

BENJAMIN JULLIERE

**CONTROLE ACTIF A L'AIDE DE PIÉZOCOMPOSITES
DES DÉFORMATIONS INDUITES THERMIQUEMENT
DANS LES MATÉRIAUX COMPOSITES**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en génie mécanique
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2006

Résumé

Ce mémoire présente une étude sur le contrôle actif, à l'aide de piézocomposites, des déformations induites thermiquement dans les structures composites. L'actionneur utilisé est le MFCTM, un piézocomposite récemment développé, innovant et performant. Le cas d'une plaque stratifiée non-symétrique comportant deux actionneurs est traité. Un modèle par éléments finis est développé afin de prédire le comportement de cette structure et d'étudier les capacités du MFCTM. La théorie est tout d'abord validée dans le cas où les actionneurs sont passifs, puis pour la compensation des déformations induites thermiquement dans la structure. Enfin, ce modèle numérique est modifié afin d'intégrer un processus de contrôle actif. Une démarche expérimentale est développée afin d'étudier physiquement le comportement de la structure. La bonne corrélation entre les résultats théoriques et expérimentaux permet d'une part de valider le modèle numérique et d'autre part de mettre en évidence les capacités de l'actionneur MFCTM.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier madame Marie-Laure Dano, d'une part de m'avoir permis de réaliser mes études universitaires de deuxième cycle en travaillant sur un projet intéressant et innovateur et d'autre part pour son aide et sa compréhension lors de ces moments passés à l'Université Laval.

Je remercie également toutes les personnes ressources du département de Génie Mécanique et particulièrement Yves Jean, qui m'ont été d'une grande aide en me faisant profiter de leur connaissance et de leur savoir-faire.

Je remercie mes parents pour avoir cru en mes capacités de réaliser mes études universitaires de deuxième cycle, et pour leur aide, sans laquelle tout ceci n'aurait pas été envisageable. Enfin, je remercie tout particulièrement Kathia de m'avoir encouragé et soutenu pendant ces mois d'étude et pour tous ces bons moments que nous avons passés et passerons ensemble.

Table des Matières

CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en situation	1
1.2 Généralités et problématique des matériaux composites	2
1.2.1 Généralités	2
1.2.2 Problématique	3
1.3 Revue de littérature	4
1.3.1 Les structures intelligentes	4
1.3.2 La piézoélectricité	5
1.3.3 Les composites à fibres actives	9
1.3.4 Etat de l'art du contrôle actif des déformations induites thermiquement dans les structures composites	12
1.4 Objectifs de la recherche et présentation du mémoire	14
CHAPITRE 2 L'ACTIONNEUR – CAPTEUR MFC™	16
2.1 Introduction	16
2.2 Composition et méthodes de fabrication du MFC™	17
2.2.1 Composition du MFC™	17
2.2.2 Méthode de fabrication du MFC™	17
2.3 Le MFC™ et les équations de la piézoélectricité.....	19
2.4 Propriétés du MFC™	21
2.5 Conclusion.....	23
CHAPITRE 3 INTRODUCTION À LA MODÉLISATION D'UNE STRUCTURE COMPOSITE MUNIE D'ACTIONNEURS MFC™	24
3.1 Introduction	24
3.2 Présentation des éléments utilisés	25
3.2.1 Éléments piézoélectriques disponibles dans le logiciel Abaqus.....	25
3.2.2 Prédiction du comportement des éléments disponibles	26
3.3 Modélisation des structures composites	30
3.3.1 Analyse en grands déplacements.....	30
3.3.2 Modélisation d'une structure composite à l'aide d'éléments solides	30

3.4 Conclusion.....	31
---------------------	----

CHAPITRE 4 MODÉLISATION DES DÉFORMATIONS THERMIQUES PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS 32

4.1 Introduction.....	32
-----------------------	----

4.2 Modélisation d'une plaque stratifiée.....	33
---	----

4.2.1 Description des modèles.....	34
------------------------------------	----

4.2.2 Résultats numériques.....	35
---------------------------------	----

4.2.3 Essais expérimentaux.....	36
---------------------------------	----

4.2.4 Conclusion partielle.....	38
---------------------------------	----

4.3 Modélisation d'une plaque stratifiée avec deux actionneurs.....	39
---	----

4.3.1 Description du modèle.....	40
----------------------------------	----

4.3.2 Essai expérimental.....	41
-------------------------------	----

4.3.3 Résultats numériques et expérimentaux.....	42
--	----

4.4 Conclusion.....	43
---------------------	----

CHAPITRE 5 COMPENSATION DES DÉFORMATIONS THERMIQUES 44

5.1 Introduction.....	44
-----------------------	----

5.2 Modélisation par la méthode des éléments finis.....	45
---	----

5.2.1 Description du modèle.....	45
----------------------------------	----

5.2.2 Résultats numériques.....	46
---------------------------------	----

5.3 Essais expérimentaux.....	47
-------------------------------	----

5.3.1 Description du montage.....	47
-----------------------------------	----

5.3.2 Résultats expérimentaux et corrélation.....	48
---	----

5.4 Conclusion.....	49
---------------------	----

CHAPITRE 6 CONTRÔLE ACTIF DES DÉFORMATIONS THERMIQUES 50

6.1 Introduction.....	50
-----------------------	----

6.2 Description du problème.....	51
----------------------------------	----

6.3 Modélisation par la méthode des éléments finis.....	52
---	----

6.3.1 Description du modèle.....	52
----------------------------------	----

6.3.2 Description du contrôle actif utilisé pour les analyses numériques.....	52
---	----

6.3.3 Contrôle actif basé sur le déplacement en bout de plaque.....	55
---	----

6.3.4 Contrôle actif basé sur les déformations de la structure.....	59
---	----

6.3.5 Contrôle actif basé sur le déplacement électrique.....	65
--	----

6.3.6 Conclusion partielle.....	70
---------------------------------	----

6.4 Essais expérimentaux.....	70
-------------------------------	----

6.4.1 Montage expérimental et principe du contrôle actif.....	70
---	----

6.4.2 Résultats expérimentaux et corrélation	72
6.5 Conclusion.....	75
CONCLUSION.....	76
RÉFÉRENCES	79
ANNEXE A : FICHIERS DE DÉFINITION DES ANALYSES *.INP.....	82
ANNEXE B : SOUS-ROUTINES D'UTILISATEUR FORTRAN.....	91
ANNEXE C : PROGRAMME D'ASSERVISSEMENT EXPÉRIMENTAL.....	103

Liste des Figures

Figure 1-1 : Directions principales d'un composite unidirectionnel.....	3
Figure 1-2 : Déformation d'un cristal de quartz.....	5
Figure 1-3 : Excitation d'un élément piézoélectrique de type PZT	8
Figure 1-4 : Principe des électrodes interdigitées	11
Figure 1-5 : Schématisation des composites à fibres actives [16].....	12
Figure 2-1 : Actionneur Macro Fiber Composite [17]	16
Figure 2-2 : Composition de l'actionneur MFC™.....	17
Figure 2-3 : Feuille de fibres piézoélectriques sur un film polymère [15].....	18
Figure 2-4 : Assemblage des composants du MFC™ [16]	18
Figure 2-5 : Repère utilisé pour définir le MFC™ [16].....	19
Figure 3-1 : Points d'intégration pour des éléments à intégration complète en deux dimensions	26
Figure 3-2 : Déformation d'un élément de matière soumis à un moment de flexion pure	27
Figure 3-3 : Déformation d'un élément linéaire à intégration complète soumis à un moment de flexion pure.....	27
Figure 3-4 : Déformation d'un élément quadratique à intégration complète soumis à un moment de flexion pure.....	28
Figure 3-5 : Points d'intégration pour des éléments à intégration réduite en deux dimensions	28
Figure 3-6 : Déformation d'un élément linéaire à intégration réduite soumis à un moment de flexion pure	29
Figure 4-1 : Géométrie de la plaque stratifiée.....	33
Figure 4-2 : Maillage de la plaque stratifiée	34
Figure 4-3 : Déflexion à 25°C de la plaque stratifiée fabriquée à 94°C.....	35
Figure 4-4 : Montage expérimental pour la mesure de la forme à 25°C d'une plaque stratifiée [0/90 ₃] _T	37
Figure 4-5 : Comparaison des formes obtenues expérimentalement et numériquement à 25°C d'une plaque stratifiée [0/90 ₃] _T fabriquée à 94°C	38

Figure 4-6 : Géométrie de la plaque stratifiée avec deux actionneurs MFC TM	39
Figure 4-7 : Maillage de la plaque stratifiée munie de deux actionneurs MFC TM	40
Figure 4-8 : Structure constituée d'un stratifié et de deux actionneurs MFC TM	41
Figure 4-9 : Forme obtenue par modélisation numérique et expérimentalement de la plaque stratifiée [0/90 ₃] _T munie de deux actionneurs MFC TM à 26°C.....	42
Figure 5-1 : Modélisation de la plaque stratifiée munie de deux MFC TM	45
Figure 5-2 : Prédiction de la forme de la plaque stratifiée sous l'effet de la température et d'un potentiel électrique	46
Figure 5-3 : Montage expérimental pour la mesure du déplacement de la plaque stratifiée soumise à une température et aux deux actionneurs MFC TM	47
Figure 5-4 : Comparaison des formes obtenues numériquement et expérimentalement d'un stratifié soumis à une variation de température et à des actionneurs MFC TM	48
Figure 6-1 : Diagramme de principe du contrôle actif.....	51
Figure 6-2 : Diagramme du contrôle actif pour le analyses numériques.....	53
Figure 6-3 : Communication entre Abaqus et la programmation FORTRAN	54
Figure 6-4 : Schéma de principe du contrôle actif basé sur le déplacement en bout de plaque	56
Figure 6-5 : Evolution de la température lors des essais numériques avec contrôle actif.....	57
Figure 6-6 : Position du bout de la plaque suivant l'axe Z	58
Figure 6-7 : Différence de potentiel appliquée lors de l'analyse avec contrôle actif basé sur la position en bout de plaque	58
Figure 6-8 : Prédiction de la forme de la plaque stratifiée sous l'effet de la température et du contrôle actif basé sur la position en bout de plaque.....	59
Figure 6-9 : Schéma de principe du contrôle actif basé sur les déformations de la structure	60
Figure 6-10 : Moyenne des déformations aux cinq emplacements	62
Figure 6-11 : Différence de potentiel appliquée aux actionneurs avec l'algorithme utilisant les déformations	62
Figure 6-12 : Prédiction de la forme de la plaque stratifiée sous l'effet de la température et de l'algorithme basé sur les déformations	63
Figure 6-13 : Répartition des déformations dans le stratifié	64
Figure 6-14 : Actionneur MFC TM avec capteur co-localisé [25].....	65
Figure 6-15 : Schéma de principe du contrôle actif basé sur le déplacement électrique.....	66
Figure 6-16 : Evolution du déplacement électrique moyen	68

Figure 6-17 : Différence de potentiel appliquée lors de l'analyse avec contrôle actif basé sur le déplacement électrique	69
Figure 6-18 : Prédiction de la forme de la plaque stratifiée sous l'effet de la température et du contrôle actif basé sur le déplacement électrique	69
Figure 6-19 : Diagramme du contrôleur avec feedback	71
Figure 6-20 : Température durant les essais expérimentaux	73
Figure 6-21 : Déplacement en bout de plaque pendant les essais	73
Figure 6-22 : Différence de potentiel appliquée aux actionneurs	74
Figure 6-23 : Déflexion de la plaque pour différents essais	74

Liste des Tableaux

Tableau 1-1 : Variables et notations de la piézoélasticité.....	7
Tableau 2-1 : Propriétés de l'actionneur MFCTM.....	22
Tableau 4-1 : Propriétés du composite unidirectionnel.....	33
Tableau 6-1 : Déformations de la plaque stratifiée sous l'effet de la température et des actionneurs	64
Tableau 6-2 : Valeur du déplacement électrique.....	70

Liste des Symboles et Notations de la Piézothermoélasticité

ε_{ij}	Tenseur des déformations mécaniques
σ_{ij}	Tenseur des contraintes
s_{ij}	Tenseur de souplesse élastique
T	Température
ΔT	Variation de température
α_{ij}	Coefficient d'expansion thermique
E_i	Champ électrique
D_i	Déplacement électrique
ϵ_{ij}	Tenseur de permittivité électrique
d_{ijk}	Tenseur des coefficients piézoélectriques
p_i	Tenseur des coefficients pyroélectriques
V_s	Tension de sortie d'un capteur
Q_s	Charge électrique
A	Aire de la section d'un capteur

Chapitre 1 Introduction

1.1 Mise en situation

Les matériaux composites ont un fort potentiel pour des applications mécaniques, notamment dans les domaines aéronautique et spatial grâce à leur excellent rapport propriétés mécaniques – poids. Cependant, dans certains cas l'anisotropie de leurs propriétés thermomécaniques est telle que l'application d'un chargement thermique sur une structure composite peut lui faire subir des distorsions importantes. Cette problématique est encore présente dans de nombreuses applications, telles que par exemple les réflecteurs de satellite, et ce malgré les développements effectués dans le cadre des structures intelligentes.

Les matériaux intelligents les plus communément utilisés pour le contrôle de forme d'une structure sont les matériaux piézoélectriques, qui lorsque excités électriquement subissent des déformations mécaniques et inversement. Parmi les matériaux piézoélectriques, les céramiques PZT ont été utilisées pour de nombreuses applications en tant qu'actionneur. De récents développements technologiques ont permis d'aboutir aux piézocomposites, qui sont des composites à fibres actives en zircono titanate de plomb (PZT). Le Macro Fiber Composite (MFC™) est un composite à fibres actives innovant, offrant performance et flexibilité.

Le but de la recherche est d'utiliser un actionneur MFC™ pour contrôler activement les déformations induites thermiquement dans une structure composite. L'objectif du travail effectué dans le cadre de ce mémoire est d'une part de développer un modèle numérique pour prédire le comportement d'une telle structure, et d'autre part de mettre en œuvre une procédure expérimentale afin de valider les prédictions numériques et vérifier les performances de l'actionneur MFC™. Dans cette introduction, des généralités sur les matériaux composites et une problématique liée à leur utilisation sont tout d'abord présentées. Ensuite, une revue de littérature permet de s'imprégner des notions de structures intelligentes, de piézoélectricité et de composite à fibres actives. Puis, un état de l'art concernant le contrôle actif des déformations induites thermiquement dans les structures composites est également abordé. Enfin, les objectifs de la recherche et le mémoire sont présentés.

1.2 Généralités et problématique des matériaux composites

1.2.1 Généralités

Un matériau composite contient essentiellement des renforts, aux propriétés mécaniques généralement élevées, supportés par un liant, que l'on appelle matrice et dont les propriétés mécaniques sont dans la plupart des cas plus faibles. Les qualités individuelles de ces composants se combinent et se complètent pour former un matériau hétérogène dont les performances globales sont améliorées [1].

1.2.1.1 La matrice

La matrice est généralement ductile et sert à maintenir ensemble les renforts qui sont souvent fragiles. Il existe deux grandes familles de matrice qui sont les matrices inorganiques et les matrices organiques ou polymériques. L'époxy, qui est un polymère thermodurcissable, est un des composants de la structure composite et des actionneurs MFC™ étudiés dans le cadre de ce mémoire.

1.2.1.2 Les renforts

Les renforts constituent l'autre composante de base d'un matériau composite. Ils sont principalement responsables de la résistance mécanique de ces matériaux. La sélection judicieuse du type de fibres utilisées comme renfort, de leur longueur, de leur proportion et de leur orientation est très importante. En effet, ces paramètres influencent les caractéristiques du matériau composite, telles que sa densité, son module d'élasticité, ses résistances en traction et compression ou encore sa résistance en fatigue. De la même façon que pour les matrices, il existe deux grandes familles qui sont les renforts organiques et les renforts inorganiques. Le carbone et le zircono titanate de plomb (PZT), fibres respectives de la structure composite et des actionneurs MFC™ étudiés lors de la recherche, sont des renforts inorganiques céramiques.

1.2.2 Problématique

La Figure 1-1 schématise une couche de matériau composite unidirectionnel, à fibres longues, avec les directions principales qui lui sont associées. Dans ce cas, les propriétés mécaniques dans la direction 1 sont en grande partie assurées par les fibres, alors que celles dans les directions 2 et 3 sont plus influencées par la matrice. On admet généralement pour ce type d'arrangement que les propriétés sont identiques dans les directions transverses 2 et 3 mais différentes de celles de la direction 1, c'est à dire que le matériau est considéré comme orthotrope transverse [1]. Donc, si l'on considère par exemple un composite unidirectionnel plat et parfait, et qu'on le soumet à des variations de température, il restera plat en se déformant, mais ne se déformera pas de la même façon dans la direction 1 que dans les directions 2 et 3.

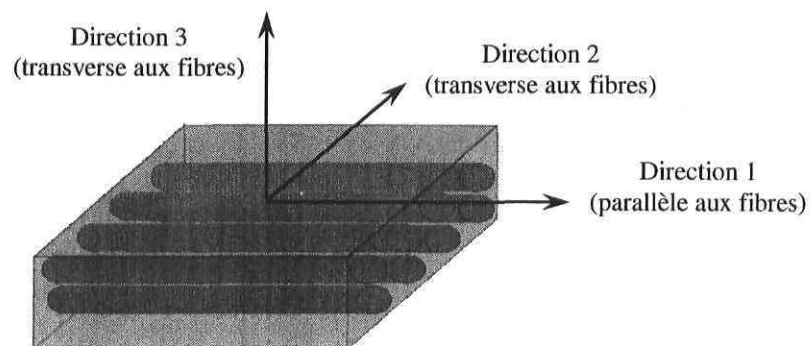


Figure 1-1 : Directions principales d'un composite unidirectionnel

Cependant ceci est rarement le cas dans les structures composites conçues pour des applications industrielles. En effet, plusieurs paramètres, tels que la direction des fibres, l'empilement de plusieurs couches de matériaux ou encore les conditions de fabrication, peuvent influencer le comportement de la structure. Plus précisément, l'anisotropie des coefficients d'expansion thermique est d'une part la principale cause de distorsion lors de la fabrication à haute température d'une structure composite [2] et engendre d'autre part des déformations dans les structures composites soumises à un chargement thermique. Cette anisotropie représente véritablement un problème pour assurer la stabilité dimensionnelle de pièces en matériau composite [2]. L'application d'un chargement thermique non uniforme constitue un autre problème d'importance puisque cela engendre une répartition non uniforme des déformations à l'intérieur du matériau, ce qui peut entraîner la création de courbure. Ces instabilités dimensionnelles influencent notamment les performances des coupoles de satellites. En effet, la puissance de transmission optimale correspond à une forme bien précise du réflecteur. Une variation de température engendrant des déformations du réflecteur implique directement une baisse des performances de transmission. Le contrôle des déformations induites thermiquement dans les structures composites permettrait d'améliorer leur performance dans de nombreuses applications.

1.3 Revue de littérature

1.3.1 Les structures intelligentes

Les études concernant les structures et matériaux intelligents ont émergé au début des années 80. L'objectif était de contrôler les déformations et de supprimer les vibrations dans les structures d'avion à hautes performances en y intégrant des actionneurs. Une structure intelligente est définie comme possédant la capacité de capter les variations engendrées par une perturbation externe et d'activer des éléments de contrôle en réponse à ces variations [3], ou encore comme étant une structure comprenant une importante distribution d'actionneurs, de capteurs et de réseaux de traitement [4].

Il existe de nombreux types de matériaux intelligents, tels que les alliages à mémoire de forme et les fluides électrostrictifs, cependant les matériaux piézoélectriques présentent plusieurs avantages et sont actuellement les plus utilisés. En effet, ils possèdent une grande rigidité structurale ce qui leur confère un grand pouvoir actif. De plus, ils peuvent interagir avec des systèmes sur une importante gamme de fréquence allant du Hertz au Mégahertz [5].

1.3.2 La piézoélectricité

La piézoélectricité est une découverte des frères Curie : sur les faces d'une plaque de cristal sujette à des pressions dans certaines directions cristallographiques, des charges de polarisation sont observées [6]. Pour exemple, observons le comportement d'un cristal de quartz. Lorsque le cristal est en position naturelle, tel que présenté sur la Figure 1-2, les forces électriques de Coulomb sont en équilibre et le cristal est donc électriquement neutre. Si des forces F tendent à déformer le cristal, il y a une augmentation des charges électriques sur l'axe de déformation et donc apparition de faces chargées positivement et négativement.

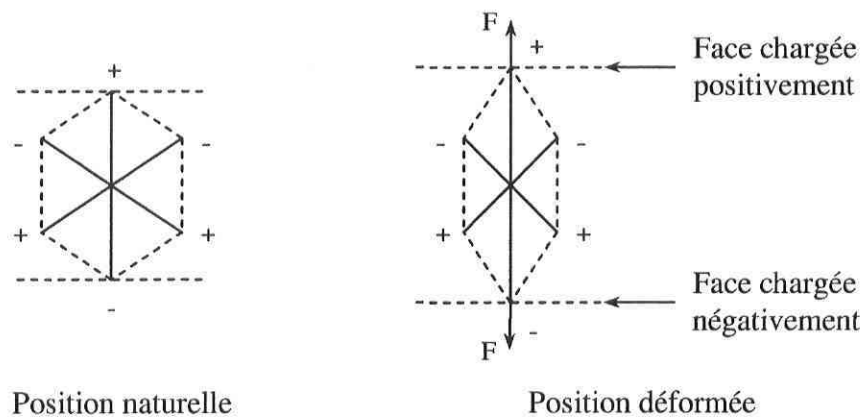


Figure 1-2 : Déformation d'un cristal de quartz

La création de charges électriques par la déformation d'un élément piézoélectrique est l'effet piézoélectrique direct. Lorsque l'élément est électriquement excité pour être déformé, il s'agit de l'effet piézoélectrique inverse. La polarisation piézoélectrique est proportionnelle aux déformations appliquées et vice versa. Les effets changent de signe si l'excitation change de sens. Cette propriété est en fait le résultat d'une symétrie dans la structure cristalline [6]. Ceci limite à 20 le nombre de cristaux piézoélectriques parmi les 32 classes existantes. Dix de ces classes se caractérisent par une polarisation spontanée, sans déformation de la matière, et sont dites pyroélectriques, car une variation de température peut engendrer une variation de leur polarisation. Les matériaux ferroélectriques sont des matériaux pyroélectriques qui présentent des dépendances très fortes de leurs propriétés électriques et mécaniques avec un champ électrique ou la température. En effet, la densité de charges sur les surfaces perpendiculaires à l'axe de polarisation, et donc la polarisation elle-même, varient avec la température ou le champ électrique créé dans le matériau [7]. Il est ainsi possible, par exemple, de changer la direction de polarisation du cristal. Le zircono-titanate de plomb (PZT) est une céramique ferromagnétique utilisée comme composant des actionneurs piézoélectriques MFC™ étudiés dans le cadre de ce mémoire.

Il existe de fortes connexions entre les propriétés thermiques, électriques et mécaniques des cristaux, et il est donc nécessaire de les traiter comme un tout : c'est le domaine de la piézothermoélasticité. Mindlin est le premier, en 1961, à développer les équations constitutives de la piézothermoélasticité linéaire dans le cadre d'une étude portant sur la propagation d'ondes planes dans un cristal infini [6]. Les relations constitutives de la piézothermoélasticité sont les suivantes :

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijk}^{E,T}(T) \cdot \sigma_{kl} + d_{kij}^T(T) \cdot E_k + \alpha_{ij}^{E,T}(T) \cdot \Delta T \quad (1-1)$$

$$D_i = d_{ijk}^T(T) \cdot \sigma_{jk} + \epsilon_{ij}^{\sigma T}(T) \cdot E_j + p_k^{\sigma,T}(T) \cdot \Delta T \quad (1-2)$$

et le Tableau 1-1 présente les variables et notations utilisées [8]. Les équations 1-1 et 1-2 décrivent respectivement les effets inverse et direct de la piézothermoélasticité. Dans ces équations les variables en exposant indiquent que les coefficients sont à considérer avec comme condition que ces variables en exposants soient constantes.

Tableau 1-1 : Variables et notations de la piézothermoélasticité

Variables			
Nature	Désignation	Définition	Unité
Mécanique	ε_{ij}	Tenseur des déformations mécaniques	m/m
	σ_{ij}	Tenseur des contraintes	N/m ²
	s_{ij}	Tenseur de souplesse élastique	m ² /N
Thermique	T	Température	°C
	ΔT	Variation de température	°C
Thermomécanique	α_{ij}	Coefficient d'expansion thermique	m/(m°C)
Electrique	E_i	Champ électrique	V/m
	D_i	Déplacement électrique	C/m ²
	ϵ_{ij}	Tenseur de permittivité électrique	F/m
Piézoélectrique	d_{ijk}	Tenseur des coefficients piézoélectriques ou constantes de charge	m/V
Pyroélectrique	p_i	Tenseur des coefficients pyroélectriques	C/m ²
Notations en exposant			
Electrique	E	Condition de tension constante	V/m
Thermique	T	Condition de température constante	°C
Mécanique	σ	Condition de contrainte constante	N/m ²

Le tenseur des coefficients piézoélectriques d_{ijk} est une matrice 6×3 couplant les déformations mécaniques au champ électrique existant dans le matériau. Dans le cas du matériau PZT et en respectant le système d'axe de la Figure 1-3 le tenseur des déformations piézoélectriques prend la forme suivante:

$$d_{ijk} E_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (1-3)$$

L'une des particularités est que les coefficients d_{31} , d_{32} et d_{33} sont de type membrane-membrane. La création d'un champ électrique dans une direction principale du cristal, ici la direction Z, engendre des déformations dans toutes les directions principales, sans aucune rotation. Le couplage des coefficients d_{15} et d_{24} avec des champs électriques dans les directions X et Y engendre du cisaillement dans les plans X-Y et Y-Z. Dans le cas présent d_{33} est le coefficient piézoélectrique majeur, c'est-à-dire que c'est le coefficient le plus élevé.

La Figure 1-3 présente le comportement d'un élément piézoélectrique de type PZT, dont la polarisation P est orientée suivant la direction Z. Dans le cas du schéma (a), le champ électrique E est nul, ce qui correspond à la forme naturelle de l'élément piézoélectrique avec ses dimensions de référence T , L et W . Lorsque le champ électrique E appliqué est opposé à la polarisation P , tel que le montre le schéma (b), l'élément se contracte dans la direction Z et s'allonge dans les directions X et Y. Le schéma (c) présente le cas inverse où le champ électrique E et la polarisation P ont la même direction. L'élément s'allonge alors suivant la direction Z et se contracte dans les directions X et Y.

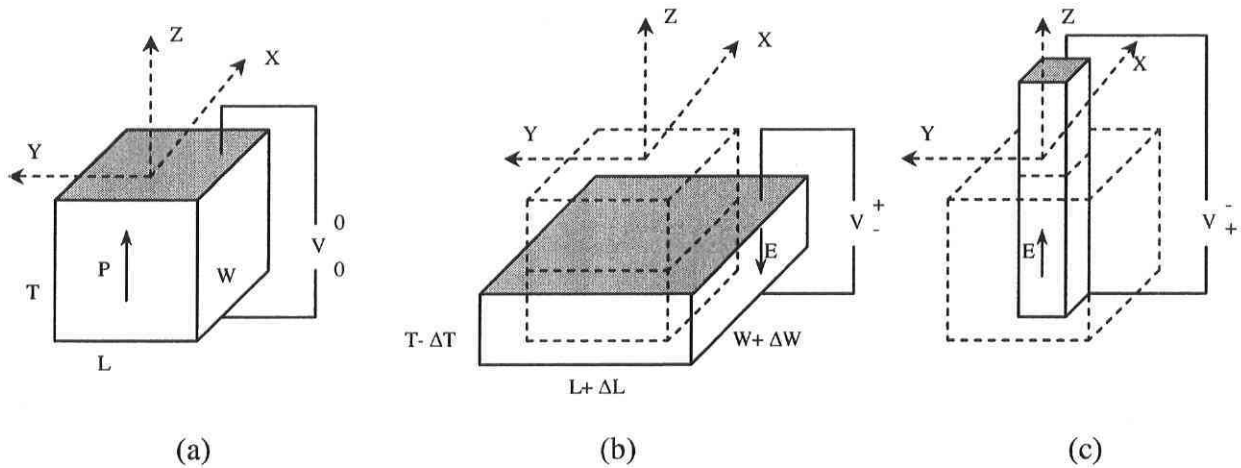


Figure 1-3 : Excitation d'un élément piézoélectrique de type PZT

1.3.3 Les composites à fibres actives

1.3.3.1 Limitations des piézocéramiques

Les matériaux piézocéramiques ont fortement participé au développement des structures intelligentes. Des modèles ont été développés afin d'incorporer des éléments piézocéramiques dans des structures simples telles que des poutres [9,10] ou bien des plaques [11,12]. De nombreuses applications aéronautiques plus complexes utilisent des éléments piézocéramiques. Des études ont été effectuées sur la réduction des amplitudes vibratoires d'une aile d'avion ou encore sur le contrôle acoustique structural des sections de fuselages d'avion afin de diminuer le niveau de pression acoustique [13, 14].

