

**UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**  
Département d'Aéronautique



# **MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Aéronautique

## **PRISE EN COMPTE DU VIEILLISSEMENT HYGROTHERMIQUE DANS L'ANALYSE DU COMPORTEMENT DES COMPOSITES HYBRIDES**

Par

**BOUKERT Billel**

Devant le jury composé de :

S. BOUKRAA	Professeur, U. de Blida	Président
E. ADDA BEDIA	Professeur, U. de Sidi Bel Abbès	Examineur
T. REZZOUG	Maître de Conférence U. de Blida	Examineur
M. LAGHA	Maître de Conférence U. de Blida	Invité
S. BERGHEUL	Maître de Conférence, U. de Blida	Encadreur
A. BENKHEDDA	Maître de Conférence, U. de Blida	Co- encadreur

Blida, Juillet 2011

## **RESUME**

En aéronautiques, les structures opèrent dans des conditions variables en termes de température et humidité, ces conditions de service induisent un changement dans la configuration structurale de ces matériaux en fonction de ces facteurs environnementaux, selon leur degré de variation avec le temps et leurs combinaisons simultanées. En effet, le caractère hétérogène et anisotrope de ces matériaux, induit des effets structuraux spécifiques, qui peuvent avoir des conséquences pénalisantes et irréversibles sur la structure. La combinaison d'une température et d'un niveau d'humidité induit un vieillissement qui se traduit par une réduction et éventuellement une dégradation de la rigidité et de la résistance, et peut aussi engendrer des contraintes résiduelles hygrothermiques à l'intérieur du stratifié. Cet état de faiblesse du matériau peut engendrer un endommagement et une réduction de la durée de vie de la structure, la présente étude aborde l'effet de la température et de l'humidité sur les propriétés mécaniques des composites avec une application sur le graphite/époxy T300/5208. L'étude s'intéresse aussi à l'analyse du comportement des composites hybrides sous l'effet de vieillissement hygrothermique pendant la phase d'absorption.

## **ABSTRACT**

In aeronautics, structures operate under varying conditions in terms of temperature and humidity, these operating conditions induce a change in the structural configuration of these materials according to environmental factors mentioned earlier and also according to their degree of variation over time and their simultaneous combinations. In fact, the heterogeneous and anisotropic character of these materials induces specific structural effects, which can have disadvantageous consequences and irreversible effects on the structure, the combination of temperature and a level of humidity induced aging resulting in a reduction and eventually a degradation of stiffness and strength, and may also lead to hygrothermal residual stresses within the laminate. This weakness of the material can cause damage and a reduction in the lifetime of the structure, the present study addresses the effect of temperature and humidity on the mechanical properties of composites with application to graphite / epoxy in T300/5208 en, the study also analyzes the behavior of hybrid composites under hygrothermal aging effect during the absorption phase.

## ملخص

هياكل الطيران تعمل تحت ظروف مختلفة من حيث درجة الحرارة والرطوبة ، وشروط الخدمة مما يؤدي إلى تغيير في التكوين الهيكلي لهذه المواد وفقا لهذه العوامل البيئية ، وفقا لدرجة الاختلاف مع مرور الوقت ومجموعاتها في وقت واحد في الواقع ، والمواد غير المتجانسة ومتباين الخواص ، يدفع تأثيرات هيكلية محددة ، التي يمكن أن تكون له عواقب وأثار غير مواتية لا رجعة فيها على الهيكل ، فإن الجمع بين درجة الحرارة ومستوى الرطوبة التي يسببها الشيخوخة مما أدى إلى انخفاض وتدهور في نهاية المطاف من صلابة وقوة ، ويمكن أن يؤدي أيضا إلى الرطوبة الحرارية المتبقية تؤكد داخل صفح. هذا الضعف من المواد ، يمكن أن تسبب الضرر والحد من عمر هيكل ، فإن هذه الدراسة تتناول تأثير درجة الحرارة والرطوبة على الخواص الميكانيكية للمركبات مع التطبيق لالجرافيت الايبوكسي T300/5208 ، وتهتم أيضا دراسة في تحليل سلوك المركبات الهجين تحت تأثير الرطوبة الحرارية الشيخوخة خلال مرحلة الاستيعاب.

## REMERCIEMENTS

*Mes vifs et respectueux remerciements vont tout d'abord à mon Co-Encadreur Madame BENKHEDDA Amina, Docteur à l'université de Blida, à qui je tiens à exprimer toute ma profonde reconnaissance surtout pour sa disponibilité et ses prestigieux conseils dérivant de sa très haute compétence, qui ont donné un encadrement de très haut niveau et de qualité dans la faisabilité de ce travail. Je salue en elle ses grandes qualités humaines, sa bonté, sa modestie, son enthousiasme, son dévouement et son sens extraordinaire de la communication.*

*Je remercie également mon Encadreur de Mémoire, Monsieur BERGHEUL Said Maître de Conférence à l'université de Blida pour son aide précieuse tout au long de ces trois années, pour les échanges et les conseils scientifiques qu'il m'a prodigués.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance au Professeur Salah BOUKRAA pour avoir accepté de présider le jury ainsi qu'au Professeur ADDA BEDIA, de l'université de Sidi Bel Abbès et aux Maîtres de conférences Tahar REZZOUG, Mohand LAGHA de l'université de Blida, pour avoir accepté la charge d'examineurs de ce travail.*

*Enfin, mes vives pensées vont à toutes les personnes que j'ai côtoyées durant ce parcours et à toutes celles qui m'ont aidée et ont ainsi contribué par leurs présences au bon déroulement de mon mémoire de magister.*

## TABLE DES MATIERES

RESUME.....	
REMERCIEMENTS.....	
TABLES DES MATIERES.....	
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX.....	
INTRODUCTION.....	16
1. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	18
1.1 Problématique .....	18
1.2 Etat de l’art .....	19
1.3 Définition du sujet .....	24
2. LES PHENOMENES HYGROTHERMIQUES DANS LES COMPOSITES.....	25
2.1 Matériaux composites .....	25
2.1.1 Matrices .....	26
2.1.1.a Propriétés de la matrice polymère .....	26
2.1.2 Renforts.....	26
2.1.3 Structures composites stratifiées.....	27
2.2 Contraintes internes.....	28
2.2.1 Cycle de polymérisation .....	28
2.3 Vieillissement hygrothermique des composites à matrice polymère.....	30
2.3.1 Vieillissement physique .....	30
2.3.1.a La plastification .....	30
2.3.1.b Gonflement.....	31
2.3.1.c Endommagement .....	32
2.3.2 vieillissements hygroscopiques type dégradations irréversibles .....	32
2.3.2.a Hydrolyse.....	32
2.3.2.b Lessivage .....	33
2.3.3 Dégradations mécaniques .....	33
2.3.3.a Evolution de Tg .....	34
2.4.1 Diffusion Fickienne.....	34
2.4.2 Influence du taux d’humidité relative.....	35
2.4.3 Influence de la température.....	36
2.4.4 Diffusion non Fickienne.....	37
2.4.5 Observations microscopiques des défauts créés au cours du vieillissement.....	38
2.5 Conclusion .....	39
3. MODELISATION DU VIEILLISSEMENT HYGROTHERMIQUE.....	41

3.1	Microanalyse pour un matériau composite unidirectionnel.....	41
3.2	Caractérisation du matériau .....	43
3.3	Introduction du vieillissement sur les propriétés mécaniques du matériau.....	44
3.3.1	Evolution de Tg au cours du vieillissement.....	45
3.3.2	Température adimensionnelle.....	45
3.3.3	Prise en compte du vieillissement dans les propriétés de la matrice.....	46
3.3.4	Prise en compte du vieillissement dans les propriétés des fibres.....	46
3.3.5	Prise en compte de l'effet de température et d'humidité dans l'évaluation des résistances à la rupture.....	47
3.4	Propriétés du T300/5208.....	48
3.5	Conditions de simulation.....	50
3.6	Résultats de la simulation.....	50
3.7	Interprétations des résultats.....	52
3.7.1	Effets de la température.....	52
3.7.2	Effets de la concentration.....	53
3.8	Validation des résultat.....	53
3.9	Influence de la fraction volumique.....	54
3.10	Cas d'une température d'utilisation proche de la température de post cuisson.....	58
3.11	Cas d'une température d'utilisation négative (régime subsonique).....	62
3.12	Conclusion.....	66

#### 4. MECANIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES ET MODELISATION HYGROTHERMIQUE.....67

4.1	Loi de comportement.....	67
4.2	Contraintes planes.....	68
4.2.1	Etat de contraintes planes.....	68
4.2.2	Matrice de rigidité réduite dans les axes principaux.....	69
4.2.3	Matrice de rigidité réduite hors des axes principaux.....	69
4.3	Théorie classique des stratifiés.....	70
4.3.1	Hypothèses de la théorie classique des stratifiés.....	70
4.3.2	Expression du champ des déformations.....	71
4.3.3	Champ des contraintes.....	74
4.3.3.a	Forme du champ des contraintes.....	74
4.3.3.b	Expression des contraintes.....	74
4.3.4	Expression des résultantes et moments.....	75
4.3.4.a	Résultantes en membrane.....	75
4.3.4.b	Moment de flexion et de torsion.....	76
4.3.5	Equation du comportement mécanique d'un stratifié.....	77
4.3.5.a	Equation constitutive.....	77
4.3.5.b	Matrice de rigidité.....	78
4.3.6.a	Déformations en membrane et courbures.....	79
4.3.6.b	Champ des déformations.....	80
4.3.6.c	Champ des contraintes.....	80
4.3.7	Equations du comportement des stratifiés tenant compte des phénomènes de dilatation.....	82
4.3.7.a	Coefficient d'expansion thermique et hygroscopique pour les unidirectionnels... ..	82
4.3.7.b	Déformations hygrothermiques dans les stratifiés unidirectionnels.....	83

4.3.7.c Relations hygrothermoélastiques contraintes et déformations.....	85
4.3.7.e Contraintes résiduelles.....	87
4.3.7.f Analyse des stratifiés multidirectionnels.....	89
4.4 Analyse unidirectionnel.....	90
4.5 Conclusion.....	91
5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	92
5.1 Organigramme.....	92
5.2 Influence de la température et humidité sur le phénomène d'absorption.....	95
5.3 Calcul des profils de concentration.....	105
5.4 Analyse de comportement des stratifiés vieillis pour le cas d'une distribution constante de la concentration.....	100
5.4.1 Validation des résultats.....	107
5.5 Analyse du comportement des stratifiés vieillis pour le cas d'une distribution fickienne de la concentration.....	107
5.5.1 Analyse des caractéristiques mécaniques.....	108
5.5.2 Analyse du comportement du $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$ pour $T_{opr}=20^\circ\text{C}$ , $60^\circ\text{C}$ , $100^\circ\text{C}$ à $t=422\text{Heures}$ .....	112
5.5.3 Analyse du comportement du $[20^\circ/-20^\circ]_{2s}$ pour $T_{opr}=20^\circ\text{C}$ , $60^\circ\text{C}$ , $100^\circ\text{C}$ à $t=422\text{Heures}$ .....	116
5.6 Etude du comportement du T300/5208 et le AS/3501-5 vieillis.....	120
5.7 Etude du comportement hygrothermique des stratifiés hybrides vieillis.....	128
5.8 Etude du comportement hygrothermique hybride d'un stratifié en AS/3501-5.....	135
5.9 Etude comparative du comportement hygrothermique des stratifiés hybrides.....	142
5.10 Effets de la fraction volumique.....	149
5.11 Effet de prise en compte des chutes des caractéristiquement mécaniques pour le calcul des contraintes résiduelles.....	156
5.12 Conclusion.....	157
CONCLUSION GENERALE.....	161
LISTE DES SYMBOLES.....	
BIBLIOGRAPHIE.....	

## LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 2.1 : Stratifié constitué de couches parfaitement liées.....	28
Figure 2.2 : Cycle de fabrication d'une résine époxyde [25]. .....	30
Figure 2.3 : a : Craquelage , b : Fissuration.....	32
Figure 2.4 : Plastification. ....	34
Figure 2.5 : Courbe de diffusion de type Fick. ....	35
Figure 2.6 : Niveau de saturation en eau de divers matériaux composites carbone/époxyde et résines époxydes en fonction du degré d'humidité HR% [41].....	36
..	
Figure 2.7 : Courbes schématiques représentatives de quatre catégories de cinétiques d'absorption d'eau non fickienne Weitsman [7]. ....	37
Figure 2.8 : Observations de facies de rupture d'éprouvettes de traction au MEB, pour différentes conditions de vieillissement [46]. ....	38
Figure 3.1 : Organigramme de calcul des propriétés vieilles TSAILOC.....	49
Figure 3.2 : Effet de la variation de température sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration. ....	50
Figure 3.3 : Effet de la variation de température sur le module de Young transversal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.....	51
Figure 3.4 : Effet de la variation de température sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.....	51
Figure 3.5 : Effet de la variation de température sur le coefficient de Poisson longitudinal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration. ....	52
Figure 3.6 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 à différentes température à $c = 0.01$ .....	54
Figure 3.7 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 à différentes température à $c = 0.015$ .....	54
Figure 3.8 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 à différentes température à $c = 0.01$ .....	55
Figure 3.9 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 à différentes température à $c = 0.015$ .....	55

Figure 3.10 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 à différentes température à $c=0.0$ .....	56
Figure 3.11 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 à différentes température à $c=0.015$ .....	56
Figure 3.12 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal pour le T300/5208 à différentes température à $c=0.01$ .....	57
Figure 3.13 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal pour le T300/5208 à différentes température à $c=0.015$ .....	57
Figure 3.14 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{max}=180\text{ °C}$ et à $c=0.01$ .....	58
Figure 3.15 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{max}=180\text{ °C}$ et à $c=0.015$ .....	58
Figure 3.16 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{max}=180\text{ °C}$ et à $c=0.01$ .....	59
Figure 3.17 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{max}=180\text{ °C}$ et à $c=0.015$ .....	59
Figure 3.18 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{max}=180\text{ °C}$ et à $c=0.01$ .....	60
Figure 3.19 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{max}=180\text{ °C}$ et à $c=0.015$ .....	60
Figure 3.20 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal de pour le T300/5208 jusqu'a $T_{max}=180\text{ °C}$ et à $c=0.01$ .....	61
Figure 3.21 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal de pour le T300/5208 jusqu'a $T_{max}=180\text{ °C}$ et à $c=0.015$ .....	61
Figure 3.22 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{min}=-55\text{ °C}$ et à $c=0.01$ .....	62
Figure 3.23 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{min}=-55\text{ °C}$ et à $c=0.015$ .....	62
Figure 3.24 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{min}=-55\text{ °C}$ et à $c=0.01$ .....	63
Figure 3.25 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{min}=-55\text{ °C}$ et à $c=0.015$ .....	63
Figure 3.26 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{min}=-55\text{ °C}$ et à $c=0.01$ .....	65

Figure 3.27 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a $T_{min} = -55\text{ °C}$ et à $c = 0.015$ .....	64
Figure 3.28 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal de pour le T300/5208 jusqu'a $T_{min} = -55\text{ °C}$ et à $c = 0.01$ .....	65
Figure 3.29 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal de pour le T300/5208 jusqu'a $T_{min} = -55\text{ °C}$ et à $c = 0.015$ .....	65
Figure 4.1 : repère principal (LTT') d'une couche et repère du stratifié (X,Y, Z).....	68
Figure 4.2 : Schématisation des déformations dans la théorie classiques des stratifiés.....	81
Figure 4.3 : Schématisation des résultantes en membrane des actions exercées sur un élément du stratifié, et des moments de flexion et de torsion .....	82
Figure 4.4 : Subdivision des couches en sous couches.....	84
Figure 4.5 : Géométrie représentative d'une plaque mince.....	90
Figure 5.1 : Organigramme AGINGMAT de calcul des contraintes et déformations hygrothermomécaniques.....	93
Figure 5.2 : Courbes de prise en eau pour différents environnements pour un modèle de Fick 1D.....	95
Figure 5.3 : Loi d'Arrhenius appliquée aux coefficients de diffusion obtenus en humidité relative.....	96
Figure 5.4 : Profils de concentration à travers l'épaisseur d'un stratifié en T300/5208 pour différentes durées de vieillissement.....	97
Figure 5.5.a : Présentation 2D des profils de concentration à travers l'épaisseur pour $t=0$ jours, 10 jours, 20 jours, 40 jours, 70 jours, 95 jours.....	98
Figure 5.5.b : Présentation 2D des profils de concentration à travers l'épaisseur pour $t=115$ jours, 195 jours, 750 jours.....	99
Figure 5.6 : Environnements de simulation.....	100
Figure 5.7 : Contraintes thermomécaniques dans les repères LT et XY du $[15^{\circ}/-30^{\circ}/-15^{\circ}/30^{\circ}]$ graphite/époxyde $\Delta T = -180^{\circ}\text{C}$ . .....	101
Figure 5.8 : Contraintes thermiques dans les repères LT et XY du $[15^{\circ}/-30^{\circ}/-15^{\circ}/30^{\circ}]$ graphite/époxyde $\Delta T = -180^{\circ}\text{C}$ . .....	102
Figure 5.9 : Contraintes hygromécaniques dans les repères LT et XY du $[15^{\circ}/-30^{\circ}/-15^{\circ}/30^{\circ}]$ graphite/époxyde $\Delta C = 0.36\%$ .....	103

Figure 5.10 : Contraintes hygroscopiques dans les repères LT et XY du [15°/-30°/-15°/30°] graphite/époxyde $\Delta C=0.36\%$ .....	104
Figure 5.11: Contraintes hygrothermiques dans les repères LT et XY du [15°/-30°/-15°/30°] graphite/époxyde $\Delta C=0.36\%$ , $\Delta T=-180^{\circ}\text{C}$ . ....	105
Figure 5.12 : Contraintes hygrothermomécaniques dans les repères LT et XY du [15°/-30°/-15°/30°] graphite/époxyde $\Delta C=0.36\%$ , $\Delta T=-180^{\circ}\text{C}$ . ....	106
Figure 5.13 : Module de Young longitudinale le long de l'épaisseur d'un stratifié en T300/5208 pour $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422$ Heures. ....	108
Figure 5.14 : Module de Young transversale le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422$ Heures. ....	108
Figure 5.15 : Module de cisaillement longitudinale le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422$ Heures. ....	109
Figure 5.16 : Coefficient de poisson le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422$ Heures. ....	109
Figure 5.17 : Résistance en traction longitudinale le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422$ Heures. ....	110
Figure 5.18 : Résistance en compression longitudinale le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422$ Heures. ....	110
Figure 5.19 : Résistance en traction transversale le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422$ Heures. ....	111
Figure 5.20 : Résistance en compression transversal le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422$ Heures. ....	111
Figure 5.21 : Contraintes hygrothermiques dans les repères LT et XY du [45°/-45°] <sub>2S</sub> graphite/époxyde $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	113
Figure 5.22 : Contraintes hygrothermiques dans les repères LT et XY du [45°/-45°] <sub>2S</sub> graphite/époxyde $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ . ....	114
Figure 5.23 : Contraintes hygrothermiques dans les repères LT et XY du [45°/-45°] <sub>2S</sub> graphite/époxyde $T_{opr}=100^{\circ}$ , $t=422\text{H}$ . ....	115
Figure 5.24 : Contraintes hygrothermiques dans les repères LT et XY du [20°/-20°] <sub>2S</sub> graphite/époxyde $T_U=20^{\circ}\text{C}$ , $\Delta C(z,t)$ , $t=422\text{H}$ . ....	117
Figure 5.25 : Contraintes hygrothermiques dans les repères LT et XY du [20°/-20°] <sub>2S</sub> graphite/époxyde $T_U=60^{\circ}\text{C}$ , $\Delta C(z,t)$ , $t=422\text{H}$ . ....	118
Figure 5.26 : Contraintes hygrothermiques dans les repères LT et XY du [20°/-20°] <sub>2S</sub> graphite/époxyde $T_U=100^{\circ}\text{C}$ , $\Delta C(z,t)$ , $t=422\text{H}$ . ....	119

Figure 5.27 : Stratifiées en T300/5208 et AS/3501-5. ....	121
Figure 5.28 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	122
Figure 5.29 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	123
Figure 5.30 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	124
Figure 5.31 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	125
Figure 5.32 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	126
Figure 5.33 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	127
Figure 5.34 : Hybridation d'un stratifié en T300/5208.....	128
Figure 5.35 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	129
Figure 5.36 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	130
Figure 5.37 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	131
Figure 5.38 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	132
Figure 5.39 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	133
Figure 5.40 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	134
Figure 5.41 : Hybridation d'un stratifié en AS/3501-5.....	135
Figure 5.42 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	136
Figure 5.43 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	137

Figure 5.44 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	138
Figure 5.45 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	139
Figure 5.46 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	140
Figure 5.47 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	141
Figure 5.48 : Configurations hybrides.....	142
Figure 5.49 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	143
Figure 5.50 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	144
Figure 5.51: Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=100^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	145
Figure 5.52 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	146
Figure 5.53 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	147
Figure 5.54 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=100^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	148
Figure 5.55 : Configuration hybridée en fraction volumique.....	149
Figure 5.56 : Contraintes hygrothermique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	150
Figure 5.57 : Contraintes hygrothermique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	151
Figure 5.58 : Contraintes hygrothermique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=100^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{h}$ .....	152
Figure 5.59 : Contraintes hygroscopique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	153
Figure 5.60 : Contraintes hygroscopique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	154

Figure 5.61 : Contraintes hygroscopique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à $T=100^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	155
Figure 5.62 : Contraintes hygrothermique longitudinales et transversales pour le cas Tsai simplifié et de la microanalyse à $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	157
Figure 5.63 : Contraintes hygrothermique longitudinales et transversales pour le cas Tsai simplifié et de la microanalyse à $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	158
Figure 5.64 : Contraintes hygrothermique longitudinales et transversales pour le cas Tsai simplifié et de la microanalyse à $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ , $t=422\text{H}$ .....	159
Tableau 3.1 : Caractéristiques de fibres et matrice du T300/5208 [18].....	48
Tableau 3.2 : Caractéristiques de variation de température et d'humidité [18].....	48
Tableau 3.3 : Résistances du T300/5208 [18].....	48
Tableau 3.4 : Environnements des simulations.....	50
Tableaux 5.1 : Environnement de simulation pour les stratifiés symétriques.....	107
Tableau 5.2 : évaluation de la contrainte transversal pour le cas de traction.....	116
Tableau 5.3 : évaluation de la contrainte transversale pour le cas de compression.....	116
Tableau 5.4 : évaluation de la contrainte transversal pour le cas de traction.....	120
Tableau 5.5 : évaluation de la contrainte transversal pour le cas de compression.....	120
Tableau 5.6 : Caractéristiques mécaniques du T300/5208 et du AS/3501-5 à $T=20^{\circ}\text{C}$ .....	121
Tableau 5.7 : Caractéristiques de diffusion du T300/5208 et du AS/3501-5. ....	121

## INTRODUCTION

Les composites à matrice polymère sont de plus en plus diffusés en construction aéronautique particulièrement dans les applications militaires et aérospatiales.

