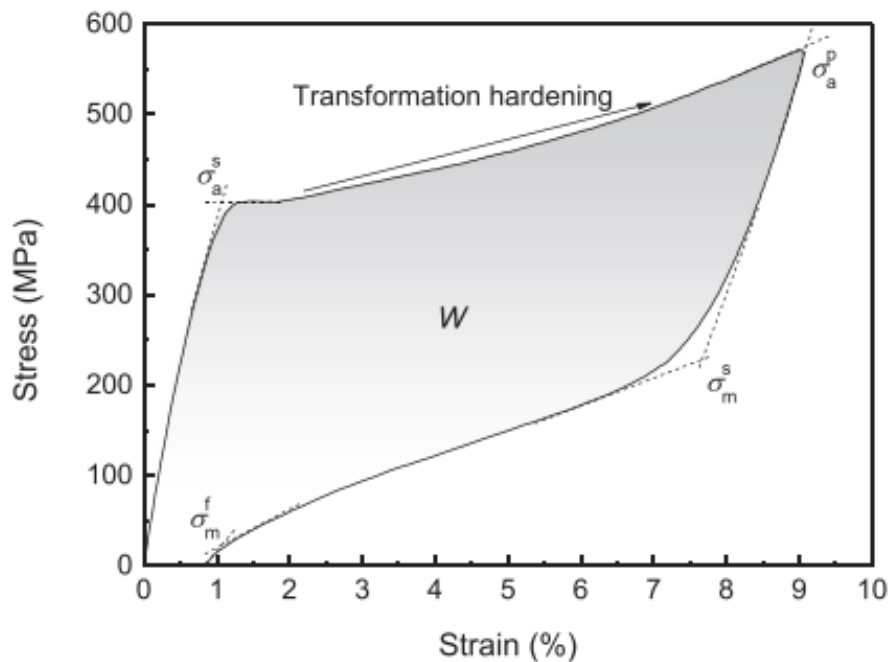


Figure 2-2 Illustration des contraintes de transformations, le palais de transformation et l'énergie dissipée.[47]

La Figure 2-2 montre la courbe contrainte-déformation obtenue à cet effet de superélasticité avec la désignation des contraintes de transformation, le sens de la transformation et l'énergie dissipée.

Les températures de transformations à une contrainte mécanique zéro ont été déduites avec la technique de scanner différentiel calorimétrique en anglais « differential scanning calorimetry DSC », et elles sont les suivantes $M_f = -25,0^\circ C$, $M_s = 9,7^\circ C$, $A_s = -18,2^\circ C$, $M_s = 12,4^\circ C$,

La Figure 2-3 montre les résultats obtenus à partir de cette technique. Pour que l'alliage soit à l'état austénite, la température ambiante dans la chambre du test est fixée à 26°C. [47]

Les tests cycliques ont été effectués sous la condition de la déformation contrôlée, avec la machine MTS858-BIONIX, avec une charge maximale de 5KN, les détails sont mentionnés dans l'article. [47]

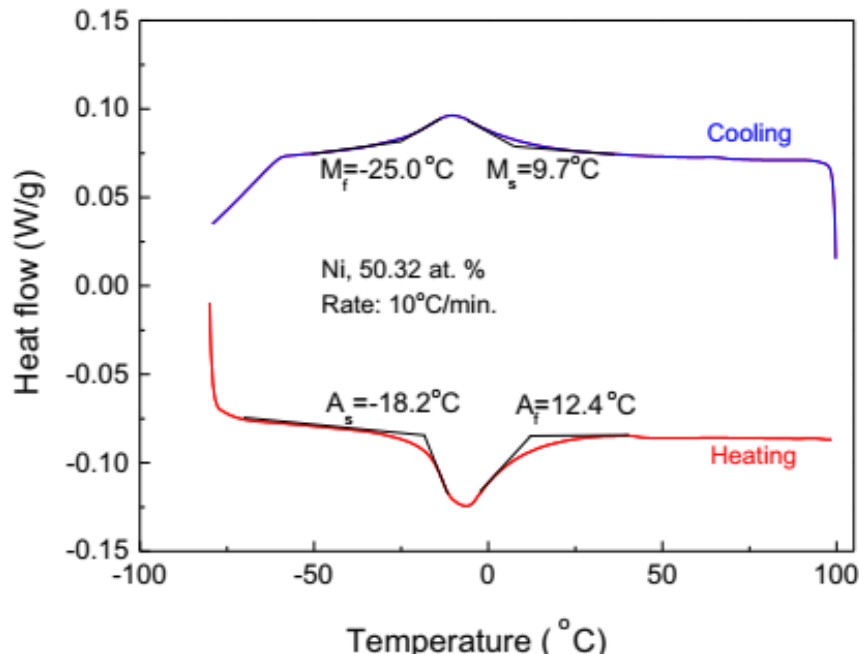


Figure 2-3 Détermination des températures de transformation sous une contrainte nul à l'aide de DSC.[47]

La stratégie dans cette étude s'est structurée à la désignation de six vitesses de déformation contrôlée qui sont les suivantes $3,3 \cdot 10^{-4}/s$, $6,6 \cdot 10^{-4}/s$, $1,0 \cdot 10^{-3}/s$, $3,3 \cdot 10^{-3}/s$, $1,0 \cdot 10^{-2}/s$ et $3,3 \cdot 10^{-2}/s$ sous des charges cycliques avec une déformation maximale fixée à 9%.

Pour chaque vitesse de déformation, le nombre des charges cycliques a été de 20 cycles pour les faibles vitesses de déformation ($3,3 \cdot 10^{-4}/s$, $6,6 \cdot 10^{-4}/s$) et 50 cycles pour les quatre autres vitesses ($1,0 \cdot 10^{-3}/s$, $3,3 \cdot 10^{-3}/s$, $1,0 \cdot 10^{-2}/s$ et $3,3 \cdot 10^{-3}/s$).

Le but était d'étudier l'effet de la vitesse de déformation et le chargement cyclique sur la superplasticité des alliages et il a été observé que :

- La superplasticité se dégrade par les chargements cycliques, autrement dit, la déformation résiduelle augmente ainsi que le durcissement de transformation ;
- Les contraintes de transformation à l'état austénite diminuent avec l'augmentation des charges cycliques et les vitesses de déformations ;
- La dissipation de l'énergie diminue avec le chargement cyclique jusqu'à ce qu'elle soit saturée ;
- La dissipation de l'énergie change de variation avec la vitesse de déformation ;

- La température augmente avec l'augmentation de la vitesse de déformation qui indique la dépendance de la nature physique de l'alliage Niti à la vitesse de déformation.

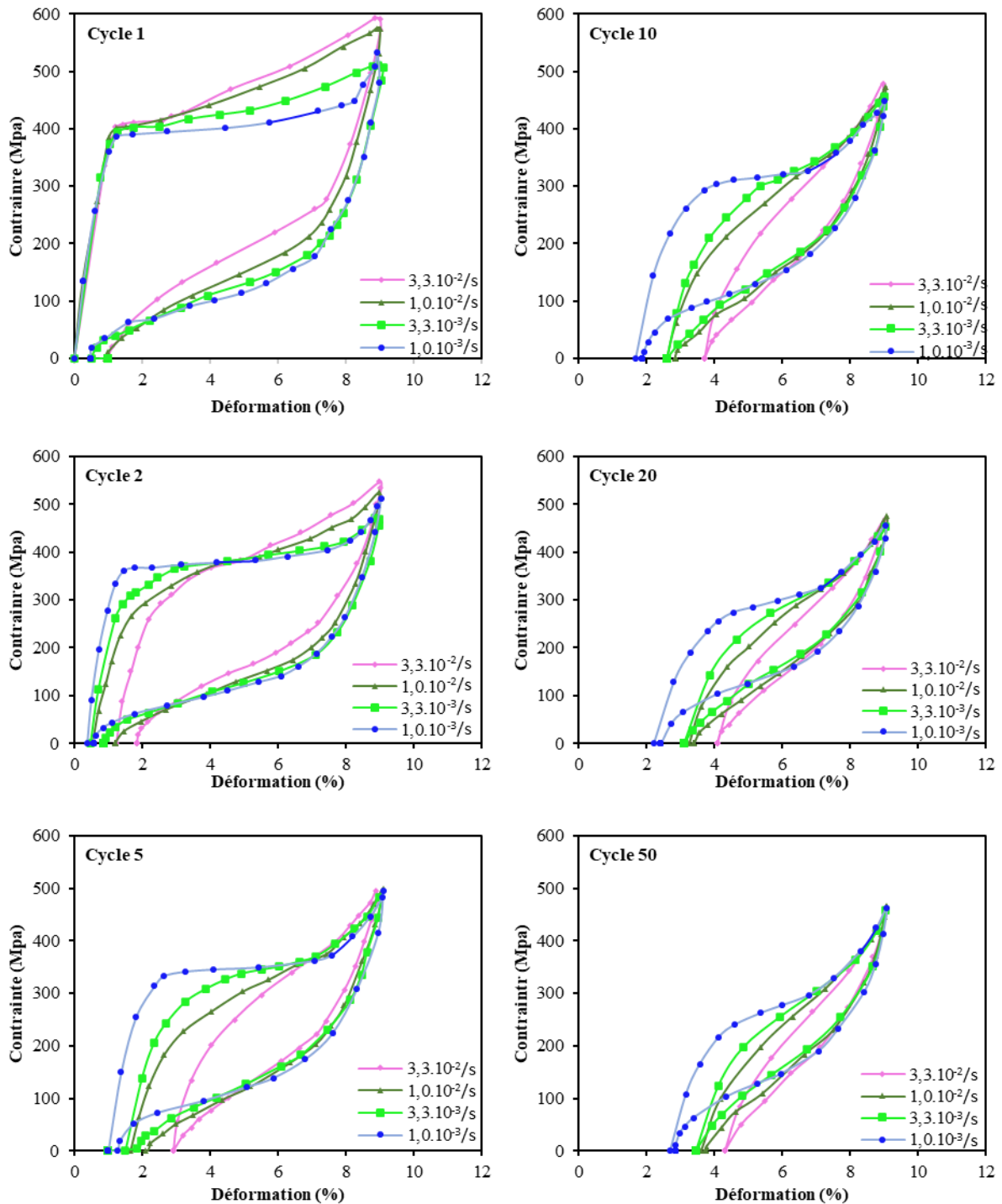


Figure 2-4 dépendance de la courbe contrainte-déformation par rapport à la vitesse de déformation sur des différents cycles : 1^{er} cycle, 2^{ème} cycle, 5^{ème} cycle, 10^{ème} cycle, 20^{ème} cycle et 50^{ème} cycle.[47]

2.5.2 Relation contrainte déformation à la variation de la vitesse de déformation et les charges cycliques

L'expérimental contrainte-déformation de Qianhua Kan et al (Kan et al. 2016) s'est organisé à la représentation de chaque cycle avec les différents variants de vitesse de déformation qui les conviennent.

(pour les cycles de 1 à 20 les vitesses de déformation $3,3.10^{-4}/s$, $6,6.10^{-4} /s$, $1,0.10^{-3} /s$, $3,3.10^{-3} /s$, $1,0.10^{-2} /s$ et $3,3.10^{-3}$ et pour le 50^{ème}, les vitesses de déformation $1,0.10^{-3} /s$, $3,3.10^{-3}/s$, $1,0.10^{-2}/s$ et $3,3.10^{-3}$) comme il est indiqué dans la Figure 2-4.

Dans la Figure 2-4, il a été conclu que la superélasticité se dégenère avec le chargement cyclique sur les différentes vitesses de déformation subites et la boucle hystérésis devient plus étroite avec l'augmentation des nombres de cycles jusqu'à saturation. Cette dégénération et cet étroitement se voit dans l'accumulation de déformation résiduelle après chaque cycle charge-décharge et aussi les contraintes du début et de fin à la martensite qui diminuent.[47]

Pour observer clairement l'effet de la variation de la vitesse de déformation et les charges cycliques sur la déformation résiduelle et les contraintes de transformation, les figures suivantes montrent l'évolution entre elles.

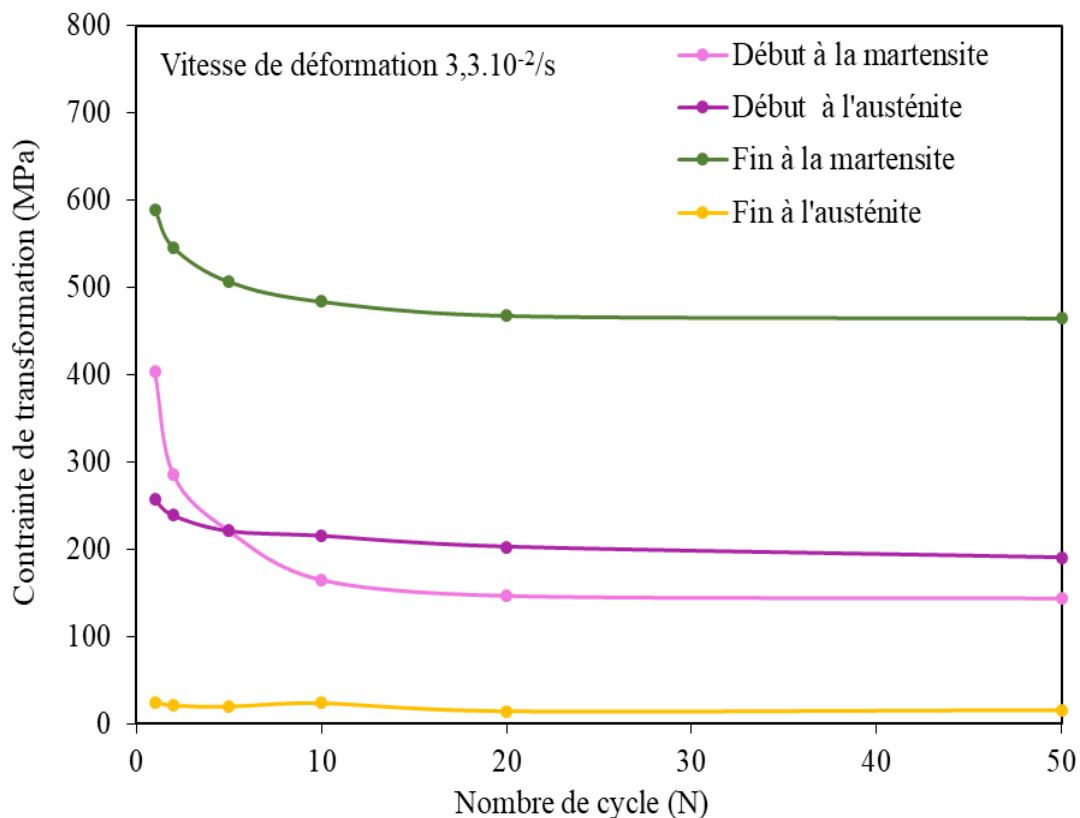


Figure 2-5 Evolution de la contrainte de transformation en fonction du nombre de cycles.[47]

La représentation de la Figure 2-5 et la Figure 2-6 ont fait montrer que l'évolution de la contrainte de transformation en fonction du nombre de cycles a une forte relation avec la vitesse de déformation, et c'est la contrainte de fin de martensite qui prend l'ampleur de cette relation

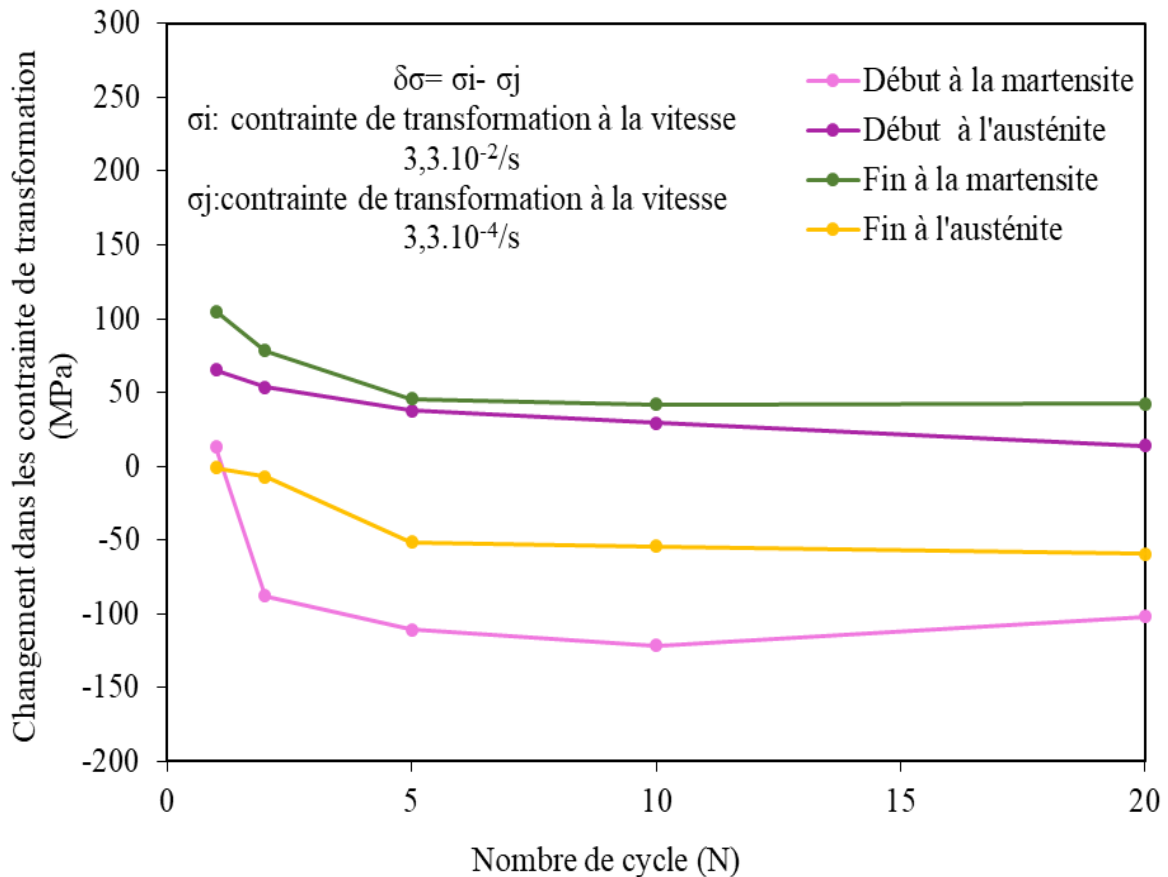


Figure 2-6 Evolution de changement de contrainte de transformation en fonction du nombre de cycles. [47]

La Figure 2-7 et la Figure 2-8 ont fait montrer que la déformation résiduelle augmente avec l'incrément du nombre des cycles et cette augmentation devient plus importante avec l'importance de la vitesse de déformation avec une croissance non linéaire de cette dernière.[47]

La Figure 2-9 et la Figure 2-10 ont dévoilé la diminution importante de l'énergie dissipée avec l'incrément du nombre des cycles pour toutes les vitesses de déformation jusqu'à ce qu'elle soit saturée après un certain nombre de cycles. En parallèle, la figure 6B a montré que les valeurs extrêmes de la dissipation de l'énergie pour chaque cycle se différencient selon la vitesse de déformation.[47]

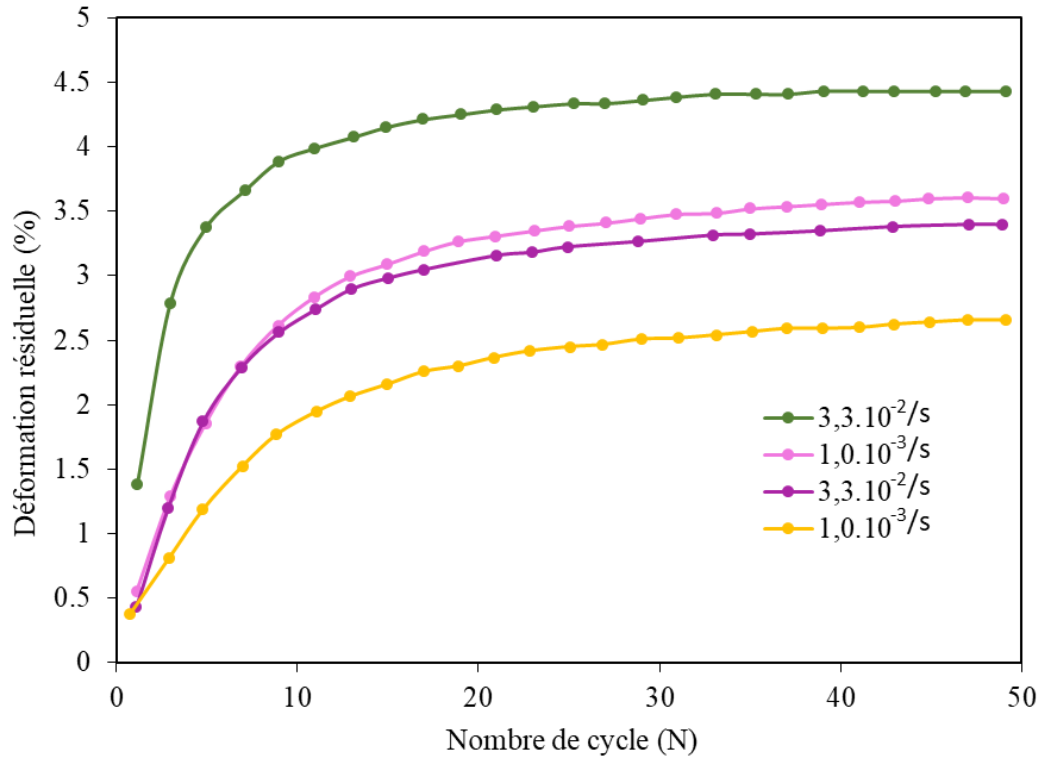


Figure 2-7 Evolution de la déformation résiduelle en fonction de nombre de cycle.[47]

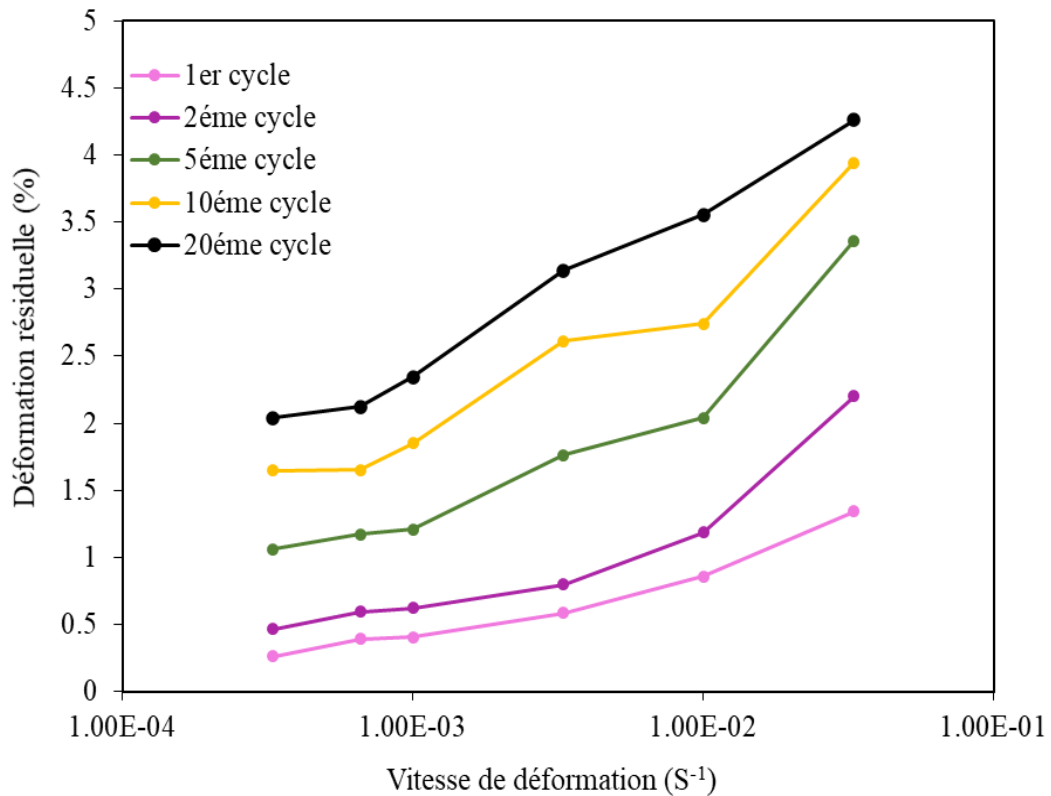


Figure 2-8 Evolution de la déformation résiduelle en fonction la vitesse de déformation.[47]

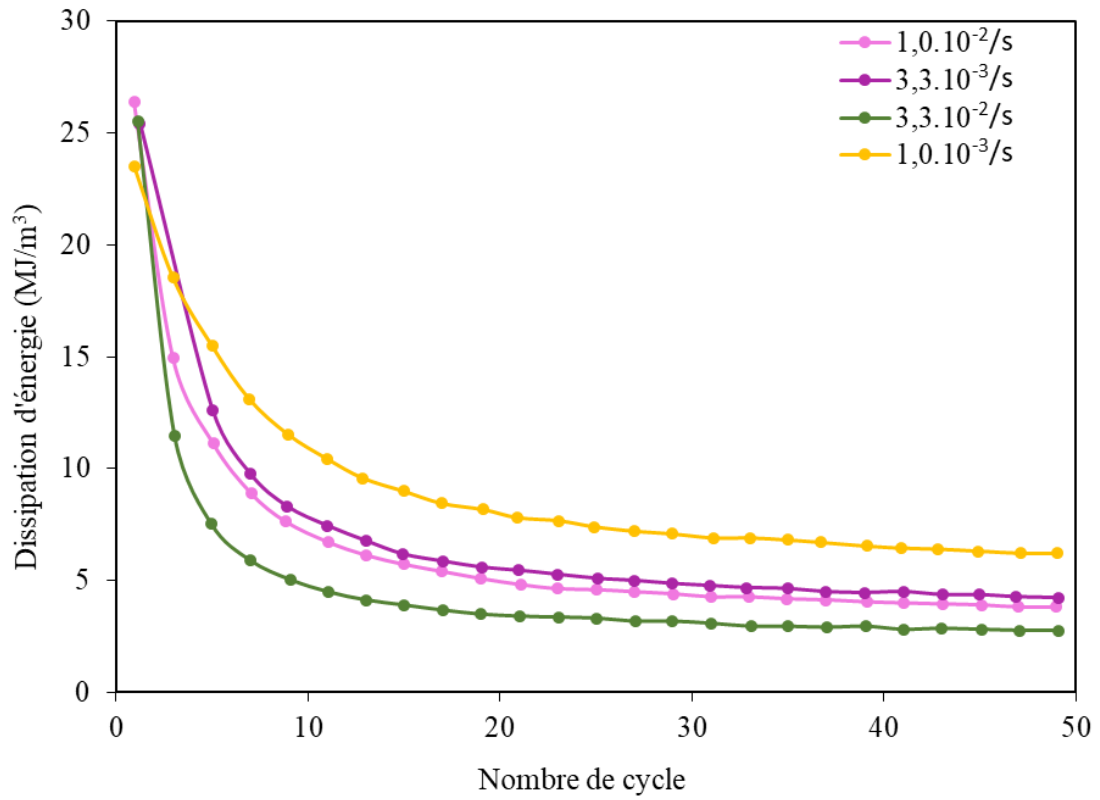


Figure 2-9 Evolution de la dissipation d'énergie en fonction de nombre de cycle.[47]