Lors de ces différentes utilisations, les piézocéramiques ont également fait apparaître certaines limitations d'utilisation. Tout d'abord, la nature fragile des céramiques rend ces éléments vulnérables aux ruptures lors des manipulations et des phases de collage. Ensuite, ils offrent une capacité très limitée pour l'adaptation à des structures courbes. Enfin, ils représentent un ajout de masse non négligeable à la structure hôte [5]. Trois critères qualitatifs caractérisant un actionneur découlent donc de l'utilisation des piézocéramiques [15] : performance, robustesse et mise en œuvre.

La performance correspond au besoin d'un grand pouvoir actif et d'une activation hautement directionnelle. La robustesse réfère à la résistance aux dommages durant la manipulation et l'utilisation. Enfin, la mise en œuvre définit le besoin d'actionneurs facilement intégrables, que ce soit pour couvrir des structures entières ou bien pour s'accommoder à des structures courbes [15].

1.3.3.2 Introduction des composites à fibres actives

Le principe des composites à fibres actives, introduit par Hagood et Bent en 1993, est d'intégrer des fibres piézoélectriques dans une matrice polymérique. Cet arrangement permet de répondre aux besoins mentionnés précédemment [5] :

- Les matériaux cristallins sont utilisés sous forme de fibres, impliquant une diminution de la fraction volumique occupée par les incursions néfastes, et donc une augmentation de la résistance spécifique du matériau.
- Les fibres étant placées dans une matrice flexible elles peuvent être plus fines et donc moins rigides qu'un élément monolithique en flexion.
- La matrice flexible permet bien entendu de protéger les fibres mais permet aussi de mieux s'adapter aux surfaces courbes.
- De tels actionneurs sont facilement intégrables en tant que couche active à l'intérieur d'un stratifié.

1.3.3.3 Développement des composites à fibres actives

Hager et al. ont travaillé, en 1993, à améliorer l'activation dans le plan. En utilisant des électrodes interdigitées (IDE, 'Interdigitated Electrodes'), ils ont appliqué un champ électrique dans le plan à un élément piézocéramique monolithique. Ceci a permis de polariser lors de la fabrication et ensuite d'activer le matériau à travers le coefficient piézoélectrique majeur, comme présenté à la Figure 1-4. Cependant, cet arrangement engendrait la création de contraintes trop importantes entraînant ainsi la rupture de la plaque piézocéramique monolithique [5].

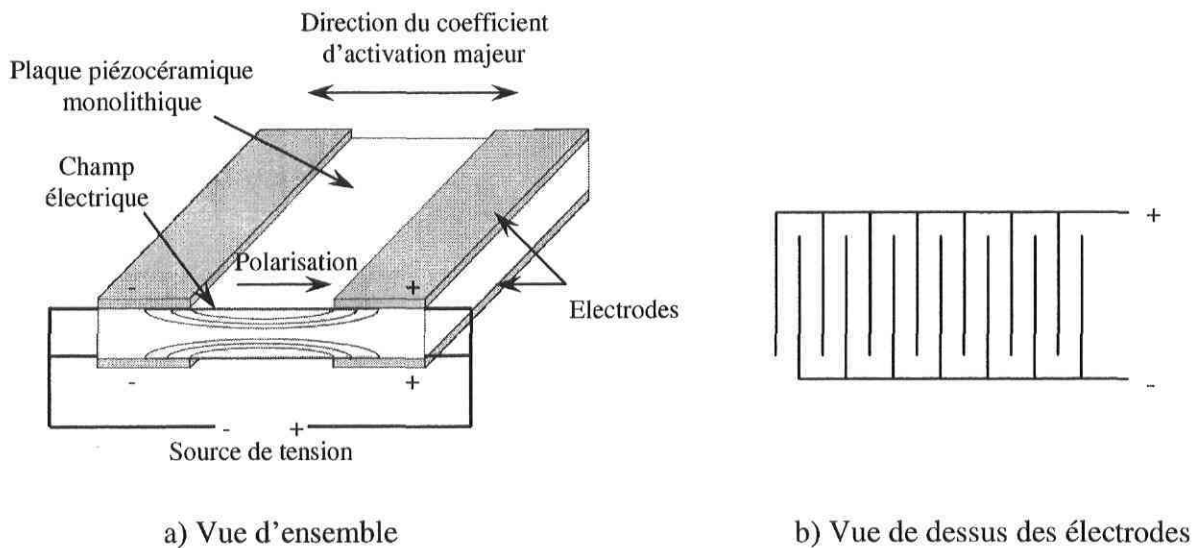


Figure 1-4 : Principe des électrodes interdigitées

Des composites à fibres piézoélectriques (PFC), avec électrodes uniformes, ont été développés en parallèle au Massachusetts Institute of Technology, dans le but de créer une activation orthotrope dans le plan. Ceci a permis d'obtenir plus de déformations dans la direction des fibres que dans les autres directions. Cette amélioration offre donc la possibilité de contrôler les déformations de la structure hôte dans des directions spécifiques. De plus, le matériau cristallin étant utilisé sous forme de fibres, il est plus résistant que précédemment. Cependant, les électrodes uniformes étant placées au dessus et en dessous d'une couche unique de fibres, la polarisation et le champ électrique sont dirigés dans l'épaisseur du matériau et non le long des fibres. L'activation dans le plan se fait donc en utilisant un coefficient piézoélectrique mineur [5].

La combinaison de l'activation dirigée du PFC et des déformations importantes obtenues à l'aide des électrodes interdigitées a permis de développer en 1997 le composite à fibre active (AFC) schématisé à la Figure 1-5. Les électrodes interdigitées créent une polarisation et un champ électrique dans l'axe des fibres et permettent d'activer le matériau suivant son coefficient piézoélectrique majeur. L'actionneur Macro Fiber Composite (MFCTM) utilisé dans le cadre de ce mémoire a été développé dans la lignée du composite à fibre active.

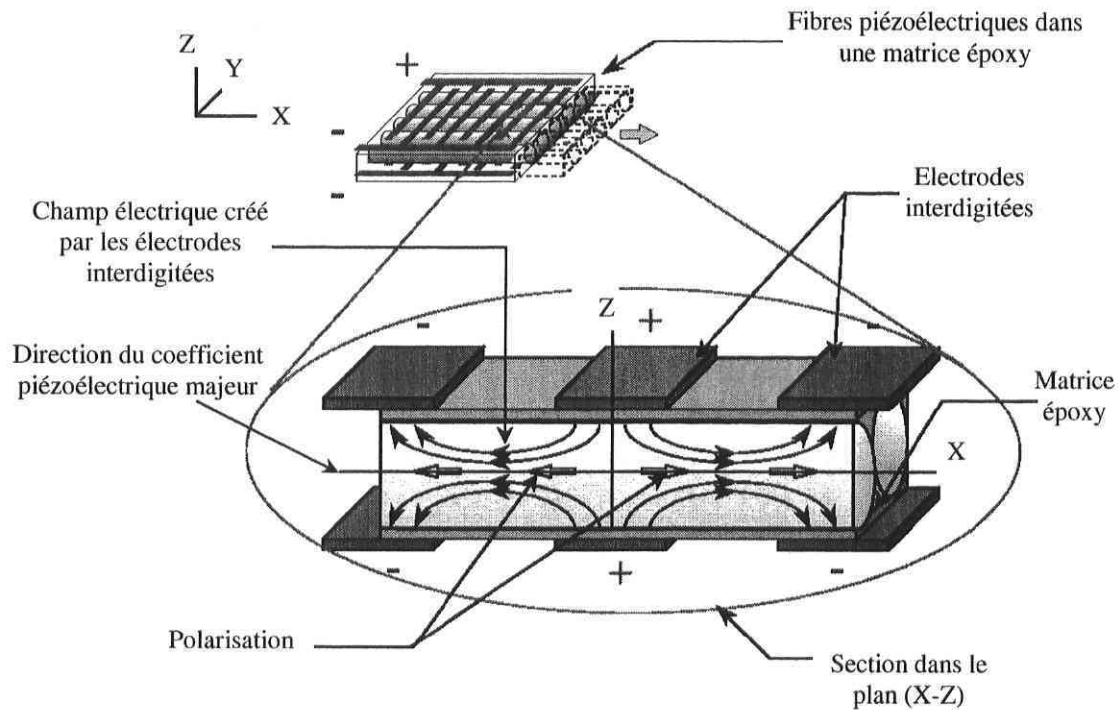


Figure 1-5 : Schématisation des composites à fibres actives [16]

Les propriétés de l'actionneur MFCTM et sa capacité à compenser les déformations induites thermiquement dans une structure composite ont été étudiées dans un travail de recherche réalisé au sein de l'Université Laval précédemment à ce mémoire (Gakwaya [17]). Des analyses numériques et des essais expérimentaux ont été réalisés dans le cas d'actionneurs MFCTM collés sur une plaque stratifiée. Les résultats obtenus ont montré que le MFCTM a la capacité de compenser des déformations thermiques induites dans un stratifié.

1.3.4 Etat de l'art du contrôle actif des déformations induites thermiquement dans les structures composites

De nombreux travaux ont été effectués afin de développer des modèles permettant de contrôler les vibrations induites dans une structure composite à l'aide d'actionneurs et de capteurs piézocéramiques [18,19]. Ces modèles purement numériques utilisent des algorithmes de contrôle

liant l'activation de l'actionneur à la dérivée temporelle de la sortie du capteur, la charge électrique, et permettent de contrôler des phénomènes vibratoires ayant des amplitudes de l'ordre de quelques millimètres.

Quelques études ont été réalisées sur le contrôle des déformations induites thermiquement dans des structures composites. Shen et Weng [12] proposent une formulation par éléments finis comprenant des éléments piézocéramiques et permettant de définir la forme d'une structure composite soumise à des actionneurs et à un chargement thermique. Ils étudient ainsi la réponse de la structure, la sortie du capteur et la tension nécessaire pour réduire la déflexion de la structure. Tan [20] propose un modèle par éléments finis simulant les compensations des déformations thermiques d'une coque parabolôïde à l'aide de matériaux intelligents. Il utilise un modèle itératif et un algorithme de contrôle basé sur les déformations de la structure permettant de définir la forme de la coque ainsi que la convergence de la déflexion en fonction des itérations. Koko et al. [21] ont intégré les effets thermopiézoélectriques dans le logiciel d'éléments finis SMARTCOM. Ceci leur permet de réaliser des analyses statiques et dynamiques du comportement d'une poutre composite comportant des films piézoélectriques (PVDF) ou des actionneurs piézocéramiques. Encore une fois ces études présentent des modèles numériques sans développement et mise en œuvre d'essais expérimentaux.

Zhou, Song et Binienda [10] se sont intéressés à la compensation des déformations thermiques d'une poutre en composite en utilisant des actionneurs piézocéramiques. Les analyses sont effectuées à l'aide du logiciel commercial d'éléments finis ANSYS. Ils présentent des résultats pour la simulation du comportement d'une poutre soumise à un chargement thermique et/ou à l'activation d'actionneurs. Dans un premier temps des analyses numériques statiques sont réalisées. Dans un second temps des essais expérimentaux sont effectués et les résultats obtenus montrent de bonnes corrélations. Enfin, ils se sont intéressés au contrôle actif d'un point de vue expérimental en utilisant un capteur de position laser et un contrôleur avec asservissement PID (Proportionnel, Intégral et Dérivatif) basé sur le déplacement du bout de la poutre. Les résultats obtenus permettent de montrer l'efficacité des actionneurs piézocéramiques à contrôler les déformations induites thermiquement dans une poutre en composite.

1.4 Objectifs de la recherche et présentation du mémoire

Comme nous l'avons vu précédemment, de nombreux travaux ont été effectués sur l'utilisation des actionneurs piézocéramiques pour le contrôle de structure. Par contre, puisqu'ils sont relativement nouveaux, les actionneurs MFCTM ont été peu utilisés et étudiés. L'objectif du travail réalisé dans le cadre de ce mémoire est d'étudier la faisabilité d'utiliser les actionneurs MFCTM pour le contrôle actif de la forme des structures composites soumises à un chargement thermique.

Les sous objectifs de recherche sont tout d'abord de prédire le comportement d'une structure composite soumise à des actionneurs MFCTM et à un chargement thermique en développant un modèle numérique, puis d'élaborer une stratégie permettant de réaliser le contrôle actif et enfin d'effectuer des essais expérimentaux afin de valider les résultats numériques.

Dans le deuxième chapitre du mémoire, l'actionneur MFCTM est présenté et ses principales propriétés ainsi que sa méthode de fabrication sont détaillées. Les équations régissant la piézoélectricité linéaire y sont aussi développées.

Le troisième chapitre introduit la modélisation par éléments finis d'une structure composite munie d'actionneurs MFCTM et permet de s'imprégner des types éléments utilisés ainsi que des caractéristiques des analyses effectuées.

Des analyses numériques sont réalisées dans le quatrième chapitre pour prédire les déformations thermiques d'une plaque composite seule puis d'une plaque composite comportant des actionneurs passifs. Des essais expérimentaux sont réalisés afin de valider l'étude numérique.

Ensuite, dans le cinquième chapitre, la capacité des actionneurs MFCTM à compenser les déformations induites thermiquement dans une structure composite est étudiée. Une plaque

stratifiée est soumise à une variation de température puis à l'activation des MFCTM. Les simulations numériques sont validées par des essais expérimentaux.

Enfin, les actionneurs MFCTM sont utilisés dans le sixième chapitre pour contrôler activement les déformations induites par des variations de température dans la plaque stratifiée. C'est-à-dire que les déformations induites sont détectées par un capteur puis que les actionneurs les compensent automatiquement par le biais d'une boucle de contrôle. Le comportement est étudié numériquement et expérimentalement en utilisant différents algorithmes de contrôle.

Chapitre 2 L'actionneur – capteur MFC™

2.1 Introduction

Comme il a été spécifié précédemment les composites à fibres actives ont été développés afin de répondre à des problématiques ne pouvant être résolues à l'aide des actionneurs piézocéramiques monolithiques à cause de leur fragilité. De plus, l'introduction des électrodes interdigitées a permis d'utiliser plus efficacement le coefficient piézoélectrique majeur du matériau, rendant ainsi les actionneurs plus performants. L'actionneur - capteur Macro Fiber Composite (MFC™), présenté à la Figure 2-1, a été développé récemment au Centre de Recherche Langley de la Nasa. Jusqu'à présent il n'a été utilisé que pour quelques applications. Par exemple l'actionneur MFC™ a été utilisé pour contrer la torsion et la flexion que subissent les queues verticales d'avions de combat ou pour contrôler les vibrations induites dans des structures spatiales gonflables [22]. Le MFC™ pourrait posséder un fort potentiel pour contrôler les déformations induites thermiquement dans des structures composites, cependant ceci n'a pas encore été étudié et constitue l'objet de ce travail.

Dans cette section l'actionneur MFC™ est présenté. Tout d'abord, sa composition et sa méthode de fabrication sont abordées. Ensuite, les équations constitutives de la piézoélectricité sont transposées au MFC™. Enfin, ses différentes propriétés sont détaillées.

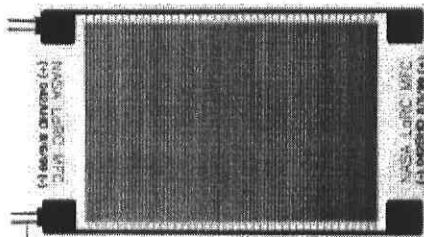


Figure 2-1 : Actionneur Macro Fiber Composite [17]

2.2 Composition et méthodes de fabrication du MFC™

2.2.1 Composition du MFC™

Le MFC™ est basé sur le principe des actionneurs à fibres actives et comporte trois constituants principaux : l'époxy, les fibres piézoélectriques et les électrodes interdigitées. Tel que le montre la Figure 2-2, le MFC™ est composé d'une couche de fibres rectangulaires unidirectionnelles de PZT-5A dans une matrice d'époxy, placée entre deux ensembles comportant une fine couche d'époxy et un arrangement d'électrodes interdigitées en cuivre. Ces électrodes sont elles mêmes couvertes par un film de Kapton.

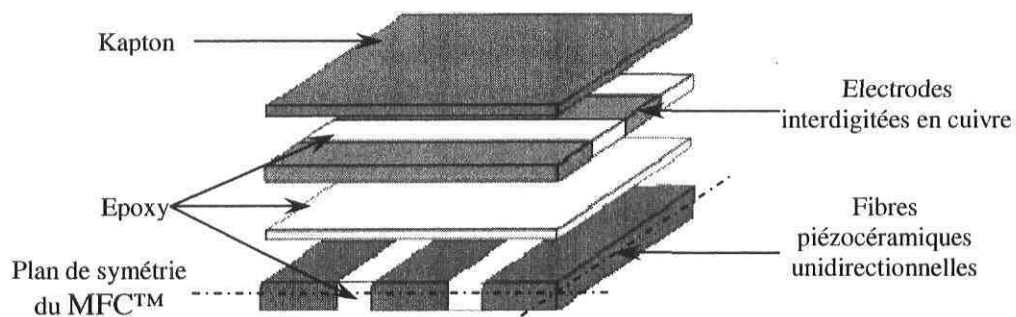


Figure 2-2 : Composition de l'actionneur MFC™

2.2.2 Méthode de fabrication du MFC™

La couche de fibres du MFC™ (Figure 2-3) est obtenue par la découpe à l'aide d'une scie à commande numérique d'une feuille de piézoéramique supportée par un film polymère, qui permet une bonne manipulation lors de la fabrication [16].

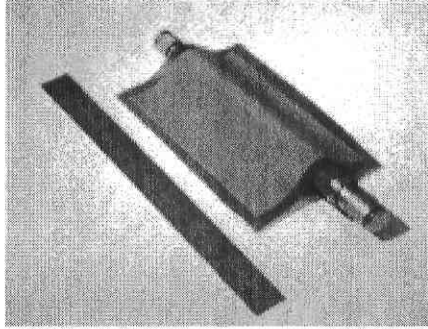
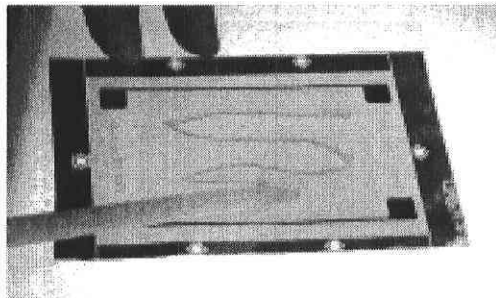
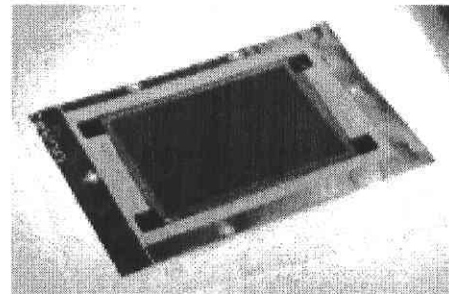


Figure 2-3 : Feuille de fibres piézoélectriques sur un film polymère [15]

L'arrangement d'électrodes, obtenu par un procédé de photorésistance, est supporté par un film diélectrique fait de Kapton. Une couche d'époxy structurelle est déposée sur toute la surface de cet ensemble (Figure 2-4 (a)). Ensuite, les fibres piézoélectriques, soutenues par le film polymère, sont plaquées contre l'arrangement d'électrodes inférieures (Figure 2-4 (b)). Le film polymère étant retiré, une couche d'époxy structurelle est appliquée sur les fibres et l'arrangement d'électrodes supérieures est placé. Le tout est ensuite polymérisé sous vide avec apport de chaleur. La consolidation finale est réalisée sous vide à l'aide d'une presse avec rouleaux chauffants et permet d'obtenir le MFC™ présenté à la Figure 2-2 [16].



(a)



(b)

Figure 2-4 : Assemblage des composants du MFC™ [16]

Une fois le MFC™ assemblé, un important champ électrique est appliqué afin de polariser les fibres piézocéramiques tel que présenté à la Figure 1-5. Les électrodes étant interdigitées comme sur la Figure 1-4, la direction du champ électrique change entre chaque électrode et donc la polarisation change de sens également. Dans le cas où les électrodes interdigitées sont espacées

de 0.107 mm, l'application pendant une minute d'un champ électrique correspondant à une différence de potentiel de 3000V aux bornes du MFC permet de polariser le matériau composant les fibres.

2.3 Le MFC™ et les équations de la piézoélectricité

Afin d'uniformiser les repères utilisés pour les futures simulations numériques et de suivre les conventions établies par la mécanique des matériaux composites [1], les équations ainsi que les propriétés de l'actionneur MFC™ sont définies par rapport au repère présenté à la Figure 2-5. Les directions X, Y et Z correspondent donc respectivement à la direction des fibres piézoélectriques, la direction transverse et la direction de l'épaisseur du MFC™.

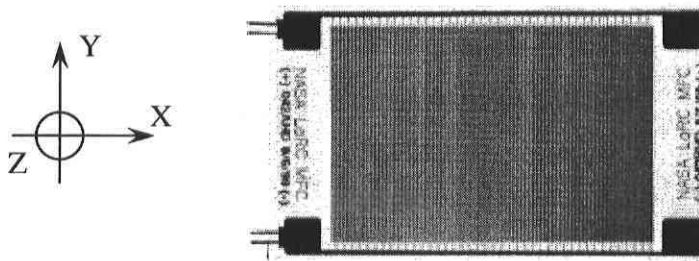


Figure 2-5 : Repère utilisé pour définir le MFC™ [16]

Rappelons ici les équations relatives de la piézothermoélasticité (1-1) et (1-2) définies au paragraphe 1.3.2, les variables étant détaillées au Tableau 1-1 :

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijk}^{E,T}(T) \cdot \sigma_{kl} + d_{kij}^T(T) \cdot E_k + \alpha_{ij}^{E,T}(T) \cdot \Delta T$$

$$D_i = d_{ijk}^T(T) \cdot \sigma_{jk} + \epsilon_{ij}^{\sigma T}(T) \cdot E_j + p_k^{\sigma,T}(T) \cdot \Delta T$$

Dans le cas des composites à fibres actives, la direction du coefficient piézoélectrique majeur est celle des fibres, c'est-à-dire la direction 1. Les équations constitutives deviennent donc [5] :

$$\begin{Bmatrix} \mathcal{E}_1 \\ \mathcal{E}_2 \\ \mathcal{E}_3 \\ \mathcal{E}_4 \\ \mathcal{E}_5 \\ \mathcal{E}_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^{E,T} & s_{12}^{E,T} & s_{13}^{E,T} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^{E,T} & s_{22}^{E,T} & s_{23}^{E,T} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^{E,T} & s_{23}^{E,T} & s_{33}^{E,T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^{E,T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^{E,T} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^{E,T} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11}^T & 0 & 0 \\ d_{12}^T & 0 & 0 \\ d_{13}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{25}^T & 0 \\ 0 & 0 & d_{36}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_1^{E,T} \\ \alpha_2^{E,T} \\ \alpha_3^{E,T} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \Delta T \quad (2-1)$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11}^T & d_{12}^T & d_{13}^T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25}^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^{\sigma,T} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22}^{\sigma,T} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^{\sigma,T} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} p_1^{\sigma,T} \\ p_2^{\sigma,T} \\ p_3^{\sigma,T} \end{Bmatrix} \Delta T \quad (2-2)$$

Plusieurs hypothèses peuvent être posées afin de simplifier ces équations. Tout d'abord il est supposé que le comportement de l'actionneur MFC™, qui est plat et fin, est régi par un état de contrainte plane. Ceci découle de l'hypothèse de Kirchoff dans la théorie des plaques simples et des coques [23]. Les contraintes normales dans l'épaisseur et les contraintes de cisaillement correspondantes sont donc considérées comme nulles :

$$\sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = 0 \quad (2-3)$$

D'autre part, le champ électrique engendré par les électrodes interdigitées est appliqué suivant la direction d'action majeure, c'est-à-dire la direction X, d'où :

$$E_2 = E_3 = 0 \quad (2-4)$$

Enfin, dans le cas du matériau piézo-céramique composant les fibres du MFC™, on a $d_{12}=d_{13}$. Après simplification, les équations (2-1) et (2-2) deviennent :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11}^T & \alpha_1^{E,T} & s_{11}^{E,T} & s_{12}^{E,T} & 0 \\ d_{12}^T & \alpha_2^{E,T} & s_{12}^{E,T} & s_{22}^{E,T} & 0 \\ d_{12}^T & \alpha_3^{E,T} & s_{13}^{E,T} & s_{23}^{E,T} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^{E,T} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ \Delta T \\ \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (2-5)$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^{\sigma,T} & p_1^{\sigma,T} & d_{11}^T & d_{12}^T & 0 \\ 0 & p_2^{\sigma,T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_3^{\sigma,T} & 0 & 0 & d_{36}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ \Delta T \\ \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} \quad (2-6)$$

Les relations (2-5) et (2-6) correspondent respectivement à un comportement du MFCTM en tant qu'actuateur et en tant que capteur. Dans le cadre des équations théoriques précédentes, l'excitation électrique est réalisée via un champ électrique. Or dans le cas d'une utilisation expérimentale, ce champ électrique est créé par l'application d'une différence de potentiel aux bornes du MFCTM. Le champ électrique est défini comme le quotient de cette différence de potentiel V par la distance $w_{\text{électrodes}}$ séparant les électrodes interdigitées [5] :

$$E_{1\text{moy}} = \frac{V}{w_{\text{électrodes}}} \quad (2-7)$$

2.4 Propriétés du MFCTM

Les équations de la piézothermoélasticité ayant été transposées à l'actionneur MFCTM, les propriétés de ce dernier peuvent être détaillées. Un travail de recherche réalisé au Département de Génie Mécanique de l'Université Laval préalablement au travail présenté dans le cadre de ce mémoire a permis de définir les différentes propriétés de l'actionneurs MFCTM [17], qui sont présentées au Tableau 2-1. Cette étude a permis d'évaluer les propriétés élastiques et les coefficients d'expansion thermiques du MFCTM dans les trois directions à partir de la loi des mélanges, de la théorie classique des stratifiés et de la méthode des éléments finis. Des études expérimentales ont été effectuées afin de mesurer les coefficients d'expansion thermique et les coefficients de déplacement piézoélectrique. Les valeurs obtenues ont été validées d'une part à celles données par le fabricant et d'autre part à celles rapportées dans la littérature.

Tableau 2-1 : Propriétés de l'actionneur MFC™

Propriétés élastiques			Propriétés thermiques et piézoélectriques		
Propriété	Unité	MFC™	Propriété	Unité	MFC™
E_1	GPa	30.3	α_1	$\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$	5.9
E_2	GPa	15.9	α_2	$\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$	29.6
E_3	GPa	11.47	α_3	$\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$	21
G_{12}	GPa	5.515	d_{11}	pm/V	360
G_{13}	GPa	2.6	d_{13}	pm/V	-190
G_{23}	GPa	2.14			
ν_{12}		0.31			
ν_{13}		0.289			
ν_{23}		0.327			

Le MFC™ n'ayant pas été utilisé comme capteur au cours de l'étude préliminaire [17], le coefficient pyroélectrique n'y est pas défini. Parmi les différents composants du MFC™, le seul possédant une propriété pyroélectrique est la piézocéramique des fibres. Le coefficient pyroélectrique pris en compte dans l'équation (2-5) du MFC™ est donc celui du matériau piézocéramique PZT-5A1. La valeur fournie par le fabricant de la piézocéramique PZT-5A1 [24] est :

$$p = -0.0002 \text{ Coul}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Il existe d'autre part certaines propriétés à respecter lors de l'utilisation d'un MFC™. En effet, la température de Curie de la piézocéramique composant les fibres est de 350°C. La température de Curie est une propriété des matériaux ferroélectriques au-delà de laquelle leur polarisation spontanée disparaît. Il est donc impératif que la température d'utilisation ne dépasse pas la température de Curie. Cependant, la température d'utilisation d'un MFC™ est en réalité limitée par la température maximale admissible par la résine le composant, qui est de 90°C. Un phénomène similaire de dépolarisation peut être engendré par la création d'un champ électrique trop puissant. C'est pourquoi la différence de potentiel appliquée aux bornes du MFC™ doit être comprise entre -500V et 1500V [25].

2.5 Conclusion

Le MFC™ est un actionneur/capteur contenant des fibres actives de piézocéramique et un arrangement d'électrodes interdigitées. La combinaison de ces deux composants permet au MFC™ d'une part de palier aux problèmes engendrés par l'utilisation des piézoélectriques monolithiques et d'autre part d'être plus performant tout en étant robuste et souple. Maintenant que le MFC™ a été présenté, que ses propriétés ont été détaillées et que les équations de la piézothermoélasticité lui ont été appliquées, il est possible de s'intéresser à son utilisation pour contrôler les déformations induites thermiquement dans des matériaux composites et à la modélisation de son comportement.