Les performances de ces matériaux ont été très concernées, l'intérêt porta spécialement sur leur durabilité à long terme, lorsque les structures sont soumises à des températures et humidités cycliques, à des radiations ultraviolets, à des immersions salines et alcalines, et aux chargements statiques et dynamiques, la légèreté et la rigidité des matériaux composites sont les principaux avantages qu'offrent les composites au monde de l'aéronautique.

Les structures aérospatiales en composites, changent en température et en humidité durant leur usage structural. Le changement de température engendre deux effets : en premier le matériau se dilate lorsqu'il est chauffé et se contracte lorsqu'il est refroidi, en second , la chaleur cause la réduction de la température de transition ,d'où une sévère dégradation de la rigidité , le matériau devient plus ductile et plus fragile.

Lors de leur exposition à des environnements variables en terme de température et d'humidité durant leur usage structural, ces matériaux sont souvent soumis à des états de contraintes complexes, qui peuvent être engendrées par des déformations de nature hygrothermique, dues à l'absorption d'humidité par la matrice polymère. Des phénomènes de vieillissement physiques et chimiques peuvent avoir lieu, en favorisant une chute considérable de la résistance du matériau. Ainsi même une contrainte relativement faible peut être potentiellement dangereuse. A ces contraintes s'ajoutent les contraintes résiduelles de fabrication, qui sont générées pendant la consolidation des résines polymères et sont susceptibles d'engendrer un endommagement du fait de la faible résistance du matériau pendant cette étape.

Déterminer avec précision les contraintes internes dans des structures composites, soumises à des sollicitations hygrothermiques est clairement une des premières étapes à aborder pour une meilleure durabilité des structures, ainsi qu'une meilleure compréhension des effets de l'environnement sur ces structures.

Il est aussi important et nécessaire de comprendre les mécanismes générant la dégradation des polymères, non seulement pour être en mesure de cerner les prédictions durant la vie de service, mais pour aussi développer des outils théoriques et des moyens expérimentaux polyvalents.

Pour l'accomplissement de cette étude, les étapes successives suivantes ont été suivies:

1. Une recherche bibliographique sur les différents travaux effectués dans l'axe de vieillissement des matériaux composites, cette recherche nous a permis de connaître l'état de l'art et d'orienter notre recherche.

2. En traitant la prise en compte et l'analyse du vieillissement hygrothermique, il est important de comprendre le processus hygrothermique au niveau microscopique de la matrice et des fibres, le chapitre 2 présente une synthèse générale sur les phénomènes hygrothermique.

3. Dans le chapitre 3, on traite la modélisation du vieillissement hygrothermique par le modèle de Tsai, on va évaluer la chute des performances mécaniques de la matrice et la fibre sous l'effet de la température et l'humidité à travers le modèle de Tsai .

4. Le chapitre 4 traite en détail la mécanique des matériaux composites à travers la théorie classique des stratifiés, et la modélisation hygrothermique du comportement des stratifiés en composites.

5. Les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre 5, ce chapitre englobe les résultats donnés par le code développé durant cette étude pour des stratifiés simples et hybrides.

Nous terminerons par une conclusion générale et des perspectives futures.

## **CHAPITRE 1**

### **RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**

Les études de la durabilité des matériaux composites à matrice polymère ont montré que ces matériaux pouvaient être fortement altérés par les facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité ambiante, les rayons ultraviolets, l'immersion dans certains fluides.

Les propriétés mécaniques de certaines matrices polymères pouvaient être modifiées suite à une exposition prolongée dans une atmosphère humide et à température variable. L'évolution de ces propriétés avec le temps sous différentes conditions d'utilisation, conditions auxquelles les structures seront confrontées durant leur service, a grandement attisé la curiosité de nombreuses études et recherches scientifiques, en vue de connaître avec précision la durabilité de la structure composite et de garantir ainsi sa fiabilité.

Dans le domaine aéronautique les structures sont réalisées en grandes parties en composites à matrice polymère, et elles évoluent dans des conditions d'environnement variables, en termes d'altitudes, de vitesses, de températures et d'humidité, la réponse de ces matériaux est donc une combinaison complexe des phénomènes qui se produisant, dont la nature est d'une origine simultanée mécanique, physico-chimique et thermique.

La prévision du comportement des composites soumise à des efforts hygrothermiques exige la caractérisation des mécanismes et de leurs couplages, ainsi que l'étude de leurs influences sur le comportement élastique et l'établissement de modèles.

#### 1.1 Problématique

Quantifier le comportement et les contraintes résiduelles des composites dans les différents environnements est très important, très intéressant pour les gens qui font

l'ingénierie aéronautique, les résultats les plus intéressants c'est de déterminer les profils de déformations et contraintes des stratifiés vieillis pour déterminer la chute des caractéristiques mécaniques, le problème à résoudre est la détermination et l'analyse du comportement des matériaux composites vieillit sous l'effet de la température et l'humidité, afin d'élargir les résultats et les connaissances, on va traiter aussi le problème de vieillissement des composites hybrides sous l'effet de la température et humidité.

## 1.2 État de l'art

Les phénomènes de conduction et de diffusion sont intrinsèquement couplés, la cinétique de diffusion dépend de la température, peu de travaux portent spécifiquement sur la caractérisation des effets conjoints de la température, de l'humidité et de l'état de contraintes sur le comportement mécanique Mulheron et autres [1], l'évaluation de l'état de contraintes internes est la somme des contraintes résiduelles d'élaboration d'origine hygrothermiques et sans chargements mécaniques, doit être examinée avec rigueur, en raison du couplage éventuel entre la diffusion de l'eau et l'endommagement.

Le cas du chargement hygrothermique en l'absence de chargement extérieur revêt d'un intérêt particulier, les variations de température et d'humidité engendrent la création de contrainte résiduelle large, pouvant amener à la ruine de la structure, Tounsi et Adda Bedia [4], Sereir, Adda Bedia et Tounsi [5], l'étude des effets de l'humidité et de la température sur la réponse mécanique des structures composites est fondamentalement pluridisciplinaire. C'est un des thèmes fédérateurs privilégiés ou devraient se rencontrer physiciens, chimistes et mécaniciens.

Le couplage entre les diffusions thermiques, hygroscopiques et l'état de contraintes internes est très représentatif du problème. Souvent les champs hygrothermiques sont obtenus indépendamment des contraintes en utilisant l'équation classique de Fourier pour le transfert de chaleur par conduction et la loi de Fick pour le transfert de masse par diffusion Cranck [6]. Les deux théories sont similaires et les champs obtenus sont utilisés pour le calcul des contraintes.

L'expérience de diffusion dans les systèmes époxy effectués par VanLandingham [8] montre que les accroissements du niveau d'humidité entraînent une augmentation dans le niveau de saturation, ceux-ci causent un gonflement qui est proportionnel au contenu de l'humidité. L'augmentation de la température engendre un comportement non Fickien avec une réduction dans la température de transition et une dégradation des propriétés mécaniques.

Mercier [11] a traité le vieillissement en milieu humide et l'endommagement par fissuration, de matériaux composites à matrice organique (CMO). La diffusion d'eau dans le matériau (matrice époxy renforcée par des fibres de verre) a été tout d'abord analysée expérimentalement, par détermination des cinétiques d'absorption sous différentes conditions d'humidité. Des baisses de différentes propriétés mécaniques en fonction de la quantité d'eau absorbée, ont été mises en évidence et quantifiées lors d'essais expérimentaux de traction. Les mécanismes physiques à l'origine de ces modifications ont été identifiés. Un mode d'endommagement particulier, la fissuration intra laminaire, ainsi que son couplage avec l'humidité, ont aussi été étudiés expérimentalement. Des différences entre évolutions réversibles et irréversibles de propriétés ont été mises en évidence et analysées en détail.

Popineau [9] a traité la durabilité (vieillissement) en milieu humide d'assemblages structuraux constituant les tuyères de propulseurs à poudre. Les matériaux utilisés sont un alliage d'aluminium et un matériau composite, collés ensemble par un adhésif polymère, l'adhésif se révèle être la partie la plus sensible à un environnement aqueux. La diminution des propriétés mécaniques du polymère massif et des assemblages structuraux semble liée à la pénétration de l'eau. Un modèle permettant d'évaluer indirectement l'énergie d'adhésion, et par extrapolation la résistance des assemblages en fonction du temps de vieillissement a été élaboré à partir du faciès de rupture des éprouvettes et de la cinétique de diffusion d'eau.

Kim [12], considéra l'effet de température sur la propagation des fissures dans les polymères et d'humidité sur un système graphite/époxy Thornel 300/Namco 5208. L'expérience a été faite sur les trois stratifiés suivants :  $[0_2/\pm 45]_2S$  ,  $[90/\pm 45]_2S$  , et  $[0/\pm 45/90]_2S$  . Les résultats révélèrent que la rigidité à des essais humides à 260°F est 40%

plus faible à la même température, mais à sec, l'effet d'humidité et de température combiné a une influence sur la dégradation de la rigidité dans les stratifiés.

L'étude de Trabelsi [10] fait partie du projet de recherche sur un nouveau avion supersonique civil susceptible de remplacer éventuellement le Concorde. L'objectif est la prévision du comportement et l'évolution des propriétés d'une pièce en composite travaillant sur une longue durée d'utilisation à des températures pouvant atteindre 100°C à 120°C, la durée de vie souhaitée est estimée à 20 000 cycles thermiques entre -50°C et 120°C et correspond à 80 000 heures (10 ans) de vol à 120°C sous atmosphère oxydante (air). L'objectif de cette thèse est d'étudier la thermo-oxydation d'un composite carbone/époxy.

Springer [13] détermina le contenu de l'humidité en fonction du temps, lorsque le matériau est exposé à une atmosphère humide, ou submergé d'eau et à température constante (taux d'humidité variant de 0 à 100%). Une description du coefficient de diffusion en fonction des propriétés des fibres et de la matrice est donnée.

La solution de l'équation de diffusion de l'humidité dans les stratifiés à travers l'épaisseur donnée par Jost est gouvernée par l'équation de diffusion classique. L'analyse des contraintes hygrothermiques engendrées par les conditions d'environnement cycliques ou le coefficient de diffusion  $D$  est fonction de la température fut abordée par Springer [13] et Tsai [18].

Benkhedda [20] a développé un code de calcul des contraintes hygrothermomécanique, en considérant une distribution uniforme de la concentration à travers l'épaisseur du stratifié lors de la phase d'absorption, la méthode des différences a été utilisée pour la résolution de l'équation de Fick, les contraintes résiduelles relatives aux environnements hygrothermique, thermiques, hygroscopiques ont été aussi calculées.

Boualem et Serir [2] ont étudié le vieillissement à long terme des composites hybrides, ils ont simulé le comportement d'un stratifié en graphite/époxy AS/3501-5, l'hybridation consiste à faire les deux couches qui sont exposées à l'environnement en T300/5208, le modèle de Tsai a permis de quantifier la chute des performances mécaniques, une modélisation par élément fini a permis le calcul des contraintes résiduelles.

Serir et Adda Bedia [3] ont étudié la réduction des contraintes hygrothermiques à travers l'utilisation des composites hybrides, la méthode utilisée est la méthode analytique développée par Adda Bedia et Tounsi, le calcul consiste à utiliser une plaque en T300/5208-AS/3501-T300/5208 et une autre plaque en AS/3501-T300/5208-AS/3501 pour évaluer la configuration la plus adaptée pour la réduction des contraintes résiduelles.

Adda Bedia, Hann et Verchery ont présenté une large synthèse en faisant des observations sur des aspects hygroscopiques qui interagissent lors des problèmes de diffusion à des conditions environnementales variables [22].

Benkeddad [23] a travaillé sur la prévision du comportement hygrothermique de structures soumises à des conditions de température et d'humidité. Un logiciel d'analyse des plaques stratifiées pour la détermination des contraintes et des déformations hygrothermiques transitoires à travers les plis a été conçu. La prise en compte des effets d'environnement sur les propriétés mécaniques n'a pas eu lieu.

Adda Bedia [24] a présenté une méthode analytique pour déterminer la valeur du gradient de la concentration en humidité, ainsi que le pourcentage maximal du gain de masse à travers l'épaisseur des plaques composites à matrice polymère, exposées aux conditions d'environnement cycliques. La méthode prédit les extensions des effets de bord, les limites approximatives de la partie fluctuante, les valeurs de la concentration de l'humidité aux bords de la plaque et la concentration de l'humidité en régime transitoire.

Jacquemein et Vautrin [25] ont proposé une méthode analytique permettant de calculer les contraintes internes, induites par des conditions environnementales cycliques pour des structures composites cylindriques épaisses. Les cylindres sont composés de plis orthotropes dont les propriétés hygrothermoélastiques transitoires sont déterminées en considérant les équations classiques de la mécanique des solides.

Récemment Tounsi et Adda Bedia [27] ont développé une nouvelle méthode analytique, qui consiste à prédire les contraintes à travers une plaque exposée à des conditions environnementales variables symétriques, sans la détermination de la distribution de la concentration, cette même méthode a été adoptée pour la détermination

des contraintes résiduelles durant la phase de désorption d'humidité par Tounsi, Adda Bedia et Benachour [28]. L'effet de l'anisotropie sur la distribution des contraintes hygroscopiques à l'intérieur du stratifié a été étudié par Tounsi, Adda Bedia et Verchery [29].

Tounsi, Bouazza et Adda Bedia ont étudié les distributions des contraintes hygroscopiques transitoires à travers l'épaisseur des plaques stratifiées, pour des conditions d'environnement cycliques symétriques [30], et des conditions cycliques non symétriques [31]. Une étude particulière a été accordée à l'effet de l'orientation des fibres et des conditions d'environnement cycliques, sur les contraintes résiduelles non mécaniques dans les plaques composites, par Tounsi, Adda Bedia, Sereir et Benhassaini [32].

Benkhedda [33] a étudié le comportement hygrothermique des matériaux composites à matrice polymère avec la prise en compte de l'effet du vieillissement lors de la désorption en régime transitoire, le modèle de Tsai a permis de quantifier la chute des caractéristiques mécaniques dans l'environnement hygrothermique, une nouvelle méthode analytique est utilisée pour quantifier les contraintes résiduelles.

Boukhoulda et Adda Bedia [34] ont examiné l'effet de l'orientation des fibres sur l'évolution de l'humidité, pour des composites en phase d'absorption. La méthode analytique a été utilisée afin d'évaluer la concentration d'humidité à travers l'épaisseur de la plaque, soumise à des conditions cycliques pour deux types de composite, le T300/5208 et le verre époxyde. Cette méthode permet aussi de prévoir simultanément le niveau et le temps de saturation. Les résultats montrent que l'influence de l'humidité est très nette lorsque la température et l'humidité agissent simultanément. Les contraintes thermiques apparaissent dans le sens transverse des fibres. Les fibres de carbone T300 ont tendance à se rétracter sous l'effet de température contrairement à la résine.

Sereir, Adda Bedia et Tounsi [5] ont appliqué la méthode de calcul des contraintes résiduelles développées en [27], en prenant un environnement constant et symétrique. Ils ont examiné l'effet de la température sur les propriétés mécaniques du graphite époxyde, puis sur le comportement hygrothermoélastiques des plaques minces composites en transitoire lors d'une phase d'absorption. L'aspect dégradation thermomécanique a été abordé par la méthode polaire. L'effet du coefficient de diffusion sur le comportement

hygrothermoélastiques a été bien décrit, son effet est bien mis en évidence sur différents types de stratifiés. Le coefficient de diffusion en fonction de l'orientation des fibres n'a pas été considéré. L'étude fut étendue pour un environnement non symétrique [57].

### 1.3 Définition du sujet

Cette étude a été accomplie au Département d'Aéronautique de l'Université de Blida, au laboratoire des Sciences aéronautiques de l'université de Blida. Cette étude s'insère également dans un axe de recherche au sein de ce laboratoire qui est « L'hygrothermie des composites à matrice polymère »

En effet, plusieurs recherches ont été menées par les équipes conjointement sur les problèmes hygrothermiques des composites à matrice polymère.

Le but principal de notre travail est d'analyser le comportement des matériaux composites vieillit, à travers une investigation analytique, le problème est modélisé par la théorie classique des stratifiés appliqués aux plaques minces, l'effet du cisaillement transverse étant négligé, nous effectuerons le calcul des profils de concentration à travers la résolution analytique de l'équation de Fick, par la suite on utilise la modélisation de la théorie classique des stratifiés pour quantifier les déformations et contraintes hygrothermiques.

Les simulations numériques sont effectuées pour le matériau graphite/époxy T300/5208 comme matériaux composites simple, et le T300/5208-AS4/3501- T300/5208 comme un matériau composite hybrides.

Le résultat de cette étude est l'élaboration d'un code calcul appelé AGINGMAT, pour l'analyse du comportement hygrothermique des stratifiés simple et hybrides.

## **CHAPITRE 2**

### **LES PHÉNOMÈNES HYGROTHERMIQUES DANS LES COMPOSITES**

Notre étude traite l'influence des phénomènes hygrothermiques sur le comportement des matériaux composites. Dans ce chapitre nous essayons de détailler la physique expérimentale qui s'intéresse à l'analyse du comportement des matériaux composites avec des paramètres environnementaux variables, afin de nous permettre la compréhension des ces phénomènes à l'échelle microscopique.

La compréhension du processus hygrothermiques des matériaux composites à matrice polymère est assez importante pour aborder le problème des contraintes résiduelles, nous présentons aussi en détail les phénomènes hygroscopiques et leurs conséquences.