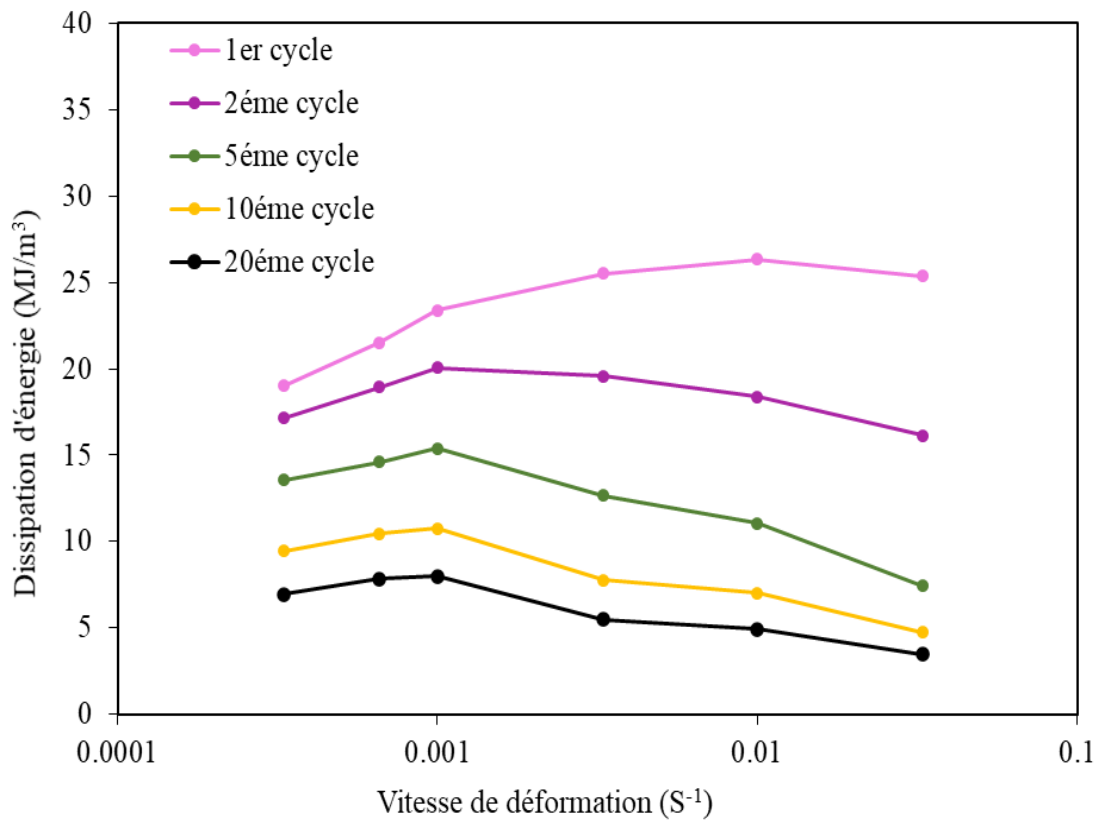


Figure 2-10 Evolution de la dissipation d'énergie en fonction de la vitesse de déformation.[47]

La conclusion tirée par Kan et al 2016 dans cette étude expérimentale est que la dépendance à la vitesse de déformation et les charges cycliques de l'alliage NiTi est assigné à la dégénération de la superélastique, la dépendance à la température et le couplage thermomécanique. La dégénération de la superélasticité dépend fortement de la vitesse de déformation. La déformation résiduelle et les contraintes de transformations augmentent avec les nombres de charges cycliques et la vitesse de. Par contre, l'énergie dissipée diminue avec le nombre de charges et augmente, en premier lieu, avec la vitesse de déformation puis elle diminue.

2.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, une synthèse de l'évolution de la loi constitutive des AMF vient d'être citée, qui s'est passé de la présentation des modèles simulateur de comportement hystérique aux utilisations des modèles destinés spécialement au AMF, ces dernières qui ont commencé à simuler l'effet superélastique puis l'effet mémoire de forme pour qu'à la suite ils aient passé à la prise en compte de l'effet d'autres paramètres, tel que la vitesse de chargements, comme il était proposé des modèles simplistes qui facilite leurs simulations dans les logiciels qui utilise la méthode des éléments finis. Trois modèles qui ont montré leurs fiabilités dans ces calculs ont été clairement détaillés, ainsi l'étude expérimentale de Kan qu'elle vient éclaircir l'effet de la vitesse de déformation et des chargements cycliques sur le comportement des AMF. Ces deux paramètres qui ont une influence importante dans les chargements dynamiques et ils vont faire une problématique pour les lois de comportement si par la suite ils vont pouvoir les prendre en compte ou non.

Dans le chapitre suivant nous allons proposer un nouveau modèle « modèle construit » à partir de deux modèles de bases « modèle de Brinson et modèle d'Auricchio simplifié par Silva Paulo Silva Lobo » pour qu'ils puissent prendre en compte l'effet de la vitesse de déformation et les chargements cycliques.

3 CHAPITRE (3) : INTRODUCTION DE L'EFFET DE LA VITESSE DE DEFORMATION ET LES CHARGES CYCLIQUES SUR LES LOIS CONSTITUTIVES

3.1 INTRODUCTION

Le comportement des AMF est influé par l'intensité de la vitesse de déformation et le chargement cyclique d'une manière régulière jusqu'à saturation, ce phénomène est réellement provoqué dans le cas d'une excitation sismique ou autre excitation dynamique similaire.

L'objectif de ce chapitre est de rendre les lois constitutives des AMF dépendantes de ces deux paramètres « la vitesse de déformation et le chargement cyclique », et plus exactement sur les modèles les plus utilisés dans le domaine parasismique. Le but majeur de ce travail est de faire des lois constitutives très proches de réalité dans ce domaine, on note que l'enjeu des AMF dans le contrôle hybride se résume à la dissipation de l'énergie et le recentrage.

Afin d'introduire l'effet de la vitesse de déformation ainsi que celui des charges cycliques, nous allons utiliser les deux modèles constitutifs, de Brinson et d'Auricchio simplifié par Paulo Silva Lobo. La raison de choisir ces deux modèles, comme nous l'avons évoqué au chapitre 2, étant leur fiabilité à simuler la superélasticité, d'une part. D'autre part, ils sont fortement utilisés dans la simulation numérique du comportement des AMF dans les algorithmes et logiciels de calcul basés sur la méthode des éléments finis. La différence entre ces deux modèles est que le premier utilise le profil contrainte-température critique pour déterminer les points critiques de transformation et le deuxième considère les contraintes de transformation comme étant des constantes de matériaux. Cette différence est la raison de présenter le modèle construit tout en se basent sur ces deux modèles.

Pour faire entrer ces deux paramètres dans les deux modèles précités, nous allons les confrontés à l'étude expérimentale réalisée par Q. Kan et al en 2016. Dans celle-ci, une étude paramétrique a été réalisée dans laquelle on a fait varier les vitesses de déformation à six. Ainsi, on a pris les résultats de six cycles de 1 à 50. Aussi, l'étude a montré clairement la relation de la déformation résiduelle, contrainte de transformation et énergie dissipée par rapport à la vitesse de déformation et le nombre de cycles.

La démarche à suivre pour arriver à ce modèle construit commence par adapter le modèle de Brinson pour que les contraintes de transformation soient claires dans les lois constitutives sachant que la possibilité de revenir aux équations originales reste possible à la connaissance des coefficients d'influence des contraintes C_A et C_M . Cette problématique ne se pose pas dans le modèle d'Auricchio puisque les contraintes de transformations sont considérées comme étant des constantes de matériaux. Par la suite, le travail va viser la modification de la loi constitutive pour que cette dernière prenne en compte la déformation résiduelle après chaque cycle. À la fin, un modèle numérique va être présenté pour simuler la déformation résiduelle et les contraintes de transformations en fonction des charges cycliques pour rendre le modèle moins dépendant de la connaissance expérimentale de chaque cycle.[66]

3.2 ADAPTATION DES CONTRAINTES DE TRANSFORMATIONS

Les points de transformations ont un rôle important dans les lois constitutives des AMF, et le comportement de ce matériau dépend solidement de ces points. En parallèle, l'étude expérimentale de Kan a montré la dépendance des contraintes de transformation à la vitesse de déformation, d'où la nécessité d'écrire la variation du volume de la fraction de la martensite d'une façon directe avec ces contraintes spécialement pour le modèle de Brinson puisque dans le modèle d'Auricchio sont prises directement comme étant des constantes de matériau.

Pour faire apparaître l'influence de la vitesse de déformation sur les contraintes de transformations, il y'a lieu de rendre ces dernières claires dans le modèle de Brinson.

Les contraintes de transformation sont les contraintes qui définissent le début et la fin d'une phase de transformation, elles varient selon la variation de la température, les coefficients d'influence de la contrainte C_A et C_M , ainsi que les contraintes critiques du début et de la fin de transformation à $T < M_s$ σ_s^{cr} et σ_f^{cr} respectivement. Le profil de contrainte-température critique est l'outil le plus robuste pour déterminer l'état de l'AMF et ainsi indiquer les points de transformation.

Dans le cas de la superélasticité, il est évidemment que la température soit supérieure à la température de transformation à l'austénite pour une contrainte égale à zéro « $T > A_s$ ».

La Figure 3-1 désigne clairement le territoire de la superélasticité. Cet effet se provoque avec la condition de la température citée plus haut. Une application d'une contrainte jusqu'au dépassement de l'austénite et l'état de transformation, d'une autre manière la provocation

totale de l'état martensite puis un relâchement de cette contrainte pour qu'une boucle hystérique soit bien désignée.

A partir de cette figure, on va définir les points de contrainte de transformation qui ont une évolution linéaire entre la température et la contrainte avec la tangente C_a à la transformation à l'austénite et la tangente C_m pour la transformation à la martensite rappelant que C_a et C_m sont les coefficients d'influence de la contrainte. [66]

$$\sigma_s^M = \sigma_s^{cr} + C_M(T - M_s) \quad 3-1$$

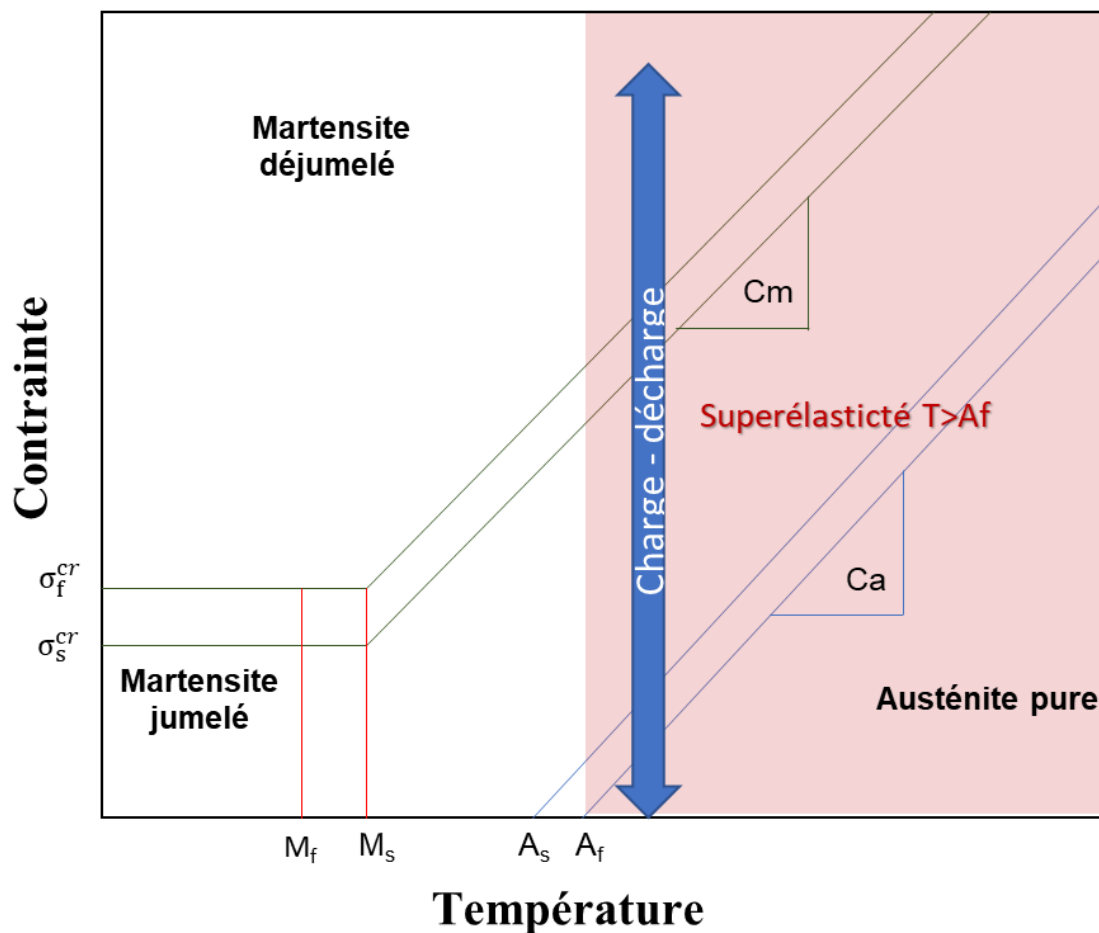


Figure 3-1 Profil Contrainte-Température critique. [40]

$$\sigma_f^M = \sigma_f^{cr} + C_M(T - M_s) \quad 3-2$$

$$\sigma_s^A = C_A(T - A_s) \quad 3-3$$

$$\sigma_f^A = C_A(T - A_f) \quad 3-4$$

La martensite ne se provoque pas par la température à l'effet superélastique à la raison qu'il n'y a pas une martensite jumelée, autrement dit, le volume de la fraction de la martensite

due à la température est égal à zéro dans tous les cas de la superélasticité « $\xi_T = 0$ ». Puisque dans le modèle de Brinson, le volume de la fraction de la martensite est la somme du volume de la fraction de martensite dû à la contrainte et dû à la température $\xi = \xi_s + \xi_T$. Donc, à l'état de superélasticité, la martensite va être dû qu'à la contrainte $\xi = \xi_s$.

A partir des équations de l'évolution du volume de la martensite proposées dans le modèle de Brinson et les équations qui définissent les contraintes de transformation à la martensite citées auparavant, les nouvelles définitions du volume de la fraction de la martensite pour la conversion à la martensite vont être les suivantes :

pour $\sigma_s^M < \sigma < \sigma_f^M$

$$\xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos \left\{ \pi \frac{\sigma - \sigma_s^M}{\sigma_f^M - \sigma_s^M} \right\} + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \quad 3-5$$

Et puisque $\xi = \xi_s$ donc

$$\xi = \frac{1-\xi_0}{2} \cos \left\{ \pi \frac{\sigma - \sigma_s^M}{\sigma_f^M - \sigma_s^M} \right\} + \frac{1+\xi_0}{2} \quad 3-6$$

De la même démarche de la conversion à la martensite, la définition du volume de la fraction de la martensite à l'austénite s'est tirée, et elle s'écrit de comme suit :

pour $\sigma_f^A < \sigma < \sigma_s^A$

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \left\{ \cos \left[\pi \frac{\sigma_s^A - \sigma}{\sigma_s^A - \sigma_f^A} \right] + 1 \right\} \quad 3-7$$

Les équations 3-6 et 3-7 définissent l'évolution de la fraction du volume de la martensite durant la transformation et la transformation réversible, sachant que ces deux équations sont en fonction des contraintes de transformations et la fraction du volume de la martensite à l'état initial, d'où l'objectif de l'adaptation.

Cette démarche effectuée va faciliter l'introduction de l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement des AMF, précisément sur les contraintes de transformations qui sont très influencées.

3.3 INTRODUCTION DE LA VITESSE DE DEFORMATION

La particularité de l'effet superélastique des AMF est le comportement hystérique et la déformation inélastique qui arrive à 9% sans négliger la capacité de revenir à l'état initial « déformation nulle » après la fin de chaque cycle de cet effet superélastique. Ce qui explique d'ailleurs l'utilité de ce matériau dans l'atténuation sismique. En occurrence, des études expérimentales ont montré l'existence d'une déformation résiduelle durant les

chargements cycliques notamment sous des chargements intenses. L'étude expérimentale de Kan a bien montré la génération de la déformation résiduelle avec l'incrémentation des charges cycliques jusqu'à saturation, Cette dernière s'apercevait quand les chargements cycliques vont présenter des résultats identiques à la rigueur adjacents. Ainsi, elle a montré que cette déformation résiduelle devient plus remarquable quand il y'a une forte vitesse de déformation.

Ce phénomène fait partie des phénomènes qui causent la dégénération de superélasticité et qui impliquent par conséquent une dégradation de l'énergie dissipée durant les chargements cycliques.

Dans cette seconde section de ce troisième chapitre, le modèle construit va viser l'introduction de la déformation résiduelle sur la loi constitutive des deux modèles de base. Et ceci dans le but d'arriver à avoir une simulation numérique capable de prendre en considération cette déformation résiduelle.

La loi constitutive utilisée dans les modèles de base « modèle de Brinson et d'Auricchio simplifiés par Paulo Silva Lob » est la même. Cette loi représente la relation contrainte-déformation en fonction du volume de la fraction de la martensite et du module d'élasticité a été définie en premier lieu, par Tanaka puis elle a été simplifiée par Brinson comme nous l'avons mentionné précédemment dans le chapitre 2.

$$\sigma = E(\xi)(\epsilon - \epsilon_L \xi_S) \quad 2-3$$

Au début, l'équation de la loi constitutive équation 3 va s'écrire de telle manière à représenter l'évolution de la déformation afin de faciliter l'introduction de la déformation résiduelle :

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E(\xi)} + \epsilon_L \xi_S \quad 3-8$$

En analysant l'équation 3-8, la déformation est égale à la « la contrainte sur le module d'élasticité, qui est en fonction du volume de la fraction de la martensite » plus « le volume de la fraction de la martensite due à la contrainte multipliée par la déformation inélastique ». Donc, la déformation est la somme d'une déformation élastique « relation contrainte-module d'élasticité » et une déformation inélastique provoquée par une martensite due à la contrainte.

La déformation résiduelle s'accumule pendant le déchargement cyclique et devient plus étroite avec l'incrémentation du nombre de *cycles*. [47]

À partir de cette observation clé retirée de l'étude expérimentale de kan, l'introduction de la déformation résiduelle va se baser.

Pour bien expliquer cette observation, la superélasticité commence à changer de comportement par rapport au cycle précédent au début de la transformation réversible « transformation martensite-austénite », à ce moment une génération d'une déformation résiduelle va débiter et elle se terminera à la fin de cette transformation réversible. En parallèle, la déformation inélastique, qui est une caractéristique du matériau, va se diminuer à la même quantité acquise à la déformation résiduelle.

En se focalisant sur la déformation résiduelle, la différence entre chaque cycle se résume en deux points. La première est la déformation inélastique qu'elle va être dégénéré après chaque cycle et la deuxième est cette déformation résiduelle qui s'accroît après chaque cycle.

Ce phénomène rend la superélasticité plus étroite après chaque cycle, mais aussi de garder la même déformation maximale.

Après l'analyse de l'équation 3-8 et la compréhension de l'apparition de la déformation résiduelle, l'introduction de cette dernière va commencer par le changement de la déformation inélastique ϵ_L par la soustraction de la déformation inélastique et la déformation résiduelle $\epsilon_L - \epsilon_R$, cette démarche rend la courbe superélastique plus étroite et compressée avec l'incrément des charges cycliques. D'un autre point de vue, c'est la déformation inélastique qui diminue durant ces chargements cycliques et la superélasticité va générer un palais de déformation plus petit qu'auparavant, donc l'équation 3-8 devient :

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E(\xi)} + (\epsilon_L - \epsilon_R)\xi_S \quad 3-9$$

Pour faire apparaitre la déformation résiduelle ou d'un point de vue mathématique, pour faire déplacer la courbe superélastique à chaque cycle, on va additionner la déformation résiduelle ϵ_R à l'équation 3-9 et changer ξ_S par ξ puisqu'il que la martensite induite par la contrainte pour qu'elle devient :

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E(\xi)} + \xi(\epsilon_L - \epsilon_R) + \epsilon_R \quad 3-10$$

On note ϵ_R La déformation résiduelle.

La déformation résiduelle va s'accumuler après chaque cycle et commence à prendre cette accumulation durant la transformation réversible. [66]

La déformation résiduelle va s'accumuler après chaque cycle et commence à prendre cette accumulation durant la transformation réversible.

La définition de l'évolution de la déformation résiduelle va être composée, sur des phases bornées, par les points de transformation avec la même logique utilisée par Brinson dans l'évolution du volume de la fraction de la martensite.

La division des phases va être définie, en premier lieu, par deux phases à savoir une phase de chargement et seconde de déchargement.

La déformation résiduelle ne change pas durant le chargement donc cette phase va rester telle qu'elle est.

La phase de déchargement se décompose en trois parties qui sont les suivantes : avant conversion à l'austénite, durant la conversion à l'austénite et après conversion à l'austénite.

À la totalité il y'aura 4 phases pour définir l'évolution de la déformation résiduelle.

L'évolution de la déformation résiduelle est constante à la phase de chargement ou l'AMF va se transformer à la l'état martensite

$$\epsilon_{R_N} = \epsilon_{R_{N-1}} \quad 3-11$$

L'évolution de la déformation résiduelle à la phase de déchargement est la suivante

$$\text{À } \sigma \geq \sigma_s^A$$

$$\text{équation } \epsilon_{R_N} = \epsilon_{R_{N-1}} \quad 3-11$$

$$\text{À } \sigma_s^A \geq \sigma \geq \sigma_f^A$$

$$\epsilon_R = \epsilon_{R(N-1)} + (\epsilon_{RN} - \epsilon_{R(N-1)}) \left(1 - \frac{\sigma - \sigma_f^A}{\sigma_s^A - \sigma_f^A}\right) \quad 3-12$$

$$\text{À } \sigma_f^A \geq \sigma$$

$$\text{équation } \epsilon_{R_N} = \epsilon_{R_{N-1}} \quad 3-11$$

Ici, l'indice N désigne le nombre de cycles chargement-déchargement.

La logique prise dans l'équation 3-12 est d'ajouter la proportionnalité durant la phase de transformation réversible après chaque cycle et cette proportionnalité a pris la même logique utilisée dans la définition de l'évolution de la fraction de martensite par Auricchio et qui a choisi une évolution linéaire.

La valeur $\epsilon_{R(N-1)}$ est la déformation résiduelle validée durant le cycle précédent.

La formule $(\epsilon_{RN} - \epsilon_{R(N-1)})$ désigne la quantité de déformation résiduelle qu'elle va s'ajouter durant ce cycle.

La formule $(1 - \frac{\sigma - \sigma_f^A}{\sigma_s^A - \sigma_f^A})$ est la proportionnalité linéaire qui commence par la valeur 0 et termine par 1 à la fin de cette transformation. Il est noté qu'on peut utiliser la formule cosinus avec la logique utilisée dans le modèle de Brinson pour la définition du volume de la fraction de la martensite.

À la fin, l'équation 3-12 et la somme de déformation résiduelle du cycle précédent plus l'évolution de la proportionnalité de la quantité de déformation résiduelle prise au cycle courant jusqu'à ce que cette proportionnalité prenne la totalité à la fin de cette transformation réversible.

Cette démarche permet à la loi constitutive de certifier la déformation résiduelle après chaque cycle et d'être prise à la phase concernée pour arriver à des résultats similaires à l'expérimentale.

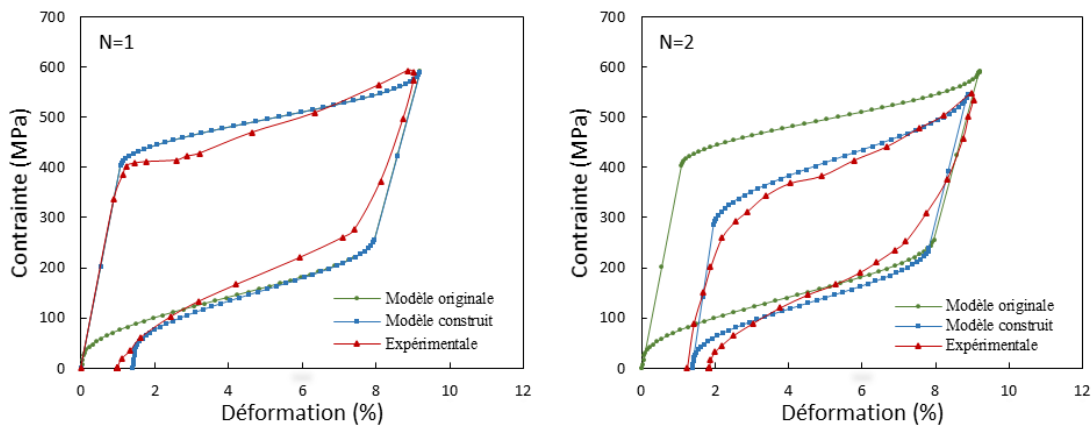


Figure 3-2 Comparatif entre le modèle non construit, modèle construit et l'expérimentale de la courbe contrainte -déformation pour cycle 1 à droite et 2 à gauche

La Figure 3-2 montre la comparaison entre l'expérimental et la simulation numérique avec le modèle original et le modèle construit. L'allure du modèle construit converge mieux au modèle expérimental. Cette convergence s'affirme dans la prise en compte de la variation des points de transformations d'un cycle à l'autre qui concrétise dans les résultats de la figure et aussi dans la prise en compte de la déformation résiduelle aboutie après un cycle de chargement.