Chapitre 3 Introduction à la modélisation d'une structure composite munie d'actionneurs MFCTM

3.1 Introduction

Dans le but de modéliser correctement par la méthode des éléments finis une structure composée d'une plaque stratifiée et d'actionneurs MFCTM, il est nécessaire de bien définir les caractéristiques de la modélisation à réaliser. En effet, il est préférable de s'assurer du choix des éléments et du type d'analyse par éléments finis. Tout d'abord, les éléments adaptés à l'étude et disponibles dans le logiciel Abaqus sont présentés. Ensuite, les caractéristiques de ces éléments sont étudiées dans le but de prédire leur comportement lors des simulations. Enfin, certaines règles relatives à la modélisation de structures composites sont présentées.

3.2 Présentation des éléments utilisés

3.2.1 Eléments piézoélectriques disponibles dans le logiciel Abaqus

Les structures faites en matériaux composites sont en général des structures minces et peuvent être modélisées par la méthode des éléments finis à l'aide d'éléments de coque. L'actionneur MFC™ pouvant être considéré comme une structure composite, il serait naturel de modéliser son comportement avec des éléments de coque. Cependant le logiciel par éléments finis utilisé pour ce projet (Abaqus 6.4) ne dispose pas d'élément de coque piézoélectrique. En plus des éléments cylindriques et axisymétriques disponibles, Abaqus propose trois types d'éléments piézoélectriques :

- élément solide linéaire à intégration complète (C3D8E)
- élément solide quadratique à intégration complète (C3D20E)
- élément solide quadratique à intégration réduite (C3D20RE)

L'actionneur MFC™ doit donc forcément être modélisé à l'aide d'éléments solides. Afin d'uniformiser le maillage et d'obtenir un modèle cohérent, il est nécessaire de modéliser la structure entière avec des éléments solides. La plaque stratifiée hôtesse peut donc être modélisée avec les éléments suivants :

- élément solide linéaire à intégration complète (C3D8)
- élément solide linéaire à intégration réduite (C3D8R)
- élément solide quadratique à intégration complète (C3D20)
- élément solide quadratique à intégration réduite (C3D20R)

3.2.2 Prédiction du comportement des éléments disponibles

Le choix du type et de l'ordre des éléments (linéaires ou quadratiques) et du niveau d'intégration affecte la précision d'une analyse [26]. Il est donc important de connaître l'influence que peuvent avoir les différentes possibilités.

3.2.2.1 Intégration complète

Tout d'abord, les termes "intégration complète" et "intégration réduite" sont liés au nombre de points de Gauss nécessaires pour l'intégration des termes polynomiaux de la matrice de rigidité de l'élément en question. Les éléments linéaires à intégration complète utilisent deux points d'intégration par dimension, alors que les éléments quadratiques en utilisent trois. Les positions des points d'intégration d'éléments linéaire et quadratique à deux dimensions et intégration complète sont montrées à la Figure 3-1 [26].



Figure 3-1 : Points d'intégration pour des éléments à intégration complète en deux dimensions

Les éléments solides linéaires à intégration complète sont affectés par la rigidification en cisaillement, ou "shear locking". Afin d'expliquer ce phénomène, observons le comportement réel d'un élément de matière d'une structure en flexion pure, tel que présenté à la Figure 3-2. Les lignes initialement parallèles à l'axe horizontal se déforment en suivant une courbure constante, tandis que les lignes à travers l'épaisseur restent droites. En finalité, les angles entre les lignes initialement horizontales et verticales sont toujours de 90° .



Figure 3-2 : Déformation d'un élément de matière soumis à un moment de flexion pure

Cependant, les côtés d'un élément linéaire n'ont pas la capacité de se courber, c'est pourquoi un élément de matière modélisé à l'aide d'un de ces éléments et soumis à un moment de flexion pure prend la forme d'un trapèze, comme présenté à la Figure 3-3.



Figure 3-3 : Déformation d'un élément linéaire à intégration complète soumis à un moment de flexion pure

Le côté supérieur de l'élément s'est allongé, ce qui correspond bien à de la tension pour σ_{11} , et le côté inférieur à lui rétréci, indiquant que σ_{11} est en compression. En supposant les déplacements petits, les dimensions des lignes verticales n'ont pas changées, impliquant que σ_{22} est nul. Ceci correspond bien au comportement d'un élément de matière en flexion pure. Cependant, on peut remarquer que les angles entre les lignes initialement verticales et horizontales ne sont plus de 90° , ce qui suppose que la contrainte de cisaillement σ_{12} est non nulle. Ceci n'est pas valable dans le cas d'un moment de flexion pure, l'élément est trop rigide pour représenter le comportement réel du fait que ces côtés n'ont pas la capacité de se courber.

Les éléments quadratiques à intégration complète ne subissent pas le problème de rigidification en cisaillement, étant donné que leurs côtés peuvent se courber, comme présenté à la Figure 3-4. Ils permettent donc d'approcher plus précisément le comportement d'un élément de matière en flexion pure [26].

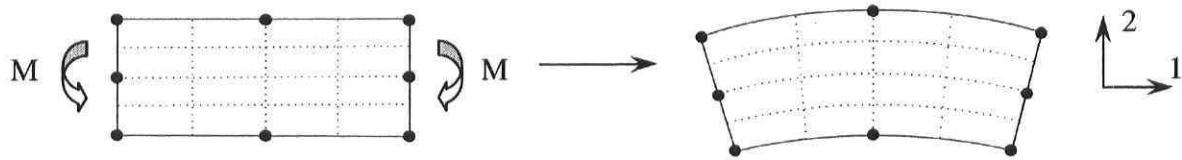


Figure 3-4 : Déformation d'un élément quadratique à intégration complète soumis à un moment de flexion pure

3.2.2.2 Intégration réduite

Les éléments à intégration réduite utilisent un point d'intégration de moins par dimension que les éléments à intégration complète. Les positionnements des points d'intégration dans le cas d'éléments à intégration complète sont montrés à la Figure 3-5 [26].



Figure 3-5 : Points d'intégration pour des éléments à intégration réduite en deux dimensions

Les éléments linéaires à intégration réduite subissent un mode de déformation à énergie nulle, ou "hourglassing", et tendent à être trop flexible. Afin de comprendre ce phénomène, considérons de nouveau un élément de matière représenté par un élément linéaire à intégration réduite (Figure 3-6).

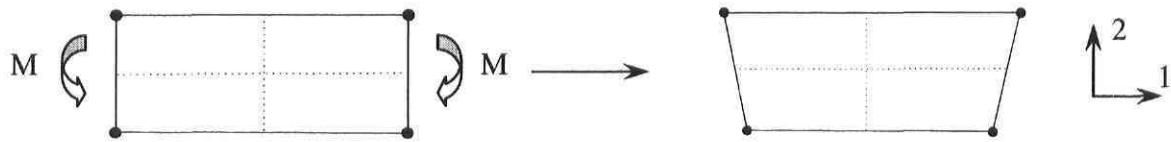


Figure 3-6 : Déformation d'un élément linéaire à intégration réduite soumis à un moment de flexion pure

Les lignes en pointillés n'ont pas changé de dimension et l'angle entre ces lignes est resté le même, c'est-à-dire 90° . Ceci implique que les composantes de contrainte au point d'intégration unique sont nulles. Ce mode de déformation est donc à énergie nulle et l'élément ne peut pas résister à la déformation étant donné qu'il n'a pas de rigidité. Une solution pour palier à ce problème est de créer un maillage suffisamment fin, en utilisant un minimum de quatre éléments dans l'épaisseur des structures modélisées en flexion [26].

Les éléments quadratiques à intégration réduite peuvent aussi subir le mode de déformation à énergie nulle dans le cas où un seul élément est utilisé dans l'épaisseur ce qui pourrait engendrer des problèmes de convergence au niveau de l'analyse numérique. Cependant ce mode ne se propagera pas si le maillage est correctement réalisé et n'aura pas lieu si l'on utilise un minimum de deux éléments dans l'épaisseur [26].

3.2.2.3 Conclusion quant aux éléments disponibles

Les éléments linéaires à intégration complète (C3D8) et à intégration réduite (C3D8R) souffrent respectivement de rigidification par cisaillement et d'un mode de déformation à énergie nulle, ce qui entraîne dans le premier cas une rigidité trop importante et dans le second cas un manque de rigidité pour modéliser des structures soumises à des phénomènes de flexion. Les éléments quadratiques à intégration complète (C3D20) et à intégration réduite (C3D20R) ne montrent pas de problème tant que le maillage est réalisé correctement. On peut donc penser que ces derniers donneront des résultats plus proches de la réalité que les éléments linéaires. Le manuel d'utilisation d'Abaqus stipule que les éléments quadratiques sont généralement plus précis que les éléments linéaires dans le cas de modélisation n'entraînant pas des conditions de contact et d'impact ou des distorsions sévères des éléments. Les éléments quadratiques sont d'ailleurs, a priori, plus précis dans des problèmes où les phénomènes de flexion dominent [26].

3.3 Modélisation des structures composites

3.3.1 Analyse en grands déplacements

Pour l'étude des déformations élastiques de petites amplitudes les analyses par éléments finis sont généralement linéaires. Cependant, un chargement thermique peut induire des distorsions importantes et donc de grands déplacements. Il est alors nécessaire dans les analyses de tenir compte de ces non-linéarités géométriques, et c'est pourquoi les analyses sont définies comme géométriquement non-linéaires.

3.3.2 Modélisation d'une structure composite à l'aide d'éléments solides

Comme présenté au paragraphe 3.2.1, une structure composite est en général modélisée à l'aide d'éléments de coque. Une autre méthode de modélisation dite par "coque épaisse" utilise un élément solide dans l'épaisseur du composite. Cet élément a alors une définition matérielle correspondant à la théorie classique des stratifiés. Cependant, ceci limite le degrés de liberté en rotation dans l'épaisseur et fausse donc la prédiction des phénomènes prenant place au travers du composite.

Afin de remédier à ces inconvénients il est possible de modéliser un composite stratifié en utilisant une couche d'éléments pour définir chaque couche du stratifié, ce qui sera réalisé dans la suite de ce mémoire. Ceci permet d'obtenir une prédiction plus réaliste des phénomènes prenant place à travers l'épaisseur, mais engendre, en contre partie, un nombre d'éléments plus important et donc des analyses plus coûteuses en temps de simulation.

3.4 Conclusion

L'étude des éléments pouvant être utilisés dans le cas de la modélisation d'un matériau piézoélectrique impose certaines restrictions. Tout d'abord, les propriétés des éléments disponibles pour la présente étude laissent penser, a priori, qu'il est nécessaire d'utiliser des éléments quadratiques (C3D20 et C3D20R) plutôt que des éléments linéaires (C3D8 et C3D8R) afin d'obtenir des résultats cohérents. D'autre part, la génération par chargement thermique de grands déplacements de la plaque stratifiée impose l'utilisation d'analyses géométriquement non-linéaires. Enfin, étant donné que des éléments solides seront utilisés pour modéliser une plaque stratifiée, chacune des couches du stratifié sera représentée par une couche d'éléments.

Chapitre 4 Modélisation des déformations thermiques par la méthode des éléments finis

4.1 Introduction

Dans le but d'obtenir une modélisation valide et avant d'utiliser l'actionneur MFC™ pour compenser ou contrôler les déformations thermiques induites dans une structure composite, il est important de s'assurer que le modèle développé prédise correctement les déformations thermiques dans une structure simple. Une plaque stratifiée $[0/90_3]_T$ fabriquée à une température de 94°C est modélisée numériquement à l'aide de différents types d'éléments et étudiée expérimentalement. Puis, une étude similaire est effectuée avec une plaque stratifiée identique, supportant deux actionneurs MFC™ sur une de ses faces.

4.2 Modélisation d'une plaque stratifiée

Afin de valider le choix des éléments solides à utiliser, la plaque hôte est dans un premier temps étudiée seule. Cette plaque est constituée d'un stratifié $[0/90_3]_T$ en carbone/epoxy (panex 33/RS-1) et mesure 250mm de long, 100mm de large et 0,68mm d'épaisseur. Lors des essais, elle est encastrée à l'une de ses extrémités sur une longueur de 10mm, tel que schématisé à la Figure 4-1. Les propriétés du composite sont présentées au Tableau 4-1. Lors de cette analyse par éléments finis, la forme que prend la plaque composite lorsqu'elle est refroidie de 94°C (température de polymérisation) à 24°C (température ambiante) est étudiée.

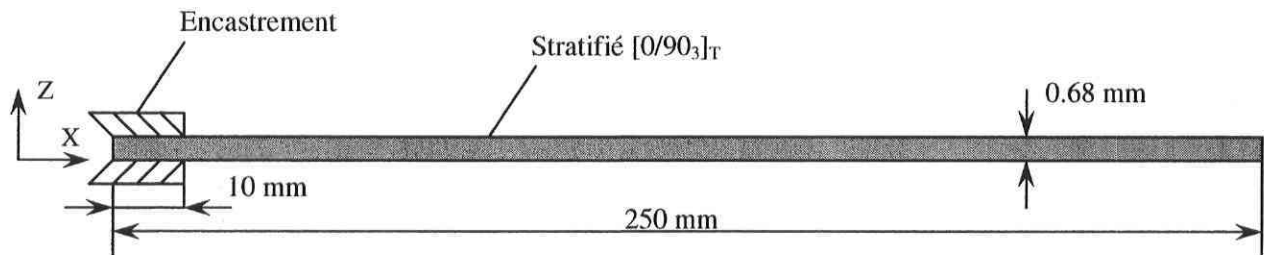


Figure 4-1 : Géométrie de la plaque stratifiée

Tableau 4-1 : Propriétés du composite unidirectionnel

Propriété *	Unité	Panex 33/RS-1
E_1	GPa	101.6
E_2	GPa	7.91
E_3	GPa	7.91
G_{12}	GPa	3.01
G_{13}	GPa	3.01
G_{23}	GPa	2.71
ν_{12}		0.318
ν_{13}		0.318
ν_{23}		0.458
α_1	$\mu/^\circ\text{C}$	-0.06
α_2	$\mu/^\circ\text{C}$	41.7
α_3	$\mu/^\circ\text{C}$	41.7

* Les propriétés sont exprimées dans un repère conventionnel associée à un composite unidirectionnel.

4.2.1 Description des modèles

La plaque stratifiée a été modélisée avec Abaqus en utilisant les éléments de coque S4R5 et les éléments solides suivants : C3D8, C3D8R, C3D20 et C3D20R. Les éléments de coque S4R5 seront la référence car leur validité pour modéliser une structure composite mince est reconnue. Les maillages, comportant 50 éléments dans la longueur et 20 dans la largeur, soit un total de 1000 dans le cas des éléments de coque, et 90 dans la longueur, 15 dans la largeur et 4 dans l'épaisseur, soit un total de 5400 dans le cas des éléments solides, sont présentés à la Figure 4-2.

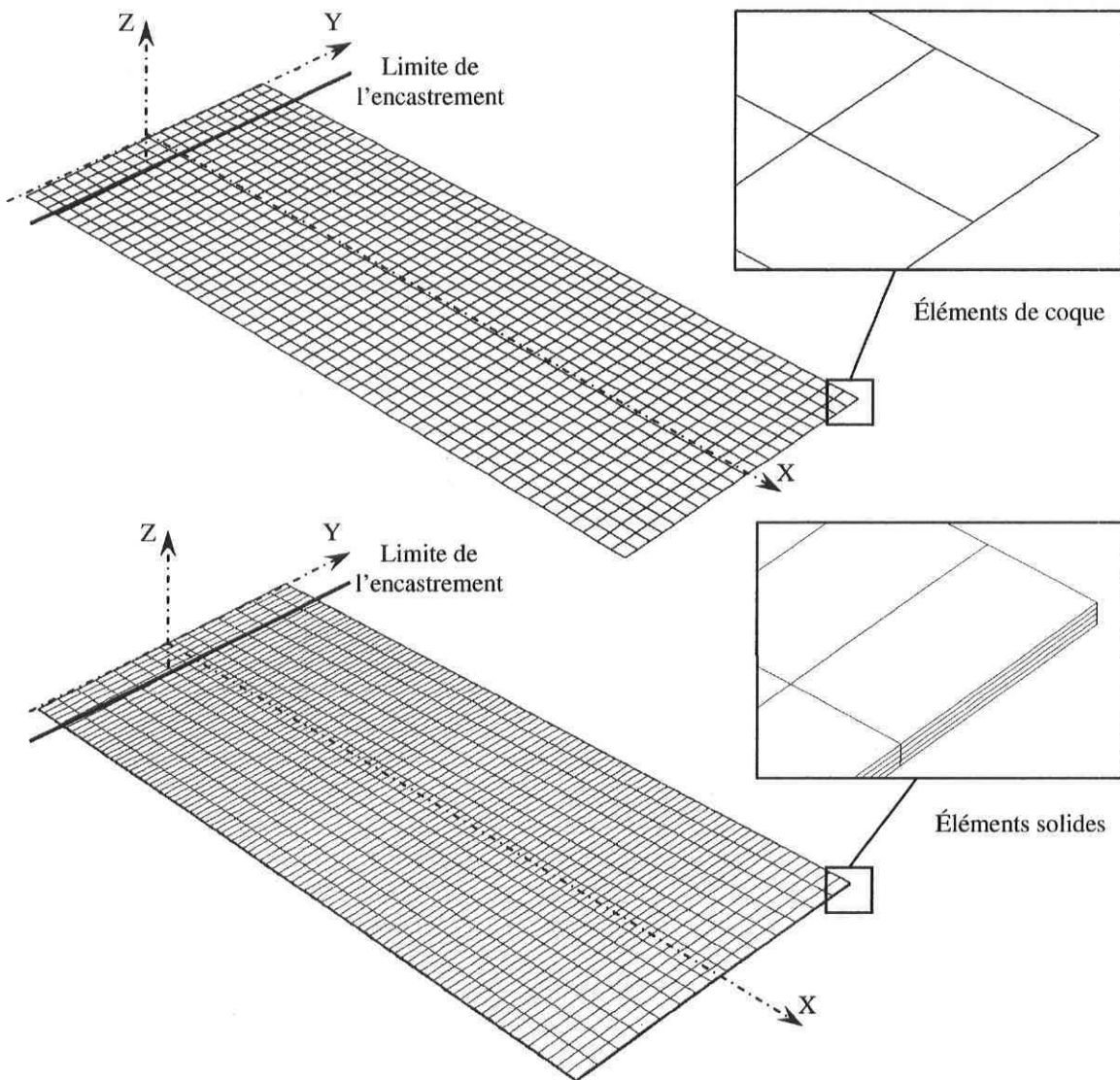


Figure 4-2 : Maillage de la plaque stratifiée

Une température de 94°C, correspondant à la température de polymérisation de la résine, est appliquée à tous les nœuds du modèle en condition initiale. Suite à cela, une température de 25°C est appliquée lors des analyses. Les déplacements dans les trois directions sont bloqués pour les nœuds correspondant à la zone d'encastrement, sur une longueur de 10mm et sur toute la largeur de la pièce, tel que présenté à la Figure 4-1.

Comme il a été mentionné au paragraphe 3.3.1, il est nécessaire de tenir compte des non-linéarités géométriques dans le cas des analyses impliquant de grands déplacements. Le stratifié étant non symétrique, les variations de température par rapport à la température de polymérisation de 94°C engendrent une courbure de la plaque et de grands déplacements, c'est pourquoi les analyses sont définies comme géométriquement non linéaires.

Les fichiers *.inp types de définition des analyses sont présentées dans l'Annexe A.

4.2.2 Résultats numériques

La forme de la plaque a été calculée par les modèles utilisant les différents types d'éléments. Le déplacement suivant l'axe Z, noté U_3 , prédit hors du plan le long de la plaque ($y=0$) est représentée sur la Figure 4-3.

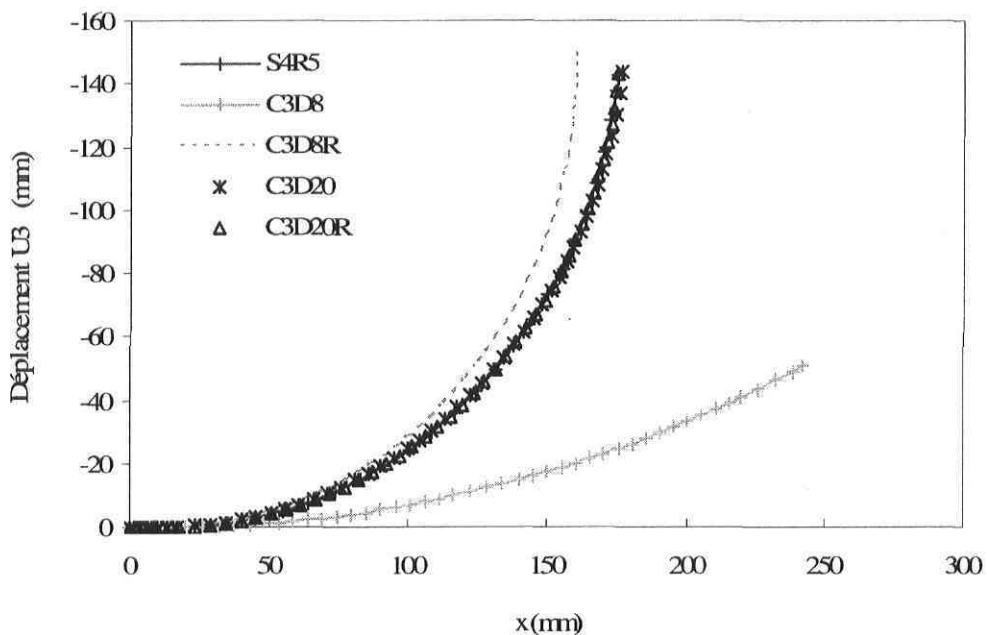


Figure 4-3 : Déflexion à 25°C de la plaque stratifiée fabriquée à 94°C

Il apparaît clairement que les résultats obtenus à l'aide des éléments C3D20 et C3D20R sont quasiment identiques aux résultats de la simulation réalisée à l'aide des éléments de coque S4R5, qui sont notre référence pour la modélisation des plaques en composite. D'autre part, on peut observer que la forme prédire par les éléments C3D8 révèle un comportement bien trop rigide en comparaison aux éléments de coque. Enfin, les éléments C3D8R montrent un manque de rigidité vis-à-vis des éléments de coque. Ces résultats concordent bien avec la conclusion amenée au paragraphe 3.2.2.3 sur la prédiction du comportement des éléments disponibles.

Notons qu'il a été spécifié au paragraphe 3.2.2.2 que les éléments C3D8R risquaient de présenter un comportement trop flexible car ils subissent un mode de déformation à énergie nulle, mais que cela pouvait être évité en augmentant le nombre d'éléments à travers l'épaisseur. Il aurait donc été possible d'améliorer les résultats obtenus à l'aide de ces éléments. Cependant, afin de conserver un nombre convenable d'éléments pour le modèle entier, les éléments à travers l'épaisseur ont été limités à quatre, un pour chaque couche du stratifié. Ceci est aussi justifié par la future modélisation de l'actionneur MFC™, qui a une épaisseur de 0.3mm, ce qui est aussi une contrainte pour le nombre d'éléments à travers l'épaisseur.

4.2.3 Essais expérimentaux

Afin de valider les résultats théoriques obtenus à l'aide de la modélisation par éléments finis, une plaque $[0/90_3]_T$ a été fabriquée et sa forme a été mesurée à température ambiante.

4.2.3.1 Fabrication et caractérisation de la plaque stratifiée

Un stratifié $[0/90_3]_T$ mesurant 250mm de longueur et 100mm de largeur a été fabriqué de la façon suivante :

- Une couche de pré-imprégné unidirectionnel est découpée avec des dimensions de 250mm de long dans le sens des fibres et 100mm de largeur.
- Trois couches de pré-imprégné unidirectionnel sont découpés avec des dimensions de 100mm de long dans le sens des fibres et 250mm dans la largeur.
- Ces quatre couches sont superposées et disposées sur une plaque d'aluminium.

- Le tout est ensuite recouvert d'un film séparateur et d'un feutre absorbant, puis placé sous vide.
- L'ensemble est mis au four à une température de 65°C pendant ½ h, puis à une température de 94°C pendant 12h pour la polymérisation de la résine.

Les propriétés du pré-impregné sont identiques à celles présentées au Tableau 4-1.

4.2.3.2 Le montage expérimental

Pour réaliser les mesures expérimentales, la plaque stratifiée est encastrée à une extrémité et placée dans une pièce à une température ambiante de 25°C. Afin de déterminer la forme de la plaque, des mesures de sa déflexion sont réalisées en plusieurs points le long de l'axe X à l'aide d'un capteur laser Keyence LK-503 après avoir soigneusement positionné chacun des éléments du montage (Figure 4-4). Le point de référence des mesures est défini le plus proche possible de l'encastrement, la tolérance de positionnement correspondant au diamètre du faisceau laser. La distance séparant les 10 points de mesure est approximativement de 20mm le long de l'axe X.

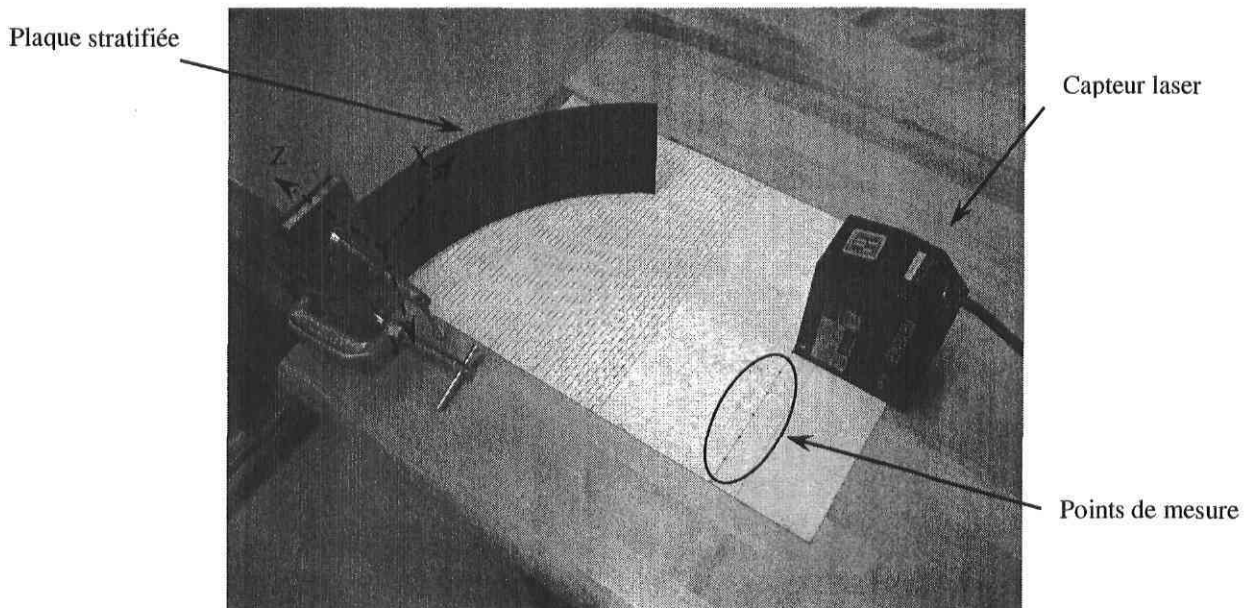


Figure 4-4 : Montage expérimental pour la mesure de la forme à 25°C d'une plaque stratifiée [0/90₃]_T

4.2.3.3 Résultats expérimentaux et corrélation

Les résultats obtenus expérimentalement sont comparés aux résultats obtenus à l'aide de la modélisation par éléments finis à la Figure 4-5. Cette figure présente les déplacements hors du plan U_3 en fonction de x . Afin de clarifier le graphique, seuls les résultats obtenus par simulation à l'aide des éléments C3D20R sont représentés. On observe que les déplacements hors du plan mesurés expérimentalement et ceux obtenus numériquement sont semblables. L'erreur moyenne du déplacement U_3 le long de l'axe X est de 2,5%.