#### 2.1 Matériaux composites

Un matériau composite est constitué de différentes phases, nommées renforts et matrice, lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases, les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques, la transmission aux fibres des sollicitations mécaniques extérieures et la protection des fibres des agressions extérieures. L'arrangement des fibres et leurs orientations permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. Le type d'association fibres/matrice dépend des contraintes imposées par l'application : des caractéristiques mécaniques particulières, tenue en température, tenue en fatigue, résistance à la corrosion, coût, etc.

### 2.1.1 Matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune a un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. La classification des types de matrices est divisée principalement en deux grandes familles : organique (thermodurcissable-thermoplastique), minérale (céramique -métallique).

#### 2.1.1.a Propriétés de la matrice polymère

D'un point de vue mécanique, la matrice se comporte comme un matériau homogène dont le rôle est de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de protéger ces dernières des agressions extérieures telles que l'humidité ambiante, les rayons ultraviolets, l'oxydation, etc.

L'utilisation des matrices polymères dans la conception des matériaux composites est très répandue, du fait que les résines polymères soient assez déformables, permettant ainsi de mieux transmettre les sollicitations mécaniques. La masse volumique étant faible, ce qui permet la conception de matériaux légers.

Une matrice polymère résulte de la création de liaisons de pontage entre les chaînes macromoléculaires des pré-polymères sous l'effet de la chaleur. On a relevé que généralement les matrices polymères utilisées dans les matériaux composites sont modifiées, voire améliorées par différents adjuvants et additifs tels que les stabilisants, les pigments, les agents de démoulages, les durcisseurs.

### 2.1.2 Renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés

pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes :

Linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

### 2.1.3 Structures composites stratifiées

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurales sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir.

Les matériaux composites sont modélisés à une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique associée aux constituants de base du composite (le renfort et la matrice) et l'échelle macroscopique liée à la structure. À cette échelle, appelée méso-échelle, une structure stratifiée est schématisée par un empilement de monocouches homogènes dans l'épaisseur et d'interfaces inter-laminaires. La couche et l'interface sont les deux entités appelées méso-constituants, comme illustré sur la figure 2.1, qui forment les bases des modèles dédiés à l'étude des structures stratifiées. L'interface inter laminaire est une entité surfacique assurant le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre. En élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface ne joue aucun rôle particulier.

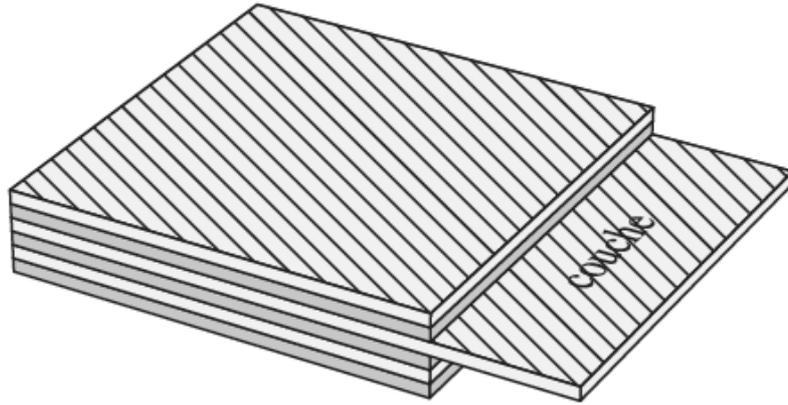


Figure 2.1 : Stratifié constitué de couches parfaitement liées

## 2.2 Contraintes internes

Le dimensionnement d'une structure composite nécessite d'évaluer les contraintes internes, en plus des contraintes mécaniques qui sont dues aux chargements. Le terme de contraintes internes désigne les contraintes non-mécaniques générées pendant :

1. La phase d'élaboration et sont souvent définies comme étant les contraintes résiduelles de fabrication.
2. Les conditions de service et sont connues par, les contraintes internes de service d'origine hygrothermiques.

L'optimisation des procédés de fabrication repose sur la réduction des défauts et la maîtrise de la microstructure, mais aussi sur la minimisation des contraintes résiduelles. Ces contraintes représentent l'état initial du matériau avant de le soumettre aux conditions de service, elles peuvent avoir une influence sur la durabilité et les performances de la structure.

### 2.2.1 Cycle de polymérisation

Durant un cycle de polymérisation usuel, la résine passe d'un état initial liquide visqueux à l'état solide. Examinons les phases d'un cycle de polymérisation usuel afin de comprendre les mécanismes à l'origine des contraintes résiduelles de fabrication.

Pendant la phase de fabrication, la matrice polymérise et réticule donnant ainsi à la structure sa morphologie définitive après refroidissement. Cette phase délicate est réalisée sous vide avec un cycle de pression et un cycle de température définis principalement suivant le type de matrice [25].

Considérons un cycle de fabrication classique pour le composite carbone époxyde, avec une vitesse de montée en température et de refroidissement de l'ordre de 3°C/min :

1. La première étape concerne la phase de montée en température jusqu'au palier de cuisson D :
  - De A à B la résine est liquide et sa rigidité est nulle. Au point B les premières liaisons réticulaires apparaissent, la rigidité n'est pas nulle pour l'ensemble de la résine.
  - Le palier B-C est le palier de gélification, il permet d'obtenir un état homogène caoutchoutique ou visqueux dans l'ensemble de la structure.
  - De C à D la résine se solidifie, il y a une forte augmentation des modules.
2. La deuxième étape concerne le palier de cuisson :
  - Le plateau D-E correspond à la réticulation : passage de l'état vitreux à l'état solide homogène.
3. La troisième étape concerne la phase de refroidissement de la température de cuisson à la température ambiante :
  - Dans la phase de refroidissement E-F, la microstructure est figée et la résine est entièrement polymérisée.

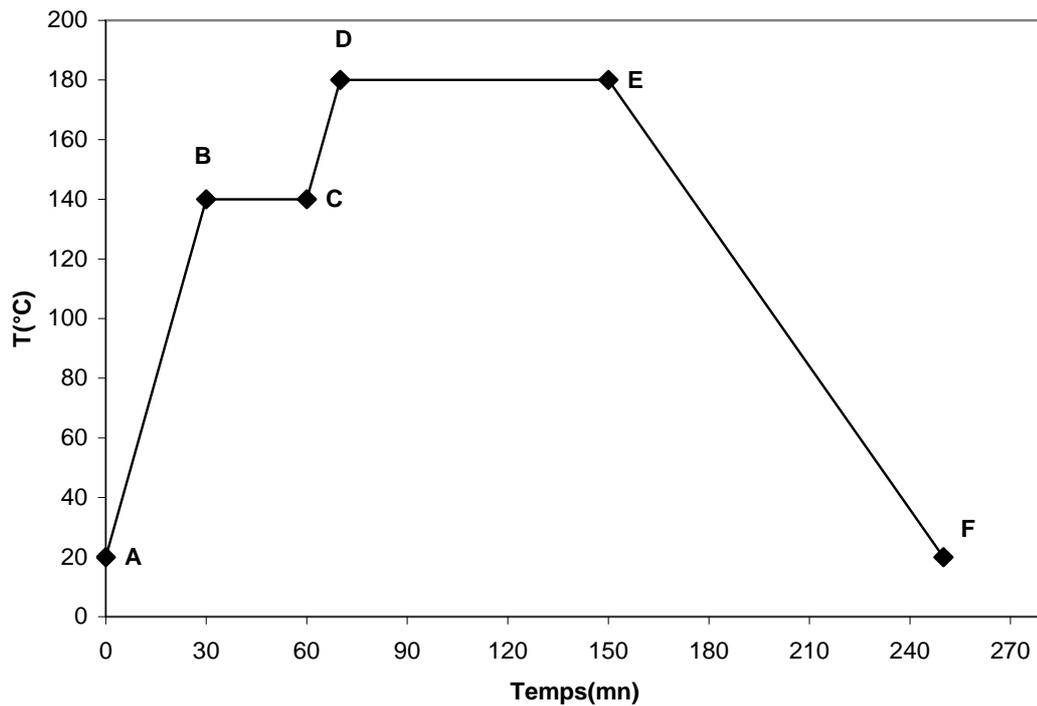


Figure 2.2 : Cycle de fabrication d'une résine époxyde [25].

### 2.3 Vieillissement hygrothermique des composites à matrice polymère

Certaines études ont été réalisées dans des conditions environnementales complexes, afin d'étudier le comportement des matériaux composites dans des conditions proches de leur fonctionnement en service, telles que les variations climatiques ou encore les cycles de vol d'un avion [36], [37], les auteurs montrent que l'endommagement et la fissuration du matériau sont accélérés et accentués par des conditions hygrothermiques cycliques, et ce, même en l'absence de sollicitations mécaniques.

#### 2.3.1 Vieillissement physique

##### 2.3.1.a La plastification

L'absorption d'eau par les composites à matrice polymère peut conduire à la plastification de la résine. Ce phénomène est expliqué par une augmentation de la mobilité des chaînes macromoléculaires de la résine due à une modification du volume libre et/ou

une rupture des liaisons hydrogène –H. La plastification se traduit concrètement par une diminution de la température de transition vitreuse et du seuil de plasticité.

Les molécules d'eau peuvent s'insérer dans le réseau tridimensionnel en brisant les liaisons secondaires, type Van der Waals ou liaisons hydrogène, entre les groupes polaires des chaînes macromoléculaires voisines [38]. Les groupes polaires du polymère vont se lier préférentiellement à une molécule d'eau. La rupture des liaisons entre les chaînes, qui assuraient une bonne partie la rigidité du matériau, va permettre une augmentation de mobilité des chaînes ou des segments de chaînes macromoléculaires. On parle dans ce cas de plastification. Cette mobilité accrue va affecter les propriétés mécaniques et physico-chimiques du polymère.

Les propriétés en traction ou cisaillement sont les plus étudiées (module d'Young et de cisaillement) pour l'aspect mécanique, ainsi que l'évolution de la température de transition vitreuse  $T_g$ . Dans la majorité des cas, une diminution du module de Young et du module de cisaillement est constatée ainsi qu'une baisse de  $T_g$ . Le phénomène est réversible. La plastification s'accompagne aussi de gonflements, qui dans le cas des composites, peuvent être responsables de décohésions fibre/matrice.

### 2.3.1.b Gonflement

Au cours du processus de diffusion d'eau à travers les résines polymères, les molécules d'eau se fixent sur les sites hydrophiles des chaînes macromoléculaires et provoquent ainsi, une augmentation du volume appelé gonflement ou dilatation hygroscopique. Certains auteurs ont supposé que l'augmentation de volume était égale au volume d'eau absorbée [35]. Or, il a été démontré expérimentalement que l'augmentation de volume était moins importante. Cette différence peut être expliquée par l'existence du volume libre qui se remplit d'eau sans pour autant dilater le polymère. D'autres auteurs ont mesuré expérimentalement le gonflement en fonction de la quantité d'eau absorbée et ont constaté une évolution linéaire de ces deux grandeurs. Ce qui a permis de définir un coefficient de dilatation hygroscopique  $\beta$  qui est le rapport entre l'augmentation relative de longueur et l'augmentation relative de poids.

### 2.3.1.c Endommagement

L'endommagement se traduit par la formation de craquelures ou fissures [39]:

- Craquelage (crazing): zones de polymères constituées de vide et de fibrilles de polymère très orientés.
- Fissuration (cracking): la craze peut conduire à la formation d'une microfissure puis d'une fissure.

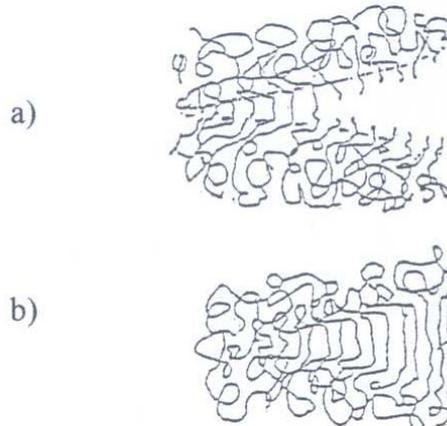


Figure 2.3 : a : Craquelage , b : Fissuration

### 2.3.2 vieillissements hygroscopiques type dégradations irréversibles

#### 2.3.2.a Hydrolyse

L'hydrolyse est une réaction chimique irréversible due à l'eau est une réaction chimique qui se traduit par des scissions des chaînes macromoléculaires entraînant une diminution de la masse moléculaire de la résine polymère [40].

Ils existent plusieurs processus d'hydrolyse. Certains auteurs supposent une réaction d'hydrolyse dans ces deux cas de figures :

1. Quand la masse du polymère augmente continuellement au cours du processus de diffusion de l'eau,
2. Quand la masse du polymère vieilli et re-séché est plus grande que la masse du polymère initialement sec (et avant la reprise en eau).

Au cours de l'absorption, les molécules d'eau peuvent remplacer les liaisons hydrogène déjà existantes par des liaisons hydrogène entre l'eau et le polymère. Le résultat de ces interactions chimiques à long terme est la dégradation de la résine et de l'interface par hydrolyse. Celle-ci est activée thermiquement, et est susceptible d'être catalysée par divers agents chimiques.

#### 2.3.2.b Lessivage

On parle de phénomène de lessivage du réseau polymère quand il y a perte de masse du polymère après une exposition prolongée dans une atmosphère humide. Cette perte de masse est constatée soit au cours du processus de diffusion de l'eau après la saturation, soit sur un polymère vieilli et séché à nouveau.

Il peut y avoir aussi des coupures de chaînes entre les nœuds de réticulation donnant lieu ainsi à la création de fragments de chaînes macromoléculaires, se retrouvant libre dans le réseau et pouvant diffuser vers le milieu extérieur. On parle dans ce cas de lessivage. Il se crée alors un volume libre, qui peut accueillir des molécules d'eau supplémentaires. Ce cas de figure explique les cinétiques d'absorption d'eau, qui présentent effectivement cette augmentation brutale de l'absorption d'eau ou au contraire une diminution de la masse globale du matériau à partir d'une certaine durée de vieillissement, synonyme de perte de masse par lessivage [40].

#### 2.3.3 Dégradations mécaniques

Après la connaissance des cinétiques d'absorption d'eau et des mécanismes physico-chimiques mis en jeu lors du vieillissement, notre travail s'est également intéressé aux conséquences de la diffusion d'eau dans le matériau. Il est en effet primordial de connaître, au cours du vieillissement, l'évolution de Propriétés thermomécaniques, telles que la température de transition vitreuse, les Propriétés élastiques, visqueuses, les Propriétés a rupture.

### 2.3.3.a Evolution de Tg

La transition vitreuse est l'une des caractéristiques les plus importantes des polymères, pendant laquelle le matériau passe progressivement d'un état vitreux (rigide) à un état caoutchoutique. Au-dessus de cette température, le polymère perd une grande partie de sa rigidité. Ainsi, cette grandeur constitue un témoin de l'état physico-chimique du polymère et un excellent indicateur de l'évolution du polymère.

Cette chute de Tg est expliquée par l'effet plastifiant de l'eau dans la matrice, qui augmente la mobilité moléculaire (Figure 2.4) et permet donc un changement de conformation des chaînes macromoléculaires à des températures inférieures à celles du matériau sec. Les réactions par coupure de chaîne (hydrolyse), présentées également précédemment, impliquent aussi une baisse de Tg.

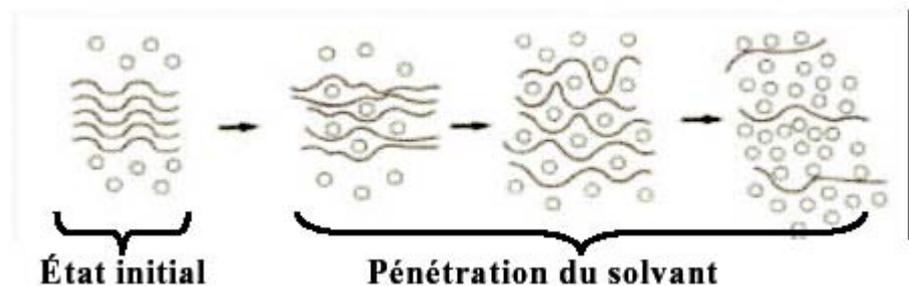


Figure 2.4 : Plastification.

### 2.4.1 Diffusion Fickienne

La diffusion Fickienne est ainsi caractérisée par deux paramètres :

1. Un coefficient de diffusion  $D$  indépendant du temps et de l'espace, ainsi que de la concentration en molécules d'eau, puisque le processus est dans le cas de phénomènes physiques réversibles.
2. Un seuil d'absorption d'eau asymptotique  $M_s$ , atteint pour un temps infini correspondant à l'équilibre et caractérisé par la valeur correspondante du gain de masse, généralement exprimée en pourcentage.

La représentation d'une diffusion Fickienne est donnée par la figure 2.5. C'est une fonction linéaire en début d'absorption et qui s'incurve au moment de la saturation, quand le matériau se met en équilibre avec l'environnement. La considération du paramètre  $M_t$  est intéressante puisque ce dernier correspond à la masse d'eau absorbée à un instant donné de vieillissement.

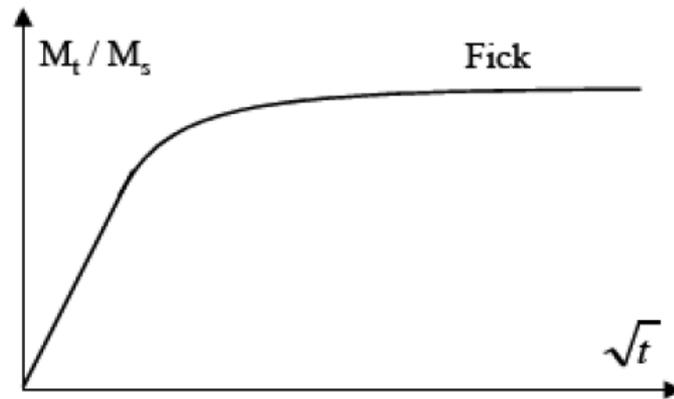


Figure 2.5 : Courbe de diffusion de type Fick.

#### 2.4.2 Influence du taux d'humidité relative

Dans le cas où le matériau présente un niveau de saturation en eau  $M_s$ , il existe en général une dépendance directe de  $M_s$  en fonction du degré d'humidité du milieu (HR%). La figure 2.6 illustre les variations de  $M_s$  en fonction de HR% pour trois matériaux composites différents et trois résines, Loos and Springer [41]. Ces courbes sont décrites par la relation :

$$M_s = a.(HR\%)^b \quad (2.1)$$

où  $a$  et  $b$  sont des constantes pour les matériaux composites.

Le degré d'humidité n'a pas d'influence sur la valeur du coefficient de diffusion, c'est à dire sur la vitesse de diffusion de l'eau. On considérera donc que  $D$  est indépendant de la concentration d'eau et reste constant pour une température donnée.

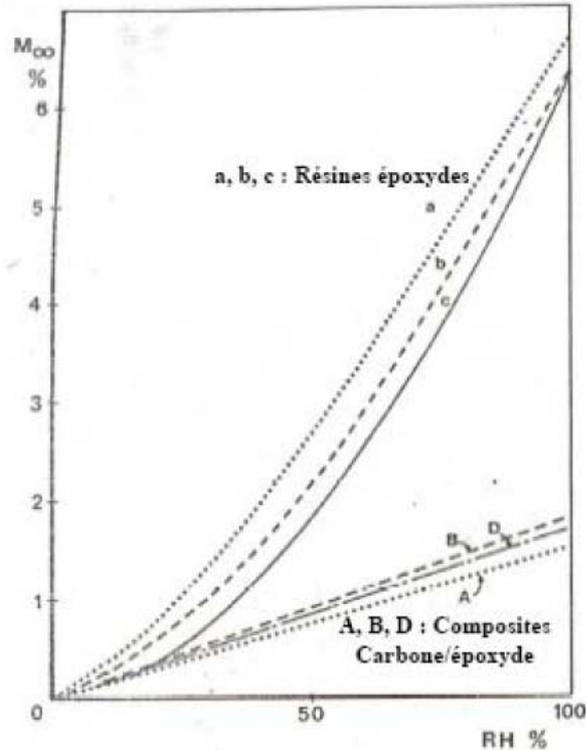


Figure 2.6 : Niveau de saturation en eau de divers matériaux composites carbone/époxyde et résines époxydes en fonction du degré d'humidité HR% [41].