Cette approche a permis l'étroitement de la superélasticité. En conséquence, la surface représentée entre le palais de chargement et de déchargement commence à se serrer, d'un point de vue énergétique, l'énergie dissiper se diminue avec l'incrémentation des cycles, ce qui est respecté dans le modèle construit. [66]

Le modèle construit donne le pouvoir aux lois constitutives de prendre en compte la variation des contraintes de transformations et la déformation résiduelle qui sont acquises durant les chargements cycliques.

En outre elles ont aussi une sensibilité à l'importance de la vitesse de déformation et au nombre des cycles. L'intérêt majeur de ce modèle construit est d'arriver à représenter correctement le comportement des AMF lors du chargement dynamique.

Généralement, les simulations numériques sont exécutées à l'aide des simulateurs qui se basent principalement sur la méthode des éléments finis, tout en définissant la loi de comportement des matériaux. Le modèle construit a réussi à prendre en compte la variation des contraintes de transformation et la déformation résiduelle, qui sont dues au chargement cyclique et les fortes vitesses de déformation. Dans le concret, ces deux derniers se résument dans le cas des tremblements de terre. Mais jusqu'à ce point-là, cette réussite est achevée par la connaissance de la variation de ces paramètres à chaque cycle et à chaque vitesse de déformation. Autrement dit, la simulation numérique va être face à deux cas, l'exigence de la connaissance de tous les cas possibles. Cette possibilité impose un expérimental important qui va même alourdir les algorithmes de simulation, spécialement dans le cas de l'étude sismique qui impose une multitude des cas. Le deuxième cas, un expérimental limité qui va empêcher l'étude de tous les cas possibles.

Pour faire face à ce handicap, ou plus au moins donner plus de solutions avec le normal de l'expérimental accompli, un modèle numérique va être proposé pour simuler la variation des contraintes de transformations et la déformation résiduelle en fonction des charges cycliques. Cette dernière accorde au modèle construit de proposer plus de solutions et de faciliter l'écriture des algorithmes de ce modèle.

3.4 MODELE NUMERIQUE DE LA SIMULATION DE LA DEFORMATION RESIDUELLE ET LES CONTRAINTES DE TRANSFORMATIONS EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES

L'étude expérimentale de [Kan](#) a clairement montré la relation entre la déformation résiduelle, les contraintes de transformation et l'énergie dissipée par rapport aux charges cycliques et les vitesses de déformations.

Cette pertinence offre au modèle construit la dépendance de la connaissance du comportement de l'AMF à chaque cycle et pour chaque vitesse de déformation. Comme elle offre la possibilité de simuler l'AMF avec exactitude et sur toutes les étapes parcourues durant un chargement dynamique, d'où l'objectif fondamental du modèle construit. [66]

Les figures (Figure 2-5 Figure 2-10) montrent l'expérimental de ces relations notées. La Figure 2-7 montre l'évolution de la déformation résiduelle en fonction des nombres de cycles, toutes les courbes ont une allure identique quelle que soit la vitesse de déformation, avec une différence d'intensité qui se résume au point de départ et le seuil de saturation.

La Figure 3-3 montre en particulier cette relation à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2} /s$. Le choix de cette dernière était à cause de l'intensité de cette courbe et qui va faciliter l'approche entre l'expérimental et la définition théorique et numérique. Cette courbe débutera au cycle N=1 avec la déformation résiduelle attribuée à ce cycle et cette vitesse de déformation jusqu'à un seuil constant après un certain nombre de cycles parcouru. L'évolution de cette courbe était ascendante en exponentiel jusqu'à une saturation constante.

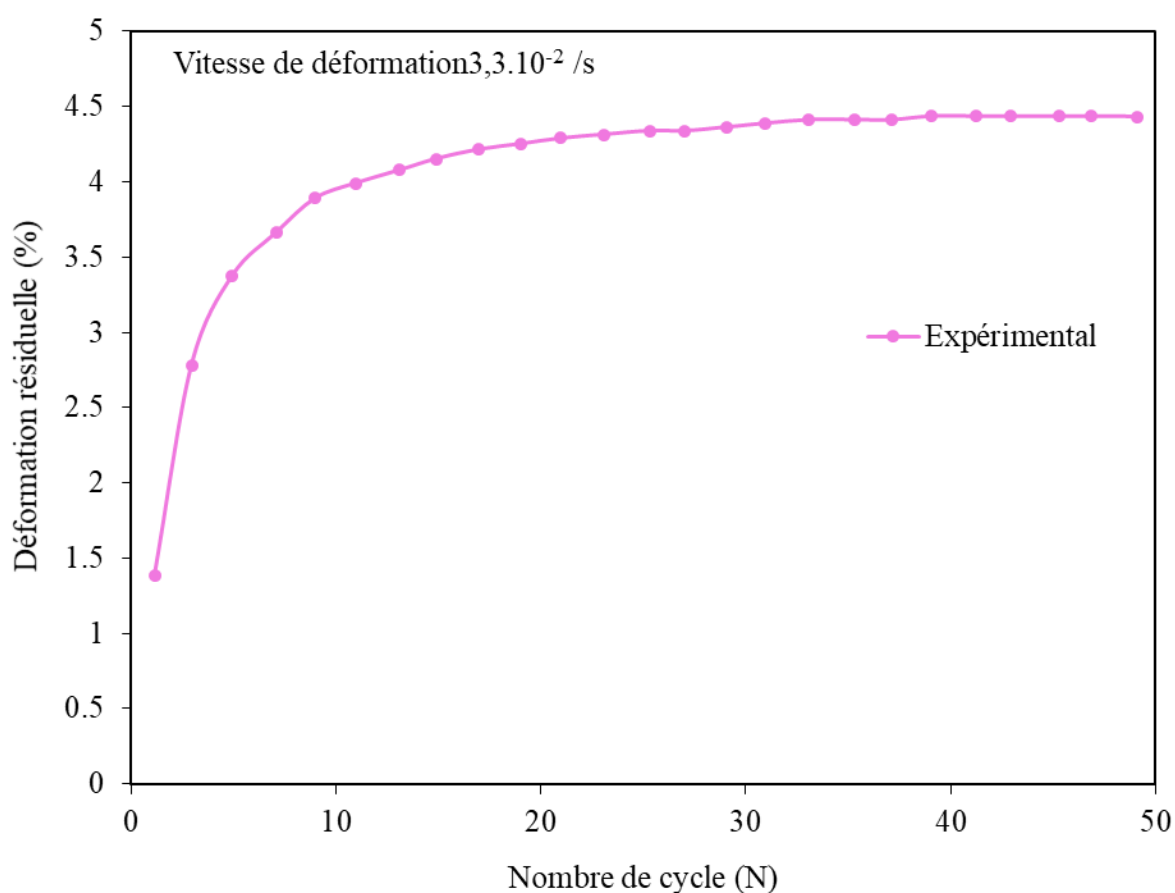


Figure 3-3 Déformation résiduelle en fonction des nombres de cycles à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2} /s$. [47]

La Figure 2-5 montre la relation des quatre contraintes de transformation en fonction du nombre de cycles sur les deux vitesses de transformations extrêmes. L'évolution de la contrainte du début de transformation à la martensite pour la vitesse $3,3 \cdot 10^{-2} /s$ fait montrer plus clairement cette relation. Cette clareté est apparue à cause de la différence importante entre la contrainte de transformation sur le premier et le dernier cycle.

La Figure 3-4 a montré en exception, que l'évolution de cette contrainte de transformation à la vitesse $3,3.10^2$, la courbe débutera avec le cycle $N=1$ et la contrainte de transformation attribuée à ce cycle jusqu'à de la contrainte de transformation après un certain nombre de cycles. L'évolution de cette courbe est descendante en forme d'exponentielle jusqu'à saturation.

La relation de la déformation résiduelle et les contraintes de transformation en fonction des nombres de cycles ont une allure exponentielle ascendante jusqu'à saturation pour la première et descendante jusqu'à saturation pour la deuxième.

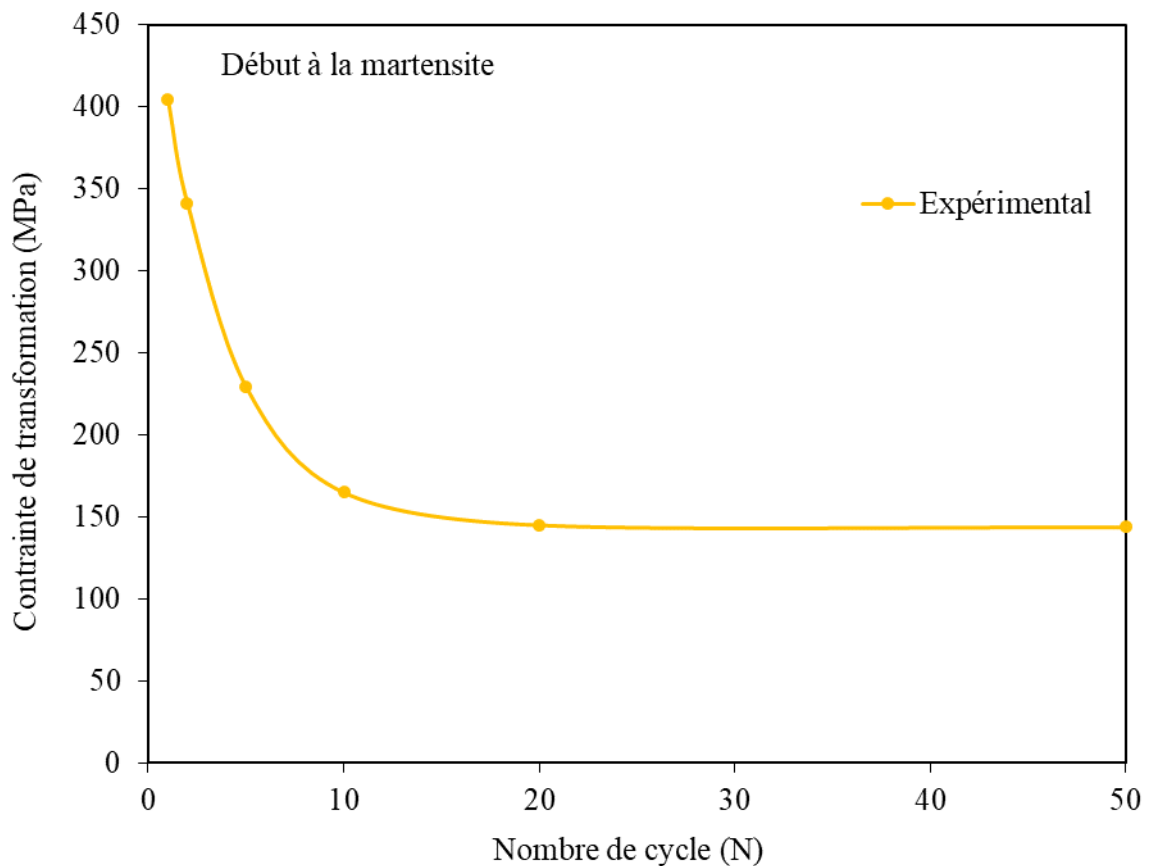


Figure 3-4 Contrainte de transformation de début à la martensite en fonction des nombres de cycles. [47]

Avant de définir cette relation avec une équation mathématique, un bref aperçu mathématique sur ces relations exponentielles va être présenté.

3.5 FONCTION EXPONENTIELLE

Soit la fonction $y = f(x)$ où a et b sont les paramètres de cette fonction. Voici trois différentes équations générales avec la fonction exponentielle :

Fonction générale d'une exponentielle croissante $y = ae^{bx}$

Fonction générale d'une exponentielle décroissante $y = ae^{-bx}$

Fonction générale $y = a(1 - e^{-bx})$

En remplaçant les paramètres a et b par des valeurs, on obtient les courbes suivantes.

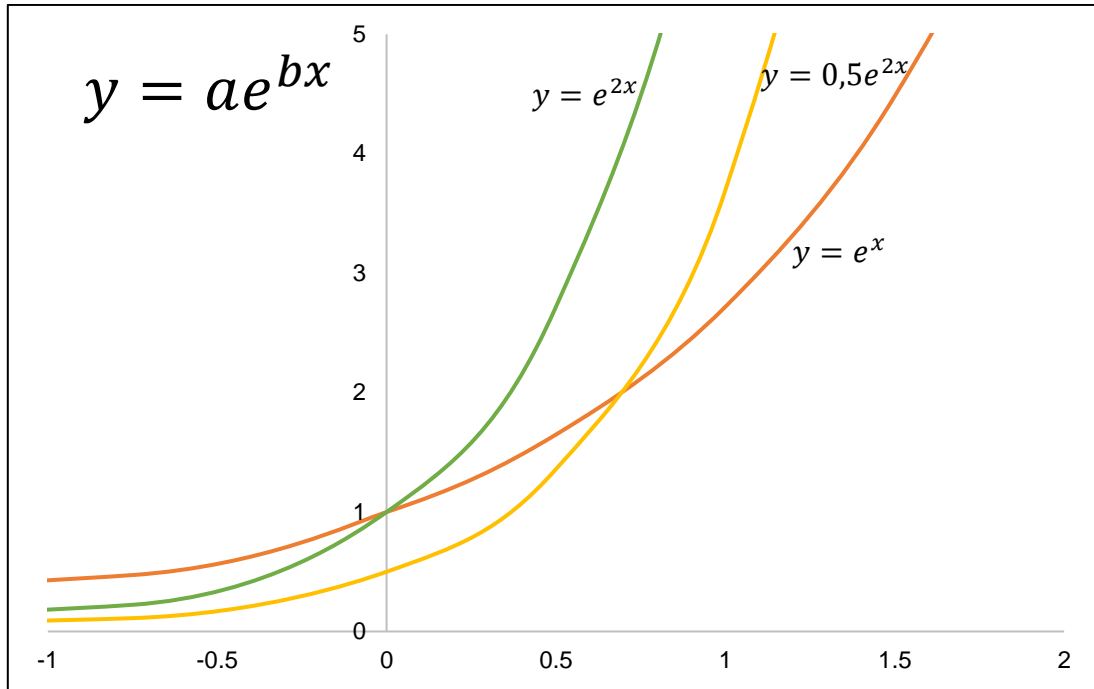


Figure 3-5 Courbes de la loi exponentielle $y = ae^{bx}$.

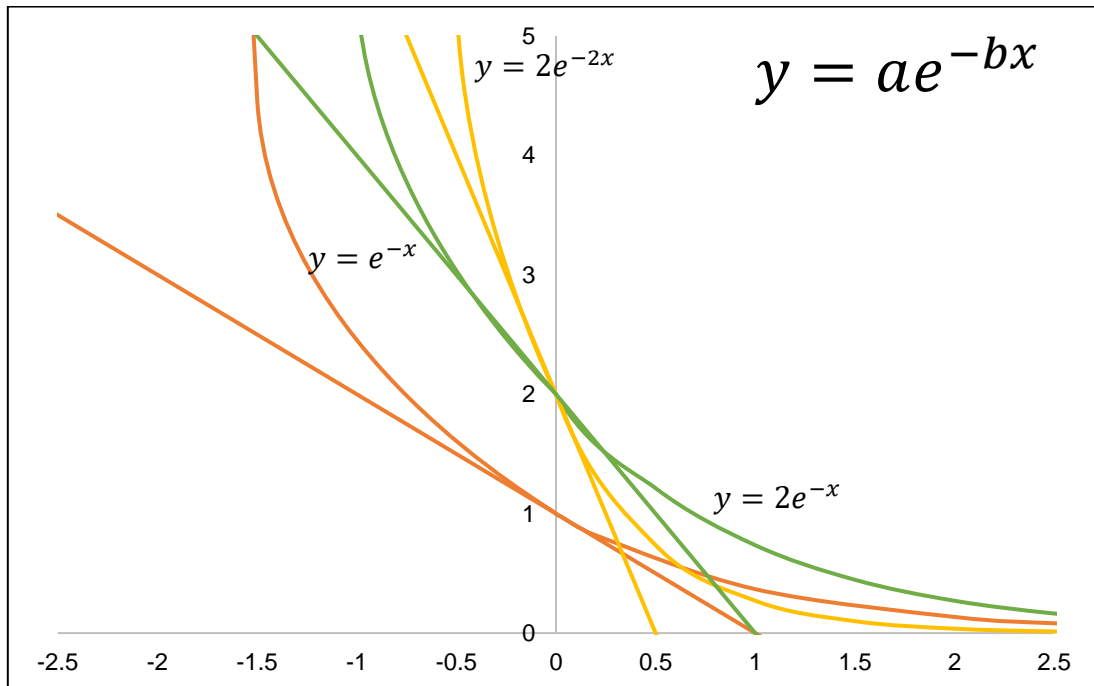


Figure 3-6 Courbes de la loi exponentielle $y = ae^{-bx}$.

La Figure 3-5 nous montre les trois courbes de la fonction exponentielle croissante, la première est la courbe de la fonction exponentielle elle-même $y = e^x$ et les deux autres avec la variation des paramètres a et b comme il est indiqué dans la figure, cette équation générale est l'origine de toutes les autres équations exponentielles.

La Figure 3-6 représente trois courbes particulières de l'équation d'exponentielle décroissante générale $y = ae^{-bx}$, avec leur tangente au point origine (0,0), quels que soit les paramètres a et b, tous les courbes tant vers y=0 à l'infini.

La valeur a est la valeur de $y = f(0)$, d'une façon directe, cette valeur est là où la courbe coupe l'axe des ordonnées à l'origine.

Le tracé de la tangente au point origine (0,0) a une pente égale à $-a.b$, d'où la valeur de $1/b$ est l'intersection de ce tracé et l'axe des abscisses.

Les paramètres « a et b » manifestent l'intersection de la courbe de cette équation exponentielle décroissante générale $y = ae^{-bx}$ et avec l'axe des ordonnées à l'origine et ils manifestent aussi l'intensité de cette décroissance.

Face à un expérimental qui prend cette allure, la détermination des paramètres a et b pour avoir une équation qui le représente mathématiquement peut se faire de plusieurs manières. Une de ces manières est de le déterminer avec l'inverse de la méthode qui fait définir ces paramètres.

Comme il y'a une possibilité de déterminer ces paramètres en deux étapes, la première est que le paramètre a est égal à la valeur de $y = f(0) = a$ donc directement on fait la lecture de l'intersection de la courbe avec l'axe des abscisses. La deuxième étape est de faire une lecture d'un autre point supposé $(n, f(n))$ pour que $a = \frac{f(n)}{e^{-bn}}$. $b = -\frac{1}{n} \ln \frac{f(n)}{a}$

Dans le cas où la courbe de l'expérimental ne tend pas vers 0 ou elle ne coupe pas l'axe des abscisses, une démarche mathématique va être suivie, c'est la démarche de changement des axes.

La Figure 3-7 représente trois courbes particulières de l'équation exponentielle générale $y = a(1 - e^{-bx})$, avec leur tangente au point origine (0,0), sachant que toutes les courbes passent par le point origine (0,0) quelle que soit la valeur des paramètres a et b.

La valeur a est le seuil de cette courbe, autrement dit c'est la limite de l'équation $y = a(1 - e^{-bx})$ pour x tend vers l'infini appelée aussi l'asymptote horizontale.

Le tracé de la tangente au point origine (0,0) a une pente égale à « a.b », d'où la valeur de $1/b$ est l'intersection de cette asymptote horizontale avec la tangente pour $x=1/b$, d'un autre

point de vue la tangente de la courbe au point origine (0,0) passe par ce point et le point (1/b,a) et la pente de cette ligne est égale « a.b ».

Les paramètres « a et b » manifestent le seuil de l'équation exponentielle générale $y = a(1 - e^{-bx})$ ou asymptote horizontale comme ils manifestent aussi l'intensité de la croissance de cette courbe.

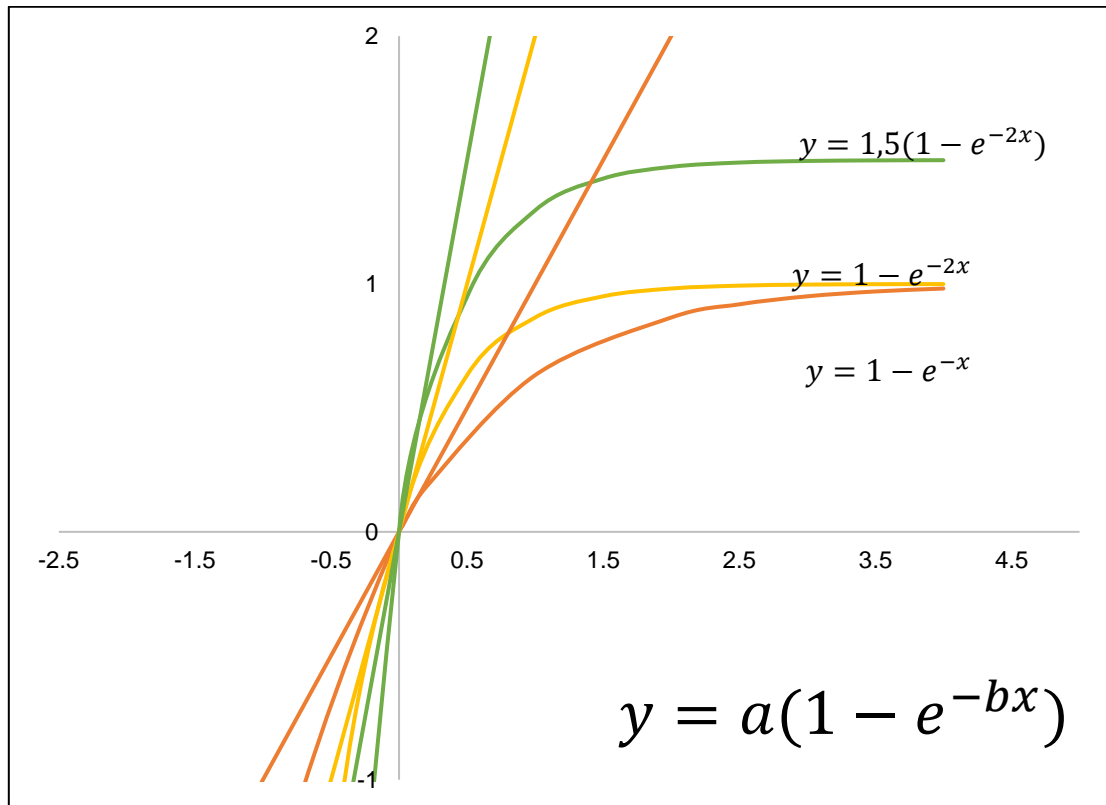


Figure 3-7 Courbes de la loi exponentielle générale $y = a(1 - e^{-bx})$.

Face à un expérimental avec cette allure, la détermination des paramètres a et b pour avoir une équation qui les représentent mathématiquement peut se faire de plusieurs manières aussi. Tout comme l'équation générale décroissante, une de ces manières est de les déterminer avec l'inverse de la méthode qui fait définir ces paramètres.

Comme il y'a une possibilité de déterminer ces paramètres en deux étapes, la première étape est la détermination de la valeur a avec le tracé de l'asymptote horizontale. La deuxième étape est de faire une lecture d'un autre point supposé $(n, f(n))$ pour que

$$b = -\frac{1}{n} \ln \frac{1-f(n)}{a}.$$

Dans le cas où la courbe de l'expérimental ne passe pas par le point origine (0,0), la solution va se résoudre aussi avec la démarche du changement d'axe

L'expérimental de la déformation résiduelle et les contraintes de transformations en fonction des nombres de cycles ont eu une approche qui tend vers les équations $y = a(1 - e^{-bx})$ et $y = ae^{-bx}$ respectivement, d'où la focalisation sur la démarche de détermination des constantes de ces deux équations est présentée.

Les deux sous-sections suivantes vont être consacrées qu'à la définition mathématique de ces deux variantes.

3.5.1 Modèle numérique de la déformation résiduelle

L'analyse expérimentale faite par Kan mentionne que la relation contrainte-déformation devient plus étroite avec l'incrémentation des cycles de charge jusqu'à saturation. Ce phénomène se prolonge systématiquement sur la déformation résiduelle qu'elle va avoir une saturation après un certain cycle et ce plafond de saturation lui-même prend de l'ampleur avec l'augmentation de la vitesse de déformation.

L'objectif à atteindre dans la construction de ce modèle numérique destiné pour la représentation de la déformation résiduelle en fonction des nombres de cycle est d'avoir une loi constitutive pour cette dernière. Cette loi aura des constantes qui changent en fonction du matériau lui-même évidemment et de la vitesse de déformation. Elle est fixe durant un chargement cyclique et une vitesse de déformation précis.

La construction du modèle numérique pour la simulation de la déformation résiduelle en fonction de nombre de cycle va se baser sur l'équation générale exponentielle $y = a(1 - e^{-bx})$ présenté précédemment. Les paramètres a et b vont être déterminés de la même démarche pour chaque vitesse de déformation.

Le variant « x » est changé par « N ». Où N est un nombre naturel qui représente le nombre de cycles. La fonction « y » est nommée « ϵ_{RN} » qui va signifier la déformation résiduelle à chaque cycle « N ».

L'équation générale devient

$$\epsilon_{RN} = a(1 - e^{bN}) \quad 3-13$$

Dans la synthèse de l'équation générale d'exponentielle $y = a(1 - e^{-bx})$, le paramètre a signifie l'asymptote horizontale.