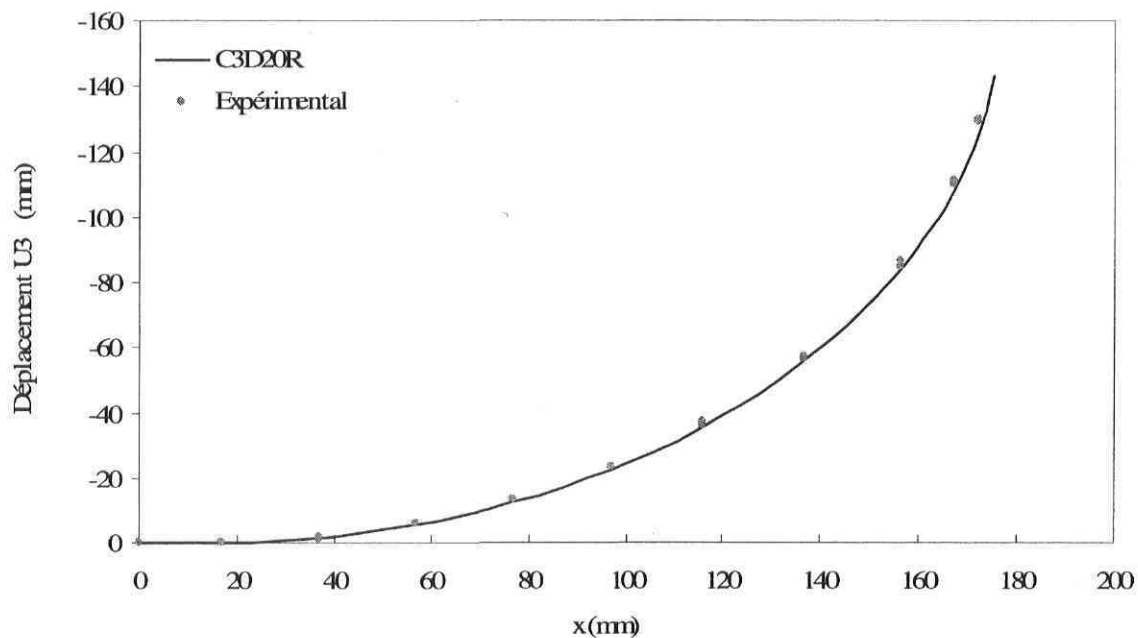


Figure 4-5 : Comparaison des formes obtenues expérimentalement et numériquement à 25°C d'une plaque stratifiée $[0/90_3]_T$ fabriquée à 94°C

4.2.4 Conclusion partielle

Une plaque stratifiée a été modélisée à l'aide du logiciel Abaqus en utilisant divers types d'éléments afin de valider le choix des éléments solides à utiliser. Une modélisation à l'aide d'éléments de coque, référence dans la modélisation de plaque mince, a permis de valider l'utilisation des éléments solides quadratiques à intégration complète (C3D20) et à intégration réduite (C3D20R). Ceci a d'autre part mis en évidence les problèmes engendrés par l'utilisation

des éléments solides linéaires à intégration complète (C3D8) et à intégration réduite (C3D8R) dans le cas d'une plaque mince soumise à de la flexion et à de grands déplacements. Les résultats obtenus expérimentalement permettent de valider une seconde fois l'utilisation des éléments solides quadratiques. Ceci correspond aux conclusions apportées aux paragraphes 3.2.2.3 quant à la prédiction du comportement des éléments solides dans le cas de la modélisation d'une plaque mince de composite.

4.3 Modélisation d'une plaque stratifiée avec deux actionneurs

Les éléments linéaires (C3D8 et C3D8R) et quadratiques (C3D20 et C3D20R) ont été testés dans le cas de la modélisation d'une plaque stratifiée. La combinaison de ces éléments avec des éléments solides piézoélectriques doit maintenant être validée. Une structure composée d'une plaque stratifiée $[0/90_3]_T$ et de deux actionneurs MFCTM est modélisée numériquement puis étudiée expérimentalement. Tel que le montre la Figure 4-6 deux actionneurs MFCTM sont collés sur la surface supérieure du stratifié, de telle sorte que les fibres piézoélectriques du MFCTM soient alignées avec celles de la couche à 0°. Le comportement de cette structure est ici analysé à température ambiante avec des actionneurs passifs. Les propriétés du composite et des actionneurs MFCTM sont respectivement présentées au Tableau 4-1 et au Tableau 2-1.

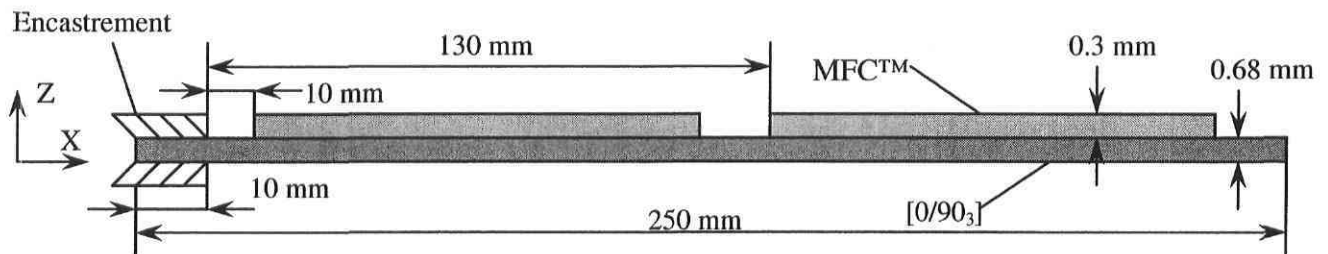


Figure 4-6 : Géométrie de la plaque stratifiée avec deux actionneurs MFCTM

4.3.1 Description du modèle

Il a été conclu au paragraphe 4.2.4 que les éléments solides quadratiques étaient les plus aptes à représenter le comportement d'une plaque stratifiée. D'autre part, le paragraphe 3.2.2.2 spécifie que les éléments quadratiques à intégration réduite, lorsqu'ils sont utilisés avec deux éléments à travers l'épaisseur, ne subissent ni la rigidification en cisaillement ni le mode de déformation à énergie nulle. Ils permettent de plus de raccourcir le temps de calcul par rapport à des éléments à intégration complète. La structure présentée précédemment a donc été modélisée à l'aide d'Abaqus en utilisant une combinaison d'éléments solides C3D20R et C3D20RE avec 4 éléments à travers l'épaisseur de la plaque stratifiée $[0/90_3]_T$ et deux éléments à travers l'épaisseur des actionneurs MFCTM. Le maillage présenté à la Figure 4-7 comporte 96 éléments dans la longueur et 15 dans la largeur pour le stratifié, les MFCTM étant constitués de 32 éléments dans leur longueur et 5 dans la largeur. Le nombre total d'éléments de cette analyse est donc 6400. Les fichiers *.inp types de définition des analyses sont présentés en Annexe A.

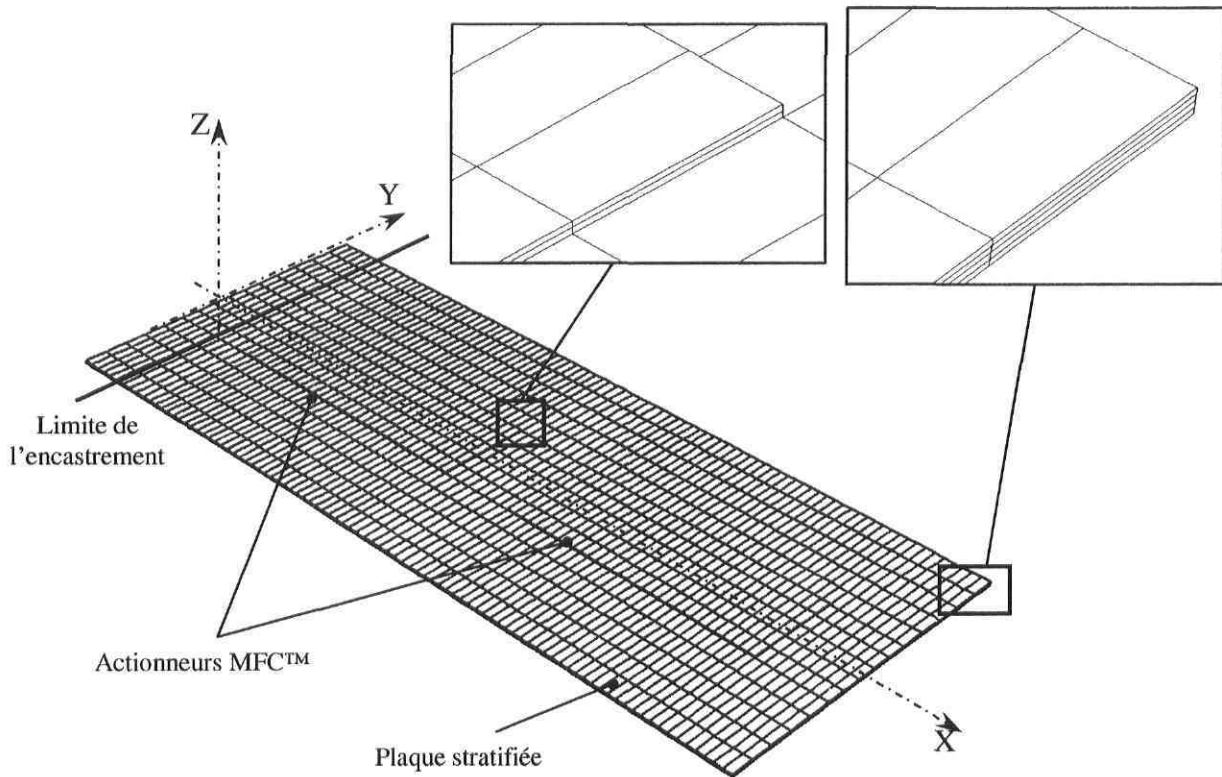


Figure 4-7 : Maillage de la plaque stratifiée munie de deux actionneurs MFCTM

4.3.2 Essai expérimental

Dans le but de valider la modélisation numérique la structure composite munie des deux actionneurs a été fabriquée (Figure 4-8). La procédure suivie est quasiment identique à celle présentée au paragraphe 4.2.3.1. Avant la mise sous vide les actionneurs ont été déposés sur une couche d'époxy Loctite E-HP-120 appliquée sur le stratifié non polymérisé. La polymérisation du pré-imprégné et de la colle a eu lieu lorsque la structure a été mise sous vide et placée dans un four à 94°C pendant 12h. Après la fabrication, la structure a été encastrée à l'une de ses extrémités et les mesures ont été réalisées à l'aide du capteur laser dans une pièce à température ambiante de 26°C.

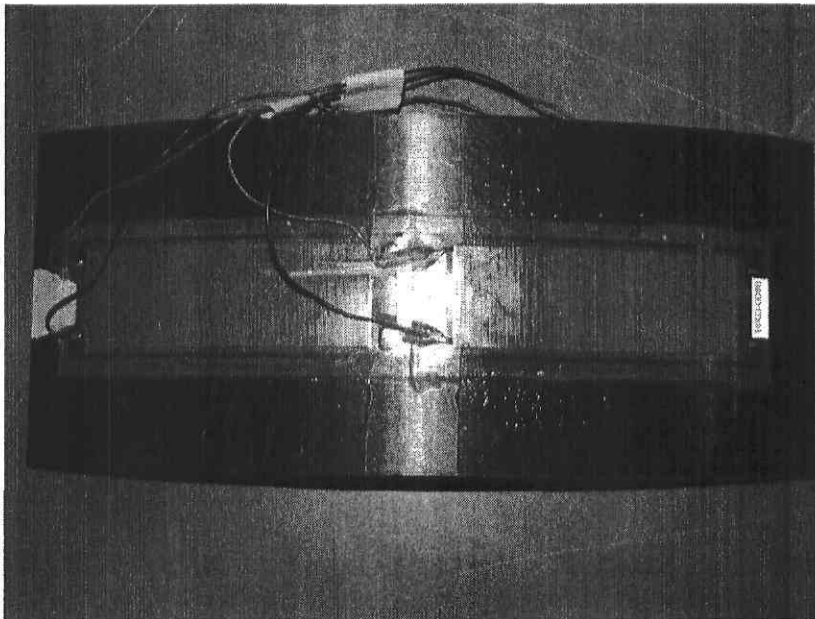


Figure 4-8 : Structure constituée d'un stratifié et de deux actionneurs MFC™

4.3.3 Résultats numériques et expérimentaux

La forme prédite par simulation numérique et la forme obtenue expérimentalement sont représentées sur la Figure 4-9. Cette figure présente les déplacements hors du plan U_3 en fonction de x . On peut remarquer que les déplacements hors du plan ($y=0$) sont semblables et donc que la combinaison d'éléments C3D20R et C3D20RE permet de modéliser la structure composée d'une plaque stratifiée et de deux actionneurs MFCTM au repos. L'erreur moyenne de déplacement est de 2,4 mm sur la longueur de la plaque. On peut aussi noter que la présence des actionneurs rigidifie la structure puisque la déflexion en bout de plaque, qui est de 118 mm par modélisation, diminue de 17.5% par rapport au modèle sans les actionneurs MFCTM, qui présente une déflexion de 143 mm.

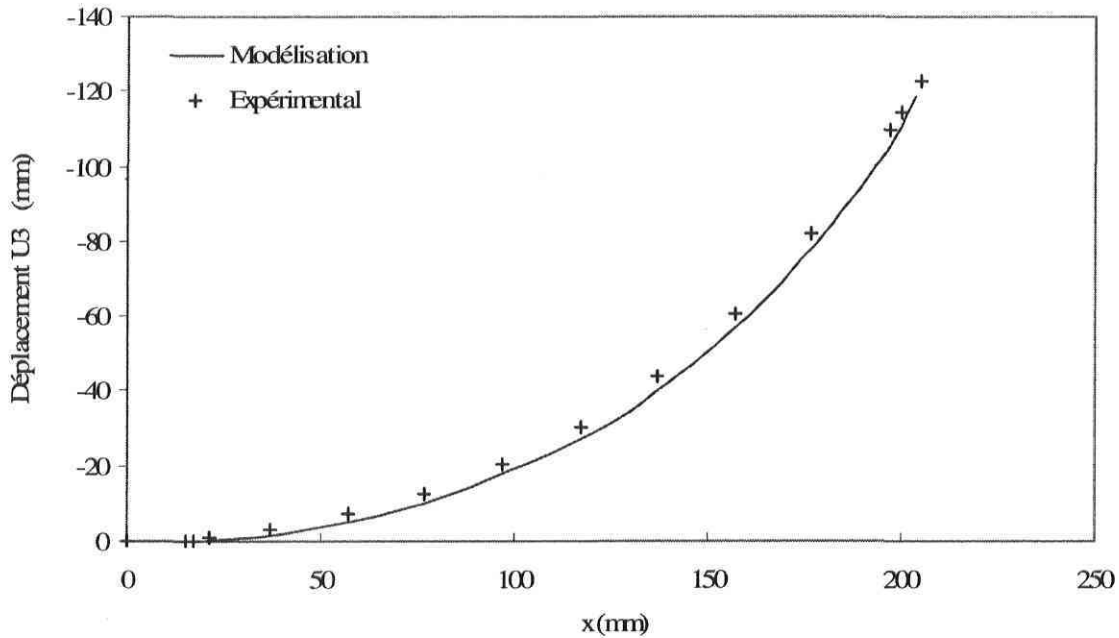


Figure 4-9 : Forme obtenue par modélisation numérique et expérimentalement de la plaque stratifiée $[0/90_3]_T$ munie de deux actionneurs MFCTM à 26°C

4.4 Conclusion

L'étude des caractéristiques des éléments a permis de définir à priori le choix des éléments solides à utiliser dans le cas de la modélisation d'une structure composée d'une plaque stratifiée mince et de deux actionneurs MFC™. Une plaque stratifiée a été modélisée puis étudiée expérimentalement. Ceci a permis de mettre en évidence la rigidité trop importante des éléments linéaires C3D8 et le manque de rigidité des éléments linéaires C3D8R. Les éléments quadratiques de type C3D20 et C3D20R ont montré de bons résultats. Enfin, la structure composée du stratifié et des actionneurs a été modélisée puis testée expérimentalement. L'étude de la forme de cet ensemble à température ambiante a montré une bonne corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux. Ceci permet donc de valider le choix de la combinaison d'éléments C3D20R et C3D20RE pour modéliser une plaque stratifiée munie de deux actionneurs MFC™.

Chapitre 5 Compensation des déformations thermiques

5.1 Introduction

La modélisation numérique d'une structure composée d'un stratifié et de deux actionneurs MFC™ ayant été validée dans le cas d'un comportement passif des actionneurs, on peut maintenant étudier la faisabilité d'utiliser des actionneurs MFC™ pour compenser les déformations induites thermiquement dans un stratifié. La structure étudiée est identique à celle présentée au paragraphe 4.3. Tout d'abord, l'ensemble est soumis à une température de référence puis à une perturbation thermique afin d'engendrer des déformations. Ensuite, différents potentiels électriques sont appliqués aux bornes des actionneurs MFC™ afin de compenser le déplacement thermique induit précédemment. Le comportement de la structure est dans un premier temps modélisé par la méthode des éléments finis puis étudié expérimentalement.

Un des objectifs de ce mémoire étant de compenser les déformations induites thermiquement dans une plaque stratifiée, il est nécessaire de concevoir un spécimen d'étude subissant facilement des déformations thermiques. Une des particularités des stratifiés non symétriques est que leur non symétrie, lorsque couplée à une variation de température, engendre une modification de leur courbure. Ainsi, afin de facilement créer des déformations thermiques importantes, la plaque choisie pour l'étude dans le cadre de ce mémoire est constituée d'un stratifié non symétrique $[0/90_3]_T$ fabriqué à une température de polymérisation de 94°C. Une variation par rapport à cette température de polymérisation engendre alors une modification de la courbure de ce stratifié, qui est fonction de cette variation. L'arrangement du stratifié comprenant une seule couche à 0° et trois couches à 90° permet d'amplifier ce phénomène et donc d'obtenir une courbure importante.

5.2 Modélisation par la méthode des éléments finis

5.2.1 Description du modèle

Le maillage est identique à celui du paragraphe 4.3. Les éléments modélisant le stratifié et les actionneurs MFC™ sont respectivement de type C3D20R et C3D20RE. Les analyses sont spécifiées comme géométriquement non-linéaires du fait des grands déplacements. Les déplacements dans les trois directions sont bloqués pour les nœuds correspondant à la zone d'encastrement, sur une longueur de 10 mm et sur toute la largeur de la pièce, tel que présenté à la Figure 5-1. La température de polymérisation de 94°C est appliquée à tous les nœuds du modèle en tant que condition thermique initiale. Les actionneurs sont contrôlés par le biais d'un potentiel électrique appliqué aux nœuds des faces 01, 11, 02 et 12 à l'aide du degré de liberté supplémentaire dont disposent les éléments piézoélectriques C3D20RE. La valeur du champ électrique appliqué aux faces 11 et 12 est de zéro alors que celle appliquée aux faces 01 et 02 est égale au champ électrique désiré. Les fichiers *.inp types de définition des analyses sont présentés en Annexe A.

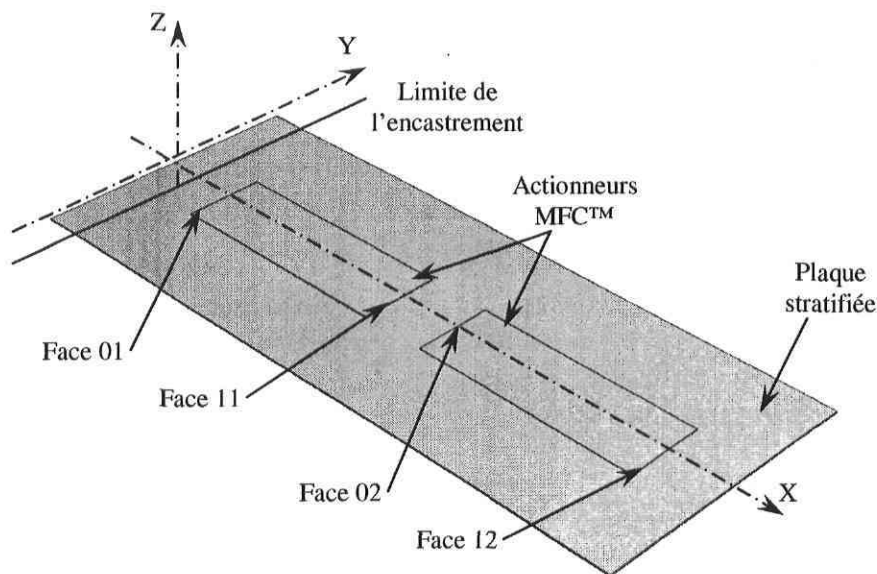


Figure 5-1 : Modélisation de la plaque stratifiée munie de deux MFC™

5.2.2 Résultats numériques

Le but est de tester numériquement la capacité des actionneurs MFC™ à compenser les déformations thermiques d'un stratifié. La forme de la structure a été calculée pour différentes conditions appliquées. Le déplacement U_3 prédit hors du plan le long de la plaque ($y=0$) est représenté sur la Figure 5-2. La structure est dans un premier temps soumise à des températures de 72°C et 80°C, les actionneurs étant passifs. Puis, la température étant maintenue à 80°C, des différences de potentiel de 1000V, 1257V et 1500V sont appliqués aux bornes des actionneurs. L'application d'une différence de potentiel de 1257V permet de recouvrer approximativement la forme que la structure avait à 72°C, alors que les différences de potentiel de 1000V et 1500V engendrent respectivement pas assez et trop de déplacement. Donc, d'après les résultats des simulations numériques, les actionneurs MFC™ ont la capacité de compenser efficacement le changement de forme induit thermiquement par une différence de 8°C.

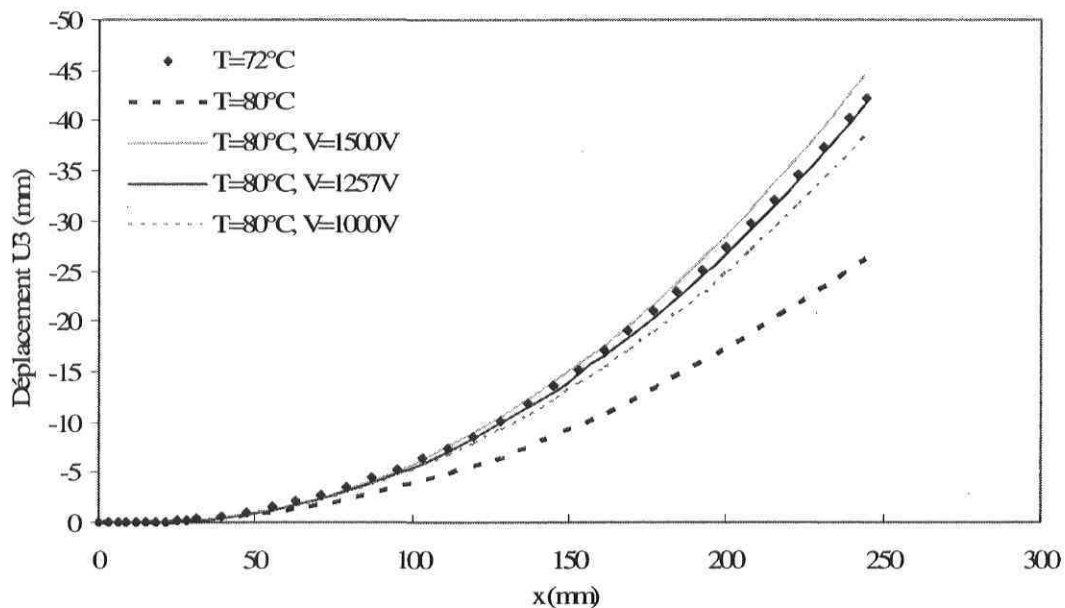


Figure 5-2 : Prédiction de la forme de la plaque stratifiée sous l'effet de la température et d'un potentiel électrique

La limite maximale de la différence de potentiel applicable aux MFC™ utilisés étant de 1500V nous n'étudierons pas de différence de température supérieure à 8°C. Les résultats présentés dans ce mémoire sont donc valables pour cette différence de température et il sera important de les vérifier dans le cas d'application utilisant des MFC™ plus puissants avec des différences de température plus importantes.

5.3 Essais expérimentaux

5.3.1 Description du montage

La structure utilisée dans cet essai est la même que celle présentée au paragraphe 4.3.1. La plaque stratifiée munie de deux actionneurs MFC™ est encastrée à l'une de ses extrémités puis placée à l'intérieur d'un four tel que le montre la Figure 5-3. Les bornes de chacun des actionneurs ont été connectées à une source haute tension. Le capteur laser est utilisé pour mesurer la déflexion de la plaque à travers la vitre du four. Les éléments du montage ont été placés soigneusement à l'aide de niveaux de telle sorte que l'axe de déplacement vertical du capteur laser soit perpendiculaire au plan Y-Z de la plaque de support et donc parallèle à l'axe X de la structure dans la zone d'encastrement (Figure 5-3).

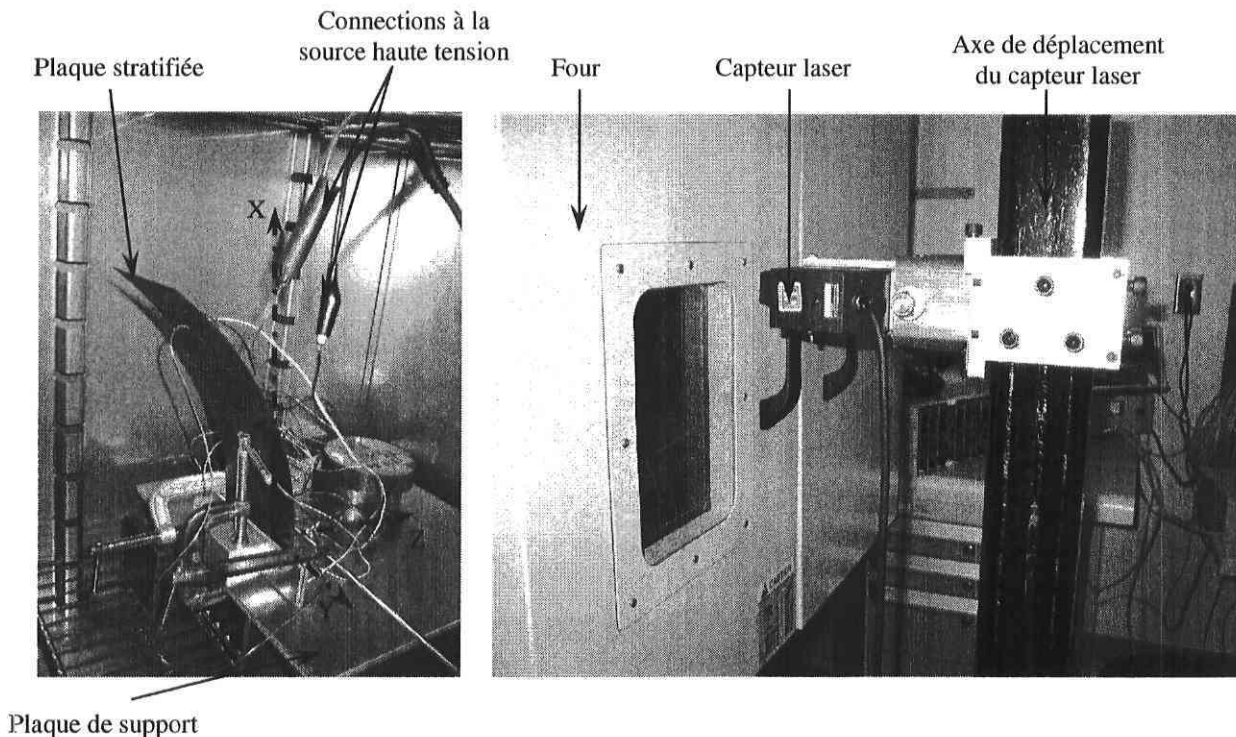


Figure 5-3 : Montage expérimental pour la mesure du déplacement de la plaque stratifiée soumise à une température et aux deux actionneurs MFC™

5.3.2 Résultats expérimentaux et corrélation

Le but est de vérifier les performances des actionneurs MFCTM pour compenser expérimentalement les déformations thermiques d'une plaque stratifiée. La déflexion de la plaque lors des essais expérimentaux est présentée à la Figure 5-4. La structure est soumise à une température de 72.1°C puis de 80.4°C, alors que la différence de potentiel aux bornes des actionneurs est nulle. Afin de corriger le changement de forme induit par cette différence de 8.3°C, les actionneurs MFCTM sont soumis à une différences de potentiel de 1257V. Les résultats expérimentaux démontrent que les actionneurs MFCTM peuvent compenser les déformations induites thermiquement dans le stratifié. Afin de valider le modèle numérique, les résultats théoriques de la Figure 5-2 sont également présentés à la Figure 5-4. On remarque que les résultats théoriques et expérimentaux montrent une excellente corrélation, et que les formes prédites numériquement et celles déterminées expérimentalement sont semblables. Les différences moyennes du déplacement U_3 sur la longueur de la plaque sont respectivement de 4.1%, 3.8% et 2.9% entre l'expérimental et la modélisation pour les formes à 72.1°C, à 80.4°C et avec activation des MFCTM.