#### 2.4.3 Influence de la température

Tous les auteurs confirment l'influence de la température sur les cinétiques d'absorption. La pente initiale des courbes d'absorption augmente avec la température, ce qui rend le coefficient de diffusion d'eau  $D$  extrêmement sensible à la température.

Une valeur typique de  $D$  à température ambiante est de l'ordre de  $10^{-7} \text{mm}^2/\text{s}$  pour une résine époxy, pour le cas d'une résine époxy vieillie en immersion ou en humidité relative à différentes températures. L'absorption est thermiquement activée et la relation d'Arrhenius permet de décrire la dépendance entre  $D$  et  $T$  :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.2)$$

#### 2.4.4 Diffusion non Fickienne

Dans de nombreuses circonstances, les cinétiques d'absorption d'eau par les polymères ou par les composites à matrice polymère présentent des écarts par rapport au comportement Fickien évoqué précédemment. Weitsman [42] qualifie cet aspect « d'anomalie de diffusion ». Selon lui, certains de ces comportements non Fickiens peuvent être expliqués par le caractère viscoélastique des polymères. Il propose donc un modèle tenant compte du temps nécessaire pour atteindre l'équilibre aux limites, d'un matériau plongé dans un milieu aux conditions constantes.

Les courbes schématiques données sur la figure 2.7 sont représentatives des différents cas rencontrés dans la littérature.

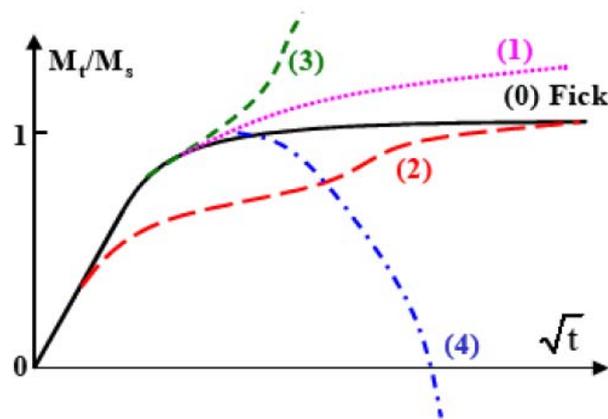


Figure 2.7 : Courbes schématiques représentatives de quatre catégories de cinétiques d'absorption d'eau non Fickienne Weitsman [7].

1. La courbe (0) correspond au comportement Fickien.
2. La courbe (1), qui est caractérisée par une augmentation continue de la prise de poids, correspond au cas pseudo-Fickien couramment décrit par Weitsman [7], l'équilibre n'est jamais atteint.
3. La courbe (2) représente une cinétique de type Langmuir .
4. Le cas (3) correspond à une accélération rapide de l'absorption d'eau, qui est généralement accompagnée de déformations importantes et d'endommagements au sein du matériau.
5. Enfin le cas (4) présente une perte de poids du matériau, après une certaine durée de vieillissement Dewimille [43], Springer [44]. On peut attribuer ce cas de figure à des

dégradations physiques ou chimiques, ou à une hydrolyse du matériau. Des groupements chimiques peuvent être arrachés des chaînes polymères et être évacués dans le solvant, ce qui explique la perte de matière et la baisse de la masse globale, malgré l'absorption d'eau.

Les cas correspondant aux courbes (0) et (2) sont ceux, où le matériau parvient à une saturation en eau vis-à-vis du milieu environnant. Ces cas se produisent généralement pour des conditions peu sévères : vieillissement en humidité relative ou en immersion à faible température.

Les anomalies de diffusion correspondant aux cas (3) et (4) ont généralement lieu quand le matériau est soumis à des conditions environnementales très sévères telles qu'une température élevée (généralement au-dessus de 70°C) et/ou un environnement très humide, voir un conditionnement en immersion.

#### 2.4.5 Observations microscopiques des défauts créés au cours du vieillissement

Afin de mieux identifier les modes de dégradations du matériau en présence d'humidité, il est intéressant de réaliser des observations microscopiques. Plusieurs auteurs ont ainsi observé au microscope électronique à balayage (MEB) des faciès de rupture d'échantillons vieillis en milieu humide et les ont comparés à ceux d'échantillons non vieillis [45] , [46] , [57],[48]. Un exemple est donné sur la figure 2.8 pour un composite verre-époxy vieilli 17 semaines en immersion à 50 ou 80°C.

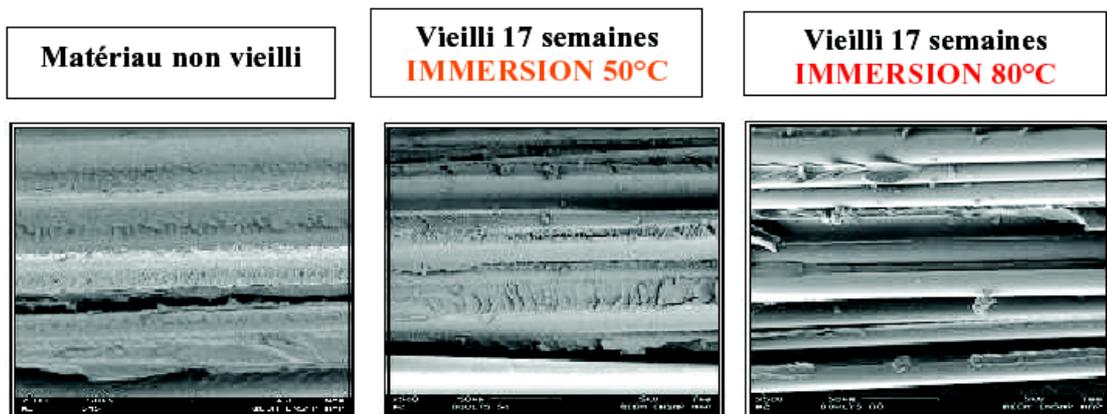


Figure 2.8 : Observations de faciès de rupture d'éprouvettes de traction au MEB, pour différentes conditions de vieillissement [46].

On constate d'après ces photos MEB que le matériau est effectivement fortement dégradé par la présence de l'eau. Sur le matériau non vieilli, on a une très bonne adhésion entre les fibres et la matrice, les fibres étant enrobées par une couche de résine. Après immersion à 40°C, mais surtout à 80°C, une décohésion entre ces deux composants est observée. Il apparaît des fibres et des empreintes lisses, sans résine autour, ce qui suggère une dégradation de l'interface, qui peut créer ainsi des zones libres pour l'eau. Cela prouve bien que l'eau agit de manière agressive et peut pénétrer plus facilement et de façon plus abondante par les espaces créés à l'interface fibre/matrice. Les fissures se produisent en bordure des zones riches en résine, entre les faisceaux de fibres. Sous l'effet de l'eau, il y a en effet gonflement important de la résine qui soumet les interfaces à de fortes sollicitations en cisaillement.

B. Dewimille [45] observe très peu d'endommagement en dessous de 65°C [49]. Y.J. Weitsman [48] observe que les décohésions fibre/matrice apparaissent essentiellement à l'intérieur du composite alors que Dewimille les trouvent surtout proches de la surface, là où la concentration en eau est importante.

Un autre mode de dégradation couramment observé est la fissuration de la matrice. Il est constaté qu'un vieillissement thermique peut se produire et que des fissures apparaissent dans des zones riches en résine, en raison des dilatations thermiques différentes entre fibre et matrice. Des auteurs considèrent des conditions sévères, en température uniquement, pour des applications aéronautiques par exemple (températures de l'ordre de 100 à 200°C) [50]. Il apparaît bien dans ce cas de figure des phénomènes de fissuration de la matrice, accompagnés d'oxydation. Une couche oxydée, dont la taille augmente au cours du temps, se forme à partir de la surface des éprouvettes vieilles à haute température.

## 2.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de définir les différents processus hygrothermiques qui peuvent avoir lieu lors du fonctionnement des stratifiés en composite dans des environnements variables, la dégradation des composites est fonction de la température et humidité, donc il

est très intéressant d'étudier l'impact de ces deux dernières sur l'évolution des performances mécaniques, cette idée sera développée dans le prochain chapitre.

### CHAPITRE 3

#### MODELISATION DU VIEILLISSEMENT HYGROTHERMIQUE

Dans cette partie on va modéliser le vieillissement des stratifiés composite, par la prise en compte de l'influence de la température et humidité sur les propriétés mécaniques, le modèle semi-empirique de Tsai est utilise pour modéliser et quantifié les chutes des caractéristiques mécaniques des composites vieillis, on va s'intéresser aussi aux effets de couplage d'une température et une humidité.

#### 3.1 Microanalyse pour un matériau composite unidirectionnel

Nous présentons ici différents modèles par l'approche semi-empirique pour différents modules d'élasticité, pour un matériau composite à fibres continues unidirectionnelles, Issac [15], Berthelot [51], Staab [52].

##### 3.1.1 Module d'élasticité longitudinal $E_X$

Loi de mélange [15],[51], [52],[53], [54]  $E_X = V_f E_{fx} + (1-V_f)E_m$  (3.1)

##### 3.1.2 Module d'élasticité transversal $E_Y$

Chamis [54] 
$$E_Y = \frac{E_{fx} E_{my}}{E_{fy} - \sqrt{V_f} (E_{fy} - E_{my})}$$
 (3.2)

Gibson[55] 
$$E_Y = E_{my} \left[ (1-V_f) + \frac{\sqrt{V_f}}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{E_{my}}{E_{fy}}\right)} \right]$$
 (3.3)

Equation d'Halpin-Tsai [15], [51]

$$E_Y = E_{my} \left[ \frac{E_{fy} (1+2V_f) + 2E_{my} (1-V_f)}{E_{fy} (1-V_f) + E_{my} (2+V_f)} \right] \quad (3.4)$$

Gibson modifie [55]

$$\frac{1}{E_Y} = \frac{1 - \sqrt{V_f}}{E_{my}} + \frac{\sqrt{V_f}}{E_{fy} \sqrt{V_f} + (1 - \sqrt{V_f}) E_{my}} \quad (3.5)$$

### 3.1.3 Module de cisaillement $G_{XY}$

Chamis[55]

$$G_{XY} = \frac{G_{fxy} G_{mxy}}{G_{fxy} - \sqrt{V_f} (G_{fxy} - G_{mxy})} \quad (3.6)$$

Christensen [56]

$$G_{XY} = G_{mxy} \left[ \frac{(1+V_f) G_{fxy} + (1-V_f) G_{mxy}}{(1-V_f) G_{fxy} + (1+V_f) G_{mxy}} \right] \quad (3.7)$$

Equation d'Halpin-Tsai [15]

$$G_{XY} = G_{mxy} \left[ \frac{(1+V_f) G_{fxy} + (1-V_f) G_{mxy}}{(1-V_f) G_{fxy} + (1+V_f) G_{mxy}} \right] \quad (3.8)$$

Gibson [55]

$$\frac{1}{G_{XY}} = \frac{1 - \sqrt{V_f}}{G_{mxy}} + \frac{\sqrt{V_f}}{G_{fxy} \sqrt{V_f} + (1 - \sqrt{V_f}) G_{mxy}} \quad (3.9)$$

### 3.1.4 Coefficients de Poisson $\nu_{XY}$

Loi de mélange [15], [51], [52],[53], [54]

$$\nu_{XY} = \nu_{fxy} V_f + \nu_{mxy} (1 - V_f) \quad (3.10)$$

### 3.2 Caractérisation du matériau

Après avoir exposé les différentes expressions semi-empiriques concernant l'évaluation des propriétés mécaniques du composite, nous allons devoir choisir les modèles des différents modules qui nous permettront de faire la caractérisation de notre matériau.

Le module de Young longitudinal et le coefficient de Poisson sont pris d'après le modèle correspondant à ceux issus de la loi des mélanges. Le module de Young transversal et le coefficient de Poisson sont pris selon le modèle correspondant à celui de la loi des mélanges modifiée par Hahn décrit en référence [18]. Ce modèle a également été adopté dans les travaux de Sereir et autres [5], [57].

Soit ci-dessous le choix du modèle semi-empirique pour l'évaluation des propriétés du composite en fonction des volumes des fibres.

#### 3.2.1 Le module de Young dans la direction des fibres

$$E_X = V_f E_{fx} + (1 - V_f) E_m \quad (3.11)$$

#### 3.2.2 Le module de Young transversal

La relation micromécanique modifiée par Hahn [18] pour le graphite époxy T300/5208 du module de Young transversal est :

$$E_Y = \frac{1 + 0.516(V_f / V_m)}{\frac{1}{E_{fy}} + \frac{0.516(V_f / V_m)}{E_m}} \quad (3.12)$$

### 3.2.3 Le module de cisaillement longitudinal

De même, la relation micromécanique modifiée par Hahn [18] pour le graphite époxy T300/5208 du module de Young transversal est :

$$G_{XY} = \frac{1 + 0.316(V_f / V_m)}{\frac{1}{G_{fx}} + \frac{0.316(V_f / V_m)}{G_m}} \quad (3.13)$$

Avec

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (3.14)$$

### 3.2.4 Le coefficient de Poisson

$$\nu_{XY} = \nu_{fxy} V_f + \nu_m (1 - V_f) \quad (3.15)$$

## 3.3 Introduction du vieillissement sur les propriétés mécaniques du matériau

Cette étape est une étape clé dans notre étude, dans laquelle on va quantifier les performances des composites vieillis par la température et l'humidité, le modèle utilisé sera présenté en détail.

Le modèle utilisé est le modèle de Tsai [18], il tient compte de l'évolution de la température de transition en fonction de l'humidité, puis l'évolution des propriétés élémentaires des fibres et de la matrice en fonction de la température et de l'humidité. Ce modèle est le même adopté dans les travaux de Sereir [5] et [57] [33]

La particularité du modèle est que le vieillissement de la fibre est bien pris en considération. Ceci est en accord avec certaines études qui mentionnent une certaine

dégradation des fibres due à l'humidité Ishai [36]. Cependant, la plupart des études considèrent cette dégradation comme négligeable, notamment par rapport à la dégradation de la matrice et de l'interface.

### 3.3.1 Évolution de Tg au cours du vieillissement

Le paramètre Tg est un paramètre quantitatif du phénomène de vieillissement, c'est aussi une caractéristique importante des polymères et représente la transition entre le domaine vitreux et le domaine caoutchoutique du matériau, Mercier [11].

La première partie d'analyse doit permettre de suivre l'évolution de la température de transition vitreuse Tg au cours du vieillissement.

Tsai [18] assume qu'une absorption d'humidité induit une diminution de la température de transition d'une quantité gc:

$$Tg = T_g^{\circ} - gc \quad (3.16)$$

### 3.3.2 Température adimensionnelle

Tsai [18] propose la notion de la température adimensionnelle T\*, qui est un élément essentiel pour l'évaluation des caractéristiques du composite :

$$T^* = \frac{T - T_{opr}}{T_g - T_{rm}} \quad (3.17)$$

On voit l'effet de la température à travers  $T_{opr}$  qui est la température d'utilisation ainsi que l'effet de la concentration à travers la température de transition.  $T_{rm}$  étant la température de référence.

### 3.3.3 Prise en compte du vieillissement dans les propriétés de la matrice

Tsai [18] relie la température adimensionnelle  $T^*$ , pour déterminer empiriquement les expressions des propriétés de la matrice, en fonction de la température et de l'humidité avant et après le vieillissement.

$$\frac{E_m}{E_m^0} = (T^*)^a \quad (3.17a)$$

$$\frac{G_m}{G_m^0} = (T^*)^a \quad (3.17b)$$

$$\frac{\nu_m}{\nu_m^0} = (T^*)^a \quad (3.17c)$$

### 3.3.4 Prise en compte du vieillissement dans les propriétés des fibres

Les propriétés des fibres en fonction de la température et de la concentration s'expriment aussi en fonction de la température adimensionnelle.

$$\frac{E_{fx}}{E_{fx}^0} = (T^*)^f \quad (3.18a)$$

$$\frac{E_{fy}}{E_{fy}^0} = (T^*)^f \quad (3.18b)$$

$$\frac{G_{fx}}{G_{fx}^0} = (T^*)^f \quad (3.18c)$$

$$\frac{\nu_{fx}}{\nu_{fx}^0} = (T^*)^f \quad (3.18d)$$

f et a: étant des constantes semi-empiriques [18], données dans le tableau 3.2

### 3.3.5 Prise en compte de l'effet de température et d'humidité dans l'évaluation des résistances à la rupture

Les résistances avant et après le vieillissement sont aussi fonctions des paramètres d'environnement et s'expriment en fonction de la température adimensionnelle [18].

#### 3.3.5.1 Résistance en traction longitudinale

$$\frac{X}{X^0} = \left( \frac{\nu_f}{\nu_f} \right) (T^*)^h \quad (3.19a)$$

#### 3.3.5.2 Résistance en compression longitudinale

$$\frac{X'}{X'^0} = \left( \frac{\nu_f}{\nu_f} \right) \left( \frac{G_{xy}}{G_{xy}} \right) (T^*)^e \quad (3.19b)$$

#### 3.3.5.3 Résistance en tension transversale

$$\frac{Y}{Y^0} = (T^*)^c \quad (3.19c)$$

#### 3.3.5.4 Résistance en compression transversale

$$\frac{Y'}{Y'^0} = (T^*)^c \quad (3.19d)$$

#### 3.3.5.5 Résistance en cisaillement plan

$$\frac{S}{S^0} = (T^*)^c \quad (3.19e)$$

$h, e, c$  : étant des constantes semi-empiriques [18], données dans le tableau 3.2

Par mesure des propriétés des plis qui sont fonction de la température et de l'humidité, nous reprenons les formulations micromécaniques pour calculer les propriétés ayant subi le changement du à ces paramètres.

### 3.4 Propriétés du T300/5208

L'application de notre étude se fera sur le T300/5208. Le T300 est la fibre de carbone et le N5208 est la résine. Nous présentons ci-dessous sous forme de tableaux les caractéristiques de ce type de matériau, ainsi que les caractéristiques de la matrice époxyde et des fibres de carbone :

Tableau 3.1 : Caractéristiques de fibres et matrice du T300/5208 [18].

$E_{fx}$ (Gpa)	$E_{fy}$ (Gpa)	$\nu_{fx}$	$E_m$ (Gpa)	$\nu_m$	$G_m$ (Gpa)	$G_{fx}$ (Gpa)	$V_f$
259	18.69	0.25	3.4	0.35	1.26	19.69	0.7

Tableau 3.2 Caractéristiques de variations de température et d'humidité [18].

$T_g^0$	$T_{rm}$ (°C)	$G$ (°C/c)	a	b	c	f	h	e
160	22	2000	0.5	0.2	0.9	0.04	0.04	0.2

Tableau 3.3 Résistances du T300/5208 [18].