À ce cas d'étude, l'asymptote horizontale est la déformation résiduelle atteinte après saturation, autrement dit c'est la déformation résiduelle maximale que l'AMF peut acquérir à une vitesse de déformation attribuée.

L'équation de la déformation résiduelle devient

$$\epsilon_{RN} = \epsilon_{Rmax}(1 - e^{bN}) \quad 3-14$$

La constante « b » est nommée alpha « α » pour représenter l'évolution de la déformation résiduelle en fonction des nombres de cycles

Pour déterminer cette constante « α » et arriver à la loi qui représente la déformation résiduelle en fonction des nombres de cycles à une vitesse de déformation attribuée $\epsilon_{RN} = \epsilon_{Rmax}(1 - e^{\alpha N})$, il est nécessaire de connaître une valeur de déformation résiduelle à un cycle N, ce cycle va être nommé le cycle « m ». Mathématiquement, c'est connaître un point (m, ϵ_{Rm}), sachant que m soit différente de 0 et différente aussi des cycles qui figurent parmi les cycles après saturation ϵ_{Rmax} .

Au point m, ϵ_{Rm} , l'équation de la déformation résiduelle devient

$$\epsilon_{Rm} = \epsilon_{Rmax}(1 - e^{\alpha m}) \quad 3-15$$

A partir de 3-15

$$e^{\alpha m} = 1 - \frac{\epsilon_{Rm}}{\epsilon_{Rmax}} \rightarrow \alpha m = \ln\left(1 - \frac{\epsilon_{Rm}}{\epsilon_{Rmax}}\right)$$

$$\alpha = \frac{1}{m} \ln\left(1 - \frac{\epsilon_{Rm}}{\epsilon_{Rmax}}\right) \quad 3-16$$

Donc :

$$\epsilon_{RN} = \epsilon_{Rmax}(1 - e^{\alpha N}) \quad 3-17$$

Avec :

$$\alpha = \frac{1}{m} \ln\left(1 - \frac{\epsilon_{Rm}}{\epsilon_{Rmax}}\right) \quad 3-18$$

Dans la courbe expérimentale de la déformation résiduelle en fonction du nombre de cycles, la courbe commence par le (1, ϵ_{R1}). En parallèle, l'équation générale $y = a(1 - e^{-bx})$ débutera par le point origine (0,0) pour l'intervalle $[0, +\infty[$.

Pour garder cet aspect, l'équation de la déformation résiduelle passe par un changement de repère de (0,0) à (1, ϵ_{R1}).

Le changement va être sur

- L'asymptote horizontale qui change de ϵ_{Rmax} à $\epsilon_{Rmax} - \epsilon_{R1}$;
- Le variant N devient N - 1 puisque la courbe va porter un cycle en avant ;
- L'axe des ordonnées se décale d'une valeur ϵ_{R1} , donc ϵ_{RN} devient $\epsilon_{RN} - \epsilon_{R1}$.

À la prise en compte de ces trois derniers points, l'équation de la déformation résiduelle en fonction des nombres de cycles devient

$$\epsilon_{RN} - \epsilon_{R1} = (\epsilon_{Rmax} - \epsilon_{R1})(1 - e^{\alpha(N-1)}) \quad 3-19$$

L'équation de l'évolution de la déformation résiduelle après changement de repère devient

$$\epsilon_{RN} = (\epsilon_{Rmax} - \epsilon_{R1})(1 - e^{\alpha(N-1)}) + \epsilon_{R1} \quad 3-20$$

Cette équation sera valable pour $N = 1$ jusqu'à $+\infty$ et pour $N = 0$, $\epsilon_{RN} = \epsilon_{Rinitial}$

Le paramètre α change aussi après le changement de repère, la nouvelle condition pour le déterminer dans ce cas-là est de connaître un point (m, ϵ_{Rm}) , mais ce m soit différente de 1 et différente aussi des cycles qui figurent parmi les cycles après saturation ϵ_{Rmax} .

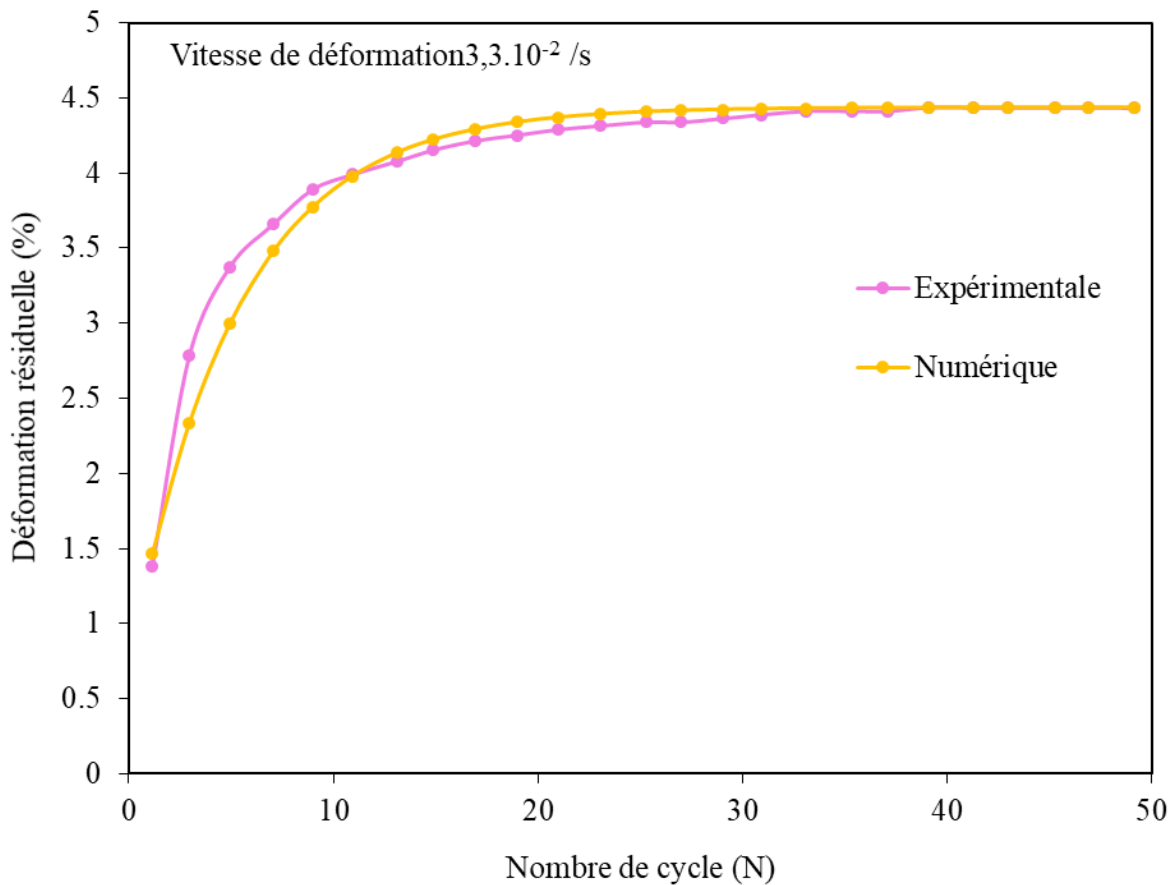


Figure 3-8 Comparaison entre l'expérimentale et le numérique de la courbe déformation résiduelle-nombre de cycle à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2}$ /s.

Au point m, ϵ_{Rm} , l'équation de la déformation résiduelle devient

$$\epsilon_{Rm} = (\epsilon_{Rmax} - \epsilon_{R1})(1 - e^{\alpha(m-1)}) + \epsilon_{R1} \quad 3-21$$

A partir de 3-21,

$$e^{\alpha(m-1)} = 1 - \frac{\epsilon_{Rm} - \epsilon_{R1}}{\epsilon_{Rmax} - \epsilon_{R1}} \rightarrow \alpha(m-1) = \ln\left(1 - \frac{\epsilon_{Rm}}{\epsilon_{Rmax}}\right)$$

$$\alpha = \frac{1}{m-1} \ln\left(1 - \frac{\epsilon_{Rm} - \epsilon_{R1}}{\epsilon_{Rmax} - \epsilon_{R1}}\right) \quad 3-22$$

Pour écrire l'équation de l'évolution de la déformation résiduelle en fonction des nombres de cycles, il y'a lieu de connaître la déformation résiduelle au premier ϵ_{R1} , la déformation résiduelle maximale ϵ_{Rmax} qui peut être atteinte et une déformation résiduelle ϵ_{Rm} , sachant que ce cycle m doit être compris entre ces deux derniers cycles $1 < m < N_{max}$, sachant que le N_{max} est le cycle de début de saturation.

3.5.2 Modèle numérique des contraintes de transformation

Les contraintes de transformation se diminuent avec l'incrémentation des nombres de cycles selon l'étude expérimentale de Kan. Identiquement que la déformation résiduelle, les contraintes de transformation auront une stabilité après un certain nombre de cycle à cause de la saturation de la superélasticité sur le même nombre évidemment et à partir de ces cycles la contrainte de transformation est nommée $\sigma_{tr\ max}$.

L'étendu de cette diminution entre le premier cycle et le cycle où cette contrainte de transformation prend de la stabilité varie selon les quatre points de transformation et aussi selon l'importance de la vitesse de déformation.

Le modèle numérique va définir une loi générale d'évolution de la contrainte de transformation en fonction du nombre de cycles est particulière pour chaque type d'alliage et à chaque vitesse de déformation.

Autrement dit, la construction du modèle numérique pour la simulation de la contrainte de transformation en fonction de nombre de cycle va se baser sur l'équation générale exponentielle $y = ae^{-bx}$, et les paramètres a et b vont être déterminés de la même démarche pour chaque vitesse de déformation.

Le variant « x » est changé par « N », pareil pour l'équation de la déformation résiduelle. La fonction « y » est nommée « σ_{trN} » qui va signifier la contrainte de transformation à chaque cycle « N ».

L'équation générale devient $\sigma_{trN} = ae^{-bN}$.

D'après la synthèse de l'équation générale d'exponentielle $y = ae^{-bx}$, La valeur a est $a = y = f(0)$.

À ce cas d'étude, c'est la contrainte de transformation pour le cycle $N=0$, donc $a = \sigma_{tr0}$ et réellement ce cycle n'existe pas expérimentalement, ce paramètre σ_{tr0} va être pris comme un paramètre fictif pour construire l'équation théorique de l'expérimental pour qu'après va subir un changement de repère qui permet d'accorder entre l'expérimental et le théorique.

L'équation de l'évolution de la contrainte de transformation en fonction des nombres devient

$$\sigma_{trN} = \sigma_{tr0} e^{-bN} \quad 33-23$$

La constante « b » est nommé béta « β » pour représenter l'évolution de la contrainte de transformation en fonction des nombres de cycles.

A une vitesse de déformation attribuée, la loi représentative de la contrainte de transformation en fonction des nombres de cycles est simultanément liée à la détermination de la constante « b ». La connaissance d'une valeur de la contrainte transformation à un cycle N permet de déduire la valeur de « b ». Ce cycle va être nommé le cycle « m » pour garder la même logique précédente et on obtient mathématiquement un point de coordonnées (m, ϵ_{Rm}) , rappelant toujours que m soit différente de 0 et différente aussi des cycles qui figurent parmi les cycles après saturation $\sigma_{tr\max}$.

Au point m, ϵ_{Rm} , l'équation de la contrainte de transformation devient

$$\sigma_{trm} = \sigma_{tr0} e^{-\beta m} \quad 3-24$$

A partir de l'équation 3-24

$$\frac{\sigma_{trm}}{\sigma_{tr0}} = e^{-\beta m} \rightarrow -\beta m = \ln\left(\frac{\sigma_{trm}}{\sigma_{tr0}}\right)$$

$$\beta = -\frac{1}{m} \ln\left(\frac{\sigma_{trm}}{\sigma_{tr0}}\right) \quad 3-25$$

Donc :

$$\sigma_{trm} = \sigma_{tr0} e^{-\beta m} \quad 3-26$$

Avec :

$$\beta = -\frac{1}{m} \ln\left(\frac{\sigma_{trm}}{\sigma_{tr0}}\right) \quad 3-27$$

Cette équation donne une courbe qui débutera du point $(0, \sigma_{tr0})$ avec une descendance exponentielle qui tend vers 0 pour $N \rightarrow +\infty$. D'après l'étude expérimentale, la courbe débutera à partir du cycle $N = 1$ et la courbe tend vers $\sigma_{tr\max}$ pour $N \rightarrow +\infty$, sachant que $\sigma_{tr\max}$ est la contrainte maximale obtenue après un certain nombre de cycles.

Pour avoir une simulation numérique correcte et correspondante à l'expérimental, l'équation de la contrainte de transformation passe par un changement de repère de l'axe des ordonnées de σ_{tr0} à σ_{tr1} et de l'axe des abscisses de $N = 0$ à $N = 1$.

Le changement va être sur

- L'axe des ordonnées se décale d'une valeur de σ_{trmax} , donc σ_{trN} devient $\sigma_{trN} - \sigma_{trmax}$;
- La variante N devient $N - 1$ puisque la courbe va porter un cycle en avant ;
- La valeur de a qui est égale à σ_{tr0} signifie la valeur de l'intersection des abscisses avec la courbe de change à $\sigma_{tr1} - \sigma_{trmax}$.

Suite à ces trois étapes, l'équation de la contrainte de transformation en fonction des nombres de cycle devient

$$\sigma_{trN} - \sigma_{trmax} = (\sigma_{tr1} - \sigma_{trmax})e^{\beta(N-1)} \quad 3-28$$

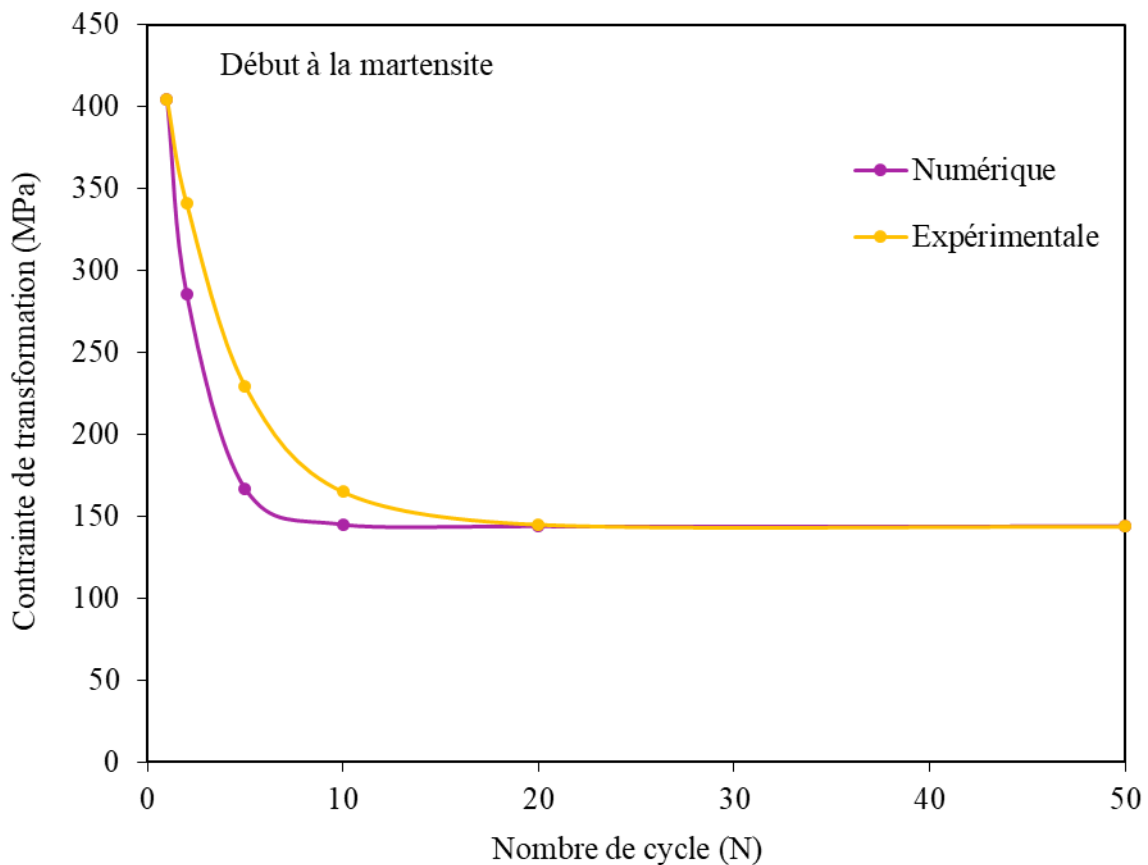


Figure 3-9 Comparaison entre l'expérimental et le numérique de la courbe contrainte de transformation-nombre de cycle à la vitesse de déformation.

L'équation de l'évolution de la contrainte de transformation après changement de repère devient

$$\sigma_{trN} = (\sigma_{tr1} - \sigma_{trmax})e^{\beta(N-1)} + \sigma_{trmax} \quad 3-29$$

Le paramètre β change aussi après le changement de repère, de la même méthode avec la déformation résiduelle, la nouvelle condition pour le déterminer dans ce cas-là est de connaître un point (m, σ_{trm}) , mais ce m soit différent de 1 et différent aussi des cycles qui figurent parmi les cycles après saturation σ_{trmax} .

A partir de 3-29,

$$\frac{\sigma_{trm} - \sigma_{trmax}}{\sigma_{tr1} - \sigma_{trmax}} = e^{\beta(m-1)} \rightarrow \beta(m-1) = \ln\left(\frac{\sigma_{trm} - \sigma_{trmax}}{\sigma_{tr1} - \sigma_{trmax}}\right)$$

$$\beta = \frac{1}{m-1} \ln\left(\frac{\sigma_{trm} - \sigma_{trmax}}{\sigma_{tr1} - \sigma_{trmax}}\right) \quad 3-30$$

L'écriture l'équation de l'évolution de la contrainte de transformation en fonction des nombres de cycles subit les mêmes étapes que l'écriture la déformation résiduelle en fonction des nombres de cycle, la différence entre eux se résume dans l'équation exponentielle de base. A ce cas-là les constantes à déterminer sont la contrainte de transformation au premier cycle σ_{tr1} , la contrainte de transformation maximale σ_{trmax} qui peut être atteinte et une contrainte de transformation σ_{trm} , sachant que ce cycle m doit être compris entre ces deux derniers cycles $1 < m < N \text{ max}$.

3.6 CONCLUSION

Le modèle construit vient d'intégrer la déformation résiduelle et la variation des contraintes de transformations sur les modèles constitutives de base « modèle de Brinson et le modèle d'Auricchio », cette intégration a permis la loi constitutive de prendre en compte l'effet de la vitesse de déformation et les chargements cyclique. Une simulation numérique de la variation de la déformation résiduelle et les contraintes de transformation en fonction des nombres de cycle s'est ajouté à ce modèle pour qu'ils puissent avoir le pouvoir de simuler les différents cas.

La finalité de ce modèle est de simuler des résultats numériques trop proche de l'expérimentale ainsi de faciliter son utilisation dans les programmes de calcul.

Dans le chapitre suivant, une synthèse de ce modèle et son algorithme de simulation vont se présenter, puis l'illustration des résultats afin voir le rapprochement entre le modèle construit et expérimentale ainsi la valeur ajoutée par rapport aux modèles de base.

4 MODELE CONSTRUIT « ALGORITHME RESULTATS DISCUSSION »

4.1 INTRODUCTION

L'introduction de la déformation résiduelle et les contraintes de transformation sur les modèles constitutifs des AMF les plus recommandés dans l'ingénierie a donné un modèle constitutif construit, capable de prendre en considération l'effet de la vitesse de déformation et les chargements cycliques. Et ceci pour un cycle quelconque d'une vitesse de déformation précise. Ce modèle va donner la possibilité de simuler, avec plus de précision, l'AMF dans le cas de l'atténuation sismique et sur une multitude de cas, car il a le pouvoir de représenter les différents résultats de chaque cycle. Cette capacité va encore faciliter l'utilisation d'un simulateur à la base de la méthode d'éléments finis à prendre en compte ces effets sans avoir de lourds résultats expérimentaux.

Dans ce chapitre, une synthèse du modèle construit avec les algorithmes appropriés et structurés pour qu'il soit introduit facilement dans les simulateurs de calcul ou les sous-routines des lois de comportements des matériaux. Aussi, une représentation des résultats numériques du modèle construit exporté à partir de ces algorithmes et conformément au cas de l'étude expérimentale pour voir la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux.

4.2 SYNTHÈSE DU MODELE CONSTRUIT

L'objectif majeur du modèle construit est d'arriver à prendre en compte l'effet de la vitesse de déformation et le chargement cyclique qui ont une influence directe et remarquable sur la déformation résiduelle et les contraintes de transformation. Le modèle construit est bâti à partir du modèle de Brinson et d'Auricchio, et la différence entre ces deux se schématise dans l'évolution de la fraction de la martensite.

La synthèse va s'organiser sur la présentation de la loi constitutive générale, puis sur l'évolution de déformation résiduelle ainsi que l'évolution du volume de la fraction de la martensite selon le modèle de Brinson et aussi selon le modèle d'Auricchio. A la fin, les équations qui définissent l'évolution de la déformation résiduelle et les contraintes de transformation en fonction des nombres de cycles seront abordées.

4.2.1 La loi constitutive

La loi constitutive est la relation directe « contrainte-déformation » en fonction du module d'élasticité, elle était principalement construite à la base de la relation proposée par le modèle de Brinson 1996, tout en introduisant la déformation résiduelle.

La relation contrainte-déformation

équation 3-10

- Le module d'élasticité

équation 2-4

4.2.2 La déformation résiduelle

La déformation résiduelle change de valeur dans le cas de la transformation réversible « de la martensite à l'austénite », et sur les autres cas, elle reste constante.

- À la martensite

équation 3-11

N : nombre de cycles

Pour $N = 1$, $\epsilon_{R_{N-1}} = \epsilon_{R_{initial}}$

- À l'Austénite

Si $\sigma \geq \sigma_s^A$

équation 3-11

Si $\sigma_s^A \geq \sigma \geq \sigma_f^A$

équation 3-12

Si $\sigma_f^A \geq \sigma$

équation 3-11

4.2.3 L'évolution de la fraction de la martensite à la base du modèle de Brinson

La fraction du volume de la martensite est le paramètre clé qui va déterminer la transformation martensitique, dans le modèle construit, elle est restée la même par rapport au modèle original puisqu'elle a prouvé sa fiabilité, comme elle a été favorisée par beaucoup

de chercheurs comme le travail de comparaison entre les modèles publiés par H.Sayyaadi et al en 2012.

- À la martensite

Pour $\sigma_s^M < \sigma < \sigma_f^M$

équation 3-6

- À l'Austénite

Pour $\sigma_f^A < \sigma < \sigma_s^A$

équation 3-7

4.2.4 L'évolution de la fraction de la martensite à la base du modèle d'Auricchio

Pareil au cas du modèle de Brinson, dans le modèle d'Auricchio, la fraction du volume de la martensite était utilisée par d'autres chercheurs, citons le cas de Paulo Silva Lobo et al en 2015. Ce dernier a donné un modèle simplifié à partir du modèle de Brinson et d'Auricchio La différence est que le premier a utilisé des lois cosinus et le deuxième des lois linéaire. Ce modèle a visé que la superélasticité, ce qui est le cas pour le modèle construit.

- À la martensite

Pour $\sigma_s^M < \sigma < \sigma_f^M$

équation 2-19

- À l'Austénite

Pour $\sigma_f^A < \sigma < \sigma_s^A$

équation 2-20

4.2.5 L'évolution de la déformation résiduelle

Le modèle construit a représenté l'évolution de la déformation en fonction de trois valeurs expérimentales avec la fonction exponentielle, celle-ci permet d'avoir des résultats sur tous les cycles possibles sans chercher à avoir d'autres résultats expérimentaux.

équation 3-20

Cette équation sera valable pour $N = 1$ jusqu'à $+\infty$ et pour $N = 0, \epsilon_{RN} = \epsilon_{R\text{initial}}$

équation 3-22

4.2.6 L'évolution de la contrainte de transformation

Le modèle construit a utilisé la même logique dans les contraintes de transformation que dans la déformation, juste que la fonction exponentielle n'est pas la même, car l'une est ascendante jusqu'à saturation et l'autre est descendante jusqu'à saturation.

équation 3-29

équation 3-30

4.3 ALGORITHME

L'algorithme de chaque modèle va être présenté d'une façon universelle, pour qu'après elle peut être adaptée suivant le langage utilisé ou demandé dans les simulateurs de calcul.

Chaque structure d'algorithme va suivre le cheminement suivant :

- Déclaration des constantes ;
- Déclaration des variables ;
- Déclaration de l'état initial ;
- Importation des données ;
- Détermination de la phase charge ou décharge ;
- Calcul des variables selon le modèle ;
- Refaire le calcul ou écrire le nouvel état initial du matériau.

Le but de passer par « importation des données » est de donner au langage utilisé la possibilité de faire un calcul au temps réel, ou la possibilité de faire appel à une sous-routine., L'AMF va subir à chaque boucle de cette opération une nouvelle force appliquée ou déformation exigée durant un calcul transitoire, pas à pas ou autre qui va dépendre du temps.

Dans le cas où une étude sur le comportement de l'AMF est suffisante, la démarche de « importation des données » peut être remplacée par une boucle qui donne la valeur de la contrainte avec un pas régulier pour calculer la déformation ou le contraire, comme il y'a une possibilité d'injecter une série de valeurs de contrainte dans la partie « importation des données » pour avoir leur déformation.

Sur passage de « importation de données », il y'a une possibilité d'ajouter d'autres variantes dans le cas où l'étude demande plus de complexité.