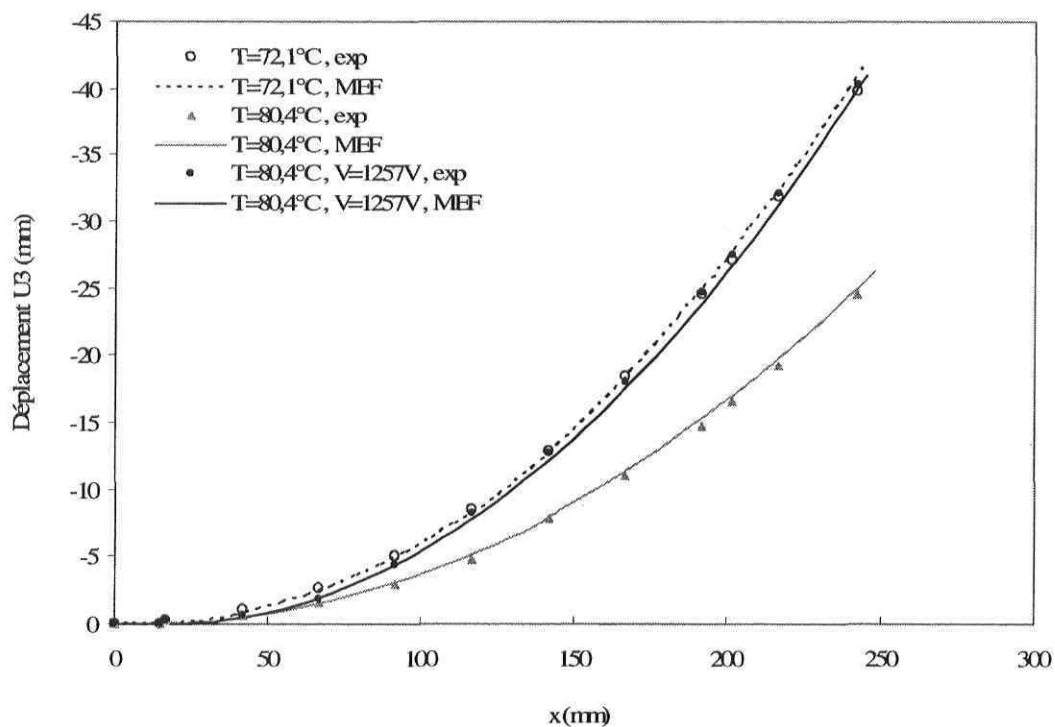


Figure 5-4 : Comparaison des formes obtenues numériquement et expérimentalement d'un stratifié soumis à une variation de température et à des actionneurs MFCTM

5.4 Conclusion

Le comportement d'une plaque stratifiée soumise à des variations de température et à deux actionneurs MFCTM a été analysé numériquement par la méthode des éléments finis puis étudié expérimentalement.

Les résultats obtenus ont été très concluants : d'une part les actionneurs MFCTM se sont montrés efficaces pour compenser les déformations induites thermiquement dans un stratifié, que ce soit d'un point de vue numérique ou bien d'un point de vue expérimental ; d'autre part la corrélation entre les analyses par éléments finis et les essais expérimentaux permet de valider l'utilisation du couple d'éléments C3D20R-C3D20RE pour la modélisation numérique d'une structure composée d'un stratifié et d'actionneurs MFCTM excités.

Chapitre 6 Contrôle actif des déformations thermiques

6.1 Introduction

La capacité et l'efficacité des actionneurs MFC™ à compenser les déformations induites thermiquement dans un stratifié ont été démontrées. Le type d'analyse ainsi que les éléments utilisés pour la modélisation numérique ont été validés par plusieurs séries d'essais expérimentaux, montrant de bonnes corrélations. L'ensemble composé de la plaque stratifiée et des actionneurs MFC™ peut maintenant être abordé en tant que structure intelligente afin de contrôler activement les déformations induites thermiquement dans le stratifié. Tout d'abord, une modélisation par éléments finis est développée en utilisant un algorithme de contrôle basé sur la définition d'un champ électrique additionnel nécessaire pour compenser les déformations thermiques du stratifié. Enfin, une procédure expérimentale est développée en utilisant un contrôleur de type PID (Proportionnel, Intégral, Dérivatif) afin de réaliser l'asservissement de la structure.

6.2 Description du problème

Rappelons ici qu'une structure intelligente est définie comme possédant la capacité de capter des variations engendrées par une perturbation externe et d'activer des éléments de contrôle en réponse à ces variations [5]. L'objectif de ce chapitre est de développer une boucle de contrôle actif permettant d'appliquer automatiquement une différence de potentiel aux actionneurs afin de compenser les déformations induites thermiquement dans le stratifié. Le diagramme de la Figure 6-1 présente les composantes de la boucle de contrôle actif. Les déformations engendrées dans la plaque stratifiée par la perturbation thermique sont détectées par un capteur qui envoie un signal au contrôleur afin de les compenser via l'effet de l'actionneur.

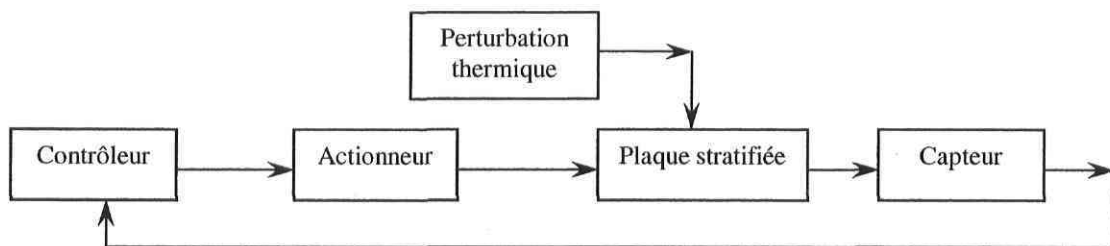


Figure 6-1 : Diagramme de principe du contrôle actif

Le type de capteur utilisé dans la boucle de contrôle peut prendre différentes formes. Il est cependant nécessaire de combiner des résultats de contrôle performants et une facilité de mise en oeuvre pour des applications industrielles. Dans ce chapitre, trois techniques de détection des déformations sont étudiées à l'aide des analyses par éléments finis : la mesure du déplacement au bout de la plaque stratifiée, la mesure des déformations sur la structure (technique des jauges de déformation) et la mesure du déplacement électrique induit dans les actionneurs MFC™. Enfin, le contrôle actif est testé expérimentalement en utilisant un capteur de déplacement laser pour détecter les déformations.

6.3 Modélisation par la méthode des éléments finis

6.3.1 Description du modèle

Les éléments utilisés pour la modélisation de la plaque stratifiée et des actionneurs MFC™ sont respectivement de type C3D20R et C3D20RE. Le maillage est identique à celui présenté à la Figure 4-7. Les nœuds correspondant à la zone d'encastrement ont les déplacements bloqués dans les trois directions, tel que présenté à la Figure 4-1. La condition thermique initiale appliquée à tous les nœuds est la température de polymérisation de 94°C. Au cours des analyses, les variations de température sont appliquées à tous les nœuds en tant que conditions aux limites. Les actionneurs MFC™ sont activés par le biais d'un potentiel électrique appliqué aux éléments piézoélectriques C3D20RE à l'aide du degré de liberté supplémentaire dont ils disposent. Les analyses sont définies comme géométriquement non-linéaires du fait des déplacements importants.

6.3.2 Description du contrôle actif utilisé pour les analyses numériques

L'objectif du contrôle actif est de maintenir la forme de la plaque stratifiée alors que des variations de température sont créées. On désire développer un modèle numérique permettant de simuler une structure intelligente qui détecte à l'aide d'un capteur mesurant une variable X , les déformations induites thermiquement dans le stratifié, puis qui définit le champ électrique nécessaire pour contrer ces déformations, et qui finalement active les actionneurs MFC™. Ces actions sont réitérées tant que des variations de température sont créées et que la forme désirée de la plaque stratifiée n'est pas atteinte.

Les analyses effectuées comportent trois phases qui sont présentées sur le diagramme de la Figure 6-2. Dans le premier pas de calcul la température de référence est appliquée alors que les actionneurs MFC™ sont passifs, engendrant la forme de référence de la plaque stratifiée et la valeur de référence X^{ref} , que l'on souhaite maintenir. Lors du second pas de calcul la variation de température commence, modifiant ainsi la forme de la structure et la valeur de la variable X , les

actionneurs étant toujours passifs. La troisième phase de l'analyse comprend les pas de calculs suivants. Du 3^e au dernier pas de l'analyse, un champ électrique, défini par le schéma de contrôle actif, est appliqué alors que la température atteint la température finale. L'analyse est terminée lorsque la différence dX entre la valeur de la variable X et sa valeur de référence X^{ref} est comprise dans la tolérance définie par l'utilisateur, c'est-à-dire lorsque la forme du stratifié est corrigée. Il est important de noter que les analyses sont décomposées en plusieurs pas de calcul qui sont traités comme des problèmes statiques, c'est-à-dire que les phénomènes dynamiques et vibratoires du système ne sont pas pris en compte.

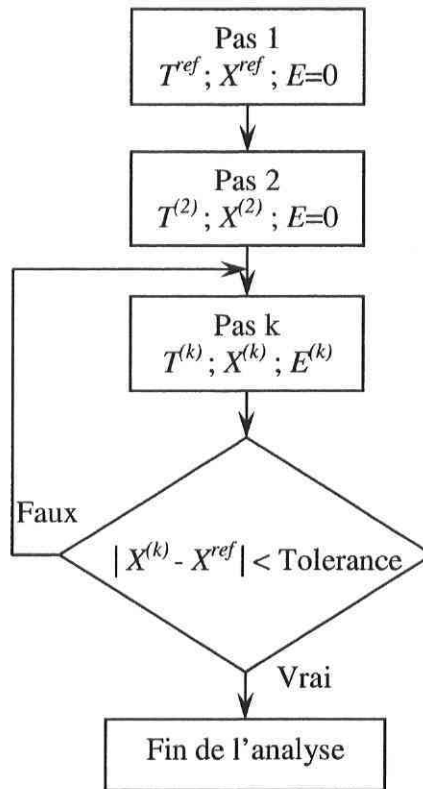


Figure 6-2 : Diagramme du contrôle actif pour le analyses numériques

Le principe du contrôle actif est ici basé sur l'application d'un champ électrique additionnel idéal. L'amplitude de ce champ électrique est calculée à partir de la différence dX de la variable X par rapport à sa valeur de référence X^{ref} , obtenue lors du premier pas de calcul. Le champ électrique E^k appliqué au k^e pas de calcul est alors défini par :

$$dX^{(k-1)} = X^{(k-1)} - X^{ref} \quad k > 2 \quad (6-1)$$

$$E^{(k)} = E^{(k-1)} + G * dX^{(k-1)} \quad k > 2 \quad (6-2)$$

où G est un paramètre de gain de contrôle. Les analyses étant composées de plusieurs pas traités statiquement, seul un gain proportionnel est utilisé. Il n'est pas ici possible d'utiliser un contrôleur de type PID comme il en sera le cas dans les essais expérimentaux ultérieurs. Les problématiques dynamiques, d'inertie du système et de temps de réponse de la source de courant générant la différence de potentiel n'étant pas intégrées, l'utilisation d'un contrôleur de type PID n'est d'ailleurs pas nécessaire.

Afin de pouvoir appliquer cet algorithme de contrôle aux analyses à réaliser à l'aide du logiciel Abaqus, deux sous-routines d'utilisateur sont programmées en langage Fortran. Ces sous-routines sont développées indépendamment du fichier de définition de l'analyse à effectuer (fichier de type *.inp) et sont écrites dans un unique fichier utilisateur de type *.f. Lors de l'initialisation de la résolution d'une analyse, ce fichier utilisateur est spécifié comme attribut. Le solveur du logiciel Abaqus intègre alors les données du fichier utilisateur en compilant le programme à l'aide d'un compilateur Fortran.

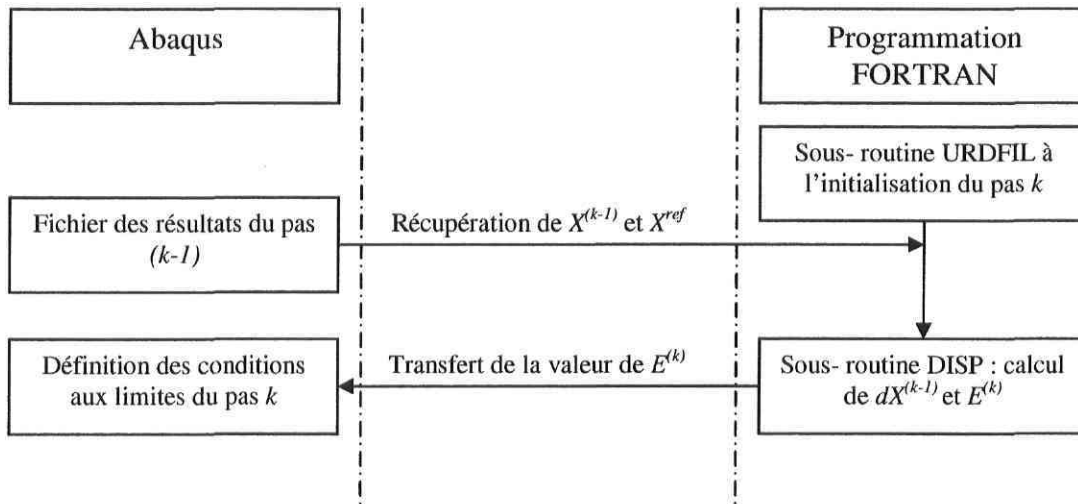


Figure 6-3 : Communication entre Abaqus et la programmation FORTRAN

La sous-routine "URDFIL" permet d'accéder au fichier des résultats Abaqus (*.fil) lors de la résolution d'une analyse [26] et ainsi d'obtenir les valeurs de $X^{(k-1)}$ et X^{ref} au cours du k^e pas de calcul.

Comme le champ électrique à appliquer dépend de la variation de X , il est nécessaire de définir sa valeur pendant la résolution de l'analyse. Cela s'effectue en utilisant la sous-routine "DISP", qui permet de spécifier une condition aux limites au cours d'une analyse [26]. Cette sous-routine est appelée à la suite de la sous routine "URDFIL" afin de calculer la variation $dX^{(k-1)}$ de X , de définir l'amplitude du champ électrique selon l'algorithme de contrôle et de l'appliquer en tant que condition aux limites.

Trois techniques de détection des déformations sont étudiées dans la suite de ce chapitre. Tout d'abord, une analyse avec contrôle actif est réalisée en utilisant le déplacement du bout de la plaque afin de détecter les déformations. Puis, la mesure des déformations de la structure, telle que réalisée à l'aide d'une jauge de déformation, est testée comme variable pour le contrôle actif. Enfin, le MFC™ ayant des capacités de capteur, le déplacement électrique, qui correspond à l'effet piézoélectrique direct, est utilisé en tant que variable du contrôle actif de la dernière analyse.

6.3.3 Contrôle actif basé sur le déplacement en bout de plaque

6.3.3.1 Principe

Le principe du contrôle actif utilise ici le déplacement U_3 du bout de la plaque stratifiée le long de l'axe Z , tel que présenté à la Figure 6-4. L'objectif de la méthode est de minimiser la variation de U_3 par rapport à sa référence. Le champ électrique $E^{(k)}$ appliqué au k^e pas de calcul est alors défini par :

$$dU_3^{(k-1)} = U_3^{(k-1)} - U_3^{ref} \quad (6-3)$$

$$E^{(k)} = E^{(k-1)} + G * dU_3^{(k-1)} \quad (6-4)$$

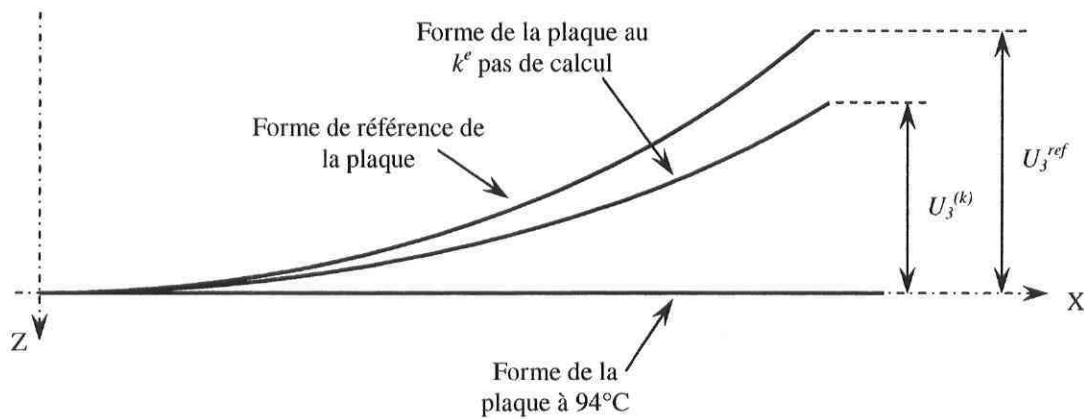


Figure 6-4 : Schéma de principe du contrôle actif basé sur le déplacement en bout de plaque

Le fichier de définition de l'analyse (*.inp) et les sous-routines "URDFIL" et "DISP" utilisées dans le cadre de cette analyse sont respectivement présentés dans les Annexes A et B.

6.3.3.2 Résultats numériques

Dans le but d'étudier numériquement le contrôle actif des déformations induites thermiquement dans la plaque stratifiée, la structure est soumise à une augmentation linéaire de la température depuis la référence de 72°C pour le 1^{er} pas de calcul jusqu'à la température finale de 78.1°C pour le 7^e pas de calcul, tel que le montre la Figure 6-5. Pour les pas suivants, la température est stabilisée à la température de perturbation de 78.1°C. La tolérance spécifiée dans le cadre de cette analyse pour la variation de U_3 est de 0.1mm. Lors des deux premiers pas de calcul, les actionneurs sont passifs car aucun champ électrique n'est appliqué. A partir du troisième pas et jusqu'à la fin de l'analyse, le champ électrique appliqué est défini en utilisant les équations (6-3) et (6-4) de l'algorithme de contrôle.

La Figure 6-6 présente le déplacement U_3 du bout de la plaque en fonction des pas de calcul et pour un gain de contrôle G égal à 20^{E6} . La position de référence ainsi que le déplacement du bout

de la plaque sans contrôle actif sont également représentés. Le contrôle actif permet de faire rapidement converger la position du bout de la plaque stratifiée vers la position de référence et la tolérance de 0.1mm est atteinte au 10^e pas, stoppant ainsi l'analyse. A la fin du processus de contrôle, la position en bout de plaque est distante de 0.08mm de la référence, alors que la valeur atteinte sans contrôle est de 12mm.

La Figure 6-7 présente l'évolution de la différence de potentiel appliquée aux actionneurs MFCTM lors de l'analyse avec contrôle actif. La valeur atteinte à la fin de l'analyse est 960V.

Le déplacement prédit hors du plan le long de la plaque ($y=0$) est représenté sur la Figure 6-8. La forme obtenue en utilisant les actionneurs est quasiment identique à la forme de référence, mise à part de petits écarts aux emplacements 1 et 2 des MFCTM. La différence de déflexion moyenne sur toute la longueur de la plaque est de 0.15mm. Les écarts observés sont vraisemblablement dus à l'interaction du comportement des actionneurs avec la plaque stratifiée. En effet, il se peut que cette interaction soit différente suivant que les actionneurs sont passifs ou actifs. Les résultats obtenus étant satisfaisants par rapport aux objectifs du mémoire, cette observation n'a pas été étudiée plus en profondeur. Il sera cependant important de s'y intéresser dans le cas de problème nécessitant une précision optimale.

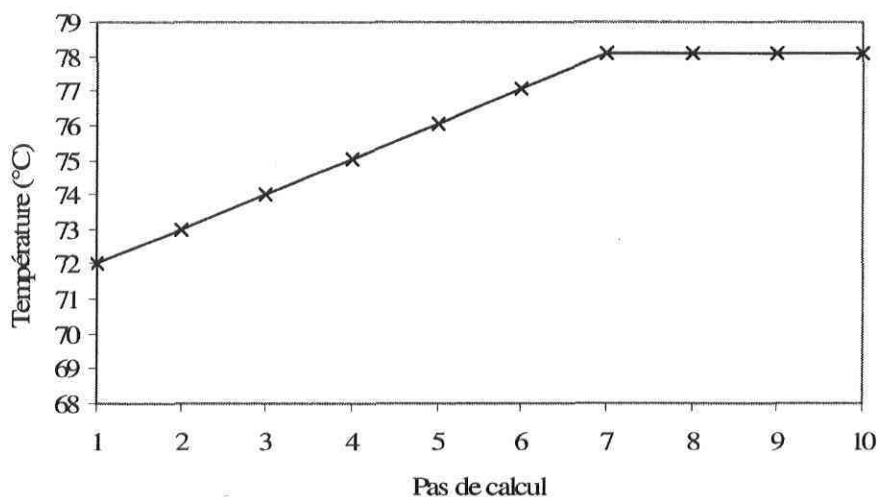


Figure 6-5 : Evolution de la température lors des essais numériques avec contrôle actif

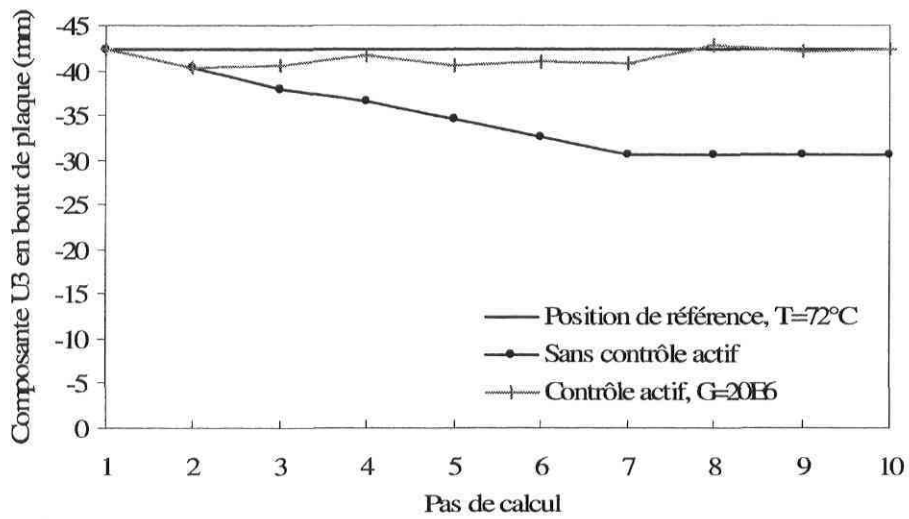


Figure 6-6 : Position du bout de la plaque suivant l'axe Z

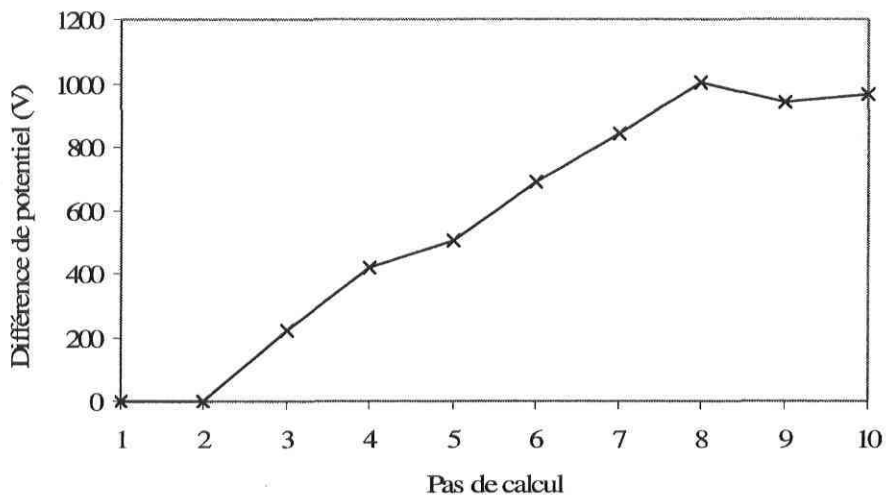


Figure 6-7 : Différence de potentiel appliquée lors de l'analyse avec contrôle actif basé sur la position en bout de plaque

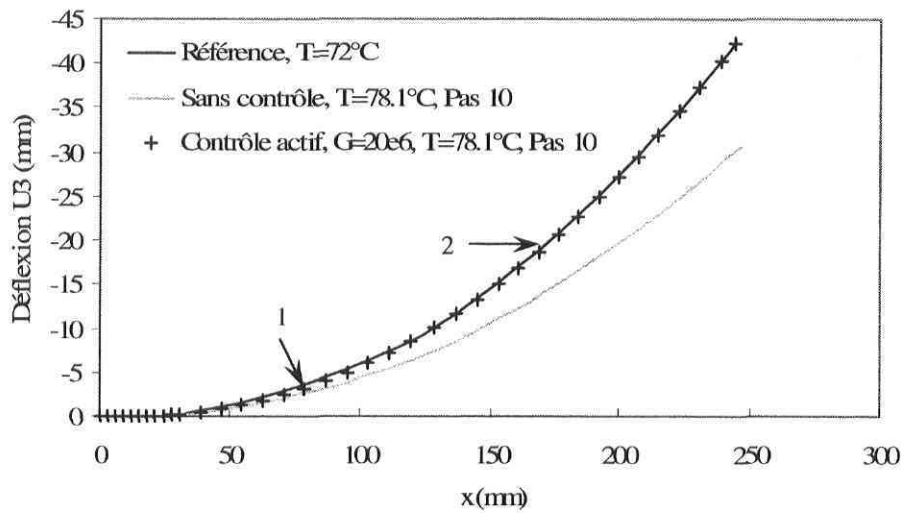


Figure 6-8 : Prédiction de la forme de la plaque stratifiée sous l'effet de la température et du contrôle actif basé sur la position en bout de plaque

Dans cette analyse, la valeur du gain a été définie après plusieurs essais afin d'obtenir un nombre de pas égale à dix. La valeur fixée pour le gain influence le nombre de pas nécessaires pour recouvrir la forme du stratifié. Plus le gain est faible plus le nombre de pas pour compenser les déformations est important. Une valeur du gain plus forte entraîne une oscillation de la forme du stratifié autour de la forme de référence, avec amortissement. A partir d'une certaine valeur du gain cette oscillation n'est plus amortie. Cette remarque est également valable pour les analyses suivantes. Une étude précise du comportement de cette oscillation en fonction de la valeur du gain n'a pas été menée dans le cadre de ce mémoire, car ceci n'en est pas l'objectif.

6.3.4 Contrôle actif basé sur les déformations de la structure

6.3.4.1 Principe

L'objectif est d'utiliser les déformations de la structure comme variable dans la boucle de contrôle. On peut assimiler cette technique à la simulation de jauges de déformation dont les axes de mesure seraient orientés suivant la longueur de la plaque stratifiée. La Figure 6-9 présente les cinq emplacements utilisés pour la mesure des déformations. Ces emplacements sont disposés afin de représenter correctement l'état de déformation le long de la plaque tout en limitant le

nombre de points de mesure. Les cinq emplacements ont une coordonnée identique suivant l'axe Y et se trouvent éloignés des actionneurs afin d'éviter leur influence. L'emplacement 1 est situé au milieu de la zone entre la limite de l'encastrement et le début du MFCTM 1. Les emplacements 2 et 4 se trouvent respectivement au milieu des MFCTM 1 et 2. L'emplacement 3 est entre les deux MFCTM. Enfin, l'emplacement 5 est situé au milieu de la zone entre la fin du MFCTM 2 et l'extrémité de la plaque. La mesure de la déformation ϵ_{11} est effectuée sur un nœud à chaque emplacement. L'algorithme testé pour traiter les valeurs des déformations est défini par l'équation (6-6) :

$$d\epsilon_{11}^{(k-1)} = \frac{\sum_{i=1}^5 (\epsilon_{11(i)}^{ref} - \epsilon_{11(i)}^{(k-1)})}{5} \quad (6-6)$$

où i représente l'emplacements où les déformations sont mesurées. Le champ électrique $E^{(k)}$ appliqué au k^e pas de calcul est défini par :

$$E^{(k)} = E^{(k-1)} + G * d\epsilon_{11}^{(k-1)} \quad (6-7)$$

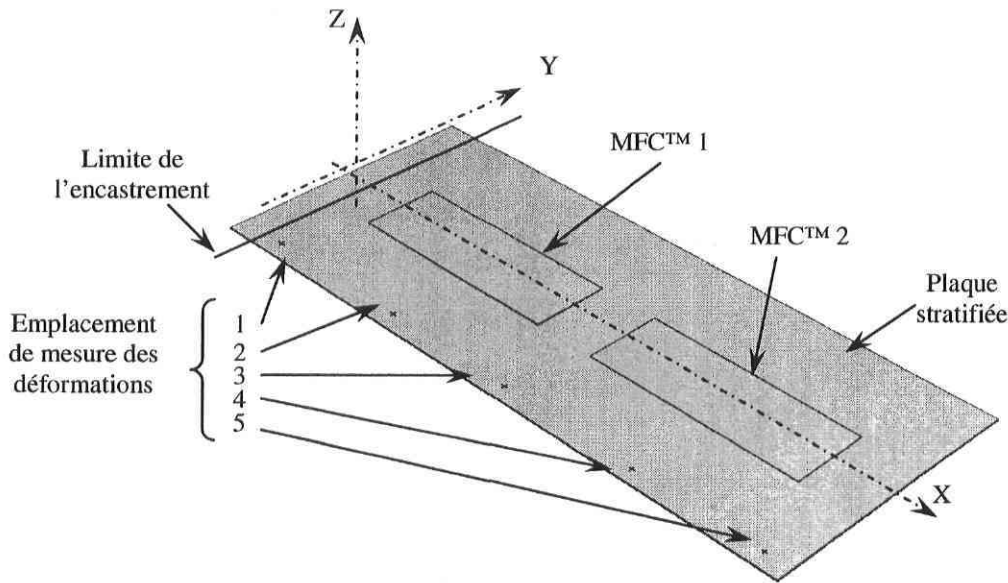


Figure 6-9 : Schéma de principe du contrôle actif basé sur les déformations de la structure

Le fichier de définition de l'analyse (*.inp) et les sous-routines "URDFIL" et "DISP" utilisées dans le cadre de cette analyse sont respectivement présentés dans les Annexes A et B.