X(MPa)	X'(MPa)	Y(MPa)	Y'(MPa)	S(MPa)
1500	1500	40	246	68

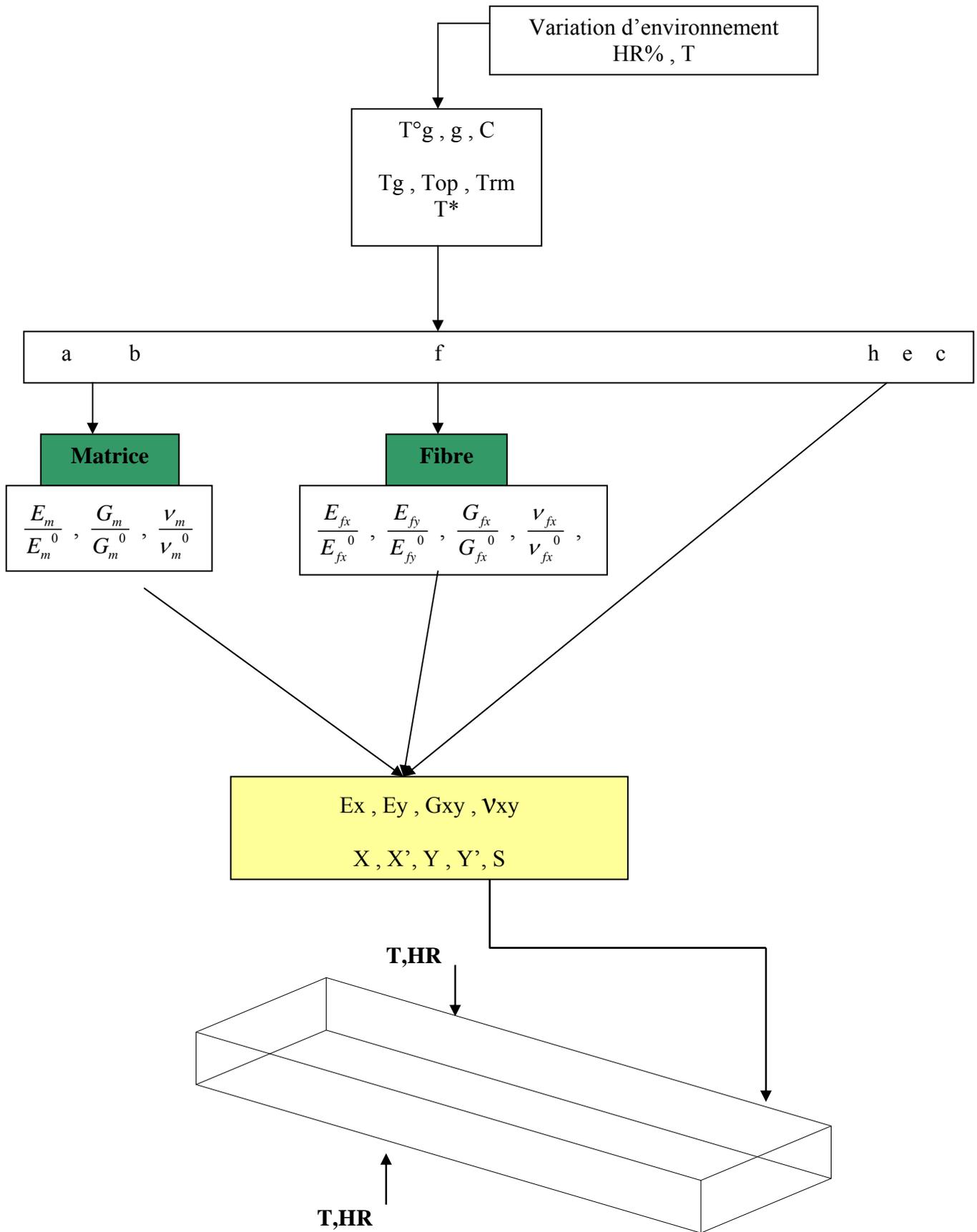


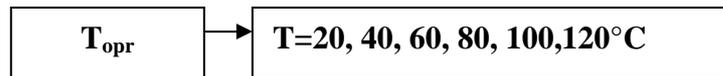
Figure 3.1 : Organigramme de calcul des propriétés vieilles TSAILOC.

### 3.5 Conditions de simulation

Nous choisissons quatre environnements différents en terme d'humidité relative. Chaque environnement considère des températures d'utilisation variables de 20°C à 120°C. 120°C, correspond aussi à la température de post cuisson prise par Tsai [18].

Tableau 3.4 : Environnements des simulations.

Environnements	Humidité relative	Concentration $C=0.015(HR)\%$
ENV 1	HR1=0%	C=0
ENV 2	HR2=33%	C=0.005
ENV 3	HR3=66%	C=0.01
ENV 4	HR4=100%	C=0.015



### 3.6 Résultats de la simulation

#### 3.6.1 Influence du taux d'humidité et la température d'utilisation et la fraction volumique des fibres

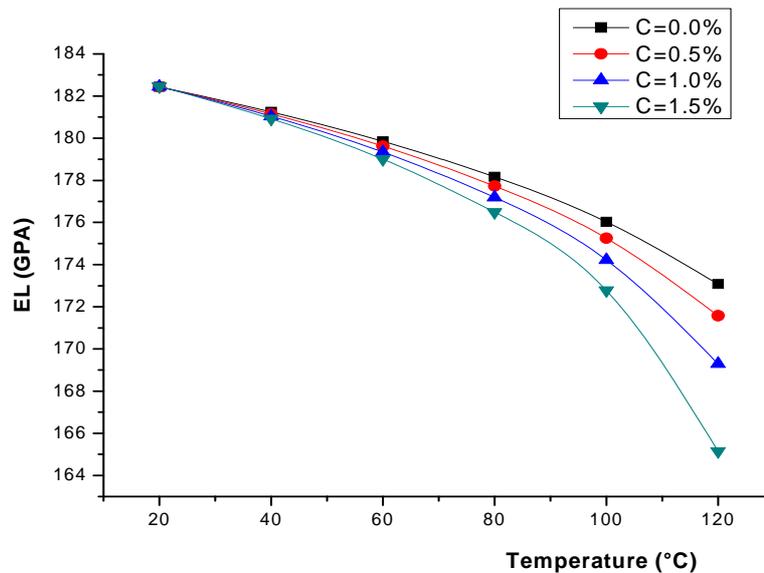


Figure 3.2 : Effet de la variation de température sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.

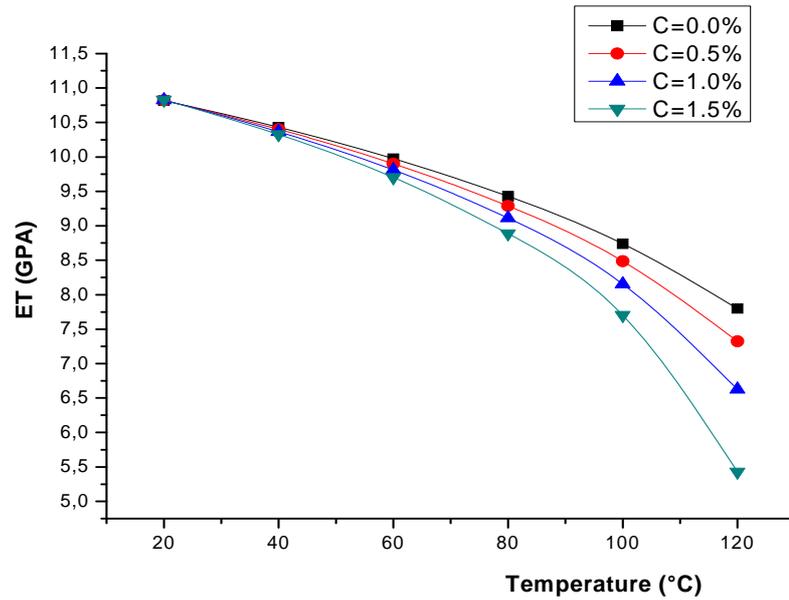


Figure 3.3 : Effet de la variation de température sur le module de Young transversal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.

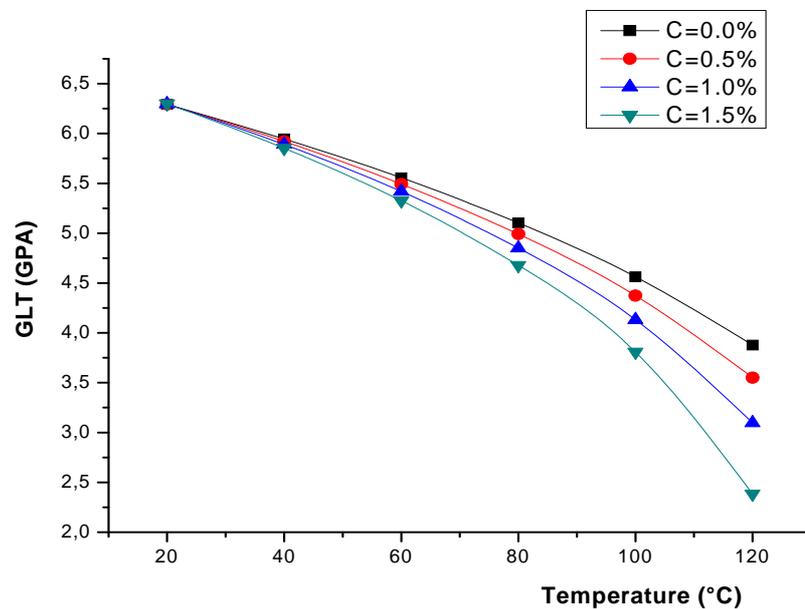


Figure 3.4 : Effet de la variation de température sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.

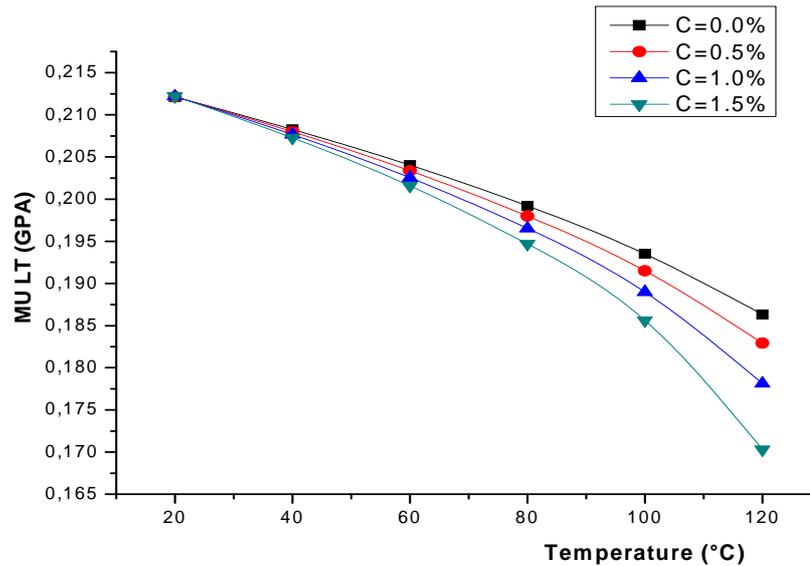


Figure 3.5 : Effet de la variation de température sur le coefficient de Poisson longitudinal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.

### 3.7 Interprétations des résultats

#### 3.7.1 Effets de la température

Pour connaître et analyser l'effet de la température sur le vieillissement des composites, on a simulé le comportement du module de Young longitudinale et transversale, le module de cisaillement longitudinal, le coefficient de poisson, comme le montrent les figures 3.2 à 3.5.

L'augmentation de la température engendre une chute des différents modules d'élasticité, nous observons une accélération de la réduction des caractéristiques mécaniques à partir de 80°C, le taux de réduction du module de Young transversal et le module de cisaillement longitudinal sont très importants et atteignent une chute de 50% des caractéristiques initiales.

En fait, ces réductions représentent la chute de rigidité. Nous constatons une réduction de la rigidité transversale de l'ordre de 56% lorsque la température atteint 120°C à une concentration initiale  $C=0.015$ . La rigidité en cisaillement se réduit considérablement aussi, elle est autour de 61% pour une température de 120°C et une concentration de

$C=0.015$ . Ces résultats sont en accord avec les résultats expérimentaux cités dans la référence [33]

### 3.7.2 Effets de la concentration

Afin de déterminer l'effet de la concentration sur les caractéristiques mécaniques, on a simulé le comportement des composites dans différents environnements en terme d'humidité relative à travers les figures 3.2 à 3.5 on peut fixer la température et voir l'effet de l'humidité.

Plus la concentration est élevée, plus le taux de dégradation est élevé, exemple le cisaillement longitudinal chute de 6.7% lorsque la concentration passe de  $C=0\%$  à  $C=1.5\%$ . Le module de Young transversal quant à lui chute de 5.96% lorsque la concentration passe de  $C=0\%$  à  $C=1.5\%$ , la combinaison d'une température et d'un haut niveau d'humidité contribuent à réduire les propriétés mécaniques du graphite/époxyde T300/5208. L'effet de température est plus prononcé pour une concentration élevée.

L'influence de la concentration d'humidité et celle de la température sont similaire, pour une concentration d'humidité donnée, plus la température est élevée plus la dégradation est importante. Les caractéristiques mécaniques les plus sensibles sont l'élasticité transversale et le cisaillement longitudinal. Ceci permet de prévoir que l'effet combiné température humidité aura une conséquence visible sur les contraintes transversales et sur le cisaillement plan.

### 3.8 Validation des résultats

Nos résultats sont en bon accord avec les résultats obtenus par Benkhedda [33] ou il apparaît communément une baisse de rigidité dans le sens transversal et en cisaillement des composites unidirectionnels. Les résultats sont aussi en bon accord avec les travaux expérimentaux de Ghorbel [58] ; Shen et Springer [59].

Le modèle de Tsai nous a permis de simuler et analyse le vieillissement et la dégradation mécanique du composite, les propriétés mécaniques du composite peuvent être obtenues pour

n'importe quelle condition de température et d'humidité, l'interprétation physico-chimique des résultats des effets de température et d'humidité sur les propriétés mécaniques est assez complexe, nos résultats montrent que pratiquement chaque propriété du matériau est susceptible d'être affectée par un vieillissement humide et thermique. Cependant, l'aspect micro analytique ne pourra déterminer ce qui se passe au coeur du matériau.

### 3.9 Influence de la fraction volumique

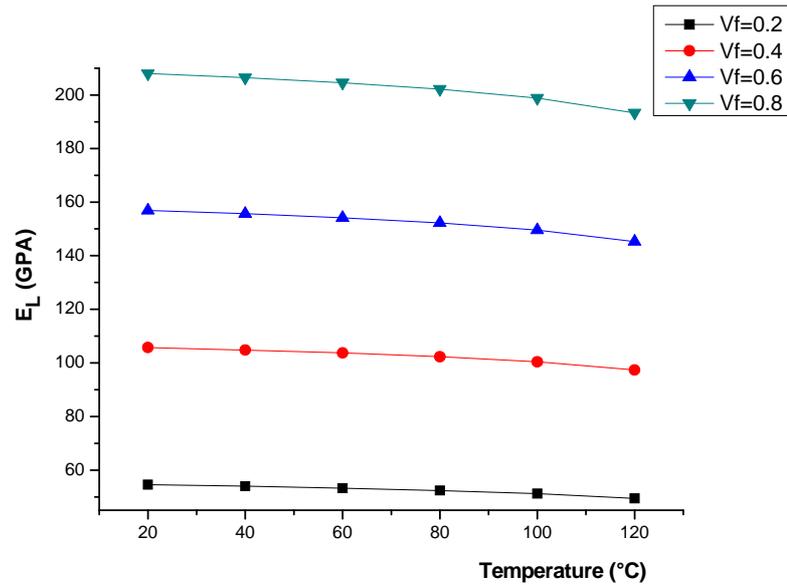


Figure 3.6 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 à différentes températures à  $c = 0.01$

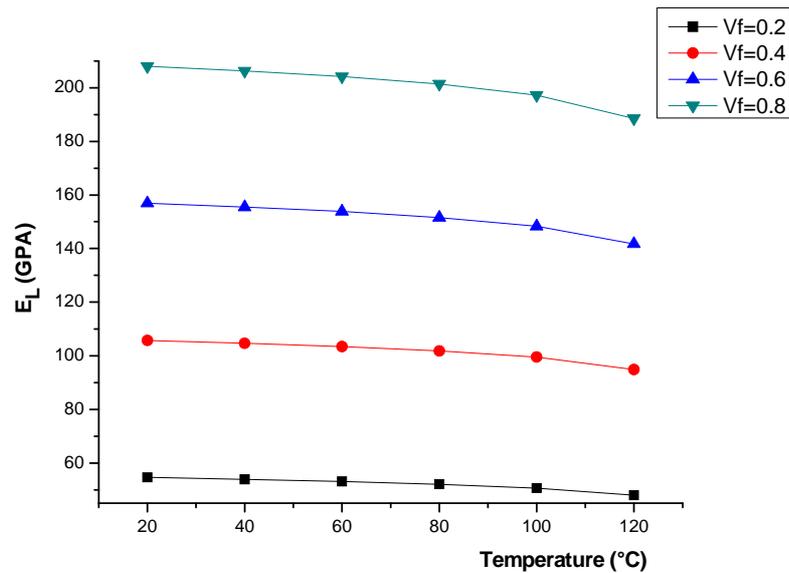


Figure 3.7 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 à différentes températures à  $c = 0.015$

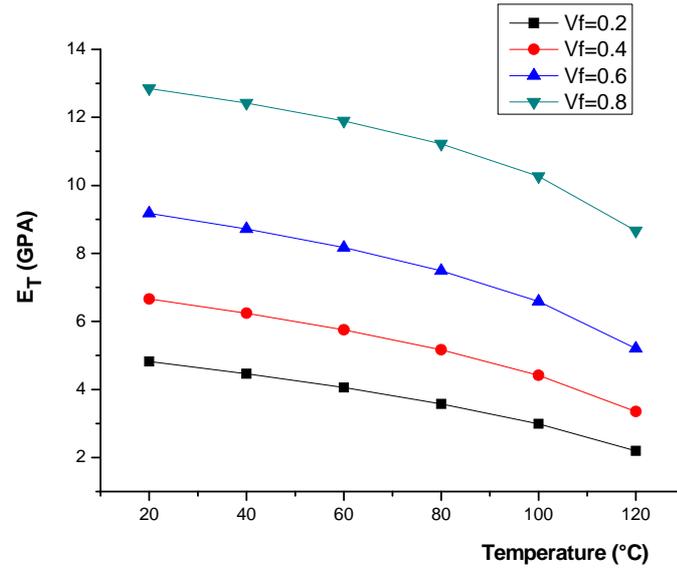


Figure 3.8 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 à différentes températures à  $c=0.01$

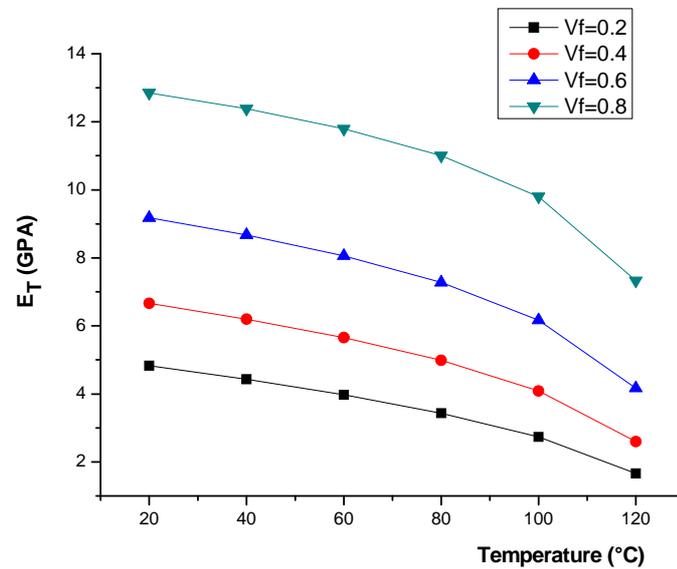


Figure 3.9 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 à différentes températures à  $c=0.015$

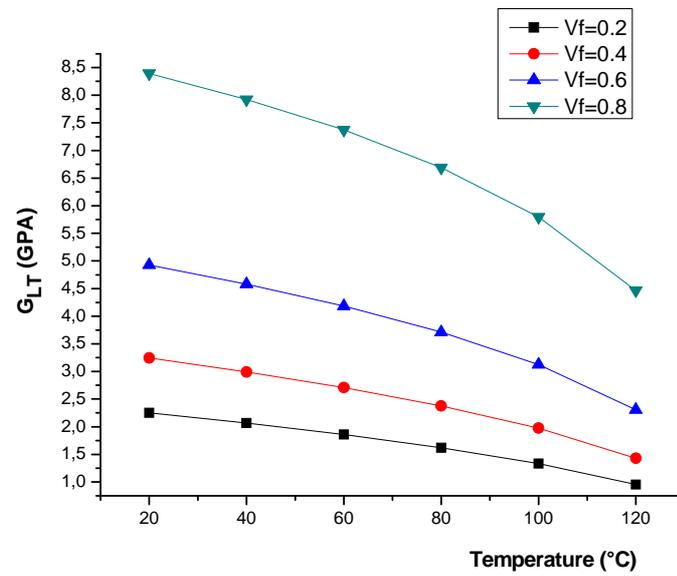


Figure 3.10 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisailment longitudinal pour le T300/5208 à différentes température à  $c=0.01$