4.3.1 Modèle d'Auricchio

- Déclaration des constantes

$$\sigma_s^M = ; \sigma_f^M = ; \sigma_f^A = ; \sigma_s^A = ; \quad ! \text{ Contrainte de transformation}$$

$$E_A = ; E_M = ; \quad ! \text{ Module d'élasticité à l'austénite et à la martensite}$$

$$\epsilon_L = ; \quad ! \text{ Déformation inélastique}$$

- Déclaration des variables

$$\epsilon ; \quad ! \text{ Déformation du matériau à l'instant } t$$

$$\sigma ; \quad ! \text{ Contrainte appliquée à l'instant } t$$

$$E(\xi) ; \quad ! \text{ Module d'élasticité à l'instant } t$$

$$\xi ; \quad ! \text{ Volume de la martensite à l'instant } t$$

$$\xi_0 ; \quad ! \text{ Volume de la martensite à l'état initial}$$

- Déclaration de l'état initial

Lecture du volume de la martensite à l'état initial ξ_0 ;

- Importation des données

Lecture de la contrainte appliquée σ ;

- Détermination de phase charge ou décharge ;

Si $\sigma(i) - \sigma(i-1) > 0$ donc « cas de chargement »

Si non si $\sigma(i) - \sigma(i-1) < 0$ donc « cas de déchargement »

Fin Si

Si « cas de chargement »

Si $\sigma < \sigma_s^M$ donc

$$\xi = \xi_0$$

si non si $\sigma_s^M \leq \sigma \leq \sigma_f^M$ donc

$$\xi = (1 - \xi_0) \frac{\sigma - \sigma_s^M}{\sigma_f^M - \sigma_s^M} + \xi_0 \quad \xi = (1 - \xi_0) \frac{\sigma - \sigma_s^M}{\sigma_f^M - \sigma_s^M} + \xi_0 \quad 2-19$$

si non si $\sigma_f^M < \sigma$ donc

$$\xi = 1$$

fin si

si non si « cas de déchargement

si $\sigma_s^A < \sigma$

$\xi = 1$

si non si $\sigma_f^A \leq \sigma \leq \sigma_s^A$

$$\xi = \xi_0 \frac{\sigma - \sigma_f^A}{\sigma_s^A - \sigma_f^A} \quad \xi = \xi_0 \frac{\sigma - \sigma_f^A}{\sigma_s^A - \sigma_f^A} \quad 2-20$$

si non si $\sigma < \sigma_f^A$

$\xi = 0$

fin si

fin si

- Calcul du module d'élasticité

$$E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad 2-4$$

- Calcul de la déformation contrainte

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E(\xi)} + (\epsilon_L - \epsilon_R)\xi_S \quad \sigma = E(\xi)(\epsilon - \epsilon_L\xi) + \theta(T - T_0) \quad 2-14$$

- Etat de l'opération

Si opération non terminer

Revenir à Importation des données

Si non si

$\xi_0 = \xi$! Définir le nouvel état du matériau

Fin si

La Figure 4-1 illustre le schéma algorithmique du modèle d'Auricchio

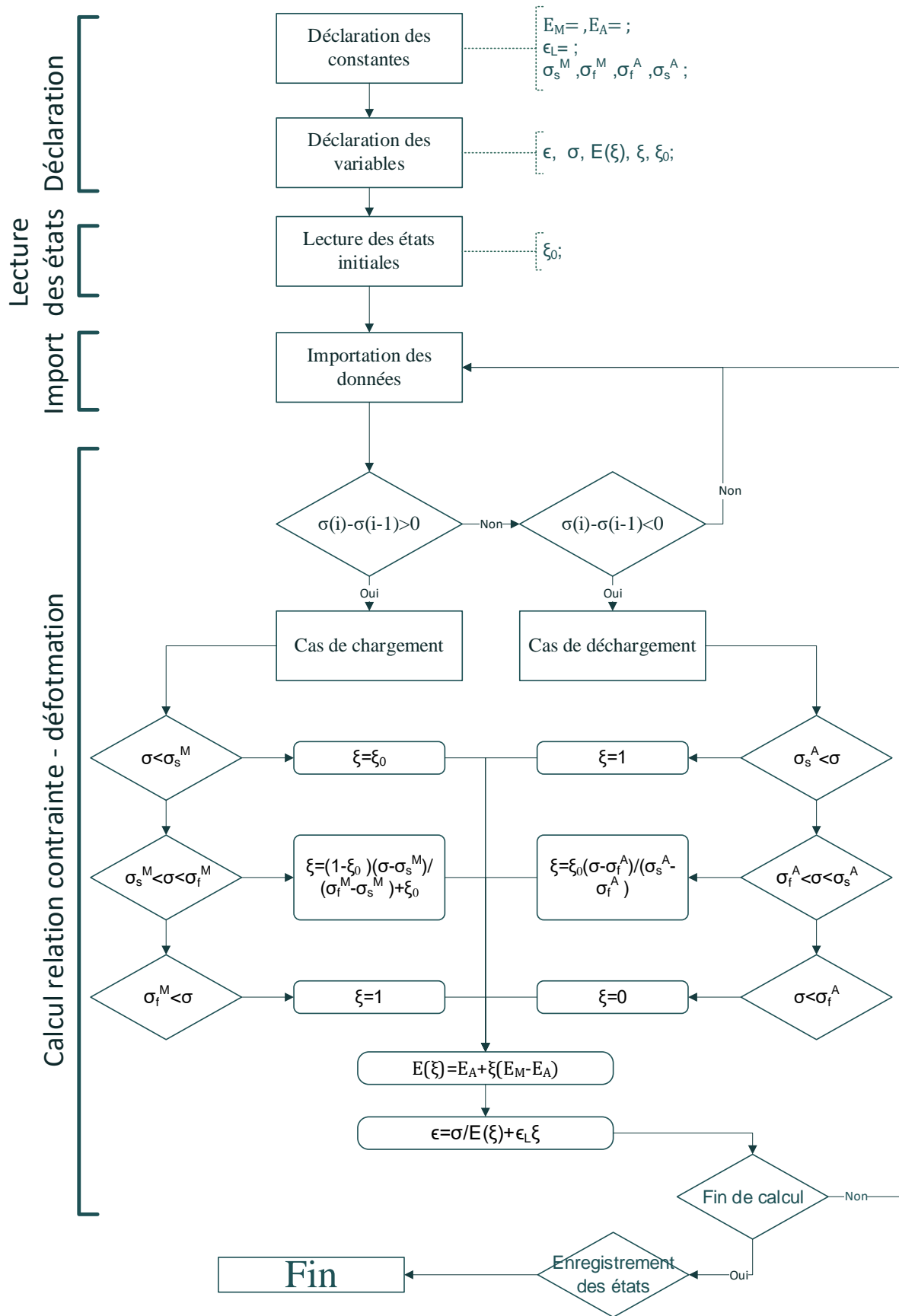


Figure 4-1 Organigramme du modèle d'Auricchio

4.3.2 Modèle Brinson

- Déclaration des constantes

$M_S = ; M_f = ; A_S = ; A_f = ;$! Température de transformation

$\sigma_s^{cr} = ; \sigma_f^{cr} = ;$! Contrainte de transformation

$C_M = ; C_A = ;$! Coefficient

$E_A = ; E_M = ;$! Module d'élasticité à l'austénite et à la martensite

$\epsilon_L = ;$! Déformation inélastique

- Déclaration des variables

$\epsilon ;$! Déformation du matériau à l'instant t

$\sigma ;$! Contrainte appliquée à l'instant t

$T ;$! Température à l'instant t

$T_0 ;$! Température à l'instant initial

$E(\xi) ;$! Module d'élasticité à l'instant t

$\xi ;$! Volume de la martensite à l'instant t

$\xi_0 ;$! Volume de la martensite à l'état initial

$\xi_S ;$! Volume de la martensite dû à la contrainte

$\xi_{S0} ;$! Volume de la martensite dû à la contrainte à l'état initial

$\xi_T ;$! Volume de la martensite dû à la température

$\xi_{T0} ;$! Volume de la martensite dû à la température à l'état initial

$\Delta_{T\varepsilon} ; a_A ; a_M ;$

- Déclaration de l'état initial

Lecture du volume de la martensite à l'état initial ξ_0 , ξ_{S0} et ξ_{T0} ;

- Importation des données

Lecture de la contrainte appliquée σ ;

- Détermination de phase charge ou décharge ;

Si $\sigma(i) - \sigma(i - 1) > 0$ donc « cas de chargement »

Si non si $\sigma(i) - \sigma(i-1) < 0$ donc « cas de déchargement »

Fin Si

- Calcul du volume de la martensite

Si « cas de chargement »

Si $T \leq M_s$ donc

Si $M_f \leq T \leq M_s$ et $T < T_0$ donc

$$\Delta_{T\varepsilon} =$$

Si non

$$\Delta_{T\varepsilon} = \frac{1-\xi_{s0}-\xi_{T0}}{2} \cos[a_M(T - M_f)] + \frac{1-\xi_{s0}+\xi_{T0}}{2}$$

Fin si

Si $\sigma < \sigma_s^{cr}$ donc

$$\xi = \xi_0$$

$$\xi_s = \xi_{s0}$$

$$\xi_T = \xi_{T0}$$

Si non si $\sigma \leq \sigma_f^{cr}$ donc

$$\xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos\left[\frac{\pi}{\sigma_s^{cr}-\sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr}]\right] + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos\left[\frac{\pi}{\sigma_s^{cr}-\sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr}]\right] + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \quad 2-7$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) + \Delta_{T\varepsilon} \quad \xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) + \Delta_{T\varepsilon} \quad 2-8$$

$$\xi = \xi_s + \xi_T$$

Si non

$$\xi = 1$$

$$\xi_s = 1$$

$$\xi_T = 0$$

Fin si

Si non si $T > M_s$

Si $\sigma < \sigma_s^\sigma + C_M(T - M_s)$ donc

$$\xi = \xi_0$$

$$\xi_s = \xi_{s0}$$

$$\xi_T = \xi_{T0}$$

Si non si $\sigma_s^\sigma + C_M(T - M_s) \leq \sigma$ donc

$$\xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_s)] \right\} + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \quad \xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_s)] \right\} + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \quad 2-5$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) \quad \xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) \quad 2-6$$

$$\xi = \xi_s + \xi_T$$

si non si $\sigma < \sigma_f^\sigma + C_M(T - M_s)$ donc

$$\xi = 1$$

$$\xi_s = 1$$

$$\xi_T = 0$$

Fin si

Fin si

si non si « cas de déchargement »

Si $T < A_s$ donc

$$\xi = \xi_0$$

$$\xi_s = \xi_{s0}$$

$$\xi_T = \xi_{T0}$$

Si non si $T > A_s$ donc

Si $\sigma > C_A(T - A_s)$ donc

$$\xi = 1$$

$$\xi_s = 1$$

$$\xi_T = 0$$

Si non si $C_A(T - A_f) \leq \sigma$ donc

$$a_A = \pi / (A_f - A_s)$$

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \left\{ \cos \left[a_A \left(T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] + 1 \right\} \quad \xi = \frac{\xi_0}{2} \left\{ \cos \left[a_A \left(T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] + 1 \right\} \quad 2-9$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad \xi_s = \xi_{s0} - \frac{\xi_{s0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad 2-10$$

$$\xi_s = \xi_{s0} - \frac{\xi_{s0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad \xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad 2-11$$

Si non si $\sigma < C_A(T - A_f)$ donc

$$\xi = 0$$

$$\xi_s = 0$$

$$\xi_T = 0$$

Fin si

Fin si

Fin si

- Calcul du module d'élasticité

$$E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad 2-4$$

- Calcul de la déformation

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E(\xi)} + (\epsilon_L - \epsilon_R)\xi_s \quad \sigma = E(\xi)(\epsilon - \epsilon_L\xi_s) \quad 2-3$$

- Etat de l'opération

Si opération non terminer

Revenir à Importation des données

Si non si

$$\xi_0 = \xi \quad ! \text{ Définir le nouvel état du matériau}$$

Fin si

La *Figure 4-2* schématise l'algorithme du modèle de Brinson

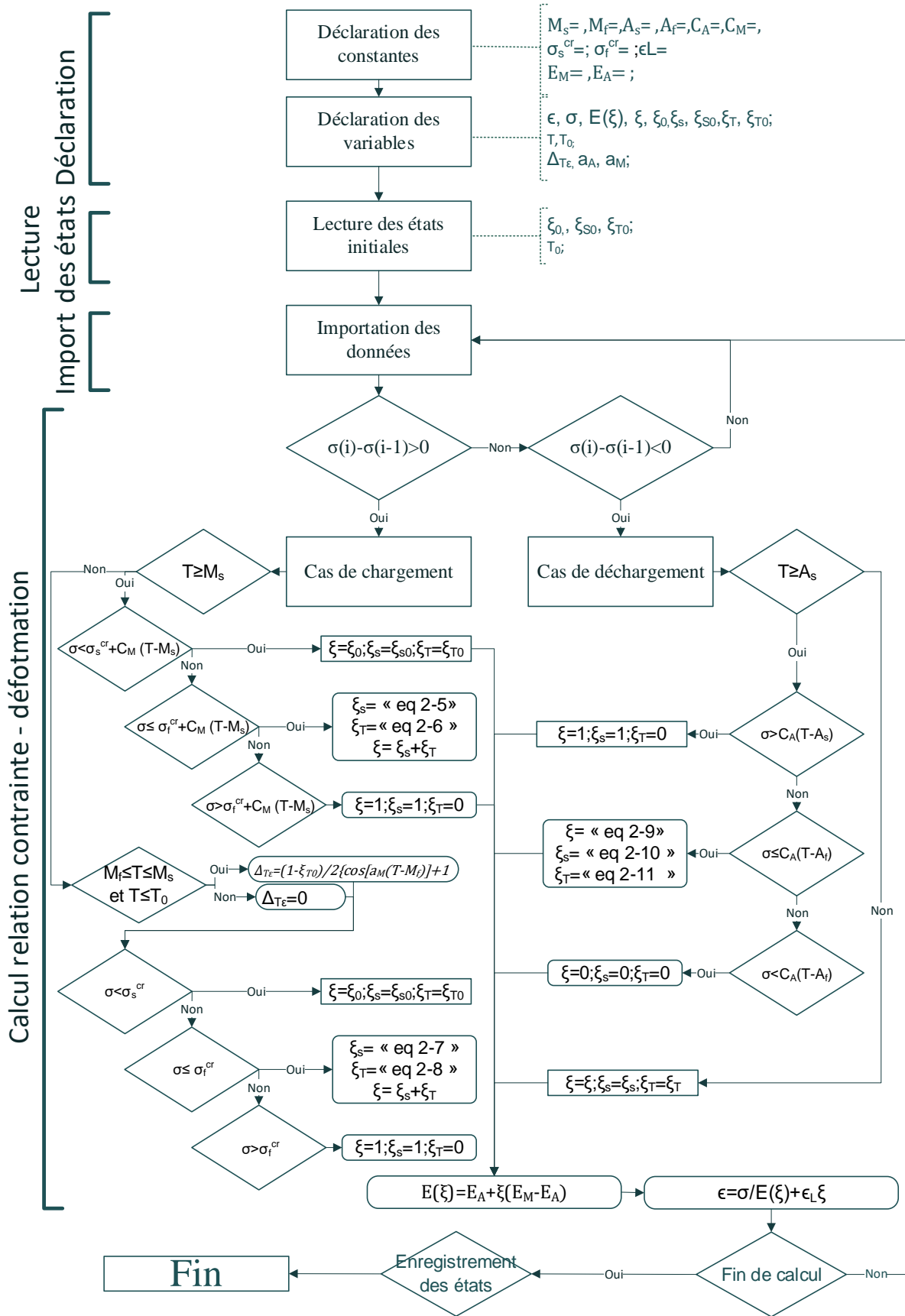


Figure 4-2 Organigramme du modèle de Brinson

4.3.3 Modèle construit

- Déclaration des constantes

$E_A = ; E_M = ;$! Module d'élasticité à l'austénite et à la martensite

$\epsilon_L = ;$! Déformation inélastique

$\epsilon_{R1} = ; \epsilon_{Rmax} = ;$! Déformation résiduelle au premier cycle et cycle max

$m = ; \epsilon_{Rm} = ;$! Cycle m et la déformation résiduelle attribué à ce cycle

- Déclaration des variables

$\epsilon ;$! Déformation du matériau à l'instant t

$\epsilon_R ;$! Déformation résiduelle à l'instant t

$\sigma ;$! Contrainte appliquée à l'instant t

$E(\xi) ;$! Module d'élasticité à l'instant t

$\xi ;$! Volume de la martensite à l'instant t

$\xi_0 ;$! Volume de la martensite à l'état initial

$\sigma_s^M = ; \sigma_f^M = ; \sigma_f^A = ; \sigma_s^A = ;$! Contrainte de transformation

$N ;$! Numéro de cycle

- Déclaration de l'état initial

Lecture de nombre de cycle N initial ;

Lecture du volume de la martensite à l'état initial ξ_0 ;

Lecture de la déformation résiduelle initial ϵ_R ; ! Par défaut $\epsilon_R = 0$

Lecture des contrainte de transformation initial ;

- Calcul de α et β

$$\alpha = \frac{1}{m-1} \ln \left(1 - \frac{\epsilon_{Rm} - \epsilon_{R1}}{\epsilon_{Rmax} - \epsilon_{R1}} \right) \quad \alpha = \frac{1}{m-1} \ln \left(1 - \frac{\epsilon_{Rm} - \epsilon_{R1}}{\epsilon_{Rmax} - \epsilon_{R1}} \right) \quad 3-22$$

$$\beta = \frac{1}{m-1} \ln \left(\frac{\sigma_{trm} - \sigma_{trmax}}{\sigma_{tr1} - \sigma_{trmax}} \right) \quad \beta = \frac{1}{m-1} \ln \left(\frac{\sigma_{trm} - \sigma_{trmax}}{\sigma_{tr1} - \sigma_{trmax}} \right) \quad 3-30$$

$$\sigma_{trN} = (\sigma_{tr1} - \sigma_{trmax}) e^{\beta(N-1)} + \sigma_{trmax} \quad 3-29$$

$$\epsilon_{RN} = \epsilon_{RN} = (\epsilon_{Rmax} - \epsilon_{R1}) (1 - e^{\alpha(N-1)}) + \epsilon_{R1} \quad 3-20$$

- Importation des données

Lecture de la contrainte appliquée σ ;

- Détermination de phase charge ou décharge ;

Si $\sigma(i) - \sigma(i - 1) > 0$ donc

« cas de chargement »

Si non si $\sigma(i) - \sigma(i - 1) < 0$ donc

« cas de déchargement »

Fin Si

- Calcul de la déformation résiduelle

Si « cas de chargement » donc

$$\epsilon_{RN} = \epsilon_{RN-1}$$

Si non si « cas de déchargement » donc

Si $\sigma_s^A < \sigma$

$$\epsilon_{RN} = \epsilon_{RN-1}$$

si non si $\sigma_f^A \leq \sigma$

$$\epsilon_R = \epsilon_{R(N-1)} + (\epsilon_{RN} - \epsilon_{R(N-1)}) \left(1 - \frac{\sigma - \sigma_f^A}{\sigma_s^A - \sigma_f^A}\right) \epsilon_R = \epsilon_{R(N-1)} + (\epsilon_{RN} - \epsilon_{R(N-1)}) \left(1 - \frac{\sigma - \sigma_f^A}{\sigma_s^A - \sigma_f^A}\right) \quad 3-12$$

si non si $\sigma < \sigma_f^A$

$$\epsilon_{RN} = \epsilon_{RN}$$

fin si

Si « cas de chargement »

Si $\sigma < \sigma_s^M$ donc

$$\xi = \xi_0$$

si non si $\sigma \leq \sigma_f^M$ donc

$$\xi = (1 - \xi_0) \frac{\sigma - \sigma_s^M}{\sigma_f^M - \sigma_s^M} + \xi_0 \xi = (1 - \xi_0) \frac{\sigma - \sigma_s^M}{\sigma_f^M - \sigma_s^M} + \xi_0 \quad 2-19$$

si non si $\sigma_f^M < \sigma$ *donc*

$$\xi = 1$$

fin si

si non si « cas de déchargement »

si $\sigma_s^A < \sigma$

$$\xi = 1$$

si non si $\sigma_f^A \leq \sigma$

$$\xi = \xi_0 \frac{\sigma - \sigma_f^A}{\sigma_s^A - \sigma_f^A} \quad \xi = \xi_0 \frac{\sigma - \sigma_f^A}{\sigma_s^A - \sigma_f^A} \quad 2-20$$

si non si $\sigma < \sigma_f^A$

$$\xi = 0$$

fin si

fin si

- Calcul du module d'élasticité

$$E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad 2-4$$

- Calcul de la déformation

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E(\xi)} + \xi_S(\epsilon_L - \epsilon_R) + \epsilon_R \quad \epsilon = \frac{\sigma}{E(\xi)} + \xi(\epsilon_L - \epsilon_R) + \epsilon_R \quad 3-10$$

- Etat de l'opération

Si opération non terminer donc

Revenir à Importation des données

Si non si

$$\xi_0 = \xi$$

$$\xi_s = \xi_{s0}$$

$$\xi_T = \xi_{T0} \quad ! \text{ Définir le nouvel état du matériau}$$

Fin si

La Figure 4-3 résume l'algorithme du modèle construit

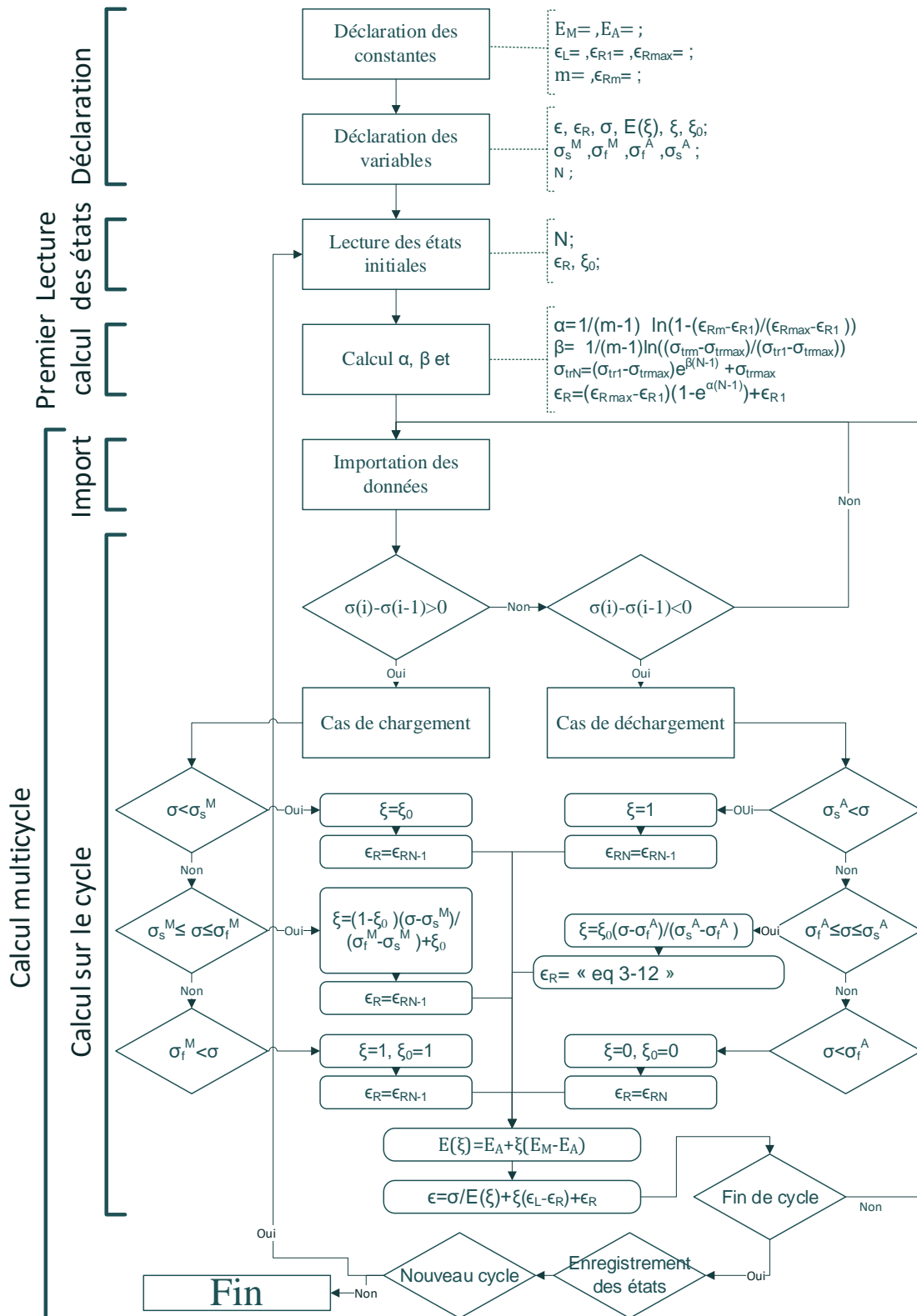


Figure 4-3 Organigramme du modèle construit

4.4 RESULTAT ET DISCUSSIONS

Le modèle construit vient d'introduire l'effet de la vitesse de déformation et le chargement cyclique sur les modèles constitutifs des AMF les plus utilisés dans l'ingénierie civile.

Afin de concrétiser cette introduction, la première étape s'est qualifiée de donner au modèle construit de faire apparaître la déformation résiduelle et la variation des contraintes de transformation avec l'incrément des chargements cycliques à une vitesse de déformation définie. La seconde étape est la représentation numérique de la déformation résiduelle et la contrainte de transformation en fonction des nombres de cycles à une vitesse de déformation définie.

Pour voir l'intérêt de ce modèle construit et la valeur ajoutée par rapport au modèle de base, la représentation des résultats va débiter par une comparaison de la relation contrainte-déformation entre le modèle origine, le modèle construit et l'expérimental de Kan à une vitesse de déformation supérieure et l'autre inférieure. Les valeurs de la déformation résiduelle et la contrainte de transformation en fonction du nombre de cycles vont être à partir des résultats expérimentaux et non pas à partir des résultats du modèle numérique proposé afin de voir réellement la fiabilité du modèle construit à l'introduction de la déformation résiduelle et les contraintes de transformation sur les lois constitutives.