6.3.4.2 Résultats numériques

Afin de tester le principe du contrôle actif basé sur la mesure des déformations de la structure, des analyses, identiques à celle du paragraphe 6.3.3.2, sont effectuées en faisant varier linéairement la température depuis 72°C à 78.1°C, tel que présenté à la Figure 6-5. Le contrôle actif est réalisé avec un gain G égal à 2.1^{E9} , défini pour engendrer une convergence relativement rapide du système.

Une analyse est réalisée en utilisant l'algorithme combinant les équations (6-6) et (6-7). La Figure 6-10 présente l'évolution de la moyenne des déformations ε_{11} mesurées aux cinq emplacements de la Figure 6-9. La moyenne obtenue avec le contrôle actif est comparée à la moyenne de référence et à la moyenne obtenue sans contrôle. Le contrôle actif engendre une bonne convergence de la moyenne des déformations vers la valeur de référence. La différence obtenue à la fin de l'analyse est $2E^{-7}$ déformation alors qu'elle atteint $2.34E^{-5}$ déformation sans contrôle. La Figure 6-11 présente la différence de potentiel appliquée aux actionneurs, qui atteint 400V au 10^e pas de l'analyse. Le déplacement prédit hors du plan le long de la plaque ($y=0$) est représenté sur la Figure 6-12. La forme prédite au 10^e pas de calcul est comparée à la forme de référence et à la forme prédite sans contrôle. Bien que les moyennes des déformations soient semblables, la déflexion de référence à l'extrémité de la plaque dépasse de 6.8 mm la déflexion engendrée par l'algorithme à l'extrémité de la plaque. La différence de potentiel définie avec cet algorithme n'est donc pas assez importante pour recouvrer la forme de référence. L'algorithme basé sur les déformations ne permet pas de contrôler activement les déformations thermiques induites dans le stratifié.

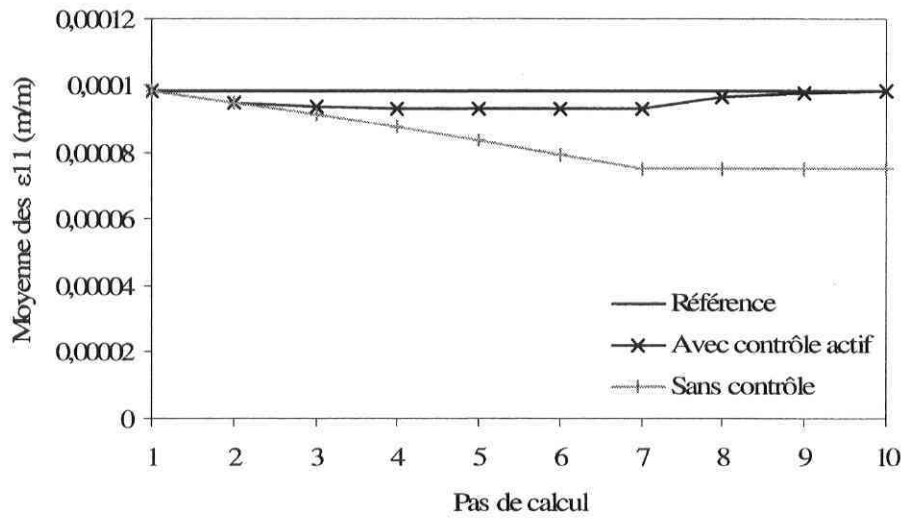


Figure 6-10 : Moyenne des déformations aux cinq emplacements

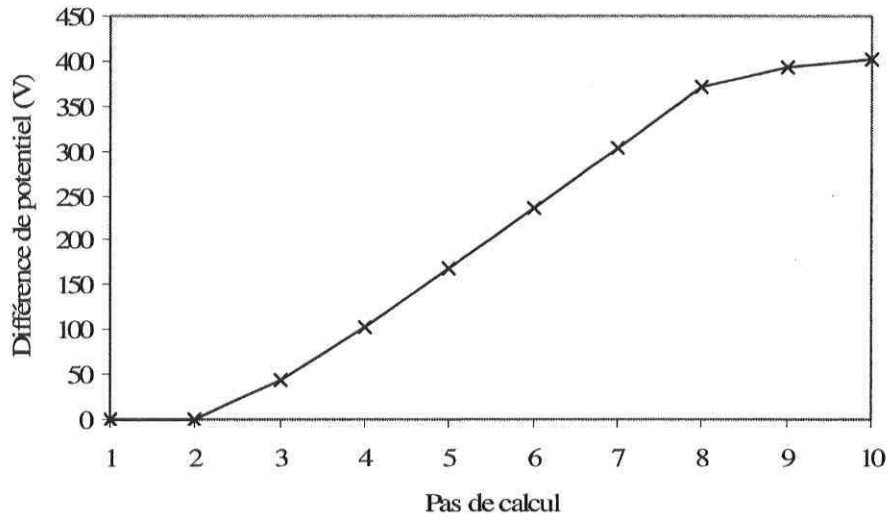


Figure 6-11 : Différence de potentiel appliquée aux actionneurs avec l'algorithme utilisant les déformations

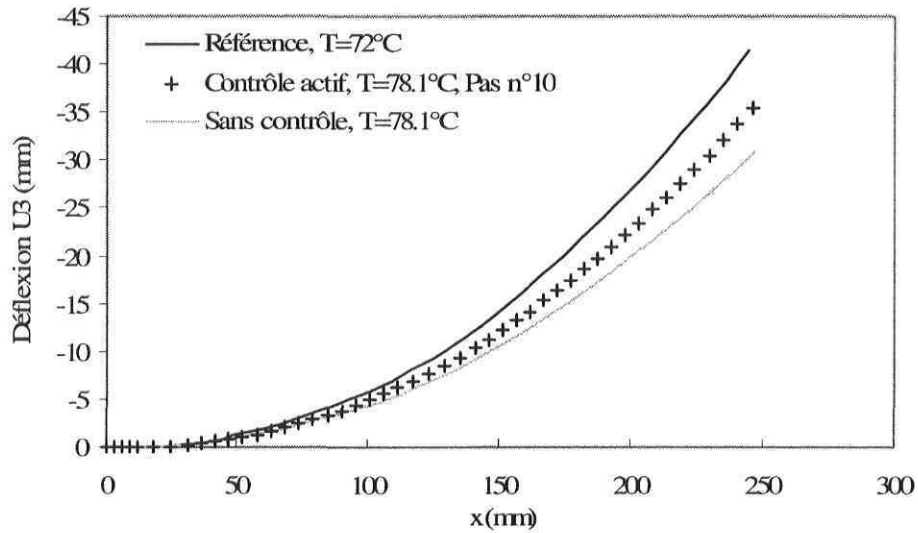


Figure 6-12 : Prédiction de la forme de la plaque stratifiée sous l'effet de la température et de l'algorithme basé sur les déformations

Discussion

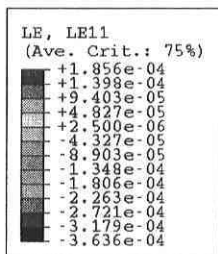
Pour comprendre pourquoi l'approche de l'algorithme ne conduit pas à des résultats satisfaisants, utilisons les résultats de l'analyse du paragraphe 6.3.3. Cette analyse a montré que l'application d'une différence de potentiel de 1257V aux bornes des MFC™ permet de compenser les déformations induites par une perturbation de température de 72.1°C à 80.4°C. La Figure 6-13 représente pour des formes semblables du stratifié, les déformations de la forme de référence et les déformations engendrées lorsque les actionneurs sont excités. On constate que les déformations sont très différentes alors que les formes globales des structures sont quasiment identiques.

Afin de vérifier ces affirmations, les valeurs des déformations aux cinq emplacements définis à la Figure 6-9 sont étudiées. Le Tableau 6-1 présente d'une part les valeurs des déformations ϵ_{11} aux cinq emplacements de mesure et d'autre part les valeurs calculées avec l'algorithme de l'équation (6-6), pour les trois combinaisons de conditions appliquées. Les résultats présentés sont définis par rapport à la température de polymérisation de 94°C, qui a été appliquée en condition initiale. Pour cette température de polymérisation les déformations sont nulles. Bien que les formes correspondant aux combinaisons de conditions I et III soient semblables, tel que montré à la Figure 5-2, les déformations obtenues et calculées sont différentes. Ce tableau montre que

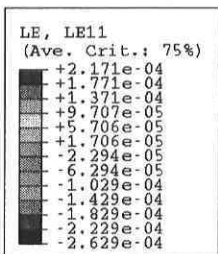
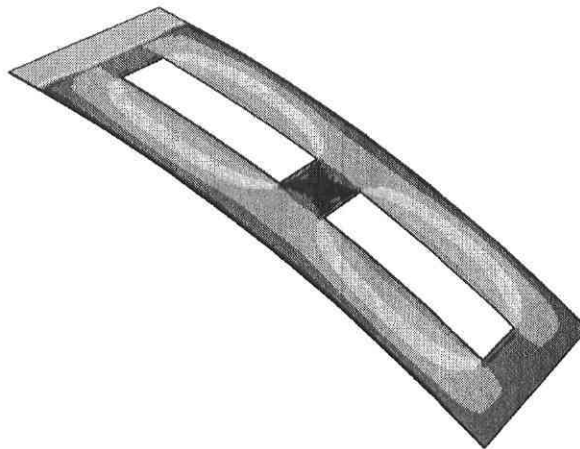
l'excitation des actionneurs influe directement sur les déformations locales du stratifié aux cinq emplacements.

Tableau 6-1 : Déformations de la plaque stratifiée sous l'effet de la température et des actionneurs

			Combinaison de conditions		
			I	II	III
			$T=72.1^{\circ}\text{C}$, $V=0$	$T=80.4^{\circ}\text{C}$, $V=0$	$T=80.4^{\circ}\text{C}$, $V=1257\text{V}$
ϵ_{11} (m/m)	Emplacement	1	1.19E-04	7.13E-05	1.17E-04
		2	8.56E-05	6.17E-05	1.75E-04
		3	1.06E-04	7.24E-05	1.23E-04
		4	7.77E-05	5.45E-05	1.66E-04
		5	1.04E-04	6.56E-05	8.14E-05
Algorithme (m/m)		9.84E-05	6.51E-05	1.33E-04	



a) Combinaison I
Forme de référence
($T=72^{\circ}\text{C}$, $V=0$)



b) Combinaison III
Forme corrigée
($T=80.4^{\circ}\text{C}$, $V=1257\text{V}$)

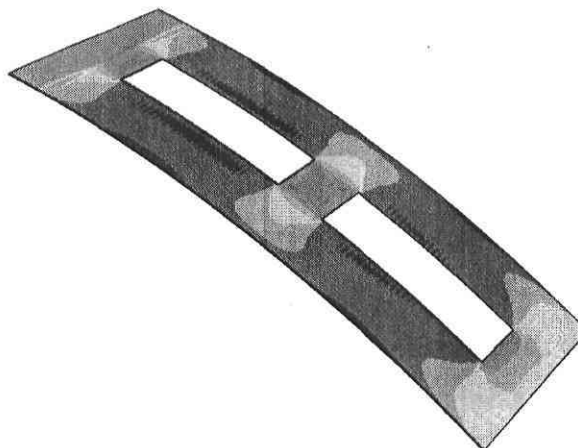


Figure 6-13 : Répartition des déformations dans le stratifié

Les résultats de cette section mettent en évidence que le comportement du stratifié au niveau des déformations est fonction de l'excitation des actionneurs et ne permet donc pas d'utiliser les mesures locales des déformations comme variable du contrôle actif.

6.3.5 Contrôle actif basé sur le déplacement électrique

6.3.5.1 Principe

Il existe, parmi les différents types de MFC™, un modèle composé d'une partie "actionneur" et d'une capteur co-localisé, tel que le montre la Figure 6-14.

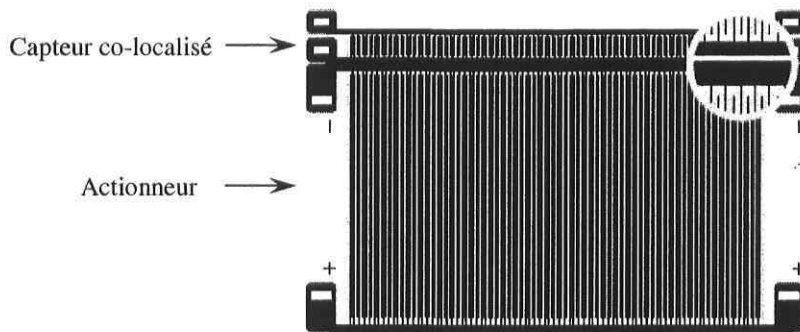


Figure 6-14 : Actionneur MFC™ avec capteur co-localisé [25]

Comme présenté au Chapitre 1, les matériaux piézoélectriques se définissent par un effet piézoélectrique direct et un effet piézoélectrique indirect. Rappelons ici l'équation 2-6 constitutive de l'effet direct du MFC™, qui correspond à un comportement en tant que capteur :

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^{\sigma,T} & p_1^{\sigma,T} & d_{11}^T & d_{12}^T & 0 \\ 0 & p_2^{\sigma,T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_3^{\sigma,T} & 0 & 0 & d_{36}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ \Delta T \\ \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix}$$

On émet ici l'hypothèse, qui sera vérifiée par la suite, que D_1 est la composante majeure du déplacement électrique. Lorsque le MFC™ est utilisé comme capteur, le champ électrique E_1 est nul et D_1 , qui sera utilisé dans les simulations numériques, est alors défini par :

$$D_1 = p_1^{\sigma T} \Delta T + d_{11}^T \sigma_1 + d_{12}^T \sigma_2 \quad (6-8)$$

Dans un contexte expérimental, le signal fourni par un MFC™, utilisé comme capteur, est une tension V_s définie en fonction de la charge électrique Q_s telle que [19] :

$$Q_s(t) = \int_A D_1(t) dA \quad (6-9)$$

$$V_s = G_c I(t) = G_c \frac{dQ_s(t)}{dt} \quad (6-10)$$

où t est le temps et A est l'aire de la section du capteur perpendiculaire à la direction de polarisation, soit la direction X. I est le courant généré sur cette surface et G_c est un gain d'amplification transformant le courant en tension.

Un schéma de la plaque stratifiée avec les MFC™ comportant des capteurs est présenté à la Figure 6-15. Les faces 01, 11, 02 et 12 sont les sections extrêmes des capteurs dans le plan Y-Z.

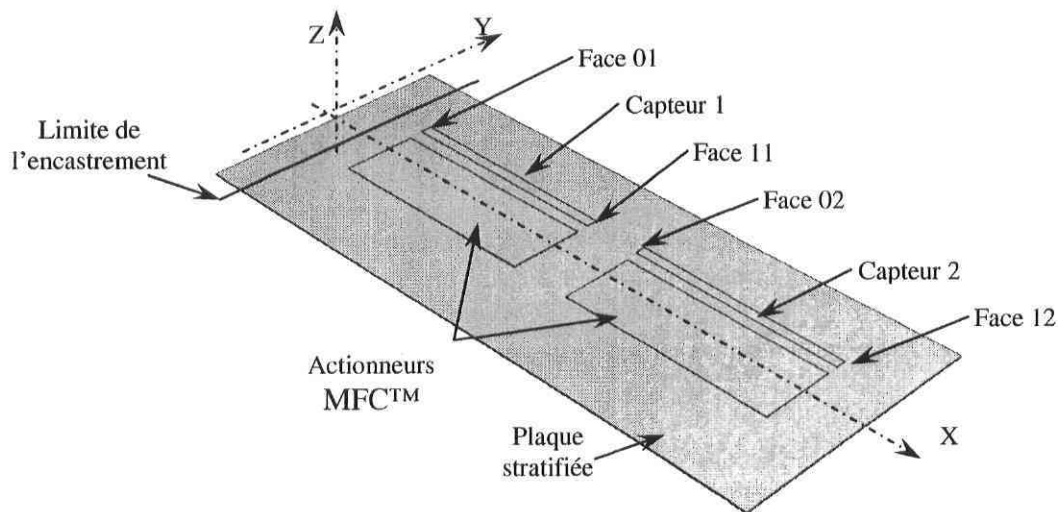


Figure 6-15 : Schéma de principe du contrôle actif basé sur le déplacement électrique

La composante D_l du déplacement électrique est une sortie des nœuds appartenant aux éléments piézoélectriques C3D20RE représentant les capteurs. Dans le modèle développé, les valeurs obtenues aux nœuds des faces 01 et 02 sont extraites lors de l'analyse, puis moyennées pour donner D_{1moy} . Le champ électrique $E^{(k)}$ appliqué au k^e pas de calcul est alors défini par :

$$dD_{1moy}^{(k-1)} = D_{1moy}^{(k-1)} - D_{1moy}^{ref} \quad (6-11)$$

$$E^{(k)} = E^{(k-1)} + G * dD_{1moy}^{(k-1)} \quad (6-12)$$

Cependant, la définition des éléments piézoélectriques C3D20RE du logiciel Abaqus ne tient pas compte de l'effet pyroélectrique. Afin de remédier à ce manque et de respecter l'équation (6-8), l'équation (6-11) devient :

$$dD_{1moy}^{(k-1)} = D_{1moy}^{(k-1)} - D_{1moy}^{ref} + p_1^{\sigma,T} \Delta T^{(k-1)} \quad (6-13)$$

avec :

$$\Delta T^{(k-1)} = T^{(k-1)} - T_{ref} \quad (6-14)$$

où $p_1^{\sigma,T}$ est le coefficient pyroélectrique et $\Delta T^{(k-1)}$ est la variation de température au pas (k-1). T_{ref} et $T^{(k-1)}$ sont respectivement les températures de référence et du pas (k-1).

Le fichier de définition de l'analyse (*.inp) et les sous routine "URDFIL" et "DISP" utilisées dans le cadre de cette analyse sont respectivement présentés dans les Annexes A et B.

6.3.5.2 Résultats numériques

Afin d'utiliser le déplacement électrique comme variable du contrôle actif, un modèle par éléments finis est développé en ajoutant au maillage de la Figure 4-7 les capteurs aux MFC™. Les capteurs sont représentés par des éléments piézoélectriques de type C3D20RE identiques à ceux des actionneurs. Ils contiennent 32 éléments le long de l'axe X et 2 éléments à travers l'épaisseur. Ils comportent un élément le long de l'axe Y et sont éloignés des actionneurs d'une distance équivalente à une rangée d'éléments. Les conditions aux limites sont identiques à celles

de l'analyse du paragraphe 6.3.3.2. Il est tout de même nécessaire d'ajouter une spécification relative aux capteurs : étant donné qu'il n'y a pas de différence de potentiel aux bornes de ces derniers, le champ électrique appliqué en tant que condition aux limites sur les faces 01, 11, 02 et 12 est nul. Le gain G de l'équation (6-12) est égal à $100E^6$. Encore une fois le gain a été choisi après plusieurs essais pour obtenir un nombre de pas de calcul égale à 10.

Les variations de la température en fonction des pas de calcul sont présentées à la Figure 6-5. La Figure 6-16 montre l'évolution du déplacement électrique moyen calculé en tenant compte de l'effet pyroélectrique. Le contrôle actif permet d'obtenir une convergence rapide de la valeur du déplacement électrique vers la valeur de référence. La différence à la fin de l'analyse est de $2E^{-6}$ C/m² alors qu'elle atteint $2.24E^{-3}$ C/m² sans contrôle. La Figure 6-17 présente l'évolution de la différence de potentiel appliquée aux actionneurs MFC™ lors de l'analyse avec contrôle actif. La valeur atteinte à la fin de l'analyse est 980V. Le déplacement prédit hors du plan le long de la plaque ($y=0$) est représenté sur la Figure 6-18. Les résultats obtenus avec la boucle de contrôle actif sont comparés à la forme de référence et à la forme obtenue sans la boucle de contrôle. L'utilisation du déplacement électrique comme variable de contrôle permet de recouvrer une forme semblable à celle de référence. La moyenne des différences de déflexion sur toute la longueur de la plaque entre la forme avec contrôle actif et la forme de référence est de 0.2mm.

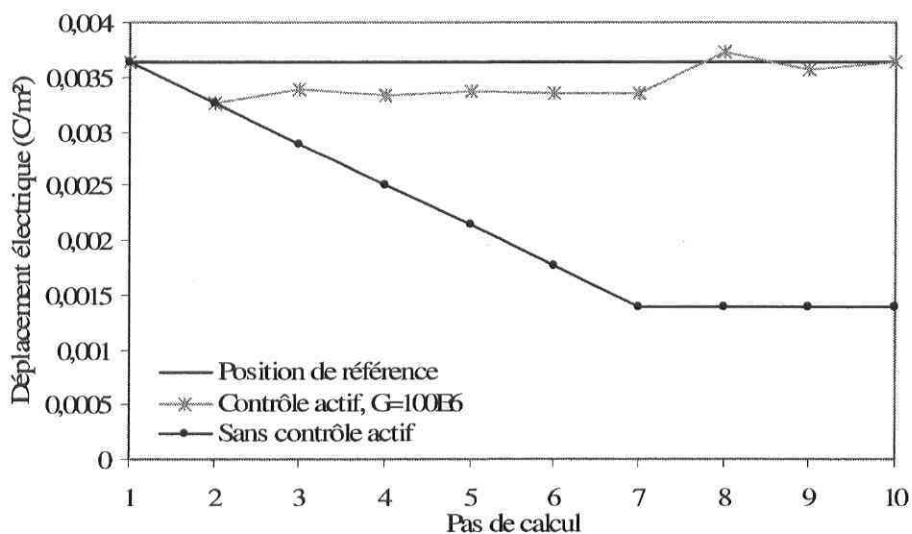


Figure 6-16 : Evolution du déplacement électrique moyen

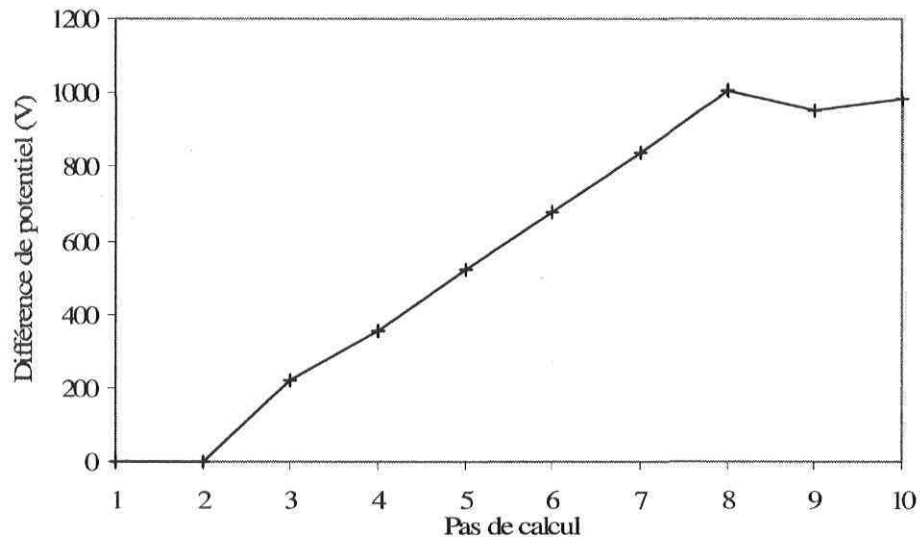


Figure 6-17 : Différence de potentiel appliquée lors de l'analyse avec contrôle actif basé sur le déplacement électrique

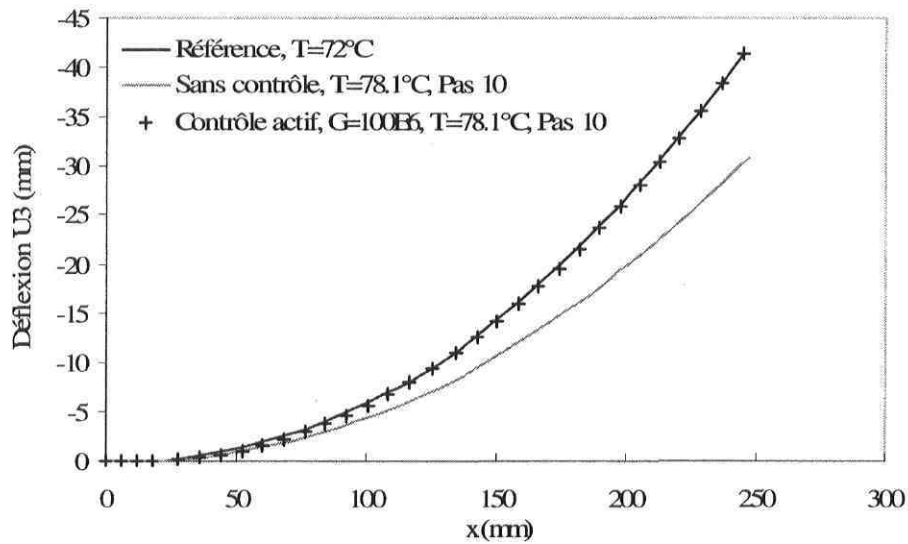


Figure 6-18 : Prédiction de la forme de la plaque stratifiée sous l'effet de la température et du contrôle actif basé sur le déplacement électrique

Les valeurs moyennes du déplacement électrique D et de ses composantes au 1^{er} et 10^e pas de calcul sont présentées dans le Tableau 6-2. Les valeurs de D_2 et D_3 sont négligeables par rapport à celles de D et D_1 . Ceci confirme l'hypothèse réalisée au paragraphe 6.3.5.1 spécifiant que D_1 est la composante principale du déplacement électrique.

Tableau 6-2 : Valeur du déplacement électrique

Pas	D (C/m ²)	D_1 (C/m ²)	D_2 (C/m ²)	D_3 (C/m ²)
1	3.63E-03	3.63E-03	-1.59E-05	-6.88E-05
10	3.64E-03	3.64E-03	7.83E-06	-5.95E-05

6.3.6 Conclusion partielle

Trois méthodes de contrôle actif ont été étudiées numériquement. Le contrôle actif utilisant la mesure des déformations de la plaque stratifiée n'a pas permis d'obtenir de résultats satisfaisants. Cependant, les deux autres méthodes, respectivement basées sur le déplacement en bout de plaque et le déplacement électrique, ont permis de contrôler activement la forme de la plaque stratifiée soumise à un chargement thermique. Afin de valider ces résultats, le contrôle actif basé sur le déplacement en bout de plaque va maintenant être testé expérimentalement.

6.4 Essais expérimentaux

6.4.1 Montage expérimental et principe du contrôle actif

L'objectif des essais est d'étudier expérimentalement la capacité des actionneurs MFC™ à contrôler activement les déformations induites thermiquement dans une plaque stratifiée $[0/90_3]_T$. Le montage expérimental et la structure étudiée sont identiques au paragraphe 5.3. Disposant d'un capteur laser de position, le contrôle actif est basé sur la position du bout de la plaque stratifiée, similairement à l'étude théorique du paragraphe 6.3.3. L'asservissement présenté à la Figure 6-19 est réalisé à l'aide d'une procédure de commande développée avec le logiciel commercial d'acquisition de données DasyLab (Cf. Annexe C). Le capteur laser et la source de tension excitant les actionneurs sont connectés à une carte d'acquisition et de contrôle équipant l'ordinateur utilisé lors de ces essais.

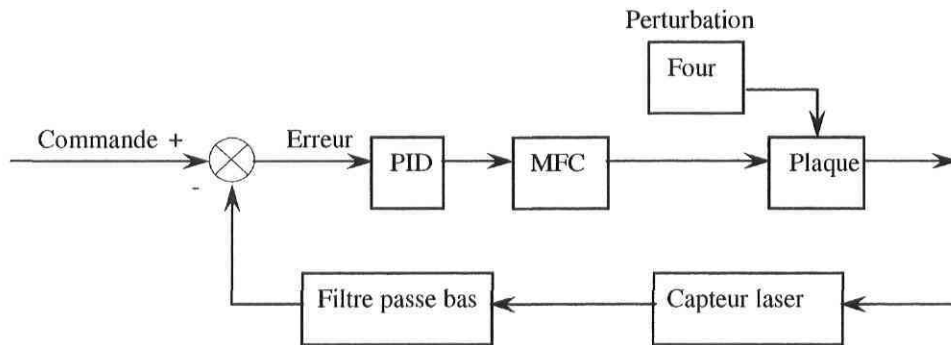


Figure 6-19 : Diagramme du contrôleur avec feedback

Afin de palier aux problématiques liées à l'inertie du système et au temps de réponse de la source de courant utilisé, un contrôleur avec rétroaction de type PID (Proportionnel, Intégral et Dérivatif) est inclus. Un contrôleur PID est sensible à la différence entre sa variable de processus, qui est dans le cas présent la position en bout de plaque, et son point de référence, qui est ici la position de référence en bout de plaque. Lorsque le four engendre une variation de température, créant ainsi un déplacement, le contrôleur PID active les actionneurs en fonction du déplacement à l'extrémité de la plaque, afin de ramener celle-ci à la position de référence. La valeur de sortie du capteur laser est fixée à zéro lorsque la structure est dans sa position de référence. Le point de référence du contrôleur PID est lui aussi égal à zéro. Ceci signifie que lors des essais, il faut garder le signal du capteur le plus proche possible de zéro.