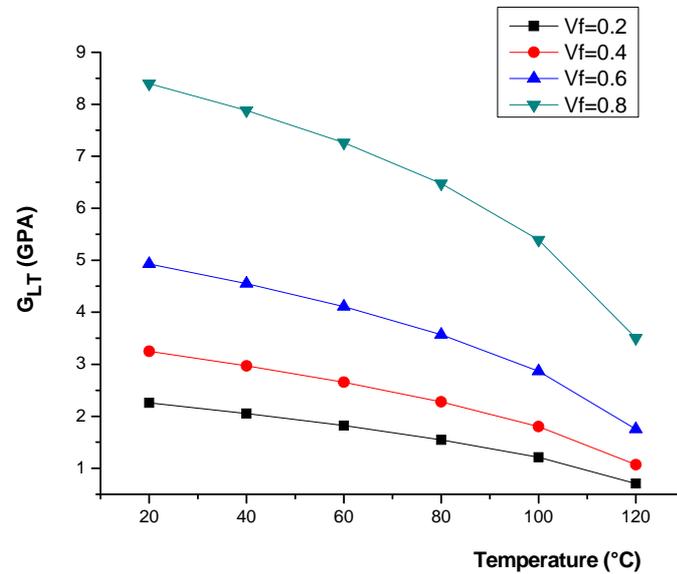


Figure 3.11 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisailment longitudinal pour le T300/5208 à différentes températures à  $c=0.015$

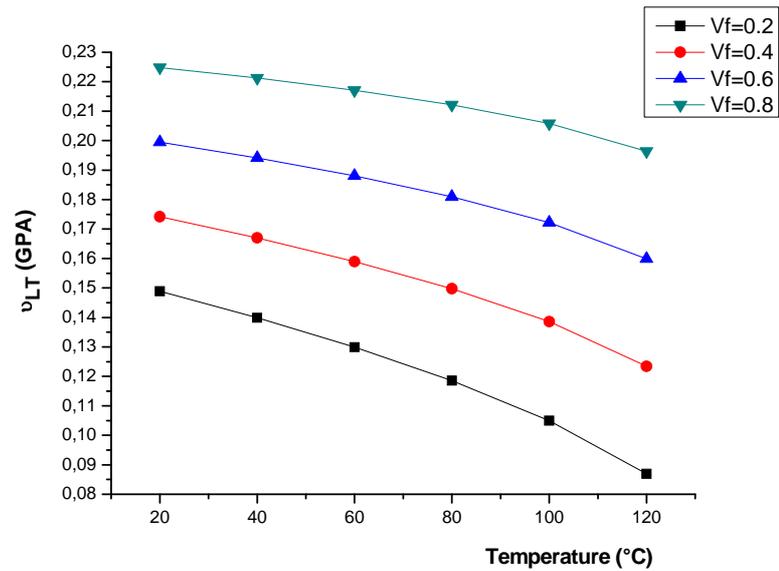


Figure 3.12 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal pour le T300/5208 à différentes température à  $c=0.01$

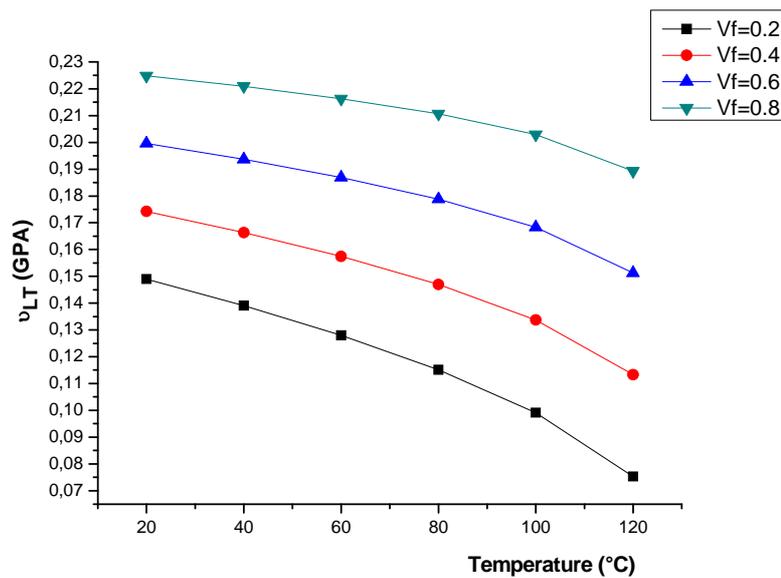


Figure 3.13 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal pour le T300/5208 à différentes températures à  $c=0.015$

Les figures 3.6 -13 confirme le rôle des fibres qui est le renfort non seulement dans le cas de chargement mécanique, mais aussi avec une sollicitation hygrothermique, à chaque fois que l'on augmente le  $v_f$  on a un amortissement du vieillissement malgré l'augmentation de T et C

### 3.10 Cas d'une température d'utilisation proche de le température de post cuisson

La température de post cuisson pour le T300/5208 est 180°.

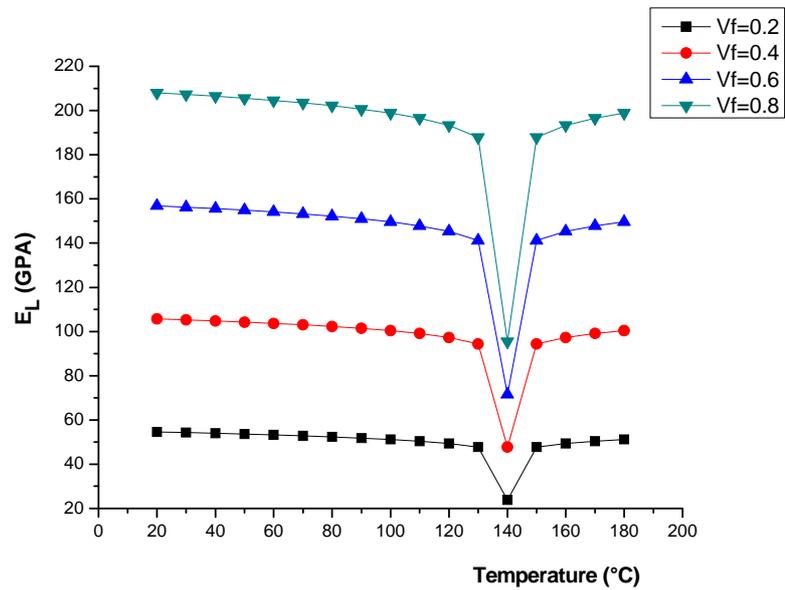


Figure 3.14 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a Tmax =180 °C et à c=0.01

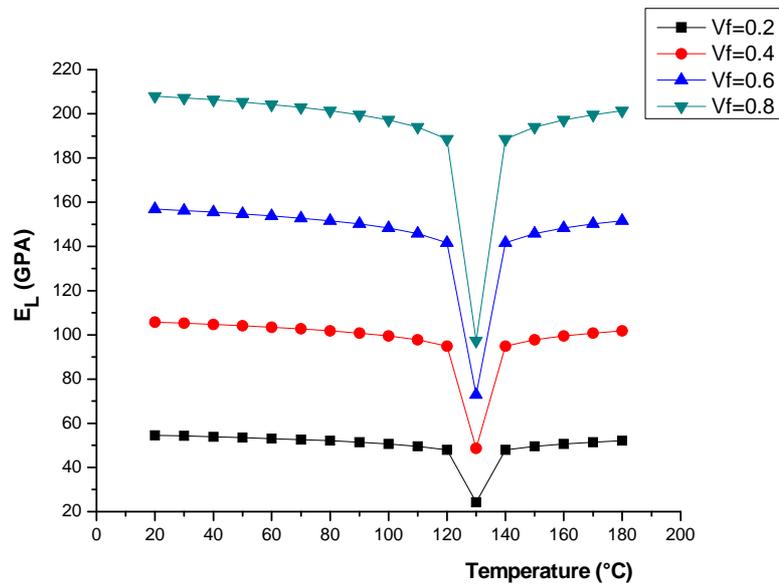


Figure 3.15 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a Tmax =180 °C et à c=0.015

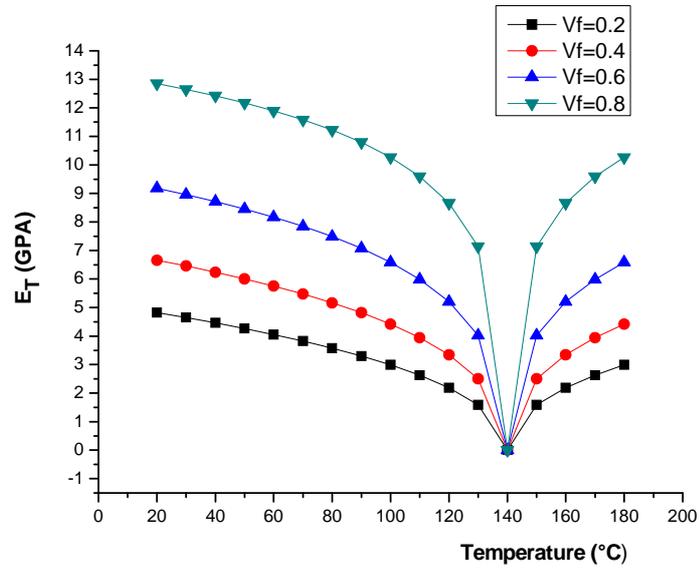


Figure 3.16 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 jusqu'a  $T_{max} = 180$  °C et à  $c = 0.01$

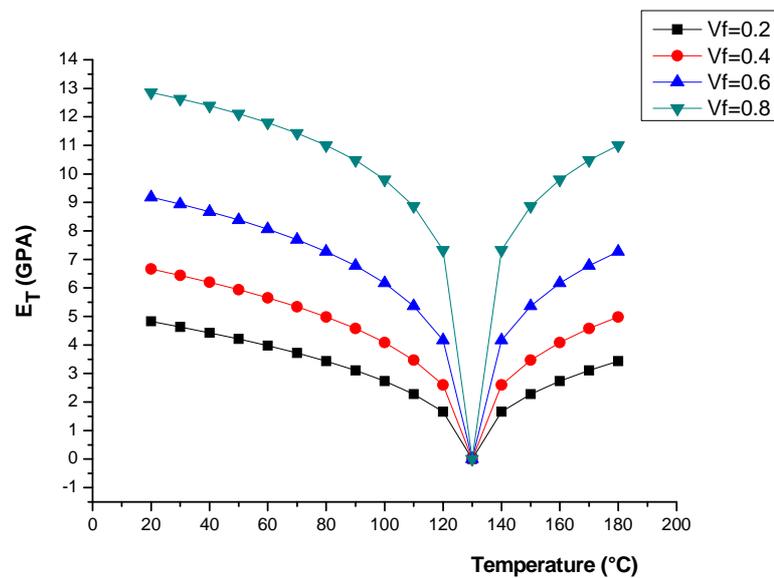


Figure 3.17 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 jusqu'a  $T_{max} = 180$  °C et à  $c = 0.015$

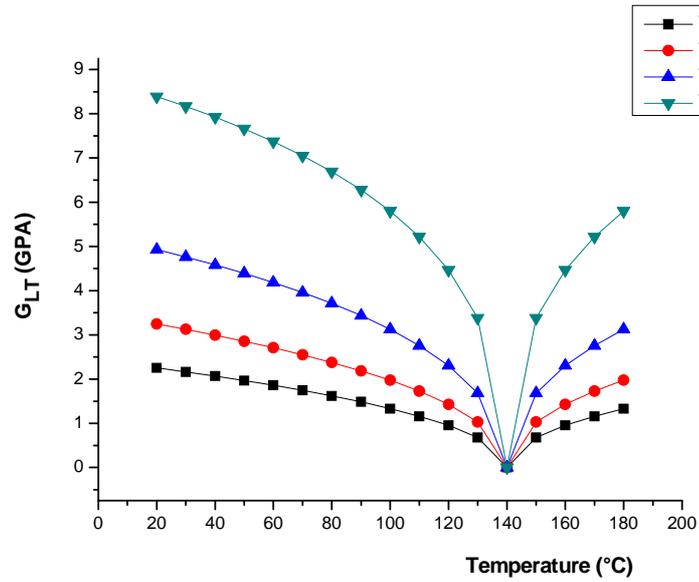


Figure 3.18 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a Tmax =180 °C et à c =0.01

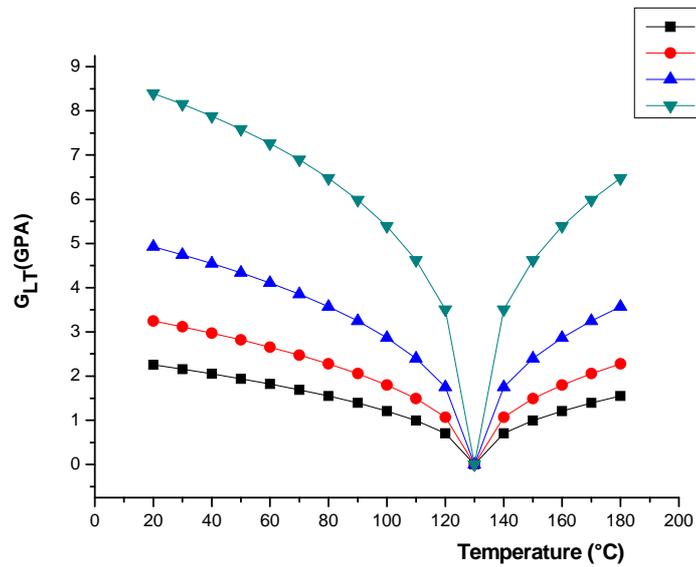


Figure 3.19 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a Tmax =180 °C et à c =0.015

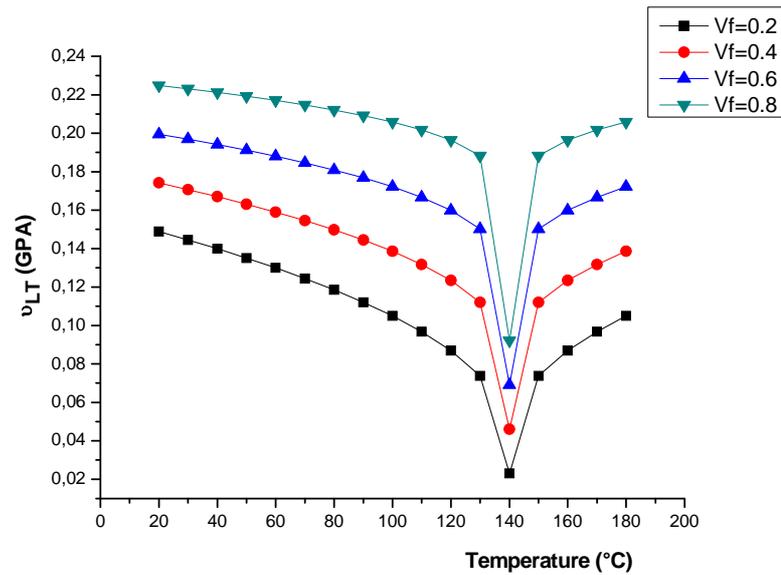


Figure 3.20 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal de pour le T300/5208 jusqu'a Tmax =180 °C et à c =0.01

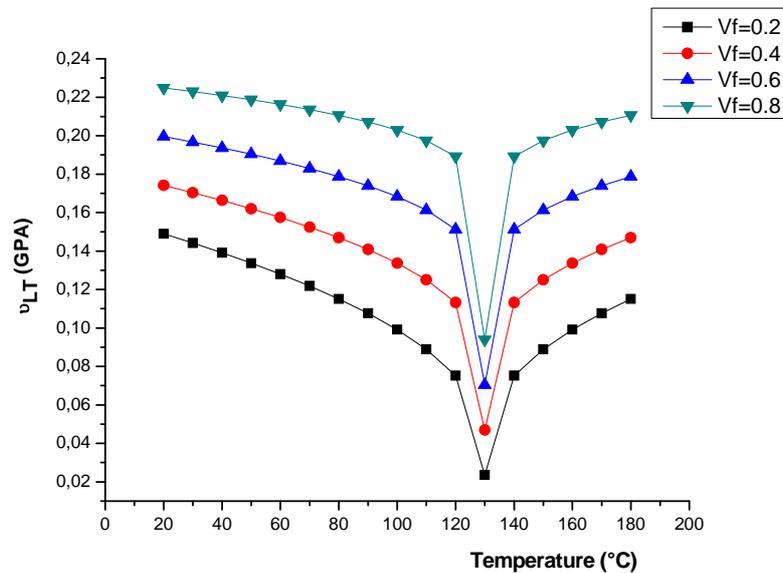


Figure 3.21 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal de pour le T300/5208 jusqu'a Tmax =180 °C et à c =0.015

Les figures 3.14-21 présentent la chute brutale des caractéristiques mécanique de notre matériau, les chutes des propriétés sont totalement récupérées lorsqu'on s'éloigne de la température de post cuisson, donc le phénomène de est réversible c'est une plastification qui a eu lieu lors de processus.

### 3.11 Cas d'une température d'utilisation négative (régime subsonique)

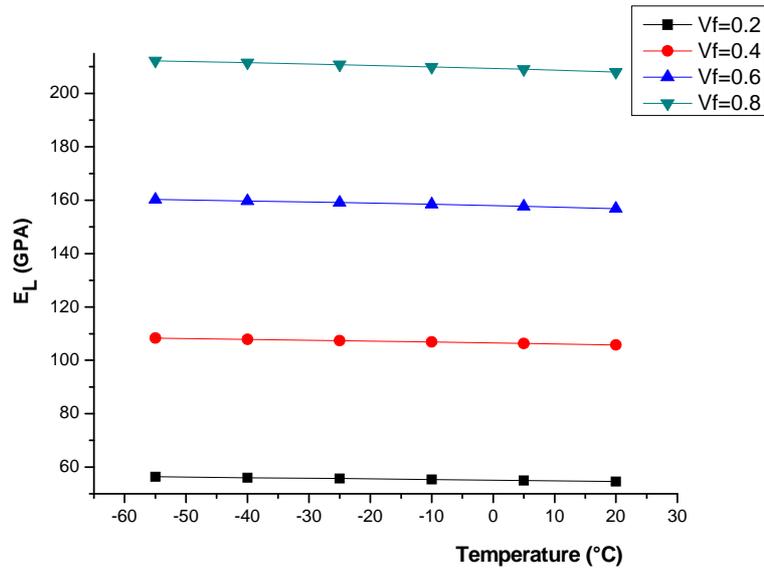


Figure 3.22 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a  $T_{min} = -55$  °C et à  $c = 0.01$

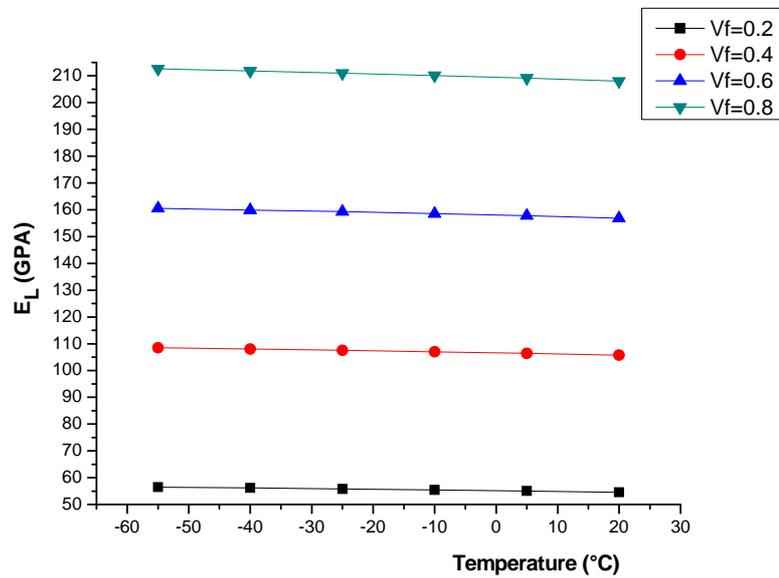


Figure 3.23 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a  $T_{min} = -55$  °C et à  $c = 0.015$

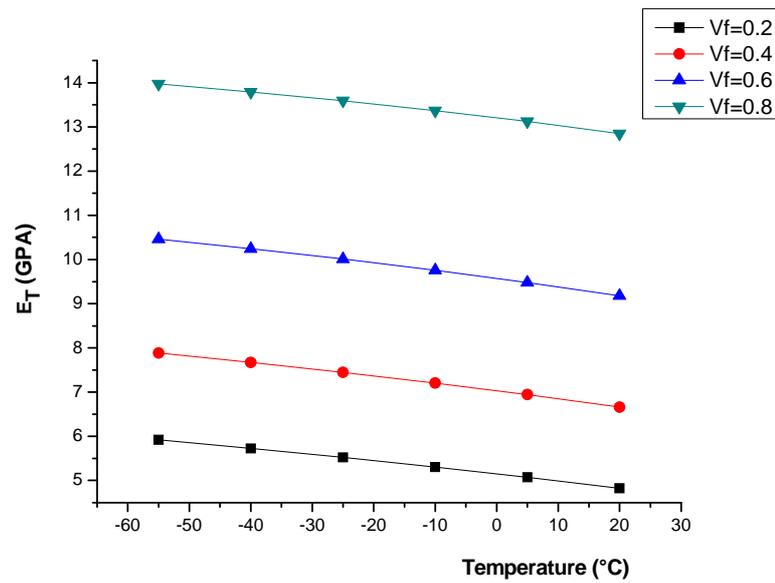


Figure 3.24 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 jusqu'a  $T_{min} = -55$  °C et à  $c = 0.01$