Le second résultat est de voir les résultats graphiques de la simulation de la déformation résiduelle et les contraintes de transformation en fonction des nombres de cycles et faire une comparaison entre l'expérimental et le numérique. Les résultats numériques vont se paramétrer sur trois valeurs, $m=2$, $m=5$ et $m=10$. Ce paramètre m est le cycle à définir expérimentalement pour écrire les équations numériques. Ce paramétrage a été choisi pour désigner quel cycle m à définir pour s'approcher le plus des résultats expérimentaux.

Pour voir l'influence et l'impact du cycle m sur la relation contrainte-déformation, deux vitesses de déformations sont traitées $3,3 \cdot 10^{-2}/s$ et $1,0 \cdot 10^{-3}/s$ sur six cycles (1, 2, 5, 10, 20 et 50). La comparaison se fait en affrontant les valeurs numériques des déformations résiduelles et les contraintes de transformation pour $m=2$, $m=5$ et $m=10$ aux valeurs expérimentales.

Une autre comparaison va être présentée également pour justifier le modèle numérique des deux paramètres cités plus haut. Il s'agit de la relation contrainte-déformation donnée par l'expérimental de Kan [47] et l'autre celle du modèle construit, avec le choix du cycle m le plus représentatif qui a été déduit.

L'intérêt majeur du modèle construit est d'arriver à simuler le comportement des AMF durant une excitation dynamique sur tous les cycles parcourus avec une vitesse de déformation

importante. Pour cet égard, une simulation de la contrainte-déformation des AMF sur tous les cycles de 1 à 50 va être présentée et comparée avec les conclusions tirées des résultats expérimentaux, afin de tirer une conclusion sur la fiabilité du modèle construit.

Les Figure 4-4 et Figure 4-5 représentent un comparatif des courbes contrainte-déformation cycliques entre l'étude expérimentale de Kan présentée dans le chapitre 2, le modèle original et le modèle construit. Ceci pour les deux vitesses de déformation $1,1 \cdot 10^{-3}/s$ et $3,3 \cdot 10^{-2}/s$. Les différents graphes représentés correspondent aux cycles de chargement $N=1, 2, 5, 10, 20$ et 50 .

Les résultats expérimentaux présentés sur les deux figures (Figure 4-4 et Figure 4-5) sont éventuellement les mêmes. Ceux qui ont été présentés dans le chapitre 2 « Figure 2-4 », sauf que les vitesses de déformation ont été ciblées.

Les résultats du modèle original et le modèle construit présentés sur la Figure 4-4 et la Figure 4-5 sont basés sur les constantes du matériau tirées de l'étude expérimentale de Kan. La différence entre les deux modèles est que le modèle construit prend en plus la déformation résiduelle et les contraintes de transformation.

L'ensemble des graphes de la Figure 4-4 montre clairement la convergence des courbes contrainte-déformation du modèle construit avec l'expérimental de Kan sur les différents cycles de chargement à la vitesse de déformation $1,1 \cdot 10^{-3}/s$. Comme il est montré que cette convergence n'est pas approuvée avec le modèle original et cette non convergence se manifeste plus avec l'incrémentement des cycles.

La déformation résiduelle se progresse avec le nombre de cycle de charge parcouru, et les contraintes de transformation diminue, considérablement la contrainte de transformation de la fin à la martensite. Ces points conclus par Kan dans son étude expérimentale sont respectés dans le modèle construit. Ce modèle vient d'ajouter sur les lois constitutives des modèles originaux proposés avant la considération de ces deux paramètres « déformation résiduelle – contrainte de transformation » qui sont fortement gouvernés par la vitesse de déformation et les chargements cycliques d'où l'objectif primaire du modèle construit. L'étude expérimentale de Kan a montré que le chargement cyclique provoque une dégénération de la superélasticité et un étirement de la courbe contrainte-déformation jusqu'à saturation. Ces deux majeurs répercussions du chargement cyclique et la déformation résiduelle ont été approuvées avec le modèle construit, contrairement au modèle original.

Sur le cycle $N=1$ à la vitesse de déformation $1,1 \cdot 10^{-3}/s$ représenté dans la Figure 4-4, le modèle construit, le modèle original et l'expérimental de Kan ont eu un rapprochement dans leur courbes contrainte-déformation sur le palis de chargement et sur la majorité du palis de déchargement.

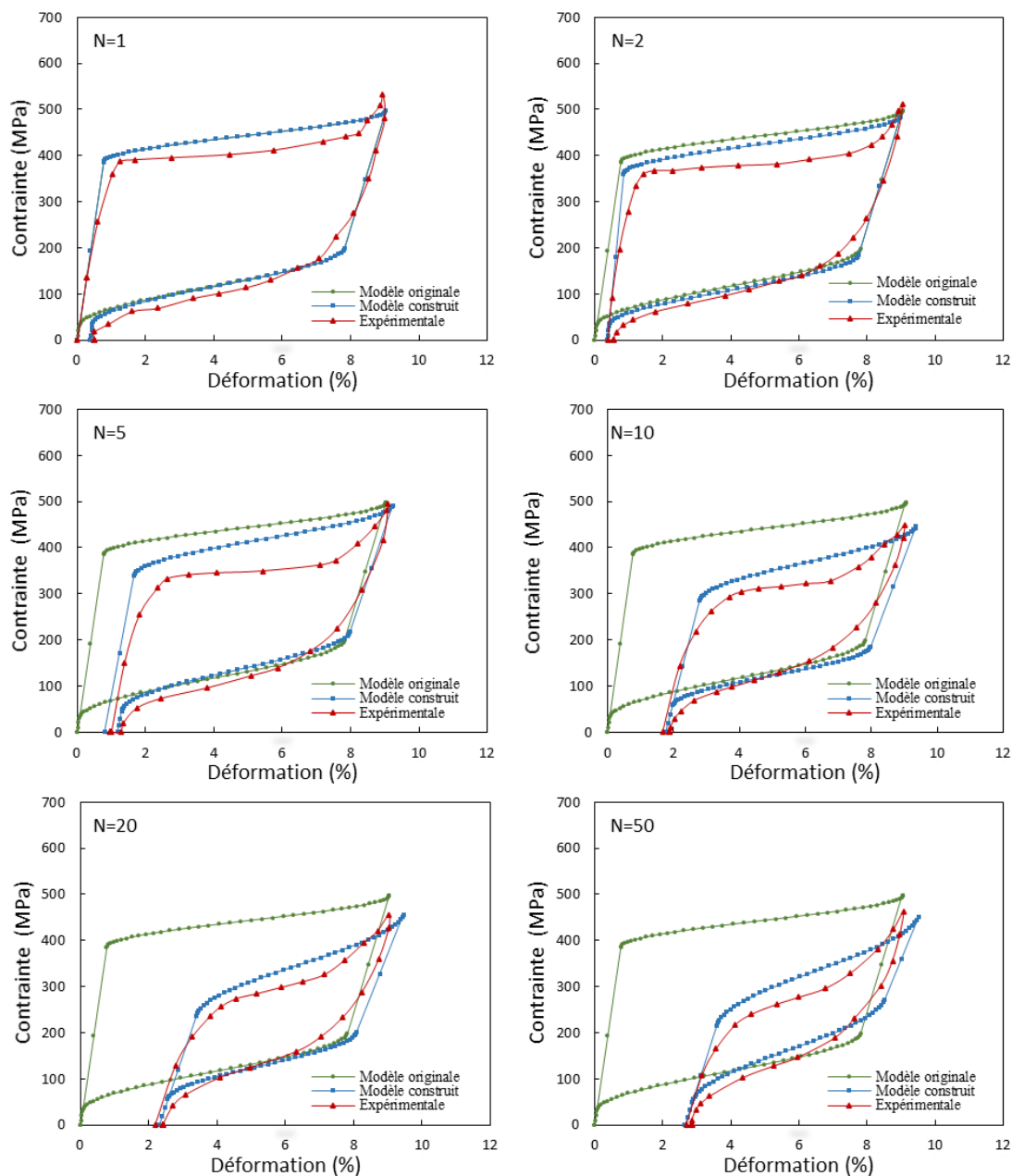


Figure 4-4 Comparaison entre le modèle original, le modèle construit et l'expérimental de la courbe contrainte-déformation à la vitesse de déformation $1,1 \cdot 10^{-3}$.

A la fin de la transformation à l'austénite, le modèle original commence à prendre la différence. Ce phénomène s'explique par le fait que les contraintes de transformation ne changent pas sur le premier cycle et la déformation résiduelle a commencé à se générer au début de la transformation à l'austénite et s'est totalement générée à la fin de la transformation à l'austénite. Sur le N=2, la différence commence à apparaitre sur la diminution de la contrainte de transformation et l'accumulation de la déformation résiduelle simultanément dans le modèle construit et l'expérimental de Kan et aucun changement dans

le modèle original. Le même phénomène et la même conclusion tirée sur le modèle construit, le modèle original et l'expérimental de Kan se projettent sur les cycles N=5 et 10 jusqu'à une saturation qui débutera au cycle N=20.

Des petites indifférences existent entre le modèle construit et l'expérimental de Kan sur les contraintes de transformation et qui ne sont pas importants par rapport à la différence manifestée entre le modèle original et l'expérimental. Ces petites indifférences peuvent être dues à cause de plusieurs possibilités, incertitude sur l'extraction des résultats expérimentaux des contraintes de transformation, variation des modules d'élasticité à l'austénite et à la martensite E_A et E_M , comme il y'a une possibilité de la variation de déformation inélastique. Ces deux derniers font naître une nouvelle problématique causée par la vitesse de déformation et le chargement cyclique. La déformation résiduelle n'a pas eu une indifférence dans le cas de cette vitesse de déformation, et dans le cas contraire, cette indifférence peut être causer mathématiquement que par une incertitude d'extraction des résultats et les autres suppositions restent négligeables.

La Figure 4-5 vient d'approuver les démonstrations et les conclusions tirées de la figure précédente qui représente la faible vitesse de déformation de cette étude. En revanche, cette figure représente la vitesse de déformation la plus élevée. La forte vitesse de ce présent cas a procuré une intense différence entre les résultats du premier cycle et du dernier cycle de la déformation résiduelle et les contraintes transformations. Cette intensité vient de confirmer l'approche de la courbe contrainte-déformation du modèle construit en vers l'expérimental, et la stérilité du modèle origine sur tous les cycles de chargement, comme elle vient de confirmer l'accumulation de déformation résiduelle, la diminution des contraintes de transformation, la dégénération de superélasticité et l'étroitement de la courbe jusqu'à saturation.

Le phénomène de l'accumulation de la déformation résiduelle et la diminution des contraintes de transformation avec l'incrémentation des cycles de charge montrés sur les différents graphes de la Figure 4-4 et la Figure 4-5 s'est déroulé de la même façon. Sauf qu'à cette vitesse de déformation, l'intensité de l'évolution est plus forte que la précédente vitesse de déformation.

Les petites indifférences du modèle construit sont aussi les mêmes, exceptionnellement dans le cycle 2 et 5, où la déformation résiduelle dans le résultat expérimental du cycle 2 a été importante par rapport au modèle construit et elle est plus faible dans le cas du cycle 5. Par contre, le modèle construit fait montrer la déformation résiduelle sur le même intervalle que l'expérimentale « cycle 2, entre 1,2 à 2 », « cycle 5, entre 2,8 et 3,6 », « cycle 10 entre 3,8 et 4 » et « cycle 20 entre 4 et 4,2 ». Cette indifférence est fortement due à l'incertitude

de l'extraction des résultats expérimentaux. La valeur de la déformation résiduelle dans le cycle 2 a été reportée sur un autre cycle de 3 à 5, d'où la récupération de la déformation résiduelle sur le cycle 5 dans le modèle construit et qui ne figure pas dans l'expérimental.

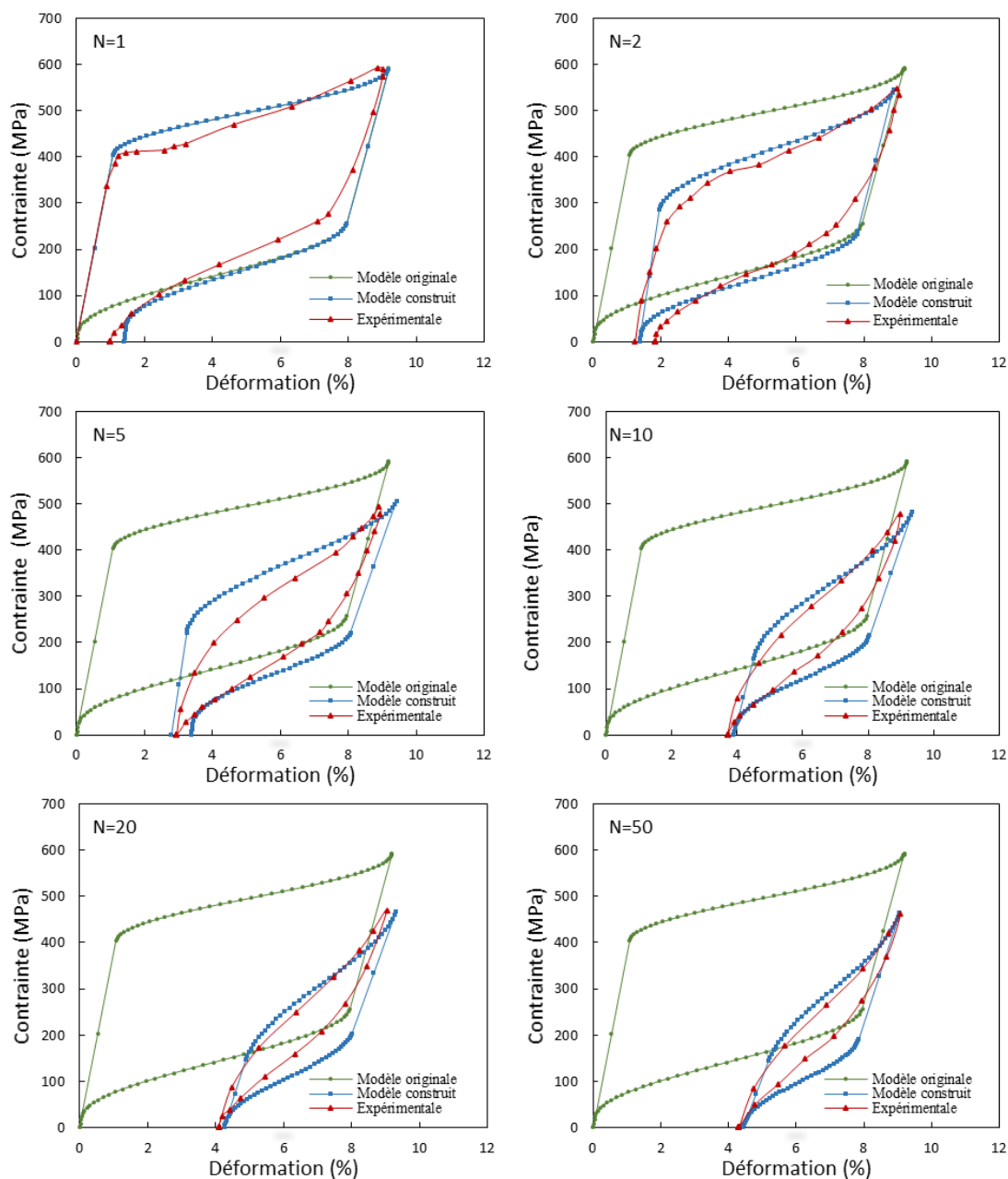


Figure 4-5 Comparaison entre le modèle original, le modèle et l'expérimental de la courbe contrainte-déformation à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2}$.

Ces deux figures ont prouvé la capacité du modèle construit à assurer la génération de la déformation résiduelle et la diminution de la contrainte de transformation en fonction du chargement cyclique. La dégénération de la superélasticité et l'étroitement de la courbe

jusqu'à saturation ont été clairement approuvés dans ce modèle construit. Le modèle original en parallèle n'a pas réussi ces objectifs. Alors que l'effet de la vitesse de déformation et les chargements cycliques sont considérablement pris en compte dans le modèle construit.

Les figures ci-dessous représentent un comparatif de la courbe déformation résiduelle-nombre de cycles entre l'expérimental de Kan et les résultats de la simulation numérique pour $m=2$, $m=5$ et $m=10$, sur quatre différentes vitesses de déformation. Elles sont organisées respectivement, Figure 4-6, Figure 4-7, Figure 4-8 et Figure 4-9 pour les vitesses suivantes $3.3 \times 10^{-2}/s$, $1.1 \times 10^{-2}/s$, $3.3 \times 10^{-3}/s$, et $1.1 \times 10^{-3}/s$.

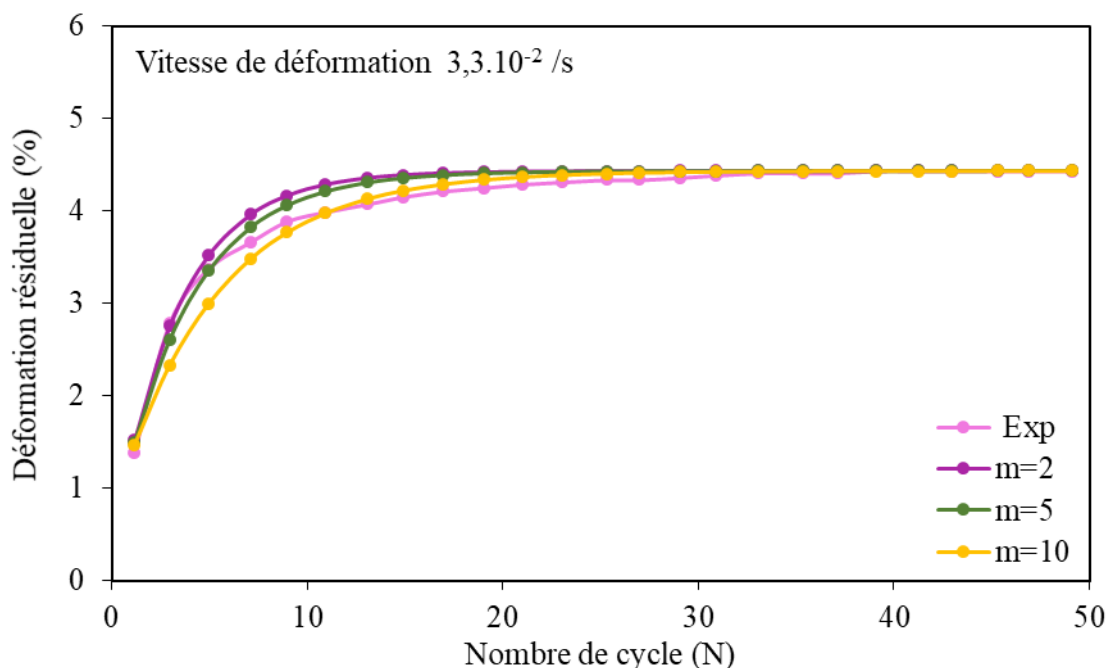


Figure 4-6 Comparaison entre l'expérimental et simulation numérique de la relation Déformation résiduelle-nombre de cycles pour $m=2,5$ et 10 à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2}$.

La courbe déformation résiduelle-nombre de cycles du modèle numérique proposé dans le modèle construit s'approche des résultats expérimentaux de l'étude de Kan sur les quatre vitesses de déformation et pour les trois valeurs de m ($m=3$, $m=5$, $m=10$).

En outre, si nous comparons entre les courbes de chaque figure ($m=3$, $m=5$, $m=10$), il existe de légères différences entre celles-ci. Cette différence est plus lisible pour la vitesse la plus intense « 3.3×10^{-2} ». Les résultats de la déformation résiduelle sur le cycle 1 et le cycle maximum sont des résultats identiques et similaires entre le numérique et l'expérimental quel que soit le paramètre m , aussi le résultat du cycle lui-même autrement dit le cycle 1 et le cycle max. Mathématiquement, sur ces cycles, il y'aura une exactitude car le modèle numérique se base sur ces trois points pour qu'il soit construit.

Par contre, les résultats numériques des autres cycles sont des résultats inférieurs aux résultats expérimentaux pour les cycles inférieurs à m . En revanche, ils deviennent supérieurs pour les cycles supérieurs à m .

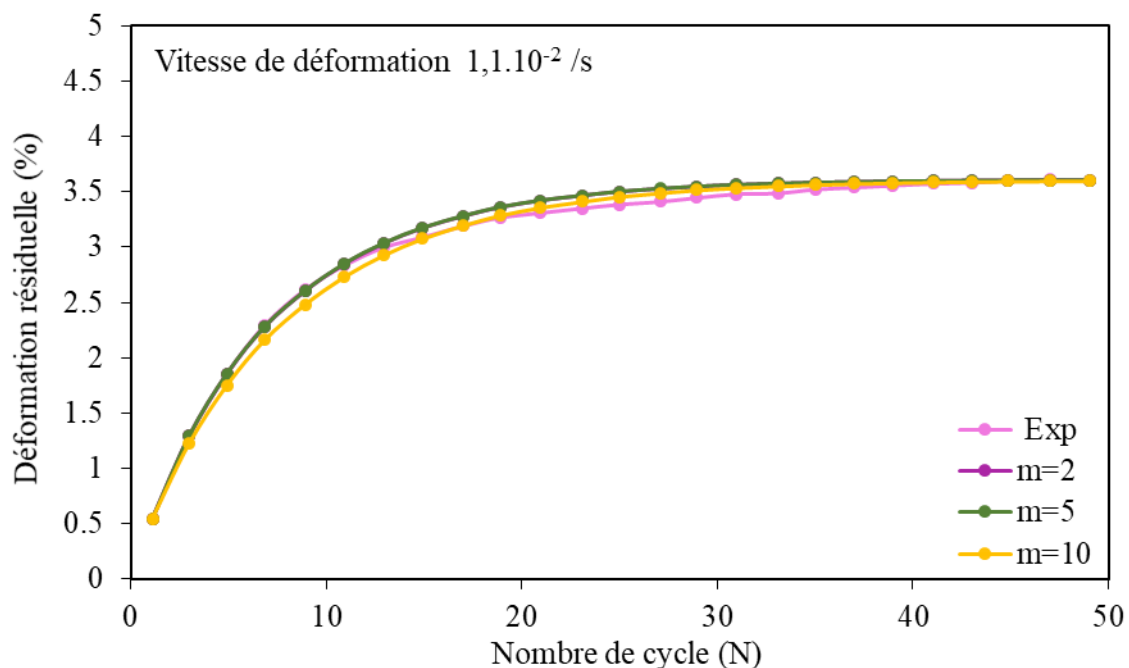


Figure 4-7 Comparaison entre l'expérimental et simulation numérique de la relation Déformation résiduelle-nombre de cycles pour $m=2,5$ et 10 à la vitesse de déformation $1,1.10^{-2}$.

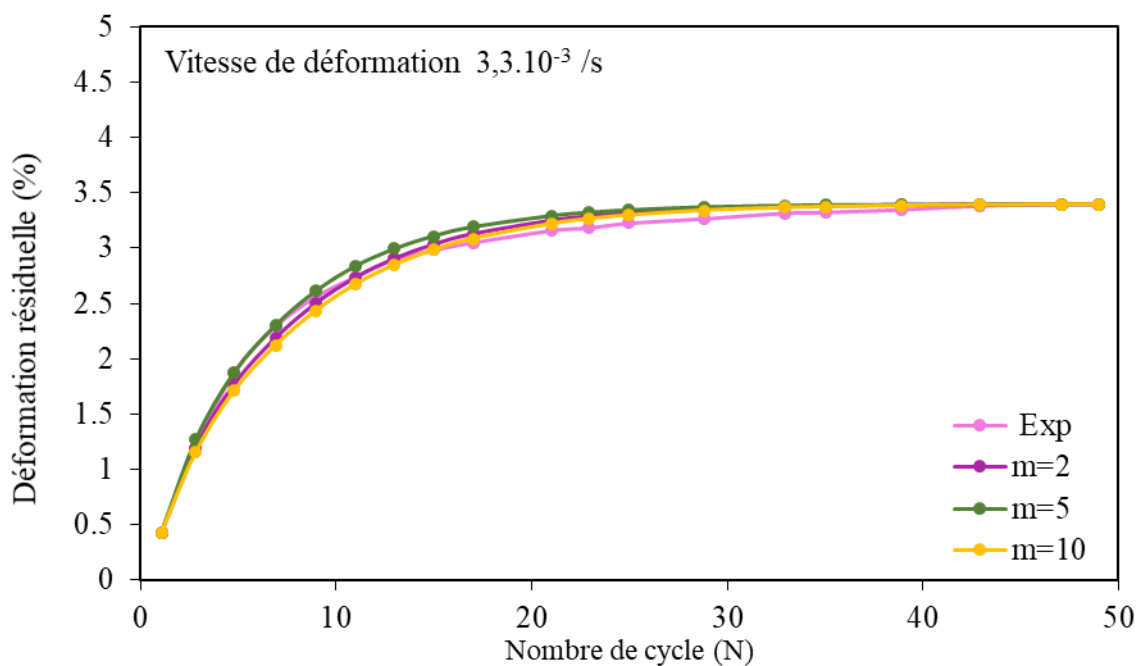


Figure 4-8 Comparaison entre l'expérimental et simulation numérique de la relation Déformation résiduelle-nombre de cycles pour $m=2,5$ et 10 à la vitesse de déformation $3,3.10^{-3}$.