Le contrôleur est composé de trois paramètres : P , I et D . Le paramètre Proportionnel P réduit le temps de réaction et diminue l'erreur du contrôle. Le paramètre Intégral I permet d'éliminer l'erreur de contrôle mais augmente l'erreur transitoire. Finalement, le paramètre Dérivatif D améliore conjointement la réponse transitoire et le dépassement de la valeur de référence, augmentant ainsi la stabilité du système. Les paramètres du contrôleur avec feedback utilisé dans le cadre de ces essais ont été définis par essais successifs afin de compenser les déformations thermiques et de stabiliser le système et sont : $P=1.5$, $I=22$ et $D=0.2$. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une étude vibratoire, un filtre passe bas est inclus afin de limiter les rapides changements de tension appliquée aux actionneurs, ralentissant en contrepartie la réponse du système.

6.4.2 Résultats expérimentaux et corrélation

La plaque $[0/90_3]_T$ avec deux actionneurs MFCTM est placée dans le four puis chauffée à 72°C. Le capteur laser est positionné pour mesurer le déplacement à l'extrémité de la plaque et sa valeur de sortie est mise à zéro lorsque la température de 72°C est atteinte. Un essai en boucle ouverte et un essai avec contrôle actif sont réalisés alors que la température augmente de 72°C à 78.1°C.

L'évolution de la température durant les essais est représentée sur la Figure 6-20. La Figure 6-21 compare les déplacements à l'extrémité de la plaque mesurés durant les deux essais. Le déplacement mesuré pendant l'essai avec contrôle actif est très proche de zéro tout au long de l'essai, ce qui signifie que le bout de la plaque reste près de sa position de référence. Le déplacement engendré a respectivement un minimum et un maximum de -0.34mm et 0.57mm, avec une valeur moyenne de 0.036mm sur la durée totale de l'essai, alors que le déplacement en boucle ouverte atteint 12mm. La différence de potentiel appliquée aux actionneurs avec le contrôle actif est représentée à la Figure 6-22. La valeur atteinte en fin d'essai pour compenser la variation de 6.1°C est de 710V.

La Figure 6-23 compare la forme de la plaque à 78.1°C avec une différence de potentiel de 710V appliquée aux actionneurs à la forme de référence et à la forme obtenue sans contrôle actif. Cette figure montre que les actionneurs MFCTM ont la capacité de contrôler activement la position de l'extrémité de la plaque avec efficacité, ce qui résulte en l'obtention d'une forme générale similaire de la plaque stratifiée. La déflexion obtenue avec le contrôle actif est semblable à celle de référence. La Figure 6-23 montre également les résultats obtenus avec l'analyse par éléments finis utilisant le contrôle actif basé sur le déplacement en bout de plaque. La corrélation entre la théorie et les essais expérimentaux est excellente, validant ainsi le modèle numérique. Les différences moyennes du déplacement U_3 sur la longueur de la plaque sont respectivement de 2.5%, 4% et 4.4% entre l'expérimental et la modélisation pour les formes à 72°C, à 78.1°C et avec activation des MFCTM. L'analyse numérique donne après 10 pas de calcul une erreur moyenne du déplacement U_3 de 4.6% entre la forme de référence et la forme obtenue avec contrôle actif. Les essais expérimentaux présentent une erreur moyenne du déplacement U_3 de 2.7% entre la forme de référence et la forme avec contrôle actif.

On peut cependant noter que les différences de potentiel définies numériquement et expérimentalement sont un peu différentes. Deux causes permettent d'expliquer cette différence. Tout d'abord, le contrôle actif réalisé numériquement est basé sur le déplacement à l'extrémité de la plaque stratifiée, alors que dans le cas expérimental, et ceci pour des raisons pratiques, le point de mesure se trouve avant l'extrémité de la plaque, tel que le montre la Figure 6-23. Les points de référence utilisés ne sont donc pas exactement les mêmes. D'autre part, il est possible d'observer des légères différences de forme entre la prédiction numérique et les essais expérimentaux dans les zones 1 et 2 de la Figure 6-23. Dans la première moitié de la plaque, la forme obtenue expérimentalement se trouve au dessus de la forme prédite numériquement, alors qu'elle passe en dessous de cette dernière dans la deuxième moitié de la plaque.

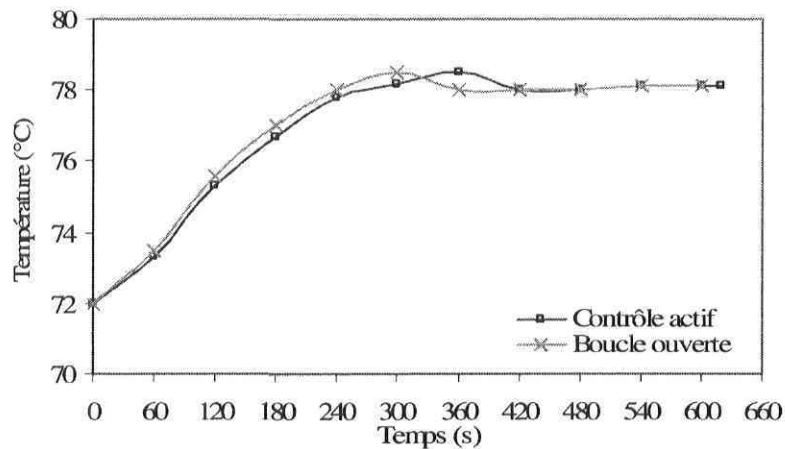


Figure 6-20 : Température durant les essais expérimentaux

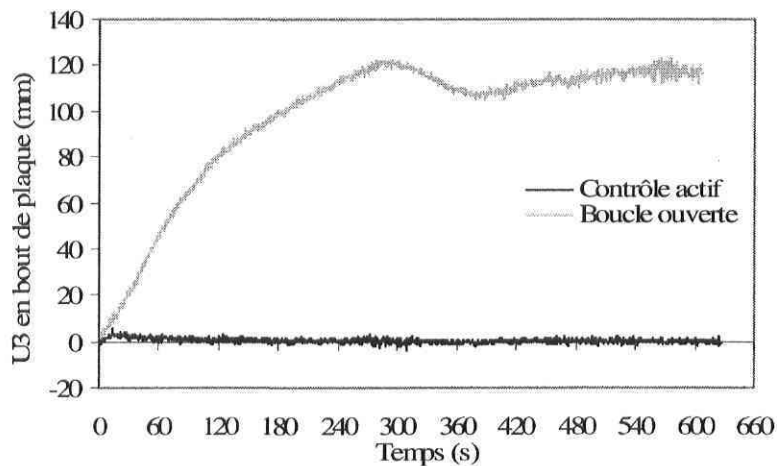


Figure 6-21 : Déplacement en bout de plaque pendant les essais

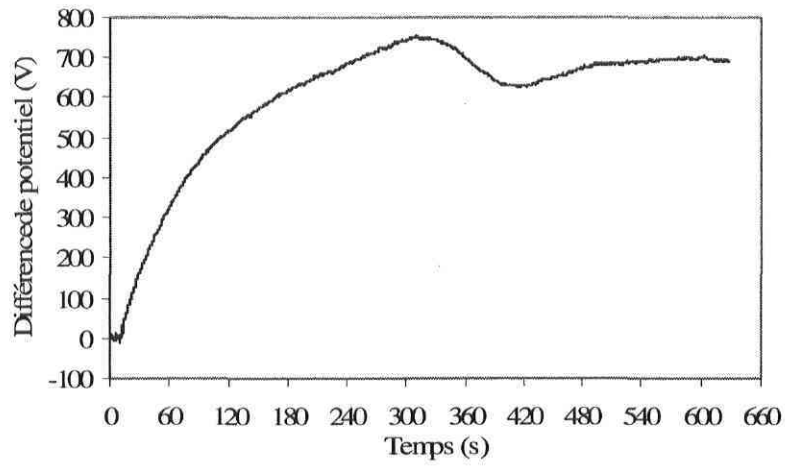


Figure 6-22 : Différence de potentiel appliquée aux actionneurs

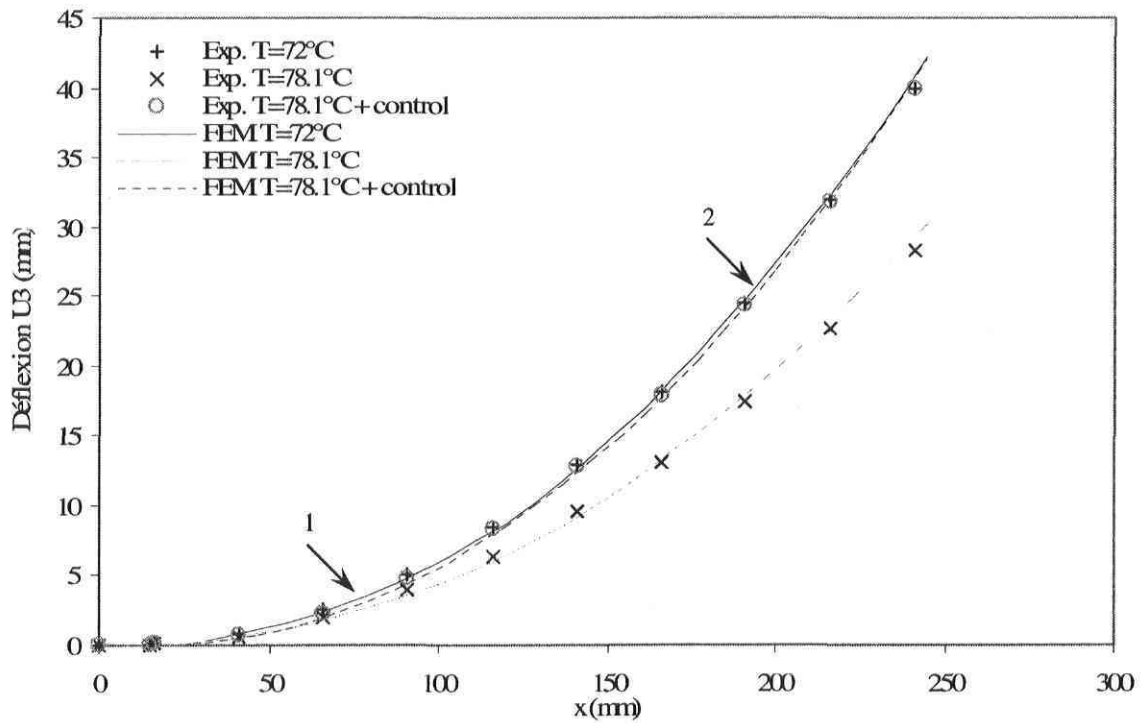


Figure 6-23 : Déflexion de la plaque pour différents essais

6.5 Conclusion

Le comportement d'une plaque stratifiée soumise à des variations de température et à deux actionneurs MFCTM activés par un processus de contrôle actif a été analysé numériquement par la méthode des éléments finis puis étudié expérimentalement.

Lors de l'approche théorique, trois techniques de détection des déformations thermiques ont été étudiées : la mesure du déplacement en bout de plaque, la mesure des déformations de la structure et la mesure du déplacement électrique induits dans les capteurs des MFCTM.

La technique utilisant les déformations n'a pas donné de résultats satisfaisants car l'état des déformations de la plaque contrôlée par les actionneurs n'est pas équivalent à celui de la plaque dans sa forme de référence. On ne peut donc pas utiliser un contrôle actif basé sur les déformations.

Le déplacement en bout de plaque et le déplacement électrique ont permis de contrôler activement la forme de la structure soumise à des variations de température. L'algorithme basé sur le déplacement électrique a l'avantage d'utiliser un capteur co-localisé et représente donc une solution plus viable, dans le cas d'applications industrielles, qu'un capteur laser.

Une procédure expérimentale a été développée afin de contrôler activement les déformations d'une plaque stratifiée en utilisant un algorithme basé sur le déplacement en bout de plaque et un contrôleur avec rétroaction de type PID. Ce dispositif s'est montré performant et a mis en évidence les capacités des actionneurs MFCTM. Les résultats obtenus expérimentalement ont été concluants et la bonne corrélation avec la théorie a permis de valider le modèle numérique.

Conclusion

L'étude présentée dans ce mémoire a permis de mettre en place un modèle par éléments finis permettant de prédire le contrôle actif à l'aide d'actionneurs MFCTM des déformations induites thermiquement dans une plaque stratifiée non symétrique $[0/90_3]_T$.

La problématique de la recherche regroupe l'utilisation d'un composite à fibres actives récemment développé et peu étudié, le MFCTM, et la complexité d'un stratifié non symétrique, qui subit d'importants déplacements et une forte courbure avec les variations de température.

Le modèle numérique étant développé à l'aide du logiciel commercial Abaqus, les éléments disponibles ont tout d'abord été étudiés afin de prédire le choix des éléments à utiliser en fonction de leurs comportements. Les actionneurs devant être modélisés à l'aide d'éléments piézoélectriques et le logiciel ne disposant pas d'éléments de coque piézoélectriques, le modèle créé a donc dû être réalisé avec des éléments solides. Les couples d'éléments solides quadratiques C3D20/C3D20E et C3D20R/C3D20RE ont montré, a priori, posséder les propriétés nécessaires pour modéliser la structure étudiée, alors que les couples d'éléments solides linéaires C3D8/C3D8E et C3D8R/C3D8RE ont présenté des défaillances qui sont respectivement la rigidification par cisaillement, entraînant une rigidité trop importante, et le mode de déformation à énergie nulle, correspondant à un manque de rigidité.

Les caractéristiques des éléments ayant été étudiées, ils ont été testés sur des structures simples. Tout d'abord, des essais à température ambiante ont été réalisés en modélisant uniquement une plaque stratifiée $[0/90_3]_T$, puis en y ajoutant deux actionneurs passifs sur une de ses faces. La corrélation avec d'une part une analyse utilisant des éléments de coque, référence pour la modélisation de plaque composite mince, et d'autre part des essais expérimentaux, a permis de valider le choix des couples d'éléments C3D20/C3D20E et C3D20R/C3D20RE.

Dans la suite du mémoire, seuls les éléments à intégration réduite C3D20R et C3D20RE ont été utilisés car ils permettent de réaliser un gain de temps pour la résolution des analyses par rapport aux éléments à intégration complète.

Les éléments à utiliser ayant été validés dans le cas de la modélisation avec des actionneurs passifs, la capacité des MFCTM de compenser les déformations induites thermiquement dans le stratifié [0/90₃]_T a été étudiée. Un modèle numérique a tout d'abord été développé, montrant les performances des actionneurs pour compenser les déformations thermiques en recouvrant la forme générale de la plaque, puis a été validé par une série d'essais expérimentaux, montrant une bonne corrélation.

Enfin, les MFCTM ont été utilisés pour compenser activement les déformations induites thermiquement dans le stratifié. Des boucles de contrôle ont été développées et implantées dans Abaqus afin de détecter les déformations engendrées par une variation de température, puis de définir et d'appliquer automatiquement aux actionneurs le champ électrique nécessaire pour contrer ces déformations.

Trois techniques de détection des déformations ont été étudiées avec des modèles par éléments finis. Le contrôle actif basé sur la mesure des déformations du stratifié n'a pas permis d'obtenir de bons résultats, ceci étant dû à l'effet global plutôt que local des actionneurs sur le stratifié. Les boucles de contrôle basées sur le déplacement en bout de plaque et sur le déplacement électrique émis par les actionneurs ont été performantes pour contrôler activement les déformations induites thermiquement dans le stratifié.

Un essai expérimental a été réalisé à l'aide d'un capteur de position laser et d'un contrôleur de type PID. Le contrôle actif a été très performant puisque l'analyse numérique et les essais expérimentaux ont respectivement permis de recouvrer la forme générale de la plaque avec des erreurs moyennes de 4.6% et 2.7%. Les essais expérimentaux ont montré une bonne corrélation avec les résultats numériques avec des erreurs comprises entre 2.5% et 4.4%.

Comme travail de recherche futur, il serait intéressant d'étudier différentes problématiques. Tout d'abord, le développement d'éléments de coque piézoélectriques dans le logiciel Abaqus permettrait d'une part de simplifier les analyses par éléments finis et d'autre part d'en diminuer les coûts de résolution.

D'autre part, l'actionneur MFCTM est caractérisé comme auto-capteur, c'est à dire que la partie active de l'actionneur peut simultanément être utilisée en tant que capteur. Or, dans ce mémoire, nous avons utilisé un actionneur auquel une partie capteur a été ajoutée en parallèle. Il serait donc

intéressant de développer un modèle numérique et une démarche expérimentale utilisant uniquement la partie active du MFC™ pour contrôler activement les déformations induites thermiquement. Ceci permettrait d'utiliser un senseur qui soit plus précisément co-localisé avec l'actionneur.

Enfin, les modèles développés pourraient être transposés à la modélisation de structures paraboloides telles que des réflecteurs de satellites.

Références

1. M. W. Hyer, 'Stress analysis of fiber-reinforced composite materials', McGraw-Hill, 1998.
2. K. J. Yoon, J. Kim, 'Prediction of Thermal Expansion Properties of Carbon/Epoxy Laminates for Temperature Variation', *Journal of Composite Materials*, Vol 34, n2, 2000.
3. H. T. Banks, R. C. Smith, Y. Wang, 'Smart Material Structures: Modeling Estimation and Control', John Wiley and Sons, Masson, Paris, 1996.
4. E. F. Crawley et J. de Luis, 'Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures', *AIAA Journal*, Vol. 25, n10, p 1373-1385, 1987.
5. R. B. Williams, 'Nonlinear Mechanical and Actuation Characterization of Piezoceramic Fiber Composites', Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
6. J. L. Nowinski, 'Theory of Thermoelasticity with Applications', Sijthoff & Noordhoff International Publishers, 1978.
7. S. Liebus, 'Couches minces ferroélectriques appliquées aux dispositifs microondes accordables en fréquence', Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Limoges, 2003.
8. H. Lee, D. A. Saravanos, 'The Effect of Temperature Dependent Material Nonlinearities on the Response of Piezoelectric Composite Plates', NASA/TM-97-206216.
9. B. N. Agrawal, K. E. Treanor, 'Shape Control of a Beam using Piezoelectric actuators', *Smart Materials and Structures*, Vol. 8, p 729-740, 1999.
10. X. Zhou, G. Song, W. Binienda, 'Thermal Deformation Compensation of a Composite Beam using Piezoelectric Actuators', *proceeding of SPIE*, Vol. 4701, p 334-344, 2002.
11. K. Chandrashekhara, R. Tenneti, 'Thermally Induced Vibration Suppresion of Laminated Plates with Piezoelectric Sensor and Actuator', *Smart Materials and Structures*, Vol. 4, p 281-290, 1995.

12. Y. Shen, C. Weng, 'Deformation Control of Laminated Composite Plates containing Piezoelectric Layer under Thermal Loading', *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 18, p 449-464, 1995.
13. C. R. Fuller, G. P. Gibbs, 'Active Control of Interior Noise in a Business Jet Using Piezoceramic Actuators', *Noise-Con 94*, Ft. Lauderdale, FL, p 389-394, 1994.
14. G. Mathur, B. Tran, 'Aircraft Cabin Noise Reduction Using Active Structural Acoustic Control', *AIAA Paper 93-4437*, 1993.
15. A. A. Bent, N. W. Hagood, 'Piezoelectric Fiber Composites with Interdigitated Electrodes', *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, Vol. 8, p 903-919, 1997.
16. W. K. Wilkie, 'Low-Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications', *Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, *Proceeding of SPIE*, Vol. 3991-42, 2000.
17. M. Gakwaya, 'Contrôle des déformations induites thermiquement dans les matériaux composites à l'aide d'un piézocomposite', *Mémoire de maitrise*, Université Laval, Québec, 2006.
18. J. Lin, M. H. Nien, 'Adaptive Control of a Composite Cantilever Beam with Piezoelectric damping-modal Actuators/Sensors', *Composite Structures*, Vol. 70, p 170-176, 2005.
19. J. M. Simoes Moita, I. F. P. Correia, C. M. M. Soares, C. A. M. Soares, 'Active Control of Adaptive Laminated Structures with Bonded Piezoelectric Sensors and Actuators', *Computers and Structures*, Vol. 82, p 1349-1358, 2004.
20. D. Tan, 'Compensation for thermal deformation of a paraboloid shell using distributed structural actuation', *International Journal of Solid and Structures*, Vol. 38, p 2893-2919, 2001.
21. T. S. Koko, I. R. Orisamolu, M. J. Smith, U. O. Akpan, 'Active Control Methodology for Thermal Distortion Management of Smart Composite Structures', *SPIE Conference on Mathematics and Control in Smart Structures*, Vol. 3323, p 8-19, 1998.
22. R. B. Williams, D. J. Inman, 'An Overview of Composite Actuators with Piezoceramic Fibers', www.smart-material.com, *Proceeding of the 20th International Modal Analysis Conference*, Los Angeles, CA, 2002.

23. A. A. Bent, N. W. Hagood, J. P. Rodgers, 'Anisotropic Actuation with Piezoelectric Fiber Composites', Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 6, p 338-349, May 1995.
24. D. Berlincourt, H. H. A. Krueger, 'Properties of Morgan Electro Ceramic Ceramics', www.morgan-electroceramics.com.
25. www.smart-material.com : 'MFC data'.
26. Manuel d'utilisation du logiciel Abaqus 6.4, Users Manual, Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc., Rhode Island, USA, 2003.

Annexe A : Fichiers de définition des analyses *.inp

L'objectif de cette annexe est de présenter les fichiers de définition (*.inp) des analyses par éléments finis effectuées avec le logiciel commercial Abaqus. Les fichiers ne sont pas entièrement détaillés, car toutes les parties initiales comprenant la définition des nœuds et des éléments ne sont pas incluses. Seules les parties concernant la définition des matériaux et des pas de calcul sont présentées. Tout d'abord, une description des analyses concernant les études préliminaires des chapitres 4 et 5 est effectuée. Puis, le détail des analyses avec contrôle actif du Chapitre 6 est abordé.

Détail des fichiers de définition des analyses des chapitres 4 et 5

<pre> ** MATERIALS ** ----- *Material, name=MFC *Dielectric 1.505e-08, *Elastic, type=ENGINEERING CONSTANTS 3.03e+10, 1.51e+10, 1.146e+10, 0.29, 0.289, 0.327, 5.5e+09, 2.6e+09, 2.14e+09, *Expansion, type=ORTHO 5.9e-06, 3e-05, 2.1e-05, *Piezoelectric, type=E 3.6e-10, -1.9e-10, -1.9e-10, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., ** ----- </pre>	<p>Définition des propriétés du MFC™</p>
<pre> ** Material, name=PANEX *Elastic, type=ENGINEERING CONSTANTS 1.017e+11, 7.91e+09, 7.91e+09, 0.318, 0.318, 0.458, 3.02e+09, 3.02e+09, 2.71e+09, *Expansion, type=ORTHO -6e-08, 4.17e-05, 4.17e-05 ** ----- </pre>	<p>Définition des propriétés du composite</p>
<pre> ** FIELDS ** Name: Field-1 Type: Temperature *Initial Conditions, type=TEMPERATURE _PICKEDSET36, 94. ** ----- </pre>	<p>Application de la température de polymérisation</p>
<pre> ** Step 1, Default Static Step ** LoadCase, Default ** *STEP, NLGEOM Non-Linear Static Analysis ** *STATIC 1.0,8.0,0.001,1.5 ** </pre>	<p>Définition du premier pas de calcul</p>
<pre> *BOUNDARY, OP=NEW Encastrement, 1,3,0. Zero1,9,9,0. Zero2,9,9,0. Pot1,9,9,0. Pot2,9,9,0. ** </pre>	<p>Définition de l'encastrement pour le set de nœuds Encastrement</p> <p>Définition du champ électrique au degré de liberté supplémentaire (n°9) pour les différents sets de nœuds des analyses avec actionneurs</p>
<pre> *TEMPERATURE _PickedSet36,72.1 ** </pre>	<p>Définition de la température pour le set comprenant tous les nœuds</p>
<pre> ** NODE OUTPUT REQUESTS *OUTPUT, FIELD, FREQ=1 *NODE OUTPUT U,EPOT ** </pre>	
<pre> ** ELEMENT OUTPUT REQUESTS *OUTPUT, FIELD, FREQ=1 *ELEMENT OUTPUT S, E, ** </pre>	<p>Définition des variables de sorties</p>

*END STEP

**

** Step 2, Default Static Step

** LoadCase, Default

**

*STEP, NLGEOM

Non-Linear Static Analysis

**

*STATIC

1.0,8.0,0.001,1.5

**

*BOUNDARY, OP=NEW

Encastrement,1,3,0.

Zero1,9,9,0.

Zero2,9,9,0.

Pot1,9,9,0.

Pot2,9,9,0.

**

*TEMPERATURE

_PickedSet36,80.4

**

** NODE OUTPUT REQUESTS

*OUTPUT, FIELD, FREQ=1

*NODE OUTPUT

U,EPOT

**

** ELEMENT OUTPUT REQUESTS

*OUTPUT, FIELD, FREQ=1

*ELEMENT OUTPUT

S, E,

**

*END STEP

**

** Step 3, Default Static Step

** LoadCase, Default

**

*STEP, NLGEOM

Non-Linear Static Analysis

**

*STATIC

1.0,8.0,0.001,1.5

**

*BOUNDARY, OP=NEW

Encastrement,1,3,0.

Zero1,9,9,0.

Zero2,9,9,0.

Pot1,9,9,213690

Pot2,9,9,213690

**

*TEMPERATURE

_PickedSet36,80.4

**

** NODE OUTPUT REQUESTS

*OUTPUT, FIELD, FREQ=1

*NODE OUTPUT

U,EPOT

Définition du
deuxième pas de
calcul

Définition de la nouvelle
température

Définition du
troisième pas de
calcul

Définition du champ électrique
pour compenser les déformations
thermiques

Définition de la nouvelle
température

```
**  
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS  
** *OUTPUT, FIELD, FREQ=1  
** *ELEMENT OUTPUT  
** S, E,  
**  
** *END STEP  
** -----
```

Fin de l'analyse

Détail des fichiers de définition des analyses avec contrôle actif du chapitre 6

L'extrait de fichier présenté ci-dessous comprend les données relatives aux trois analyses présentées au chapitre 6, il n'est pas donc pas nécessaire de toutes les intégrer dans le cas de la résolution d'une analyse. De plus, seuls les trois premiers pas de calcul sont présentés, les suivants étant identiques aux 3^e, mise à part pour les variations de température que l'on désire appliquées.