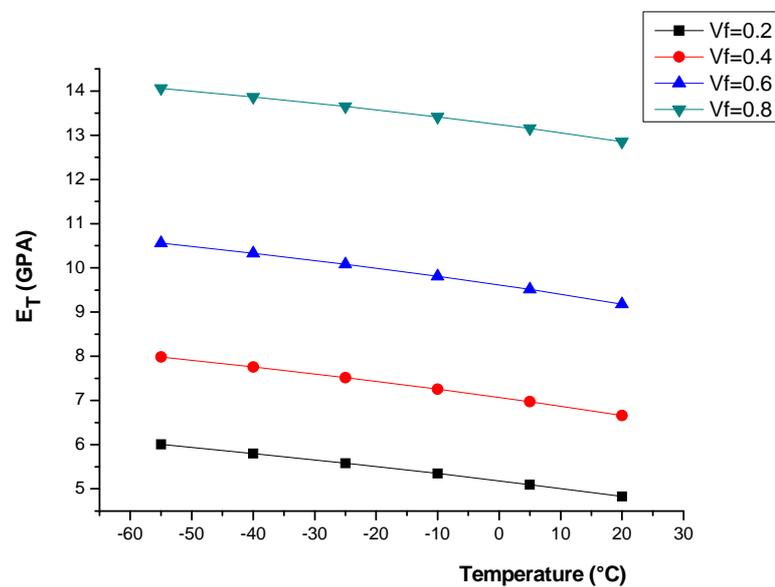


Figure 3.25 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de Young transversal pour le T300/5208 jusqu'a  $T_{min} = -55$  °C et à  $c = 0.015$

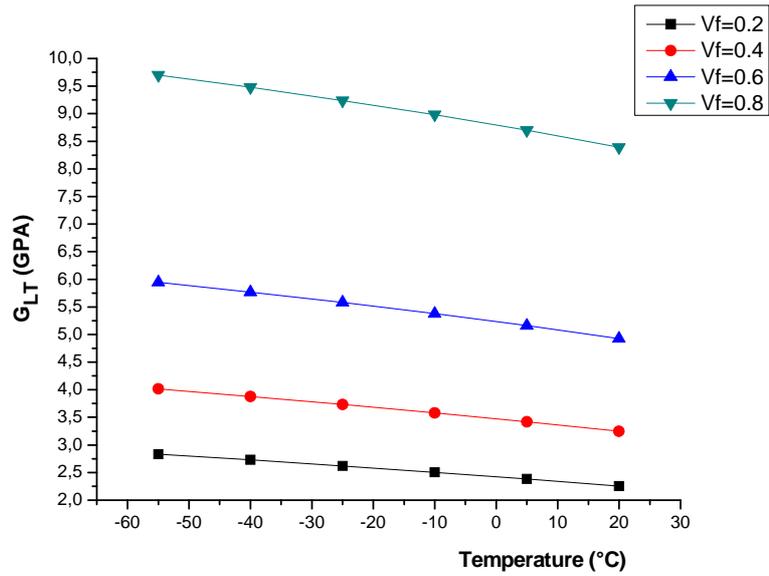


Figure 3.26 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a  $T_{min} = -55$  °C et à  $c = 0.01$

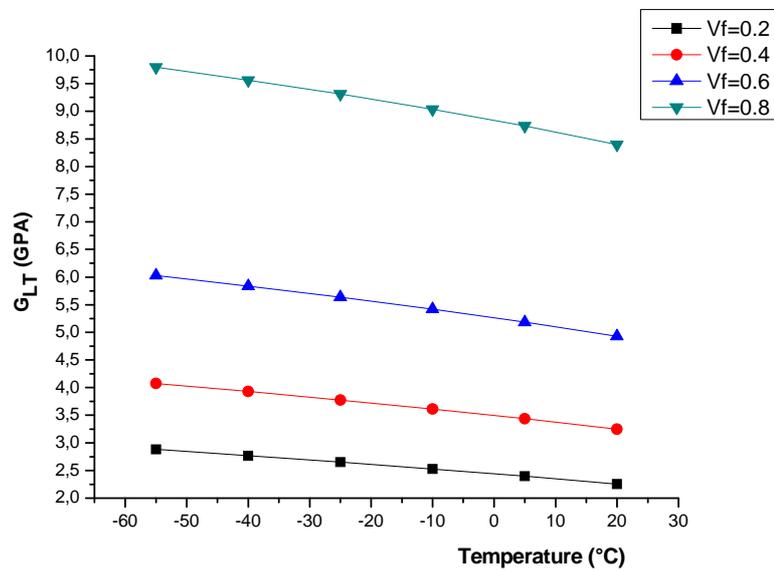


Figure 3.27 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 jusqu'a  $T_{min} = -55$  °C et à  $c = 0.015$

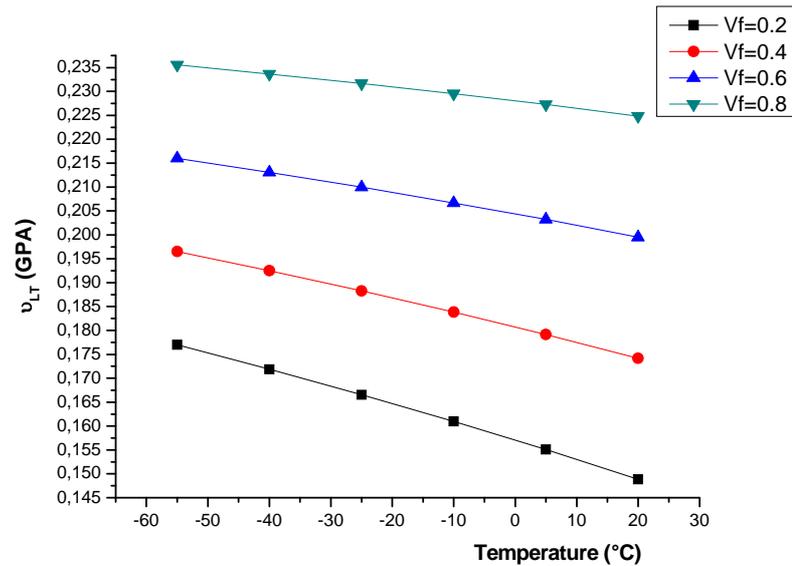


Figure 3.28 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal de pour le T300/5208 jusqu'a  $T_{min} = -55$  °C et à  $c = 0.01$

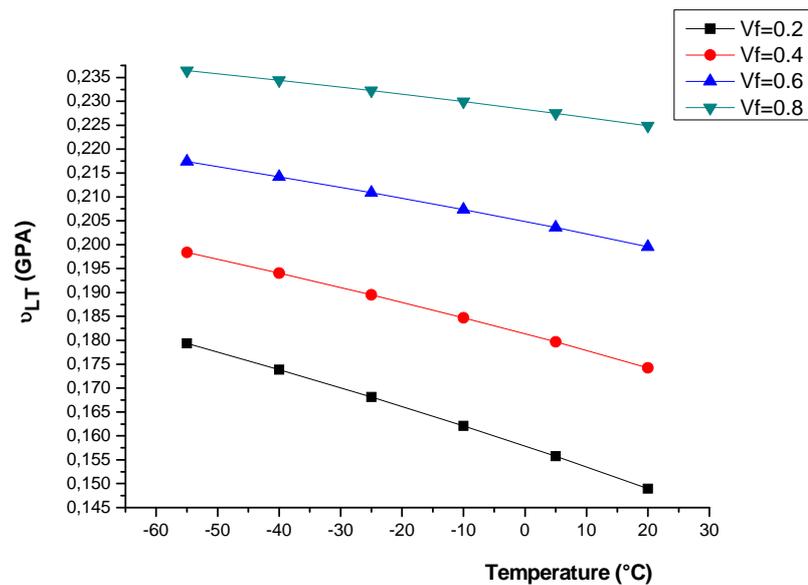


Figure 3.29 : Effet de la variation de la fraction volumique sur le coefficient de poisson longitudinal de pour le T300/5208 jusqu'a  $T_{min} = -55$  °C et à  $c = 0.015$

Les figures 3.22-29 présentent une stagnation des caractéristiques mécaniques de notre composite pour des températures d'utilisation négative, à travers ces graphes on peut dire que les phénomènes de vieillissement sont actifs thermiquement.

### 3.12 Conclusion

Le sous-programme TSAILOC développé dans ce chapitre permet de simuler le vieillissement d'un stratifié à l'aide du modèle de Tsai, et cela pour n'importe quelle condition de température et humidité, nos résultats montrent que pratiquement chaque propriété du matériau est susceptible d'être affectée par un vieillissement humide et thermique.

## CHAPITRE 4

### MECANIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES ET MODELISATION HYGROTHERMIQUE

L'utilisation rationnelle des matériaux composites exige une bonne compréhension et une modélisation quasi réelle de leur propriété directionnelles, l'objectif de ce chapitre, est d'exposer les éléments de base essentiels pour la modélisation dans le domaine des composites, à travers les lois de comportement élastique et hygrothermique pour les composites unidirectionnels, la modélisation hygrothermiques des composites.

#### 4.1 Loi de comportement

Les champs des déformations et des contraintes dans un milieu, sont liés par des lois de comportement caractérisant l'élasticité linéaire du milieu. Ces lois, permettent de rendre compte aux mieux des phénomènes observés, et sont connues sous l'application « lois de hook généralisée » [52],[15].

##### 4.1.1 Matrice de rigidité

La loi de hook généralisée, introduit la matrice de rigidité  $C$  qui est généralement symétrique et décrite par des coefficients indépendants soient des constantes de rigidité

La relation d'élasticité linéaire s'écrit sous la forme matricielle

$$[\sigma_{ij}] = [C_{ij}][\varepsilon_{ij}] \quad i, j = 1, 6 \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{66} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{16} & \dots & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

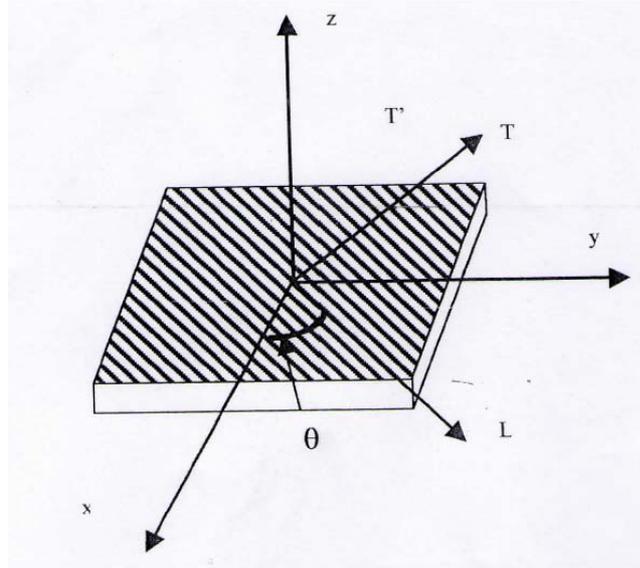


Figure 4.1 : repère principal (LTT') d'une couche et repère du stratifié (X,Y, Z)

## 4.2 Contraintes planes

Les éléments développés précédemment, sont applicables pour la résolution d'un problème quelconque d'élasticité d'un matériau composite .Nous étudions dans ce paragraphe, le problème d'un état de contraintes planes, dont les résultats sont nécessaires à la modélisation du problème étudié.

### 4.2.1 Etat de contraintes planes

Un état de contraintes planes, est un état de contraintes à deux dimensions, dont la direction z, est la direction principale, le tenseur est caractérisé par :

$$\sigma(M) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

#### 4.2.2 Matrice de rigidité réduite dans les axes principaux

Rapportées aux axes principaux, les relations d'élasticités se mettent sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{LT} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Les constantes de rigidité réduites s'expriment par :

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_L}{1 - \nu_{TL}\nu_{LT}} = \frac{E_L}{1 - \frac{E_T}{E_L}\nu_{LT}^2} \\ Q_{22} &= \frac{E_T}{1 - \nu_{TL}\nu_{LT}} = \frac{E_T}{1 - \frac{E_T}{E_L}\nu_{LT}^2} = \frac{E_T}{E_L} Q_{11} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{LT} E_T}{1 - \nu_{TL}\nu_{LT}} = \nu_{LT} Q_{22} \\ Q_{66} &= G_{LT} \end{aligned} \quad (4.5)$$

#### 4.2.3 Matrice de rigidité réduite hors des axes principaux

Les relations d'élasticités peuvent s'écrire sous l'une des deux formes :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Sachant que les expressions de constantes de rigidité réduites s'expriment :

$$\begin{aligned} Q'_{11} &= Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \\ Q'_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(c^4 + s^4) \\ Q'_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})sc^3 + (Q_{12} - Q_{22} - 2Q_{66})s^3c \\ Q'_{22} &= Q_{11}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{22}c^4 \\ Q'_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})sc^3 \\ Q'_{66} &= [(Q_{11} + Q_{22} - 2(Q_{12} + Q_{66}))s^2c^2] + Q_{66}(c^4 + s^4) \end{aligned} \quad (4.7)$$

### 4.3 Théorie classique des stratifiés

#### 4.3.1 Hypothèses de la théorie classique des stratifiés

La théorie classique des stratifiés utilise un schéma de déplacement , appelée schéma de Kirchoff du premier degré , qui est développé à partir du point de référence  $M_0(x,y,0)$  (équation 4.8 ) , elle utilise également un schéma du premier degré pour les déformations) (équation 4.9 ) , et fait ensuite une hypothèse supplémentaire , qui consiste à négliger le cisaillement transverse, dans ce schéma , les déformations en cisaillement transverse sont nulles soit [51].

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) + z\varphi_x(x, y) \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) + z\varphi_y(x, y) \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y) \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} + z \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} + z \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial w_0}{\partial z} = 0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \left( \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + z \left( \frac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} \right) \\ \gamma_{xz} = 2\varepsilon_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w_0}{\partial x} + \varphi_x \\ \gamma_{yz} = 2\varepsilon_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial w_0}{\partial y} + \varphi_y \end{aligned}$$

$$\gamma_{xz} = 0 \text{ et } \gamma_{yz} = 0$$

Cette hypothèse implique d'après (l'équation 4.9) :

$$\begin{aligned} \varphi_x(x, y) &= -\frac{\partial w_0}{\partial x} \\ \varphi_y(x, y) &= -\frac{\partial w_0}{\partial y} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Le champ de déplacement, s'écrit alors, d'après (l'équation 4.8) :

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x}(x, y) \\
 v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y}(x, y) \\
 w(x, y, z) &= w_0(x, y)
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

La déformée de la normale au plan moyen (Oxy), est alors un segment de droite normale à la déformée du plan moyen, l'ensemble des notations est schématisé sur la figure 4.2.

#### 4.3.2 Expression du champ des déformations

Le champ des déformations s'écrit d'après (l'équation 4.9), et en tenant compte de (l'équation 4.10) :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\
 \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\
 \gamma_{xy} &= \left( \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \\
 \gamma_{xz} &= 0 \\
 \gamma_{yz} &= 0
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Le tenseur des déformations en un point M est :

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

La matrice de déformations, se réduit à trois composantes non nulles :

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

Finalement le champ des déformations est la superposition :

-Des déformations en membrane :

$$\varepsilon_m(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

S'exprimant exclusivement, en fonction des déplacements ( $u_0, v_0$ ) dans le plan (oxy) des points de ce plan.

- Des déformations en flexion et torsion :

$$\varepsilon^f(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^f \\ \varepsilon_{yy}^f \\ \gamma_{xy}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

S'exprimant, en fonction des angles de rotation de la déformée du plan moyen, et de la cote  $z$  du point  $M$  généralement, les déformations en flexion et torsion s'expriment suivant la relation :

$$\varepsilon^f(M) = z.k(x, y) \quad (4.17)$$

Avec :

$$K(x, y) = \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

La matrice  $K(x,y)$  est appelée matrice de courbures de la plaque sollicitée en flexion ,les angles de rotation de la déformée du plan moyen au point  $H(x,y,0)$ , s'expriment en fonction du déplacement transversal  $w_0(x,y)$  de ce point (Figure 4.2 ) par :

$$\begin{aligned}\varphi_x &= \frac{\partial w_0}{\partial y} \\ \varphi_y &= \frac{\partial w_0}{\partial x}\end{aligned}\quad (4.19)$$

Le champ des déplacements (l'équation 4.11), s'écrit alors :

$$\begin{aligned}u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z\varphi_y \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z\varphi_x \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y)\end{aligned}\quad (4.20)$$

Finalement, le champ des déformations s'écrit

$$\varepsilon(M) = \varepsilon_m(M) + \varepsilon_f(M) \quad (4.21)$$

Où

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Avec

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx}^0 &= \frac{\partial u_0}{\partial x}(x, y), \varepsilon_{yy}^0 = \frac{\partial v_0}{\partial y}(x, y), \gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \\ K_x &= -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}(x, y), K_y = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}(x, y), K_{xy} = -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}(x, y)\end{aligned}\quad (4.23)$$

Le champ des déformations s'écrit donc :

$$\varepsilon(M) = \varepsilon(x, y, z) = \varepsilon_m(x, y) + zK(x, y) \quad (4.24)$$

Les fonctions  $\varepsilon_m(x,y)$  et  $K(x,y)$ , ne dépendent que des coordonnées  $(x,y)$  du point H du plan moyen du stratifié .

### 4.3.3 Champ des contraintes

#### 4.3.3.a Forme du champ des contraintes

Le champ des contraintes est obtenu à partir de la relation (4.6). Dans le cadre de la théorie classique des stratifiés, nous obtenons, pour la couche k :

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= Q'_{11} \varepsilon_{xx} + Q'_{12} \varepsilon_{yy} + Q'_{16} \gamma_{xy} \\
 \sigma_{yy} &= Q'_{12} \varepsilon_{xx} + Q'_{22} \varepsilon_{yy} + Q'_{26} \gamma_{xy} \\
 \sigma_{xy} &= Q'_{16} \varepsilon_{xx} + Q'_{26} \varepsilon_{yy} + Q'_{66} \gamma_{xy} \\
 \sigma_{yz} &= 0 \\
 \sigma_{xz} &= 0
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Le tenseur des contraintes en M, est donc de la forme :

$$\sigma(M) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

Le champ des contraintes, se réduit aux seuls contraintes en membrane  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$

#### 4.3.3.b Expression des contraintes

Les relations (4.25), montrent que les contraintes dans la couche k, s'expriment par :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_k = Q'_k \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \tag{4.27}$$

Avec :

$$Q'_k = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_k \tag{4.28}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon^0_{xx} \\ \varepsilon^0_{yy} \\ \gamma^0_{xy} \end{bmatrix}_k + z \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}_k \quad (4.29)$$

Soit :

$$\sigma_k(M) = \sigma_k(x, y, z) = Q'_k \varepsilon_m(x, y) + z Q'_k k(x, y) \quad (4.30)$$

$\sigma_k(M)$  représente la matrice des contraintes dans la couche  $k$  :  $h_{k-1} \leq z \leq h_k$ . la matrice de rigidité réduite  $Q'_k$ , varie d'une couche à l'autre. Il en résulte donc une discontinuité du champ des contraintes entre couches successives.