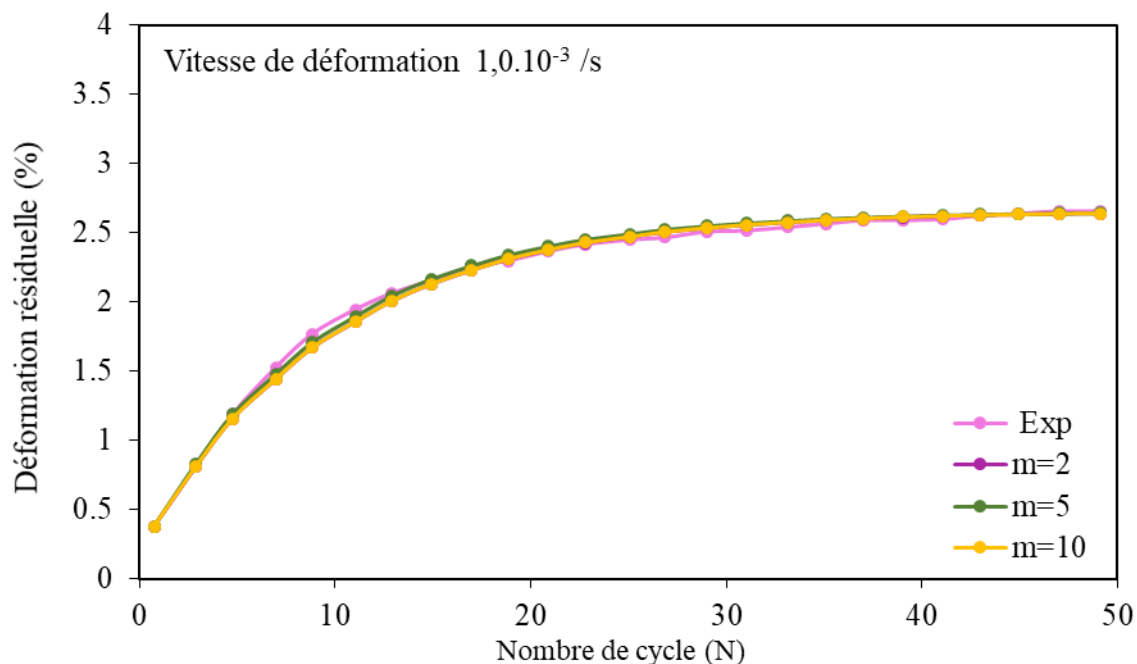


Figure 4-9 Comparaison entre l'expérimental et simulation numérique de la relation Déformation résiduelle-nombre de cycles pour $m=2,5$ et 10 à la vitesse de déformation $1,1 \cdot 10^{-3}$.

L'ensemble des résultats avec $m=10$ se rapproche plus par rapport aux résultats construits avec les autres cycles m .

Le comparatif entre l'expérimentale de Kan et les résultats de la simulation numérique pour $m=2$, $m=3$ et $m=5$ de la courbe contrainte de transformation-nombre de cycle à la vitesse de déformation $3.3 \cdot 10^{-2}$ /s est illustré dans les Figure 4-10, Figure 4-11, Figure 4-12 et Figure 4-13 respectivement pour la contrainte de transformation au début de la martensite, la fin à la martensite, le début à l'austénite et la fin de l'austénite. La courbe contrainte transformation-nombre de cycles du modèle numérique proposé dans le modèle construit s'approche des résultats expérimentaux de l'étude de Kan sur les quatre points contraints de transformation et pour les trois valeurs de m ($m=3$, $m=5$, $m=10$), similaires aux résultats de la déformation résiduelle avec en courbe descendante au lieu d'ascendante.

Aussi de légères indifférences entre les résultats du modèle numérique sont présentés à la différence du cycle m choisi, et de la même attitude pour les quatre points contraints de transformation.

Pour le cas de la contrainte de transformation à la martensite, les résultats sont plus représentatifs parce qu'il y a une différence importante entre le cycle 1 et le cycle maximum.

Mathématiquement et avec l'approbation graphique, les résultats numérique et expérimental sont similaires pour le cycle 1, cycle maximum et aussi sur le cycle m .

Contrairement au cas de la déformation résiduelle, les résultats numériques sur les autres cycles sont des résultats supérieurs aux résultats expérimentaux pour les cycles inférieurs à m et des résultats inférieurs pour les cycles supérieurs à m .

L'ensemble des résultats avec $m=10$ se rapproche plus par rapport aux résultats construits avec les autres cycles m . A ce cas d'étude, le cycle $m=10$ reste favorable pour définir la déformation résiduelle et la contrainte de transformation.

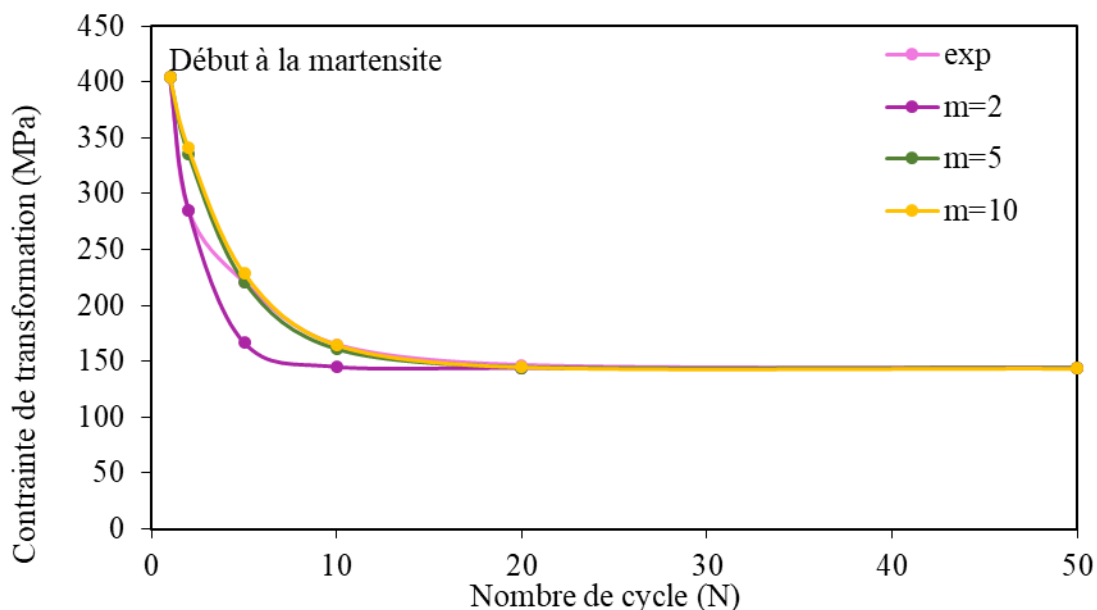


Figure 4-10 Comparatif entre l'expérimental de KAN et la simulation numérique pour $m=2,5$ et 10 de la relation Contrainte de transformation-nombre de cycle « cas début à la martensite ».

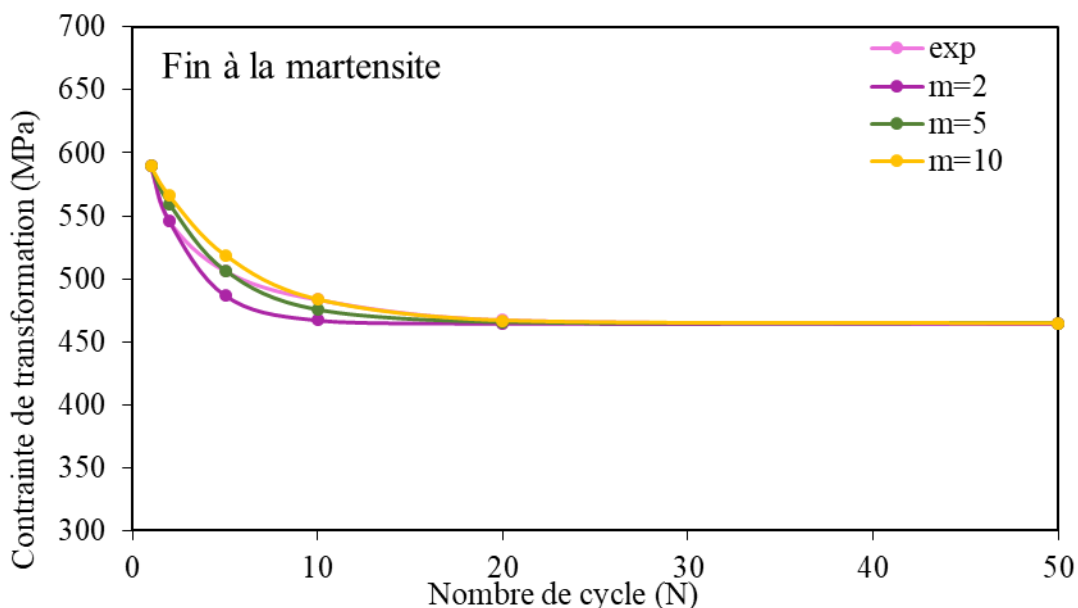


Figure 4-11 Comparatif entre l'expérimental de KAN et la simulation numérique pour $m=2,5$ et 10 de la relation Contrainte de transformation-nombre de cycle « cas fin à la martensite ».

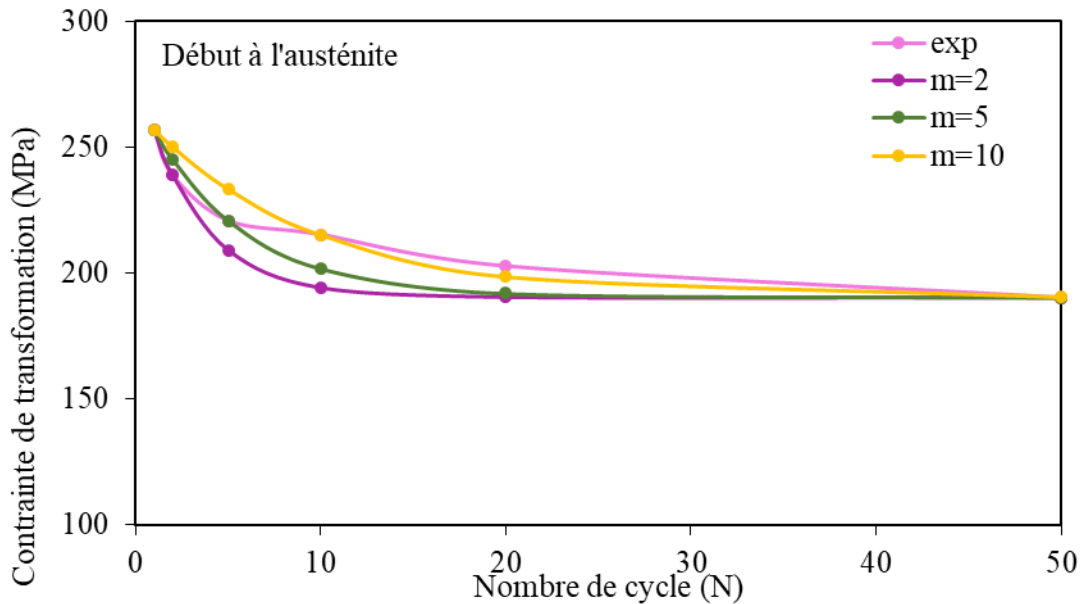


Figure 4-12 Comparatif entre l'expérimental de KAN et la simulation numérique pour $m=2,5$ et 10 de la relation Contrainte de transformation-nombre de cycle « cas début à l'austénite ».

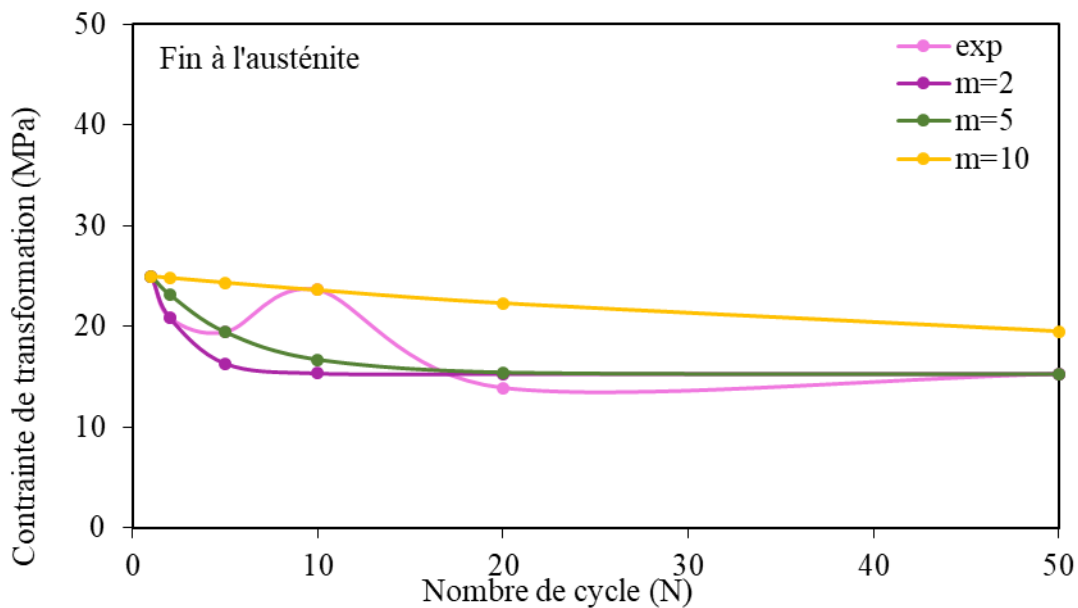


Figure 4-13 Comparatif entre l'expérimental de KAN et la simulation numérique pour $m=2,5$ et 10 de la relation Contrainte de transformation-nombre de cycle « cas fin à l'austénite ».

Pour voir l'influence du choix du cycle m sur les résultats finaux, la Figure 4-14 vient regrouper les résultats de la simulation contrainte-déformation du modèle construit à une vitesse de déformation 3.3×10^{-2} (pour les cycles 1, 2, 5, 10, 20 et 50) en ciblant à chaque graphe une comparaison entre l'utilisation des valeurs de la contrainte de transformation σ_{tr} et la déformation résiduelle ϵ_{RN} à partir de l'étude expérimentale de Kan (voir Figure 2-5,

Figure 2-7) et les valeurs de la simulation numérique des contraintes de transformation et de la déformation résiduelle pour les valeurs de $m=2$, $m=5$ et $m=10$.

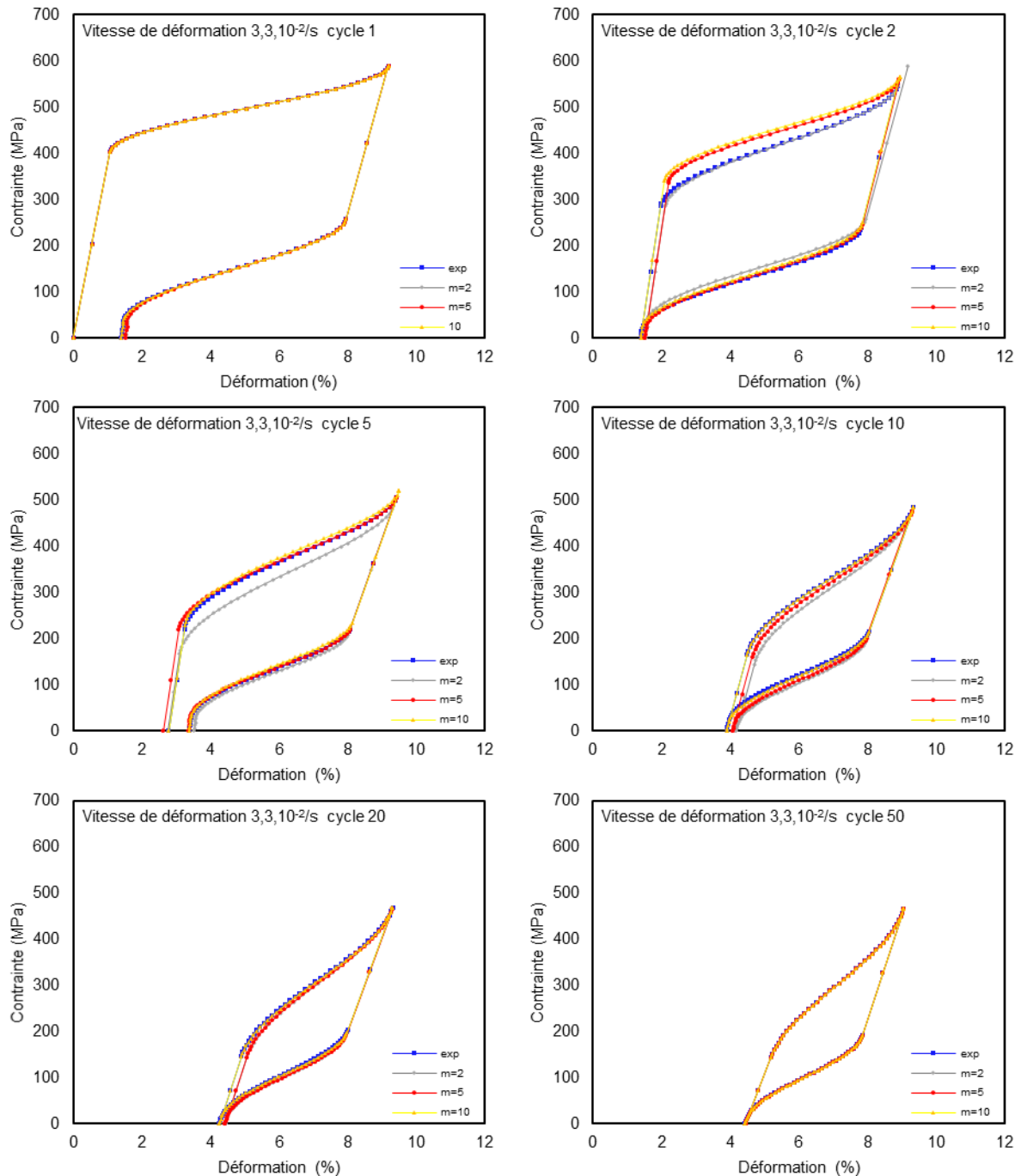


Figure 4-14 Relation contrainte-déformation du modèle construit à la vitesse $3,3 \cdot 10^{-2}$, avec les valeurs m expérimentales, $m=2$, $m=5$ et $m=10$, sur les cycles 1, 2, 5, 10, 20 et 50.

En premier lieu, la Figure 4-14 vient nous montrer que les résultats entre l'utilisation de la déformation résiduelle et la contrainte de transformation expérimentale et celle du modèle numérique pour simuler la courbe contrainte-déformation sont identiques sur le cycle 1 et le cycle 20 et 50.

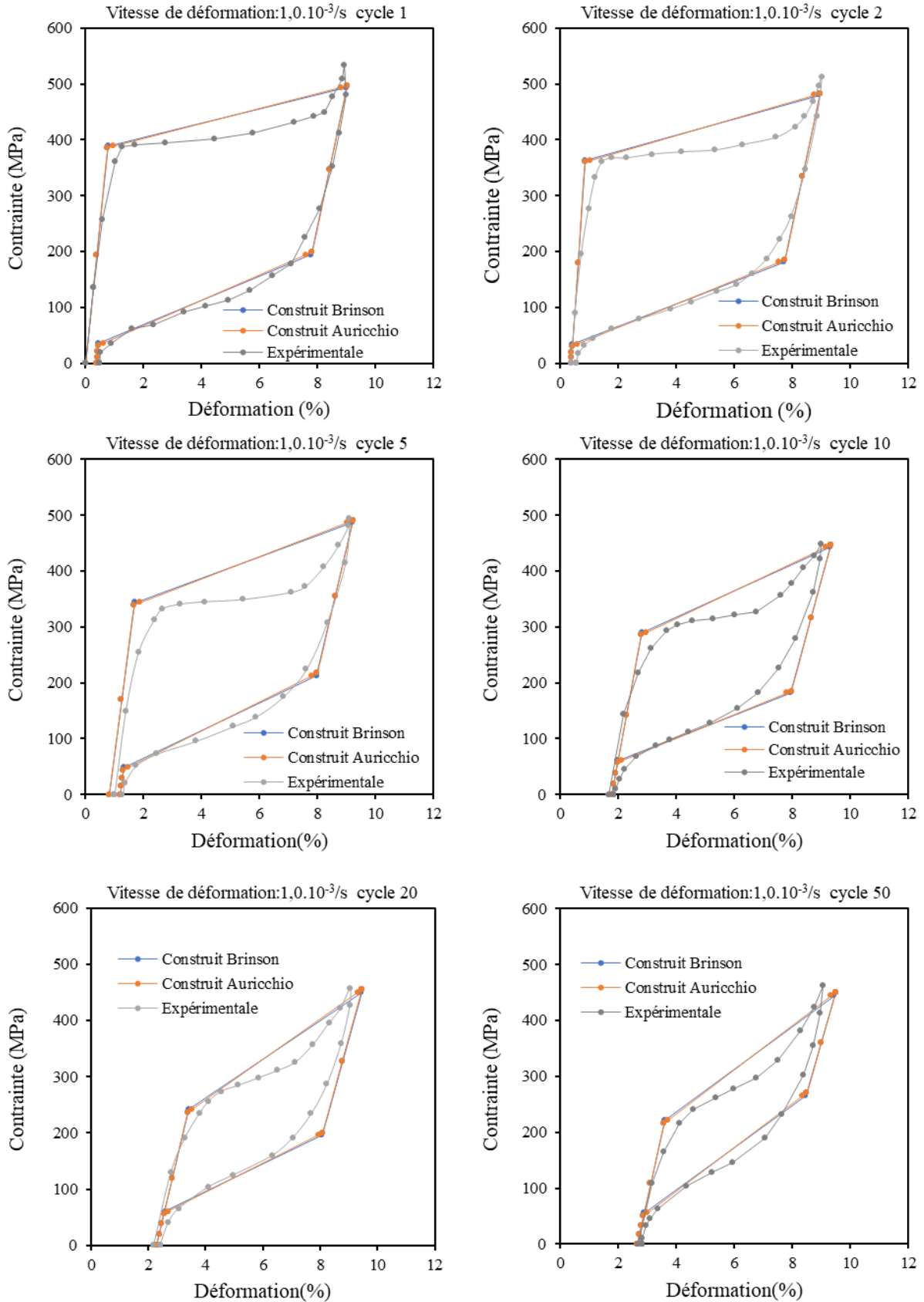


Figure 4-15 Comparaison de la relation contrainte-déformation entre l'expérimental et le modèle construit « $m=10$ » à la vitesse de déformation $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.

Autrement dit, les cycles 1 et maximum, et une identité entre l'expérimental et le numérique à la coïncidence du cycle avec le cycle m choisi. Aussi que le choix du $m=10$ fait rapprocher les résultats numériques et expérimentaux à l'ensemble des graphes, ces conclusions viennent certifier les conclusions tirées dans les figures de la déformation résiduelle-nombre de cycles et contrainte de transformation-nombre de cycles.

En second lieu, hors des cas qui font l'identité entre le numérique et l'expérimental, le choix du cycle m n'influe pas beaucoup sur les résultats obtenus.

Le cycle $m=10$ reste favorable pour faire rapprocher entre les résultats expérimentaux et numériques.

Pour illustrer, une validation entière du modèle construit, la Figure 4-15 représente un comparatif de la courbe contrainte-déformation entre l'étude expérimentale de Kan et le modèle construit tout en utilisant le modèle numérique de la simulation de la déformation résiduelle et les contraintes de transformations en fonction des nombres de cycles avec $m=10$, la vitesse de déformation ciblée est $1,0 \times 10^{-3}/s$ et les cycles de chargement sont 1, 2, 5, 10, 20 et 50. La Figure 4-16 est similaire à la Figure 4-15 avec une vitesse de déformation $3,3 \times 10^{-2}$.

Une claire convergence entre l'expérimental et le modèle construit à son utilisation complète. Aussi, les objectifs atteints sont similaires avec l'utilisation des résultats expérimentaux de la déformation résiduelle et les contraintes de transformations qui sont représentés dans la Figure 4-4 et Figure 4-5 et qui se résument à la dégénération de superélasticité. L'étroitement de la courbe jusqu'à saturation, génération de déformation résiduelle après chaque cycle et diminution des contraintes de transformation avec l'incrément des cycles.

L'objectif de ce modèle adapté est d'intégrer la déformation résiduelle et la variation des contraintes de transformation en plus de donner une simulation numérique du comportement des AMF à tout cycle du chargement-déchargement et pour plusieurs vitesses de déformation. La Figure 4-17 montre cette relation à la vitesse $3.3 \times 10^{-2}(/s)$, $m=10$ et pour les cycles 1 jusqu'au cycle 25. A partir de ce dernier, l'incrément est de 5, soient les cycles 30, 35, 40, 45 et 50.

Cette Figure 4-17 montre que les objectifs à atteindre pour les modèles construits sont concrétisés. Ces objectifs se résument en à la dégénération de la superélasticité, l'étroitement de la courbe contrainte-déformation jusqu'à saturation, diminution des contraintes de transformation, génération de la déformation résiduelle et l'augmentation du module d'élasticité à la phase de transformation.