<pre> ----- *Nset, nset=MESURE, instance=PART-1-1 353 ** ** ----- </pre>	<p>Nœud du bout de la plaque utilisé pour la mesure du déplacement</p>
<pre> ----- *Elset, elset=DEFORMATION, instance=PART-1-1 2197, 2433, 4871, 5134, 5172 ** ** ----- </pre>	<p>Le set d'éléments des nœuds utilisés pour la mesure des déformations</p>
<pre> ----- *Elset, elset=Mesure01, instance=Part-1-1 3954, 3955 *Elset, elset=Mesure02, instance=Part-1-1 5996, 6028 *Nset, nset=Mesure11, instance=Part-1-1 9, 13, 117, 118, 1733, 1766, 9516, 25354, 25357, 25359, 25360, 25361, 25362 *Nset, nset=Mesure12, instance=Part-1-1 5, 6, 129, 130, 2084, 2085, 9501, 31664, 31667, 31669, 31670, 31735, 31736 *Nset, nset=Mesure01, instance=Part-1-1 12, 16, 116, 119, 1732, 1765, 9766, 25040, 25041, 25045, 25046, 25050, 25051 *Nset, nset=Mesure02, instance=Part-1-1 2, 3, 128, 131, 2082, 2083, 9252, 31411, 31418, 31420, 31422, 31672, 31674 ** ----- </pre>	<p>Les sets de noeuds utilisés pour la mesure du déplacement électrique</p>
<pre> *End Assembly ** ** MATERIALS ** *Material, name=MFC *Dielectric 1.505e-08, *Elastic, type=ENGINEERING CONSTANTS 3.03e+10, 1.51e+10, 1.146e+10, 0.29, 0.289, 0.327, 5.5e+09, 2.6e+09, 2.14e+09, *Expansion, type=ORTHO 5.9e-06, 3e-05, 2.1e-05 *Piezoelectric, type=E 3.6e-10, -1.9e-10, -1.9e-10, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0. ** *Material, name=PANEX *Elastic, type=ENGINEERING CONSTANTS 1.017e+11, 7.91e+09, 7.91e+09, 0.318, 0.318, 0.458, 3.02e+09, 3.02e+09, 2.71e+09, *Expansion, type=ORTHO -6e-08, 4.17e-05, 4.17e-05 </pre>	<p>Définition des propriétés des matériaux</p>

```

**
** -----
** FIELDS
**
** Name: Field-1 Type: Temperature
** Initial Conditions, type=TEMPERATURE
** _PICKEDSET36, 94.
** -----
** Step 1, Default Static Step
** LoadCase, Default
**
** STEP, NLGEOM
** Non-Linear Static Analysis
**
**
** STATIC
** 1.0,8.0,0.001,1
**
**
** BOUNDARY, OP=NEW
** ENCASTREMENT,1,3,0.
** ZERO1,9,9,0.
** ZERO2,9,9,0.
** POT1,9,9,0.
** POT2,9,9,0.
**
** TEMPERATURE
** _PickedSet36, 72
**
**
** NODE FILE, NSET=MESURE, FREQ=8 ← Déplacement en
** U,                               bout de plaque
**
**                               ← Déformations
** EL FILE, ELSET=DEFORMATION, POSITION=NODES, FREQ=8
** E
**
**
** EL FILE, ELSET=Mesure01, FREQ=19
** TEMP
** EL FILE, ELSET=Mesure01, POSITION=NODE, FREQ=19
** EFLX
**
** EL FILE, ELSET=Mesure02, POSITION=NODE, FREQ=19
** EFLX
**
**
** PRINT, FREQ=1
** NODE OUTPUT REQUESTS
**
** OUTPUT, FIELD, FREQ=1
** NODE OUTPUT
** U,EPOT
**
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS
**

```

Définition de la condition
initiale de température

Premier pas de calcul

Ecriture des résultats
dans le fichier résultat .fil

Température et
déplacement
électrique

Définition des
sorties pour la
visualisation

```

*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*ELEMENT OUTPUT
S, E,
** MODAL OUTPUT REQUESTS
** NONE
**
*END STEP
**
** -----
**
** Step 2, Default Static Step
** LoadCase, Default
**
*STEP, NLGEOM
Non-Linear Static Analysis
**
**
*STATIC
1.0,8.0,0.001,1
**
**
**
*BOUNDARY, OP=NEW
ENCASTREMENT,1,3,0.
ZERO1,9,9,0.
ZERO2,9,9,0.
POT1,9,9,0.
POT2,9,9,0.
**
*TEMPERATURE
_PickedSet36, 73.3
**
**
*NODE FILE, NSET=MESURE, FREQ=8
U,
**
*EL FILE, ELSET=DEFORMATION, POSITION=NODES, FREQ=8
E
**
*EL FILE, ELSET=Mesure01, FREQ=19
TEMP
*EL FILE, ELSET=Mesure01, POSITION=NODE, FREQ=19
EFLX
**
*EL FILE, ELSET=Mesure02, POSITION=NODE, FREQ=19
EFLX
**
**
*PRINT, FREQ=1
** NODE OUTPUT REQUESTS
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
U,EPOT

```

Deuxième pas de calcul

```
**
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS
**
```

```
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*ELEMENT OUTPUT
```

```
S, E,
**
```

```
** MODAL OUTPUT REQUESTS
** NONE
**
```

```
*END STEP
**
```

```
-----
```

Troisième pas de calcul

```
** Step 3, Default Static Step
** LoadCase, Default
**
```

```
**
*STEP, NLGEOM
Non-Linear Static Analysis
**
```

```
**
```

```
**
```

```
*STATIC
```

```
1.0,8.0,0.001,1
```

```
**
```

```
**
```

```
*BOUNDARY
```

```
ENCASTREMENT,1,3,0.
```

```
ZERO1,9,9,0.
```

```
ZERO2,9,9,0.
```

```
**
```

```
**
```

```
*BOUNDARY, USER
```

```
POT1,9,9,
```

```
POT2,9,9,
```

```
**
```

```
**
```

```
*TEMPERATURE
```

```
_PickedSet36,75.3
```

```
**
```

```
*NODE FILE, NSET=MESURE, FREQ=8
```

```
U,
```

```
**
```

```
*EL FILE, ELSET=DEFORMATION, POSITION=NODES, FREQ=8
```

```
E
```

```
**
```

```
**
```

```
*EL FILE, ELSET=Mesure01, FREQ=19
```

```
TEMP
```

```
*EL FILE, ELSET=Mesure01, POSITION=NODE, FREQ=19
```

```
EFLX
```

```
**
```

```
*EL FILE, ELSET=Mesure02, POSITION=NODE, FREQ=19
```

```
EFLX
```

← Application du champ électrique
avec la valeur définie dans la sous-
routine DISP


```
**
**
*PRINT, FREQ=1
** NODE OUTPUT REQUESTS
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*NODE OUTPUT
U,EPOT
**
** ELEMENT OUTPUT REQUESTS
**
*OUTPUT, FIELD, FREQ=1
*ELEMENT OUTPUT
S, E,
** MODAL OUTPUT REQUESTS
** NONE
**
*END STEP
```

Les pas suivants sont identiques au 3^e pas, mise à part pour la température, suivant les variations désirées

Annexe B : Sous-routines d'utilisateur Fortran

Dans la présente annexe, les sous-routines d'utilisateur, développées en langage Fortran pour les analyses avec contrôle actif, sont détaillées. Rappelons que deux sous routines sont nécessaires. La première sous-routine 'URDFIL' permet de récupérer pendant un pas de calcul les données qui ont été enregistrées dans le fichier des résultats Abaqus *.fil lors du pas de calcul précédent. Ces données sont ensuite enregistrées dans des fichiers textes .txt afin de pouvoir les utiliser par la suite. La deuxième sous-routine 'DISP' récupère les données précédentes puis définit, à l'aide des équations présentées au chapitre 6, la valeur du champ électrique à appliquer en tant que conditions aux limites. Ces deux sous-routines sont appelées par le programme de résolution à chaque pas de calcul où le champ électrique n'est pas spécifié dans le fichier de définition de l'analyse.

Sous-routine relative au contrôle actif avec mesure du déplacement en bout de plaque.

```

-----
SUBROUTINE URDFIL (LSTOP,LOVRWRT,KSTEP,KINC,DTIME,TIME)
C
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
CHARACTER FNAME*80
DIMENSION ARRAY(513),JRRAY(NPRECD,513),TIME(2)
EQUIVALENCE (ARRAY(1),JRRAY(1,1))
C -----
WRITE(6,*) 'KSTEP=',KSTEP,' KINC=', KINC
IF (KSTEP.EQ.14) GOTO 119
C -----
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/Boucledep/delta.txt',STATUS='OLD')
READ(9,*) DELTAU
CLOSE(9)
C
TOL=0.0001
TOL2=TOL*TOL
DELTAU2=DELTAU*DELTAU
C
IF(DELTAU2.LT.TOL2) THEN
LSTOP=1
GO TO 118
ENDIF
C -----
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/Boucledep/glad.txt',STATUS='OLD')
C
C
C
CALL POSFIL(KSTEP,KINC,ARRAY,JRCD)
C
DEP=0.0
DO 100 K1=1,99999
CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
IF(JRCD.NE.0) GO TO 110
KEY=JRRAY(1,2)
C
IF(KEY.EQ.101) THEN
DEP=ARRAY(5)
WRITE(9,*) DEP
ENDIF
C
100 CONTINUE
110 CONTINUE
C
CLOSE(9)
C
IF (KSTEP.EQ.1) THEN
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/Boucledep/depref.txt',STATUS='OLD')

```

Initialisation de la sous-routine URDFIL

Récupération du numéro du pas et de l'incrément

Commande pour arrêter l'analyse si les résultats ont atteint la tolérance, dans le cas où il y en ait une de définie

Récupération de la composante U3 du déplacement au pas précédent.

Récupération dans le fichier .txt de la différence de position au début du pas précédent ; en début du calcul, la valeur écrite dans ce fichier doit être supérieure à la tolérance.

Définition de la tolérance

Commande d'arrêt avec condition : si DELTAU2 < TOL2

Ouverture du fichier pour écriture des résultats récupérés

Routine utilitaire pour déterminer une position dans un fichier

Initialisation d'une boucle sur les résultats

Routine utilitaire pour lire chaque enregistrement dans le fichier résultat

La composante U3 de la position du point de mesure se trouve à la position 5 de l'enregistrement 101 dans le fichier .fil

Écriture de la valeur obtenue dans le fichier .txt

Fermeture du fichier .txt

```

WRITE(9,*) DEP
CLOSE(9)
ENDIF
C
118 CONTINUE
119 CONTINUE
RETURN
END
-----
C
C
SUBROUTINE DISP (U,KSTEP,KINC,TIME,NODE,NOEL,JDOF,COORDS)
C
INCLUDE 'aba_param.inc'
CHARACTER FNAME*80
DIMENSION U(3),TIME(2),COORDS(3)
C-----
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/Boucledep/activ.txt',STATUS='OLD')
READ(9,*) ACT
ACTIVREF=ACT
CLOSE(9)
C
C
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/Boucledep/depref.txt',STATUS='OLD')
READ(9,*) DEP
DEPREF=DEP
CLOSE(9)
C
C
C
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/Boucledep/glad.txt',STATUS='OLD')
READ(9,*) DEP
C
C
DELTAU=-DEPREF+DEP
ACT=ACTIVREF+DELTAAU*20000000
C
C
C
U(1)=ACT*TIME(1)/8.0
U(2)=0.
U(3)=0.
CLOSE(9)
C
C
C
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/Boucledep/activ.txt',STATUS='OLD')
WRITE(9,*) ACT
CLOSE(9)

```

← Ecriture de la valeur de U3 de référence dans un fichier séparé si l'on est dans le pas n°1

← Récupération de la valeur du champ électrique appliqué au pas précédent et écrite dans le fichier .txt ; la valeur écrite dans ce fichier doit être égale à zéro au début du calcul.

← Récupération de la valeur de la valeur U3 de référence, correspondant au 1^{er} pas de calcul, écrite dans le fichier .txt

← Récupération de la valeur de U3 du pas précédent écrite dans le fichier .txt

← Définition de la valeur du champ électrique à l'aide de la formule définie au paragraphe 6.3.3.1

← La variable U(1) de la sous routine DISP est celle qui est appliquée comme condition aux limites dans la résolution de l'analyse; sa valeur est divisée par 8, qui est le nombre d'incrément par pas de calcul ; TIME(1) est le numéro de l'incrément, qui est 8 pour le dernier incrément, éliminant le dénominateur (ceci est nécessaire pour permettre la convergence du calcul) ; les variables U(2) et U(3) ne sont pas utilisés dans ce cas.

← Enregistrement dans le fichier .txt de la valeur du champ électrique appliqué en fin de pas

Fin de la sous-routine URDFIL

Initialisation de la sous-routine DISP

Définition de la valeur du champ électrique

```
C
C
C
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/Boucledep/delta.txt',STATUS='OLD')
WRITE(9,*) DELTAU
CLOSE(9)
C
C
C
END
```



Enregistrement dans le fichier .txt de la
différence de U3 au début du pas

Fin de la sous-
routine DISP

Sous-routine relative au contrôle actif avec mesure de déformation.

```
-----
SUBROUTINE URDFIL (LSTOP,LOVRWRT,KSTEP,KINC,DTIME,TIME)
```

Sous-routine DISP

```

C
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
CHARACTER FNAME*80
DIMENSION ARRAY(513),JRRAY(NPRECD,513),TIME(2)
EQUIVALENCE (ARRAY(1),JRRAY(1,1))
WRITE(6,*) 'KSTEP=',KSTEP,' KINC=', KINC
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/mod/ModélisationDéfo/deltadef.txt',
STATUS='OLD')
READ(9,*) DELTAE
CLOSE(9)
C
C
C
TOL=10e-6
TOL2=TOL*TOL
DELTAE2=DELTAE*DELTAE
C
C
IF(DELTAE2.LT.TOL2) THEN
LSTOP=1
GO TO 118
ENDIF
C
C
C

```

← Récupération dans le fichier .txt de la différence de déformation au début du pas précédent ; en début du calcul, la valeur écrite dans ce fichier doit être supérieure à la tolérance.

← Définition de la tolérance

← Commande d'arrêt de l'analyse avec condition

```

C
C
C
-----
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/mod/ModélisationDéfo/gladdef.txt',
STATUS='OLD')
OPEN(UNIT=12,FILE='/home/mefpp_bejul12/mod/ModélisationDéfo/gladdefref.txt',
STATUS='OLD')
C

```

Récupération des valeurs des déformations du pas précédent.

```

CALL POSFIL(KSTEP,KINC,ARRAY,JRCD)
C
DEP=0.0
DO 100 K1=1,99999
C
CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
IF(JRCD.NE.0) GO TO 110
KEY=JRRAY(1,2)
C
C
C
IF(KEY.EQ.1)THEN
EL=JRRAY(1,3)
ND=JRRAY(1,4)
ENDIF
C
C
C
IF(EL.EQ.2197.AND.ND.EQ.3567.AND.KEY.EQ.21)THEN

```

← Récupération des numéros d'élément et de nœud aux positions 3 et 4 de l'enregistrement 1 dans le fichier .fil

← Récupération de la composante E11 des déformations aux nœuds 3567 de l'élément 2197, au nœud 3731 de l'élément 2433, au nœud 5067 de l'élément 4871, au nœud 5270 de l'élément 5134, au nœud 5296 de l'élément 5172 ; ces données se trouvent à la position 3 de l'enregistrement 21 dans le fichier .fil

```

DEF1=ARRAY(3)
WRITE(9,*) DEF1
ENDIF
IF(EL.EQ.2433.AND.ND.EQ.3731.AND.KEY.EQ.21)THEN
DEF2=ARRAY(3)
WRITE(9,*) DEF2
ENDIF
IF(EL.EQ.4871.AND.ND.EQ.5067.AND.KEY.EQ.21)THEN
DEF3=ARRAY(3)
WRITE(9,*) DEF3
ENDIF
IF(EL.EQ.5134.AND.ND.EQ.5270.AND.KEY.EQ.21)THEN
DEF5=ARRAY(3)
WRITE(9,*) DEF4
ENDIF
IF(EL.EQ.5172.AND.ND.EQ.5296.AND.KEY.EQ.21)THEN
DEF5=ARRAY(3)
WRITE(9,*) DEF4
ENDIF

```

Ecriture de ces résultats dans le fichier de
référence si c'est le premier pas de calcul



```

C
C
C
C
IF(KSTEP.EQ.1) THEN
IF(EL.EQ.2197.AND.ND.EQ.3567.AND.KEY.EQ.21)THEN
DEF1=ARRAY(3)
WRITE(9,*) DEF1
ENDIF
IF(EL.EQ.2433.AND.ND.EQ.3731.AND.KEY.EQ.21)THEN
DEF2=ARRAY(3)
WRITE(9,*) DEF2
ENDIF
IF(EL.EQ.4871.AND.ND.EQ.5067.AND.KEY.EQ.21)THEN
DEF3=ARRAY(3)
WRITE(9,*) DEF3
ENDIF
IF(EL.EQ.5134.AND.ND.EQ.5270.AND.KEY.EQ.21)THEN
DEF5=ARRAY(3)
WRITE(9,*) DEF4
ENDIF
IF(EL.EQ.5172.AND.ND.EQ.5296.AND.KEY.EQ.21)THEN
DEF5=ARRAY(3)
WRITE(9,*) DEF4
ENDIF
ENDIF
C
100 CONTINUE
110 CONTINUE
CLOSE(9)
CLOSE(12)
118 CONTINUE
119 CONTINUE
RETURN
END

```

Fin de la sous-routine
URDFIL

```

SUBROUTINE DISP(U,KSTEP,KINC,TIME,NODE,NOEL,JDOF,COORDS)
C
INCLUDE 'aba_param.inc'
CHARACTER FNAME*80
DIMENSION U(3),TIME(2),COORDS(3)
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/mod/ModélisationDéfo/activdef.txt',
STATUS='OLD')
READ(9,*) ACT
ACTIVREF=ACT
CLOSE(9)
C
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/mod/ModélisationDéfo/gladdef.txt',
STATUS='OLD') DEF1, DEF2, DEF3, DEF4, DEF5
CLOSE(9)
C
C
OPEN(UNIT=12,FILE='/home/mefpp_bejul12/mod/ModélisationDéfo/gladdefref.txt',
STATUS='OLD')
READ(9,*) DEFR1, DEFR2, DEFR3, DEFR4, DEFR5
CLOSE(12)
C
C

```

← Récupération de la valeur du champ électrique appliqué au pas précédent et écrite dans le fichier .txt ; la valeur écrite dans ce fichier doit être égale à zéro au début du calcul.

← Récupération des valeurs de déformation au pas précédent écrites dans le fichier .txt

← Récupération des valeurs de déformation de référence écrites dans le fichier .txt lors du premier pas

```

C
C
DELTAE=((DEFR1+DEFR2+DEFR3+DEFR4+DEFR5)/5) -
((DEF1+DEF2+DEF3+DEF4+DEF5)/5)
C
ACT=ACTIVREF+DELTAE*2.1e9
U(1)=ACT*TIME(1)/8.0
U(2)=0.
U(3)=0.
C
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/mod/ModélisationDéfo/activdef.txt',
STATUS='OLD')
WRITE(9,*) ACT
CLOSE(9)
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/mod/ModélisationDéfo/deltadef.txt',
STATUS='OLD')
WRITE(9,*) DELTAE
CLOSE(9)
END

```

} Algorithme

← Définition à l'aide du principe présenté au paragraphe 6.3.4.1 de la valeur du champ électrique à appliquer en tant que condition aux limites

Initialisation de la sous-routine DISP

Fin de la sous-routine DISP

Sous-routine relative au contrôle actif avec mesure du déplacement électrique.

```

-----
SUBROUTINE URDFIL(LSTOP,LOVRWRT,KSTEP,KINC,DTIME,TIME)
C
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
CHARACTER FNAME*80
DIMENSION ARRAY(513),JRRAY(NPRECD,513),TIME(2)
EQUIVALENCE (ARRAY(1),JRRAY(1,1))
C
C
WRITE(6,*) 'KSTEP=',KSTEP,' KINC=', KINC
IF (KSTEP.EQ.11) GOTO 119
C
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/delta.txt',STATUS='OLD')
READ(9,*) DELTAD
CLOSE(9)
C
C
TOL=0.00001
TOL2=TOL*TOL
DELTAD2=DELTAU*DELTAU
C
IF(DELTAD2.LT.TOL2) THEN
LSTOP=1
GO TO 118
ENDIF
C
-----
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/glad1.txt',STATUS='OLD')
OPEN(UNIT=14,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/glad2.txt',STATUS='OLD')
OPEN(UNIT=18,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/reference1.txt',STATUS='OLD')
OPEN(UNIT=20,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/reference2.txt',STATUS='OLD')
OPEN(UNIT=26,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/Tref.txt',STATUS='OLD')
OPEN(UNIT=4,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/T.txt',STATUS='OLD')
C
CALL POSFIL(KSTEP,KINC,ARRAY,JRCD)
C
DO 100 K1=1,99999
C
CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
IF(JRCD.NE.0) GO TO 110
KEY=JRRAY(1,2)
C  Lecture des enregistrements
C  Recherche de EFLX3
IF(KEY.EQ.1)THEN
EL=JRRAY(1,3)
ND=JRRAY(1,4)
ENDIF
C
IF(KSTEP.EQ.1) THEN
C
IF(EL.EQ.3954.AND.KEY.EQ.2)THEN

```

Initialisation de la sous-routine URDFIL

Récupération dans le fichier .txt de la valeur du déplacement électrique du pas précédent ; cette valeur doit être supérieure à la tolérance au lancement du calcul

Définition de la tolérance

Commande d'arrêt de l'analyse avec condition sur la tolérance

Récupération des valeurs de déplacement électrique au pas

Récupération au premier pas de la température de référence ; cette donnée se trouve à la position 3 de l'enregistrement 2 dans le fichier .fil

```

TREF=ARRAY(3)
WRITE(26,*) TREF
ENDIF
C
C
C
C
C
C
C

```

Récupération au premier pas de la
composante D1 de référence du
déplacement électrique aux différents
nœuds du capteur 1 ; ces données se
trouvent à la position 4 de
l'enregistrement 52 dans le fichier .fil

```

IF(EL.EQ.3954.AND.ND.EQ.116.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(18,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.3954.AND.ND.EQ.119.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(18,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.3954.AND.ND.EQ.1732.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(18,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.3954.AND.ND.EQ.1765.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(18,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.3954.AND.ND.EQ.25040.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(18,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.3954.AND.ND.EQ.25041.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(18,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.3954.AND.ND.EQ.25045.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(18,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.3954.AND.ND.EQ.25046.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(18,*) DEPEL
ENDIF
ENDIF

```

Récupération au premier pas de la
composante D1 de référence du
déplacement électrique aux différents
nœuds du capteur 2 ; ces données se
trouvent à la position 4 de
l'enregistrement 52 dans le fichier .fil

```

C
C
C
IF(KSTEP.EQ.1) THEN
IF(EL.EQ.5996.AND.ND.EQ.2082.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(20,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.5996.AND.ND.EQ.2083.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(20,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.5996.AND.ND.EQ.128.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)

```

```

WRITE(20,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.5996.AND.ND.EQ.131.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(20,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.5996.AND.ND.EQ.31411.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(20,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.5996.AND.ND.EQ.31418.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(20,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.5996.AND.ND.EQ.31420.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(20,*) DEPEL
ENDIF
IF(EL.EQ.5996.AND.ND.EQ.31422.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(20,*) DEPEL
ENDIF
ENDIF
ENDIF

```

```

IF(EL.EQ.3954.AND.KEY.EQ.2)THEN

```

```

T=ARRAY(3)
WRITE(4,*) T
ENDIF

```

```

C
C
C

```

```

IF(EL.EQ.3954.AND.ND.EQ.116.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(9,*) DEPEL
ENDIF

```

```

.....

```

```

IF(EL.EQ.5996.AND.ND.EQ.2082.AND.KEY.EQ.51)THEN
DEPEL=ARRAY(4)
WRITE(14,*) DEPEL
ENDIF

```

```

.....

```

```

C
C

```

```

100 CONTINUE
110 CONTINUE

```

```

C

```

```

CLOSE(9)
CLOSE(14)
CLOSE(18)
CLOSE(20)
CLOSE(26)
CLOSE(4)

```

```

C
C

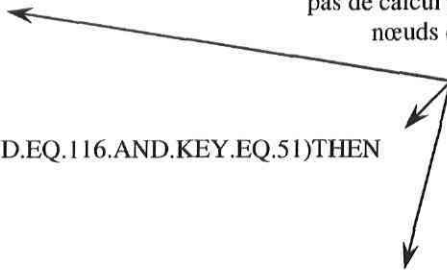
```

```

118 CONTINUE
119 CONTINUE

```

Récupération de la température et de D1 pour les capteurs 1 et 2 pendant tous les pas de calcul et pour les mêmes sets de nœuds que précédemment.



```

RETURN
END
C
C
-----
SUBROUTINE DISP(U,KSTEP,KINC,TIME,NODE,NOEL,JDOF,COORDS)
C
INCLUDE 'aba_param.inc'
CHARACTER FNAME*80
DIMENSION U(3),TIME(2),COORDS(3)
C
C
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/activ.txt',STATUS='OLD')
READ(9,*) ACT
ACTIVREF=ACT
CLOSE(9)
C
C
C
OPEN(UNIT=26,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/Tref.txt',STATUS='OLD')
READ(26,*) TEMP
TREF=TEMP
CLOSE(26)
OPEN(UNIT=4,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/T.txt',STATUS='OLD')
READ(4,*) TEMP
T=TEMP
CLOSE(4)
C
C
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/glad1.txt',STATUS='OLD')
READ(9,*) EL
A=EL
READ(9,*) EL
B=EL
READ(9,*) EL
C=EL
READ(9,*) EL
D=EL
READ(9,*) EL
E=EL
READ(9,*) EL
F=EL
READ(9,*) EL
G=EL
READ(9,*) EL
H=EL
CLOSE(9)
ABC=(A+B+C+D+E+F+G+H)/8.0
C
C
OPEN(UNIT=14,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/glad2.txt',STATUS='OLD')
READ(14,*) EL
AAA=EL
.....
READ(14,*) EL

```

Fin de la sous-routine URDFIL

Initialisation de la sous-routine DISP

← Récupération dans le fichier .txt du champ électrique appliqué au pas précédent

← Récupération dans le fichier .txt de la température de référence

← Récupération dans le fichier .txt de la température du pas précédent

← Récupération dans le fichier .txt de D1 du capteur 1 au pas précédent, puis calcul de la valeur moyenne

← Récupération dans le fichier .txt de D1 du capteur 2 au pas précédent, puis calcul de la valeur moyenne

```

HHH=EL
CLOSE(14)
SUT=(AAA+BBB+CCC+DDD+EEE+FFF+GGG+HHH)/8.0
C
C
OPEN(UNIT=18,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/reference1.txt',STATUS='OLD')
READ(18,*) EL
AA=EL
.....
READ(18,*) EL
HH=EL
CLOSE(18)
GHI=(AA+BB+CC+DD+EE+FF+GG+HH)/8.0
C
C
OPEN(UNIT=20,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/reference2.txt',STATUS='OLD')
READ(20,*) EL
AAAA=EL
.....
READ(20,*) EL
HHHH=EL
CLOSE(20)
ABCD=(AAAA+BBBB+CCCC+DDDD+EEEE+FFFF+GGGG+HHHH)/8.0
DELTAD=(GHI+ABCD)/2.0-((ABC+SUT)/2.0-0.0002*(T-TREF))
ACT=ACTIVREF+DELTAD*100000000.0
U(1)=ACT*TIME(1)/19.0
U(2)=0.
U(3)=0.
C
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/activ.txt',STATUS='OLD')
WRITE(9,*) ACT
CLOSE(9)
C
OPEN(UNIT=9,FILE='/home/mefpp_bejul12/BoucleSens/delta.txt',STATUS='OLD')
WRITE(9,*) DELTAD
CLOSE(9)
C
C
END

```

← Récupération dans le fichier .txt de D1 du capteur 1
au pas 1, puis calcul de la valeur moyenne

← Récupération dans le fichier .txt de D1 du capteur 2
au pas 1, puis calcul de la valeur moyenne

← Définition à l'aide du principe présenté au
paragraphe 6.3.5.1 du champ électrique à
appliquer en tant que condition aux limites

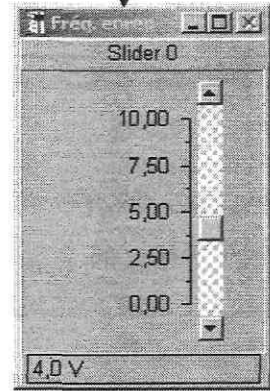
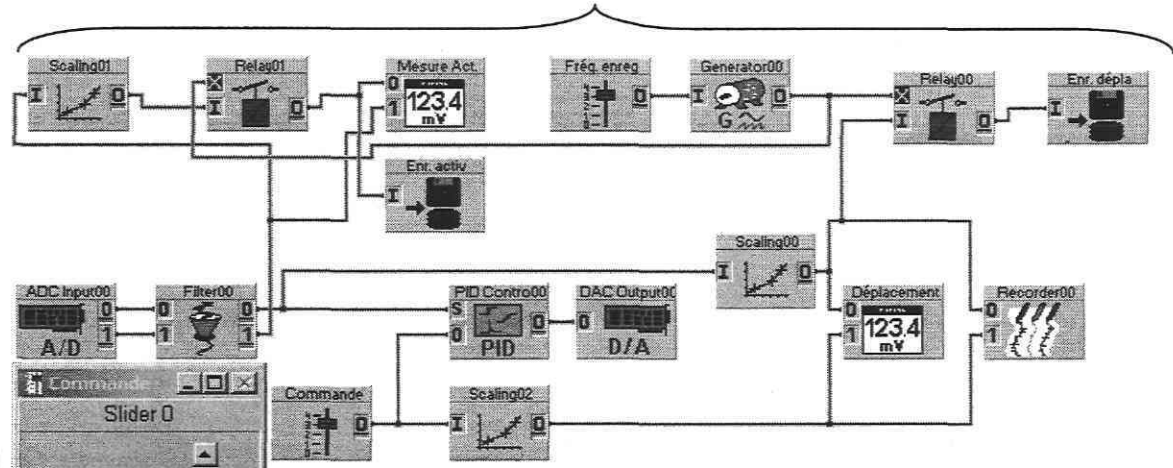
Fin de la sous-
routine DISP

Annexe C : Programme d'asservissement expérimental

Le programme d'asservissement développé avec le logiciel Daysilab est présenté dans cette annexe. Le programme développé correspond au diagramme de la Figure 6-19. Dans un premier temps l'ensemble du programme avec la partie commande et visualisation est décrit puis les modules de l'asservissement sont détaillés.

Zone de création des modules du programme, présentée à l page suivante

Réglage de la fréquence d'enregistrement des données pour le post traitement



Contrôle de la valeur du point de référence du PID

Affichage des valeurs de la différence de potentiel aux bornes des MFC™ et du déplacement en bout de plaque (sortie du capteur laser)