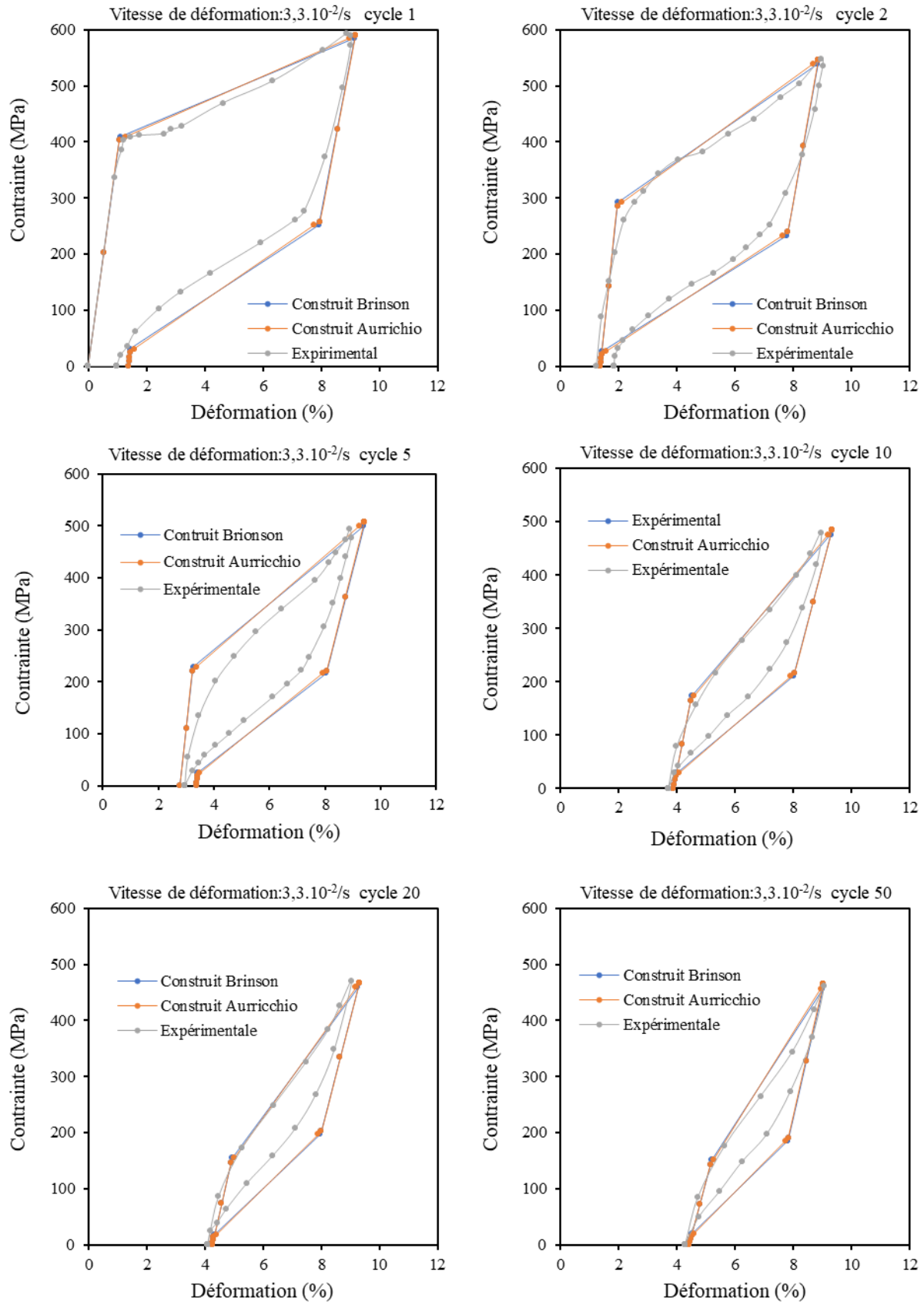


Figure 4-16 Comparaison de la relation contrainte-déformation entre l'expérimental et le modèle construit « $m=10$ » à la vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2} / s$.

On rementionne que la saturation s'aperçoit une fois que les résultats cycliques deviendront identiques à la rigueur adjacente. Ces derniers ont été clairement discutés dans l'étude expérimentale de Kan.

Les contraintes de transformation diminuent après chaque cycle avec régression de la diminution jusqu'à une stabilité à partir du cycle 20. Cette régression est importante pour les contraintes de transformation « début à la martensite- fin à la martensite – début à l'austénite – fin à l'austénite ». Ce phénomène aperçu dans cette figure est aussi clairement montré dans la Figure 2-4 qui représente la relation « contrainte de transformation – nombre de cycles » dans l'expérimental de Kan.

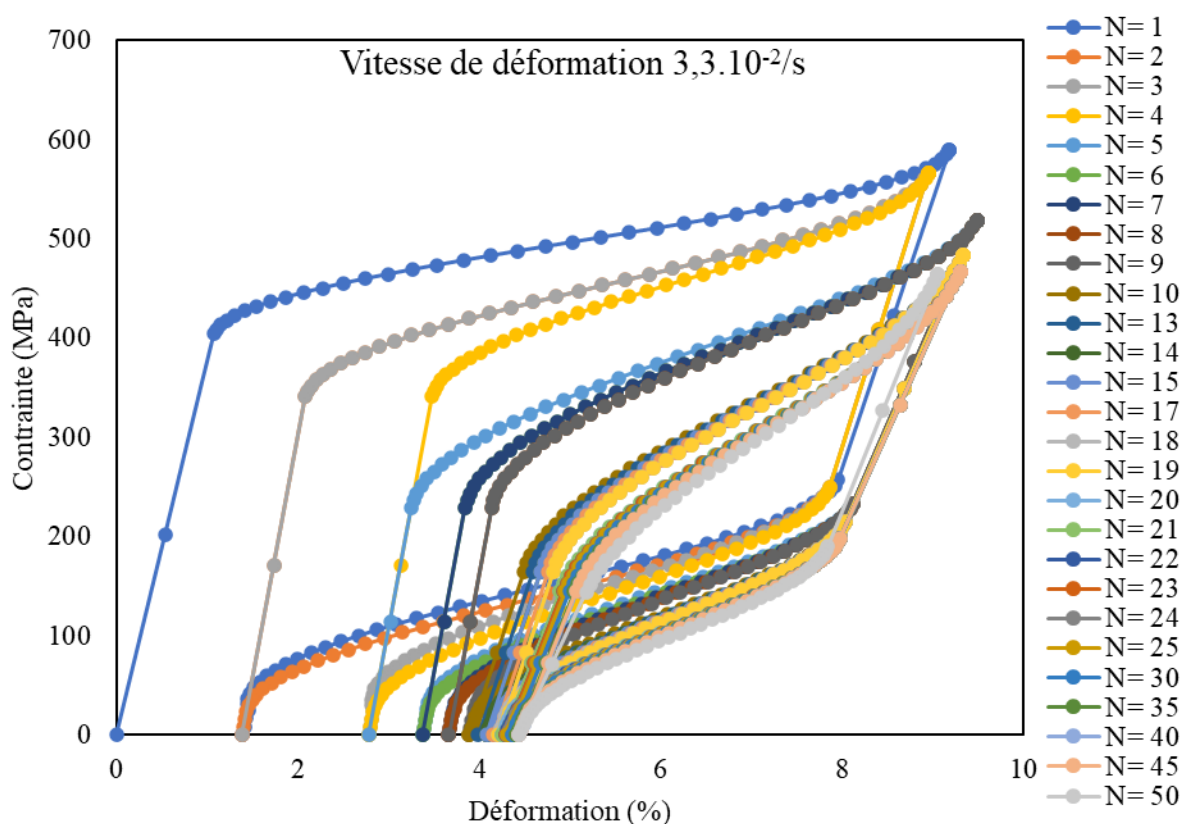


Figure 4-17 Relation contrainte-déformation du modèle construit, $m=10$, vitesse de déformation $3,3 \cdot 10^{-2}$, cycle $N=1:25,30,35,40,45,50$.

La déformation résiduelle se génère après chaque cycle avec des valeurs importantes pour qu'elle s'achève avec une régression jusqu'à ce qu'elle soit stable après le cycle 20. Ce phénomène est présenté dans la relation « déformation résiduelle - nombre de cycles » pour la vitesse de déformation $3.3 \times 10^{-2}/s$, aussi présenté et discuté.

Après chaque cycle, et à la considération du palais de transformation comme étant une ligne droite, la tangente de cette dernière devient plus importante, du point de vue physique c'est l'augmentation du module d'élasticité et ce qu'il est mentionné dans l'étude expérimental de Kan.

L'énergie dissipée est représentée par la surface entre le palai de chargement et déchargement, cette surface diminue dans la Figure 4-4 et Figure 4-5 après chaque cycle, celle-ci signifie une diminution de l'énergie dissipée après chaque cycle, et ce qui est prouvé dans l'étude expérimentale de Kan est représentée dans la Figure 2-4.

Une diminution de l'énergie dissipée et les contraintes de transformation, une génération de la déformation résiduelle et une augmentation du module d'élasticité provoque une dégénération de la superélasticité et étroitement de la courbe contrainte-déformation. Cette figure a montré l'ensemble de ces constatations.

Des différences et aussi quelques désorientations se trouvent dans le chargement cyclique représenté à cette dernière figure comme la non génération de la déformation résiduelle dans le cycle 2. Les points de transformations sont déplacés à droite après un certain cycle important et spécialement à la contrainte de fin de transformation à la martensite, qui n'est pas le cas dans l'expérimental de Kan.

Ces points ont été déjà cités auparavant qui s'expliquent avec les mêmes raisons. La déformation résiduelle n'était pas générée à cause de l'extraction des résultats expérimentaux, reste que le phénomène nécessite une étude paramétrique plus approfondie, sur la variation du module d'élasticité et la déformation inélastique en fonction des chargements cycliques.

Le modèle construit vient compléter ces objectifs et arrive à simuler le comportement des AMF sur tous les cycles, tout en respectant les résultats et les conclusions de l'étude expérimentale. Ce dernier va permettre l'intégration de la loi de comportement dans les simulateurs de calcul et leur donner la possibilité de simuler l'AMF sur toutes ces étapes tout en prenant en compte l'effet de la vitesse de déformation et les chargements cycliques.

4.5 CONCLUSION

Ce chapitre vient de présenter une synthèse générale du modèle construit suivi de l'algorithme approprié, puis une illustration des résultats détaillés obtenus à partir d'un programme de calcul basé sur cet algorithme. Une comparaison entre le modèle construit, modèle originale et l'expérimental a été figuré, ces résultats ont clairement montré l'efficacité du modèle proposé par rapport à l'original, la seconde étape des résultats a été destinée pour le modèle numérique proposé de la contrainte de transformation et la déformation résiduelle en fonction des nombres de cycles, les figures ont illustré une forte convergence par rapport à l'expérimental, les résultats du modèle construit ont été redéfinis, mais avec l'utilisation du modèle numérique « contrainte de transformation et la déformation

résiduelle en fonction des nombres de cycles » afin de voir leur fiabilité sur le modèle en général. À la fin, la simulation de la relation contrainte-déformation sur tous les cycles est présentée pour montrer l'intérêt général de ce modèle construit.

5 CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette thèse était de rendre la modélisation des alliages à mémoire de forme capable de prendre en compte l'effet de la vitesse de déformation et les chargements cycliques, deux paramètres à ajouter dans les lois constitutives qui se comptent comme étant des paramètres fondamentaux dans le cas où l'alliage est mis à l'épreuve d'atténuer l'effet sismique dans une structure.

L'objectif primaire a été fixé à l'adaptation des modèles constitutifs choisis « modèles de Brinson et d'Auricchio simplifié par Paulo Lobo » pour faciliter la prise en compte de la variation des contraintes de transformation. Ainsi, l'introduction de la déformation résiduelle dans la loi de comportement fondamentale soit la même sur les modèles originaux. Ces derniers sont les conséquences directes de l'application d'un chargement cyclique avec la variation de vitesse de déformation.

Les résultats obtenus ont montré le comparatif entre le modèle construit et le modèle origine par rapport à l'expérimental afin de voir l'intérêt de ce travail. La déformation résiduelle a été clairement approuvée dans le modèle construit avec l'incrémentations des cycles de charge et les contraintes de transformations se diminuent, contrairement au modèle origine. Le modèle construit converge à l'expérimental et cette convergence devient plus claire avec le nombre de cycles parcouru, la courbe contrainte-déformation devient plus étroite avec la dégradation de la superélasticité et l'acquisition de la déformation résiduelle. Toutes ces conclusions tirées par l'étude expérimentale viennent s'approuver par le modèle construit. Cela permet une exactitude de la dissipation d'énergie et le recentrage.

Le travail s'est suit par rendre le modèle construit capable de faire une simulation numérique de la vitesse de déformation et les contraintes de transformation en fonction des nombres de cycles. Ces fonctions ont été basées à partir des fonctions exponentielles de base, la déformation résiduelle s'est formulée à la base de l'équation exponentielle générale, $y = a(1 - e^{-bx})$, et la contrainte de transformation à partir de l'équation exponentielle décroissante générale $y = ae^{-bx}$, les résultats montrent clairement la convergence du numérique par rapport à l'expérimental. Ces lois proposées donnent l'avantage de simuler des déformations résiduelles et les contraintes de transformation à n'importe quel cycle voulu, cela va permettre en conséquence le modèle construit d'illustrer le comportement de l'AMF sans pour autant avoir de lourds résultats expérimentaux et à la fois prendre en compte l'effet de la vitesse de déformation et les charges cycliques sur toutes les étapes.

La définition des lois numérique qui représente la déformation résiduelle et les contraintes de transformation en fonction de nombre de cycles a besoin de connaître la valeur du premier cycle, la valeur du cycle max et une autre valeur autre que ces deux cycles-là qu'on a lui donné la nomination du cycle m . L'étude paramétrique a montré que le cycle $m=10$ et le cycle le plus convenable qui a réussi à avoir des résultats les plus proches de l'expérimental.

Le but de simuler la relation contrainte-déformation à la dépendance des charges cyclique et les vitesses de déformation ont été confirmé. La simulation est validée sur tous les cycles de 1 à 50 en gardant les conclusions tirées par l'étude expérimentale et sans pour autant avoir toutes les données expérimentales.

L'objectif de ce travail s'est focalisé sur l'amélioration de la simulation du comportement des AMF dans le cas où il est utilisé dans le contrôle des structures. Précisément, où celui-ci affronte des chargements cycliques et de fortes vitesses de déformation. Le modèle construit peut représenter à cet instant des résultats avec exactitude et nécessairement à la recherche d'un optimum entre le recentrage et la dissipation d'énergie, l'enjeu de la majorité des dispositifs de contrôle hybride.

Ce travail peut être développé sur plusieurs voies. Nous pouvons proposer un algorithme qui peut simuler la géométrie de l'alliage ou ces propriétés mécanique recommandées selon la dissipation d'énergie et le recentrage voulu à obtenir.

Comme nous pouvons étudier la variation de l'indice alpha et béta sur plusieurs alliages afin de voir leurs effets sur le type d'alliage.

Des investigations expérimentales peuvent aider à simuler et définir des modèles numériques de la déformation résiduelle et les contraintes de transformation en fonction de la vitesse de déformation, cette dernière va permettre au modèle constitutif d'être plus indépendant et facile à définir ces constantes sans établir beaucoup d'essais expérimentaux.

6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] COHEN M., OLSON G.B., CLAPP P.C. 1979, "In proceedings of the international conference on the martensitic transformation", On the classification of displacive phase transformation, 1-11.
- [2] GUENIN G. 1986, "Alliages à mémoire de forme", Note DCR/AO - n° 12.0013.91 - Techniques de l'ingénieur.
- [3] Karine C. 2009, "Etude d'alliages à mémoire de forme base Ru pour applications hautes températures", /, Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6).
- [4] CHANG L.C., READ T.A., 1951, "Plastic deformation and diffusion less phase changes in metals – The gold-cadmium beta phase", (189): 47-52.
- [5] Fatma JEMAL ELLOUZE 2009, "MODÉLISATION DU COMPORTEMENT THERMOMÉCANIQUE D'UN ALLIAGE À MÉMOIRE DE FORME À BASE DE FER TYPE Fe-Mn-Si".
- [6] Otsuka K., Ren X., 1999, "Recent developments in the research of shape memory alloys", Intermetallics, 7 511-528.
- [7] Otsuka K., Ren X., 2005, "Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys", Progress in Materials Science, 50, 511-678.
- [8] Bhattacharya K., Kohn R.V., 1996, "Symmetry, texture and the recoverable strain of shape-memory polycrystals", Acta Materialia, 44 (2) 529-542.
- [9] Guenin G 1986, "Alliages à mémoire de forme", Techniques de l'Ingénieur, dossier M530, parution octobre.
- [10] E. Patoor, A. Eberhardt and M. Berveiller, 1993, "Micromechanical modelling of superelasticity in shape memory alloys.", Pitman Res. Notes Math, 40: 755-794.
- [11] Patoor E., Berveiller M. 1994, "Technologie des alliages à mémoire de forme", Editions HERMES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [12] Wayman C.M., Otsuka K., 1999, "Shape memory materials, Cambridge University Press", new ed, ISBN-10: 0521663849, ISBN-13: 9780521663847.
- [13] Olson G.B., Owen W.S., 1992, "Martensite, ASM International". ISBN : 0- 87170-434-X
- [14] Van Humbeeck J., 1994, "La transformation martensitique, Patoor E, Berveiller M,", Technologie des alliages à mémoire de forme, Editions HERMES,ISBN : 2- 86601-426-X
- [15] Wayman C.M., 1992, "Shape memory effect and related phenomena", Progress in Materials Science, 36:203-224.
- [16] Liu Y., Xie Z., Van Humbeeck J., Delaey L., 1999, "Deformation of shape memory alloys associated with twinned domain re-configurations", Materials Science and Engineering, A273-275, 679-684.
- [17] Prahlad, H. and Chopra, I. 2001, "Comparative evaluation of shape memory alloy constitutive models with experimental data", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 12. 383–395
- [18] Bataillard, L. 1996, "Transformation martensitique multiple dans un alliage à mémoire de forme Ni-Ti", Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- [19] MAKI,T. AND TSUZAKI,K., 1992, "Transformation behaviour of ϵ -martensite in Fe-Mn-Si shape memory alloys", Proc. ICOMAT, 92: 1151-1162
- [20] KUBIN L.P., 1984, "Les alliages à mémoire de forme", L'ordre et désordre dans les matériaux: . P.186
- [21] HORNBOGEN E., 1985, "On the term (pseudo-elasticity)", Z. Metallkd, 86 (5): 341- 344
- [22] JANOT C., IISCHNER B., 2001, "Matériaux émergents", Presses polytechniques et universitaires romandes :ISBN 2-88074-455-5
- [23] Graesser, E.J. and Cozzareli, F.A. 1994, "A proposed three dimensional constitutive model for shape memory alloys", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 5:pp. 78–89.
- [24] Sweeney SC, Hayes JR 1995, "Shape memory alloy dampers for seismic rehabilitation of existing buildings", In: Proceedings of the 27th Joint Meeting — Wind and Seismic Effects.

- [25] Adachi Y, Unjoh S 1999, "Experimental study on seismic response control of bridges by damping devices using shape memory alloys", In: Chichester, England: Wiley:1861-70.
- [26] Dolce M, Cardone D, Marnetto R 2000, "Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys", *Earthq Eng Struct Dyn*, 29 (7): 945-68.
- [27] DesRoches, R., Delemont, M., 2002, "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory", *Engineering Structures*, 24: 325-332.
- [28] Casciati, F., Faravelli, L., and 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>
- [29] Birman, V., 2007, "Shape memory elastic foundation and supports for passive vibration control of composite plates", *International Journal of Solids and Structures*, 45: 320-335.
- [30] Hamdaoui, K., 2009, "Experimental Applications on Cu-based Shape Memory Alloys: Retrofitting of Historical Monuments and Base Isolation".
- [31] Hamdaoui, K., and Benadla, Z., 2014, "Dynamic Analysis of a Historical Monument: Retrofit Using Shape Memory Alloy Wires", *Smart Structures and Systems*, 13 (3): 375–388. DOI: <https://doi.org/10.12989/sss.2014.13.3.375>
- [32] Hamdaoui, K., Benadla, Z., Chitaoui H., and Benallal, M.E., 2019, "Dynamic behavior of a seven century historical monument reinforced by shape memory alloy wires", *Smart Structures and Systems*, 23 (4): 337–345. DOI: <https://doi.org/10.12989/sss.2019.23.4.337>
- [33] Benafan, O., Brown, J., Calkins, F.T., Kumar, P., Stebner, A.P., Turner, T.L., Vaidyanathan, R., Webster, J., Young, M.L. 2014, "Shape memory alloy actuator design: CASMART collaborative best practices and case studies", *Int J Mech Mater Des*, 10 (1): 1–42.
- [34] Z. Moumni, A. V. Herpen, P. Riberty, 2005, "Fatigue analysis of shape memory alloys: Energy approach", *Smart Materials and Structures*, 14: 287–292.
- [35] E. Patoor, D. C. Lagoudas, P. B. Entchev, L. C. Brinson, X. Gao, 2006, "Shape memory alloys, Part I: General properties and modeling of single crystals", *Mechanics of Materials*, 38: 391–429.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [36] Jayender, J. 2008, "Modeling and control of shape memory alloy actuators", IEEE Trans. Control Syst. Technol, 16 (2): 279–287.
- [37] Bolton, W. 2003, "Mechatronics", 3rd edn. Prentice Hall, England, .
- [38] Ermira J. Abdullah, Dayang L. Majid, Fairuz I. Romli, Priyanka S. Gaikwad, Lim G. Yuan, Nurul F. Harun 2015, "Active control of strain in a composite plate using shape memory alloy actuators", Int J Mech Mater Des, 11: 25–39. DOI 10.1007/s10999-014-9277-7
- [39] Silva Lobo, P., Almeida, J., Guerreiro, L., 2015, "Semi-active Damping Device Based on Superelastic Shape Memory Alloys", Structures, 3: 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2015.06.006>
- [40] Brinson, L.C., 1993, "One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: Thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 7 (1): 108-114. <https://doi.org/10.1177/1045389X9600700112>
- [41] Tanaka, K., 1986, "A thermomechanical sketch of shape memory effect: one-dimensional tensile behavior", Research Mechanical, 18: 256-263.
- [42] Jalaeefar, A., Asgarian, B., 2014, "A simple hybrid damping device with energy-dissipating and re-centering characteristics for special structures", The Structural Design of Tall and Special Buildings, 23 : 483–499. DOI: 10.1002/tal.1050
- [43] Asgarian, B., Salari, N., Saadati B., 2016, "Application of Intelligent Passive Devices Based on Shape Memory Alloys in Seismic Control of Structures", Structures, 5 : 161–169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2015.10.013>
- [44] Jalaeefar, A., Asgarian, B., 2020, "Innovative hybrid damper with structural steel and Nickel-Titanium shape memory alloy bars", Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings. Doi: 10.1680/jstbu.19.00232
- [45] Mao, J., Jia, D., Yang, Z., Xiang, N., 2020, "Seismic Performance of Concrete Bridge Piers Reinforced with Hybrid Shape Memory Alloy (SMA) and Steel Bars", Journal of Earthquake and Tsunami, 14. DOI: 10.1142/S1793431120500013

- [46] Mizari, N. M., Cho, H. M., Hu, J.W. 2020, "Experimental study of new axial recentering dampers equipped with shape memory alloy plates", *Structural Control Health Monitoring*, 28. DOI: 10.1002/stc.2680
- [47] Kan, Q., Yu., C., Kang, G., Li, J., and Yan, W., 2016, "Experimental Observations on Rate-Dependent Cyclic Deformation of Super-Elastic NiTi Shape Memory Alloy", *Mechanics of Materials*, 97: 48–58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.02.011>
- [48] Ozdemir, H. 1976, "Nonlinear transient dynamic analysis of yielding structures", thesis presented at the University of California at Berkeley, Calif., in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- [49] Graesser, E.J., Cozzarelli, F.A., 1991, "SHAPE-MEMORY ALLOYS AS NEW MATERIALS FOR ASEISMIC ISOLATION", *J. Eng. Mech. ASCE*, 117 (): 2590–2608. 117 2590–608
- [50] Liang, C. and Rogers, C.A 1990, "One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory material", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1 (2): 207-234. <https://doi.org/10.1106/104538902022599>
- [51] Ivshin, I., Pence, T.J., 1994, "A thermo mechanical model for one variant shape memory material", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 5: 455-473.
- [52] Brinson, L.C., and Huang, M.S., 1996, "Simplifications and Comparisons of Shape Memory Alloy Constitutive Models", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 7 (1): 108-114. <https://doi.org/10.1177/1045389X9600700112>
- [53] Boyd, J.G. and Lagoudas, D.C., 1996a, "A Thermodynamic Constitutive Model for the Shape Memory Materials. Part I. The monolithic shape memory alloy.", *International Journal of Plasticity*, 12 : 805-842.
- [54] Boyd, J.G. and Lagoudas, D.C., 1996b, "A Thermodynamic Constitutive Model for the Shape Memory Materials. Part II. The sma composite material.", *International Journal of Plasticity*, 12 : 843-873.
- [55] Auricchio, F. and Sacco, E., 1997, "A one-dimensional model for superelastic shape-memory alloys with different elastic properties between austenite and martensite", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 32 (6): 1101-1114. [https://doi.org/10.1016/S0020-7462\(96\)00130-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7462(96)00130-8)

- [56] Chung, J., Heo, J. and Lee, J. 2007, "Implementation strategy for the dual transformation region in the Brinson SMA constitutive model", *Smart Materials and Structure*, 16 : N1–N5. doi:10.1088/0964-1726/16/1/N01
- [57] Brocca, M., Brinson L.C., Bazant, Z.P., 2002, "Three-dimensional constitutive model for shape memory alloys based on microplane model", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 50 : 1051–1077.
- [58] Panico, M. and Brinson, L., 2007, "A three-dimensional phenomenological model for martensite reorientation in shape memory alloys", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55 : 2491–2511. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2007.03.010>
- [59] Arghavani, J., Auricchio, F., Naghdabadi, R., Reali, A. and Sohrabpour, S., 2010, "2010 A 3D phenomenological constitutive model for shape memory alloys under multiaxial loadings", *International Journal of Plasticity*, 26 : 976-991. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2009.12.003>
- [60] Saleeb A, Padul, li.S., and Kumar, A., 2011, "A multi-axial, multimechanism based constitutive model for the comprehensive representation of the evolutionary response of SMAs under general thermomechanical loading conditions", *International Journal of Plasticity*, 27: 655-687. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.08.012>
- [61] Auricchio, F., Fugazza, D., and Desroches, R., 2008, "Rate-dependent thermo-mechanical modelling of superelastic shape-memory alloys for seismic applications", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 19 : 47-61. <https://doi.org/10.1177/1045389X06073426>
- [62] Vikash, K., Jha and Mahapatra, D. Roy, 2009, "Constitutive modeling of shape memory alloy wire with non-local rate kinetics", *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 21 (1): 1–15. DOI 10.1007/s00161-009-0091-7
- [63] He,Y.J., Sun,Q.P., 2011, "On non-monotonic rate dependence of stress hysteresis of superelastic shape memory alloy bars", *International Journal of Solids and Structures*, 48 (11-12): 1688-1695. doi:10.1016/j.ijsolstr.2011.02.017
- [64] Lobo, P.S., Almeida, J., Guerreiro, L., 2015, "Shape memory alloys behaviour: A review", *Procedia Engineering*, 114: 776-783. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.025>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [65] Sayyaadia, H., Zakerzadeha, M.R., Salehib H., 2012, "A comparative analysis of some one-dimensional shape memory alloy constitutive models based on experimental tests", *Scientia Iranica*, 19 (2): 249-257. doi:10.1016/j.scient.2012.01.005
- [66] 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*, 6:64. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00412-w>