#### 4.3.4 Expression des résultantes et moments

##### 4.3.4.a Résultantes en membrane

Le champ des résultantes en membrane, note  $N(x, y)$ , est défini par :

$$N(x, y) = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_k(M) dz \quad (4.31)$$

Soit dans la stratifié :

$$N(x, y) = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} \int_{h_{i-1}}^{h_i} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_i dz \quad (4.32)$$

L'expression (4.22), associée à la relation (4.29) ou (4.30), conduit à l'expression des résultantes en membrane, dans le cadre de la théorie classique des stratifiés, nous obtenons :

$$\begin{aligned} N(x, y) &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [Q'_i \varepsilon_m(x, y) + z_i Q'_i k(x, y)] dz \\ N(x, y) &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} \left[ Q'_i \varepsilon_m(x, y) \int_{h_{i-1}}^{h_i} dz \right] + \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} \left[ Q'_i k(x, y) \int_{h_{i-1}}^{h_i} z_i dz \right] \\ N(x, y) &= \left[ \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (h_i - h_{i-1}) Q'_i \right] \varepsilon_m(x, y) + \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (h_i^2 - h_{i-1}^2) Q'_i \right] k(x, y) \end{aligned} \quad (4.33)$$

Soit en définitive :

$$N(x, y) = A\varepsilon_m(x, y) + Bk(x, y) \quad (4.34)$$

En introduisant les matrices :

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (h_i - h_{i-1}) Q'_i \\ A_{ij} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (h_i - h_{i-1}) (Q'_{ij})_i \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (h^2_i - h^2_{i-1}) (Q'_{ij})_i \end{aligned} \quad (4.35)$$

L'expression développée des résultats, s'écrit donc :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0_{xx} \\ \varepsilon^0_{yy} \\ \gamma^0_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Ces équations montrent , que dans le cas d'un stratifié , les résultantes en membrane ( $N_x, N_y, N_{xy}$ ) , ne sont pas seulement fonctions des déformations en membrane , mais sont également fonctions ,des déformations en flexion et en torsion .

#### 4.3.4.b Moment de flexion et de torsion

Les moments de flexion et de torsion, sont définis par :

$$M_f(x, y) = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} \int_{h_{i-1}}^{h_i} z \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_i dz \quad (4.37)$$

$M_x$  et  $M_y$  sont les moments de flexion, et  $M_{xy}$  les moments de torsion, ils sont schématisés en figure 4.3. Le champ des moments s'explique en introduisant l'expression (4.9) des contraintes dans l'expression (4.37), soit :

$$M_f(x, y) = \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [z_i Q'_i \varepsilon_m(x, y) + z_i^2 Q'_i k(x, y)] dz \quad (4.38)$$

Où

$$M_f(x, y) = \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (h_i^2 - h_{i-1}^2) Q'_i \right] \varepsilon_m(x, y) + \left[ \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (h_i^3 - h_{i-1}^3) Q'_i \right] k(x, y) \quad (4.39)$$

Soit :

$$M_f(x, y) = B \varepsilon_m(x, y) + D k(x, y) \quad (4.40)$$

En introduisant la nouvelle matrice :

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (h_i^3 - h_{i-1}^3) (Q'_{ij})_i \quad (4.41)$$

L'expression développée des moments, s'écrit sous la forme :

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Les moments de flexion et de torsion, sont donc des fonctions des courbures en flexion et en torsion, mais sont également fonctions des déformations en membrane.

#### 4.3.5 Equation du comportement mécanique d'un stratifié

##### 4.3.5.a Equation constitutive

L'équation constitutive d'une plaque stratifiée, exprime les résultantes et moments en fonction des déformations en membrane et des courbures, elle s'obtient en regroupant les expressions (4.36) et (4.42), suivant une seule écriture matricielle sous la forme [51] [15].

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Soit, sous forme contractée :

$$\begin{bmatrix} N \\ - \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & | & B \\ - & - & - \\ B & | & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_m \\ - \\ k \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

Les termes des matrices introduites, sont donnés par les expressions (4.35),(4.41). Il peuvent être également exprimés en introduisant, l'épaisseur  $e_i$ , et la cote  $z_i$  du centre de la sous couche  $i$ , sous la forme :

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{ij})_i e_i \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{ij})_i e_i z_i \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{ij})_i \left( e_i z_i^2 + \frac{e_i^3}{12} \right) \end{aligned} \quad (4.45)$$

Les coefficient  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$ ,  $D_{ij}$  de l'équation constitutive (4.43) d'un stratifié, s'expriment donc à partir des constantes de rigidité réduites des couches, obtenues pour chaque couche en fonction des relations (4.5), et des expressions (4.7).

#### 4.3.5.b Matrice de rigidité

La matrice intervenant dans l'expression (4.43), est la matrice de rigidité du stratifié décrivant le comportement élastique macroscopique du stratifié au point

$M_0(x,y)=M(x,y,0)$ , la matrice A est la matrice de rigidité en membrane , D est la matrice de rigidité en flexion , et B la matrice de couplage membrane flexion torsion.

Divers couplage peuvent être observés, le couplage traction-cisaillement provient des termes  $A_{16}$  et  $A_{26}$  .Le couplage membrane-flexion résulte des termes  $B_{11}$ ,  $B_{12}$ ,  $B_{22}$ , alors que le couplage membrane-torsion résulte des termes  $B_{16}$  et  $B_{26}$ , enfin le couplage flexion-torsion résulte des coefficients  $D_{16}$  et  $D_{26}$ .

#### 4.3.5.b Matrice de rigidité

Les stratifiés multidirectionnels, étant caractérisés par une discontinuité de contraintes dans les plis, il est préférable de travailler avec les déformations, qui sont continues à travers l'épaisseur.

L'intervention de l'équation, (4.43) permet d'exprimer les déformations en membrane et en courbures.

#### 4.3.6.a Déformations en membrane et courbures

L'expression des déformations en fonction des caractéristiques du stratifié, et des efforts et moments extérieurs est :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ - \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} & | & b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} & | & b_{12} & b_{22} & b_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} & | & b_{16} & b_{26} & b_{66} \\ - & - & - & | & - & - & - \\ c_{11} & c_{12} & c_{16} & | & d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{26} & | & d_{12} & d_{22} & d_{26} \\ c_{16} & c_{26} & c_{66} & | & d_{16} & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ - \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

Où

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ - \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & | & b \\ - & - & - \\ c & | & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ - \\ M \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

#### 4.3.6.b Champ des déformations

Le champ des déformations au point (x, y, z) à l'aide de l'expression (4.22) s'exprime :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z_i \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

On remarque une variation linéaire suivant l'épaisseur.

Les déformations, exprimées dans les axes principaux de la couche d'orientation (figure4.1) s'expriment :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix}_i = T \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_i \quad (4.49)$$

Avec T,

$$T = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & sc \\ s^2 & c^2 & -sc \\ -2sc & 2sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

#### 4.3.6.c Champ des contraintes

Le champ des contraintes dans le repère XYZ, est donné par l'équation (4.6) :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_i \quad (4.51)$$

Le champ des contraintes dans le repère LT :

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix}_i = T' \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_i \quad (4.52)$$

Avec :

$$T' = [T(-\theta)]^t = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Soit finalement,

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{LT} \end{bmatrix}_i \quad (4.54)$$

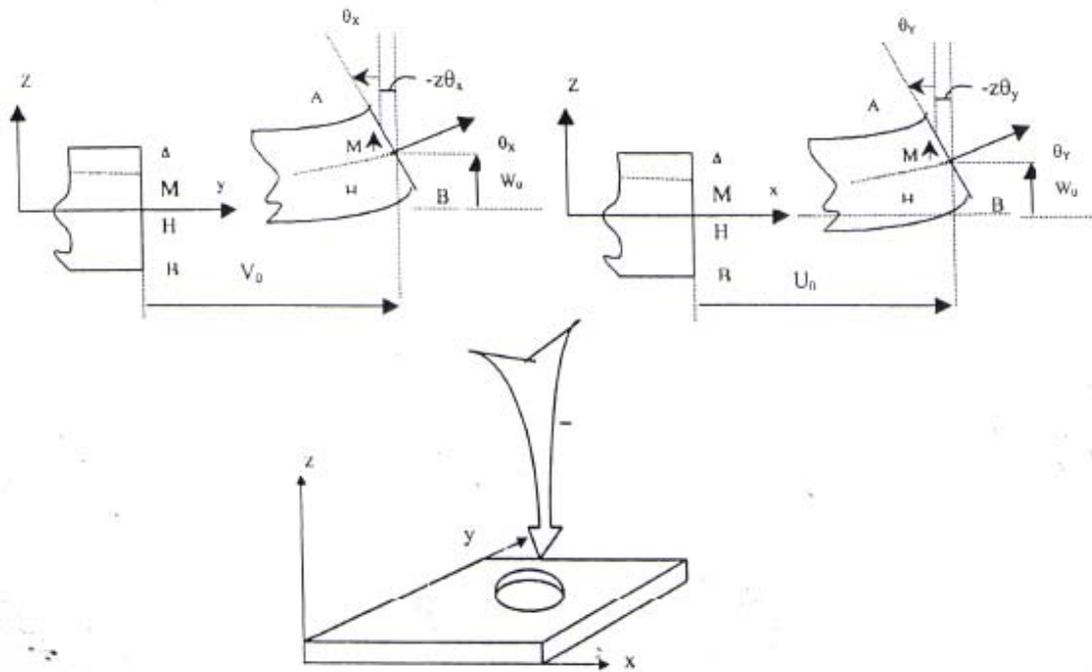


Figure 4.2 : Schématisation des déformations dans la théorie classique des stratifiés

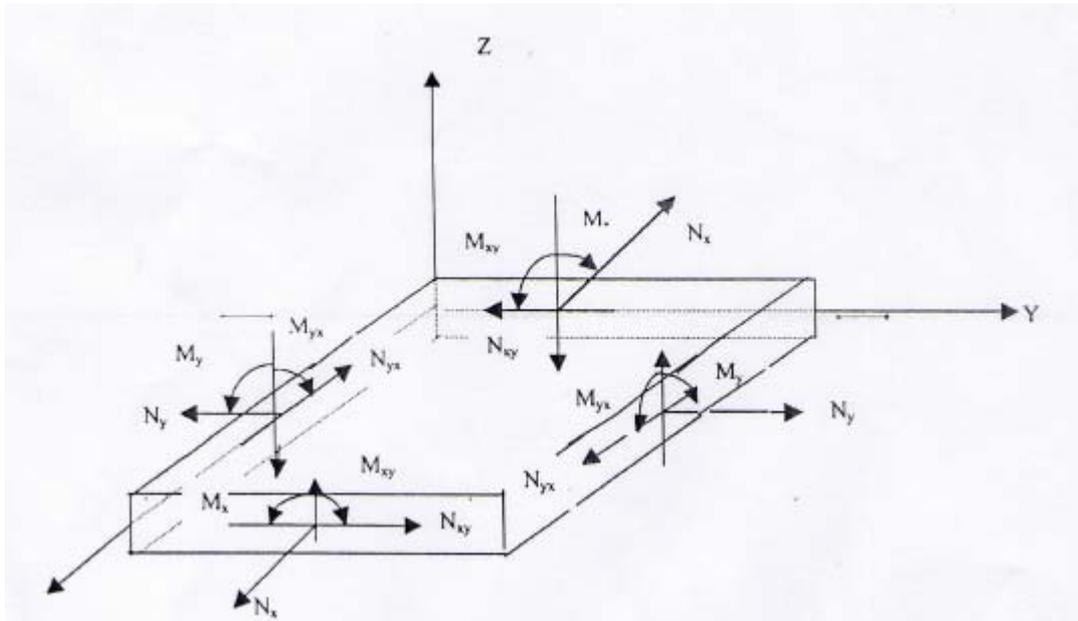


Figure 4.3 : Schématisation des résultantes en membrane des actions exercées sur un élément du stratifié, et des moments de flexion et de torsion

#### 4.3.7 Equations du comportement des stratifiés tenant compte des phénomènes de dilatation

Dans cette partie nous examinons de quelles manières sont modifiées les équations de comportement, dans le cas où l'on tient compte des phénomènes de dilatations, et les conséquences induites, sur le comportement mécanique des structures composites considéré [51] [15].

##### 4.3.7.a Coefficient d'expansion thermique et hygroscopique pour les unidirectionnels

Le coefficient hygrothermique des stratifiés unidirectionnels est caractérisé par : deux coefficients d'expansion thermique  $\alpha_L$  et  $\alpha_T$ , et deux coefficients d'expansion hygroscopique  $\beta_L$  et  $\beta_T$ , qui sont reliés aux propriétés des constituants [15].

Les coefficients d'expansion hygrothermique, sont obtenus par mesure des déformations en fonction de la température, les coefficients  $\alpha_L$  et  $\alpha_T$  ne sont pas constants, et varient avec la température.

Dans le repère (x, y) :

Les coefficients de dilatation thermique s'expriment :

$$\begin{aligned}\alpha_x &= \alpha_L c^2 + \alpha_T s^2 \\ \alpha_y &= \alpha_L s^2 + \alpha_T c^2 \\ \alpha_{xy} &= 2(\alpha_L - \alpha_T)cs\end{aligned}\tag{4.55}$$

Et les coefficients d'expansion hygroscopique sont :

$$\begin{aligned}\beta_x &= \beta_L c^2 + \beta_T s^2 \\ \beta_y &= \beta_L s^2 + \beta_T c^2 \\ \beta_{xy} &= 2(\beta_L - \beta_T)cs\end{aligned}\tag{4.56}$$

avec :

$$c = \cos(\theta) \quad \text{et} \quad s = \sin(\theta)\tag{4.57}$$

#### 4.3.7.b Déformations hygrothermiques dans les stratifiés unidirectionnels

Lorsque le stratifié est soumis à un changement de température et d'humidité dans un environnement quelconque, alors  $\Delta T = T - T_0$  et  $\Delta C = C - C_0$ , ou  $T_0$  et  $C_0$  sont les conditions de l'état de référence hygrothermique [14].

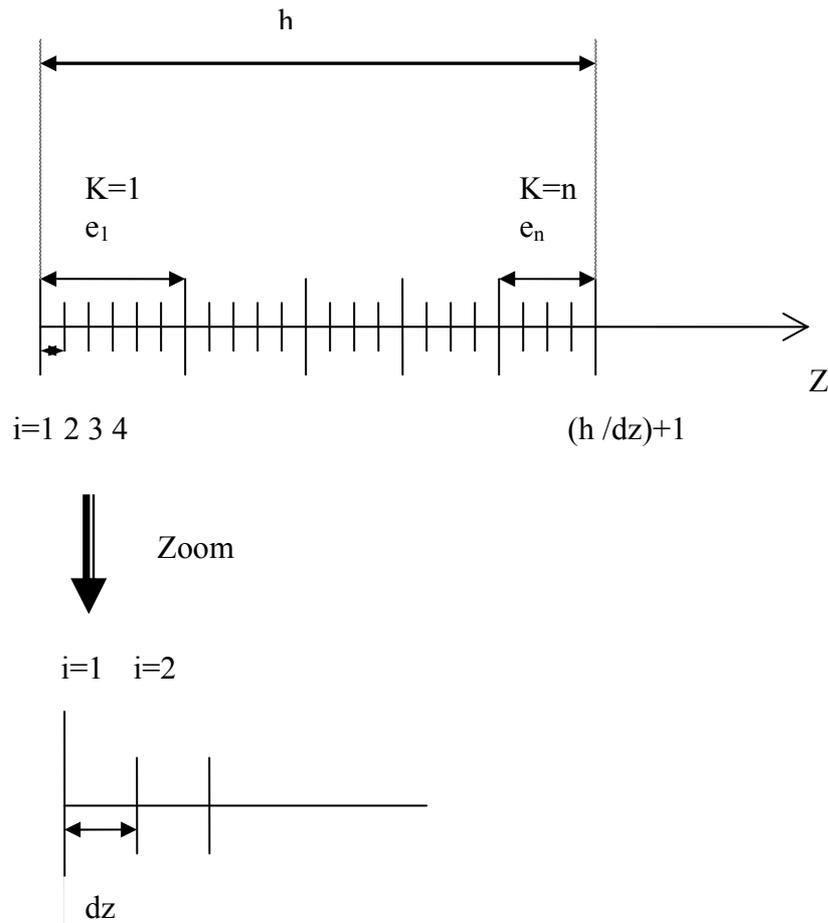


Figure 4.4 : Subdivision des couches en sous couches.

Les déformations hygrothermiques, dans les axes principaux du stratifié sont :

$$\begin{aligned}
 e_L(i) &= \varepsilon_L^{ht}(i) = \alpha_L \Delta T + \beta_L \Delta C(i) \\
 e_T(i) &= \varepsilon_T^{ht}(i) = \alpha_T \Delta T + \beta_T \Delta C(i) \\
 e_{LT}(i) &= \varepsilon_{LT}^{ht}(i) = 0
 \end{aligned}
 \tag{4.58}$$

Les déformations hygrothermiques, dans les axes du stratifié sont définis par :

$$\begin{aligned}
 e_x(i) &= \varepsilon_x^{ht}(i) = \alpha_x \Delta T + \beta_x \Delta C(i) \\
 e_y(i) &= \varepsilon_y^{ht}(i) = \alpha_y \Delta T + \beta_y \Delta C(i) \\
 e_s(i) &= \varepsilon_s^{ht}(i) = \alpha_{xy} \Delta T + \beta_{xy} \Delta C(i)
 \end{aligned}
 \tag{4.59}$$

### 4.3.7.c Relations hygrothermoélastiques contraintes et déformations

Lorsque un stratifié multidirectionnel, est assujéti à des chargements mécanique [N] et [M], et hygrothermiques ( $\Delta T$  et  $\Delta C$ ), l'état principal hygrothermoélastiques  $[\varepsilon]_{xy}^k$  dans le stratifié, est égale à la somme des déformations produites par les contraintes dans le stratifié.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xs} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{ys} \\ S_{sx} & S_{sy} & S_{ss} \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_s \end{bmatrix}_i \quad (4.60)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} - e_x \\ \varepsilon_{yy} - e_y \\ \gamma_{xy} - e_s \end{bmatrix}_i \quad (4.61)$$

En introduisant l'équation (4.22) :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 + z_i k_x - e_x \\ \varepsilon_y^0 + z_i k_y - e_y \\ \gamma_s^0 + z_i k_s - e_s \end{bmatrix}_i \quad (4.62)$$

Soit finalement :

$$[\sigma]_{x,y}^i = [Q]_{x,y}^i [\varepsilon^0]_{x,y} + [Q]_{x,y}^i [k]_{x,y} z_i - [Q]_{x,y}^i [e]_{x,y}^i \quad (4.63)$$

L'intégration des contraintes à partir de l'équation (4.62), à travers l'expression de chaque sous couche, donne la résultante en force :

$$\begin{aligned} [N]_{x,y} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [\sigma]_{x,y}^i dz \\ [N]_{x,y} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} [Q]_{x,y}^i \left\{ [\varepsilon^0]_{x,y} + z_i [k]_{x,y} - [e]_{x,y}^i \right\} dz \end{aligned} \quad (4.64)$$

Ce qui donne :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix}_k = \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} \int_{h_{i-1}}^{h_i} \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_i \left\{ \begin{bmatrix} \varepsilon^0_x \\ \varepsilon^0_y \\ \gamma^0_{xy} \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_{xy} \end{bmatrix} \right\} dz \quad (4.65)$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0_{xx} \\ \varepsilon^0_{yy} \\ \gamma^0_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_x^{HT} \\ N_y^{HT} \\ N_{xy}^{HT} \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

[A] et [B] , sont les matrices de rigidité définies en (4.35).  $[N^{HT}]_{x,y}$  représentent les résultantes des forces hydrothermiques :

$$\begin{bmatrix} N_x^{HT} \\ N_y^{HT} \\ N_{xy}^{HT} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_s \end{bmatrix}_i t_i \quad (4.67)$$

$t_i=dz=h_i-h_{i-1}$ , est l'épaisseur de la sous couche i.

Les moments résultants à travers les plis du stratifié sont délivrés à partir de l'équation (4.62).

$$\begin{aligned} [M]_{x,y} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [\sigma]_{x,y}^i z_i dz \\ [M]_{x,y} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} [Q]_{x,y}^i \left\{ [\varepsilon^0]_{x,y} + z_i [k]_{x,y} - [e]_{x,y}^i \right\} z_i dz \end{aligned} \quad (4.68)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0_{xx} \\ \varepsilon^0_{yy} \\ \gamma^0_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_x^{HT} \\ M_y^{HT} \\ M_{xy}^{HT} \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

[B] et [D] sont les matrices de rigidité définie en (4.35) (4.41).  $[M^{HT}]_{x,y}$  , sont les moments hydrothermiques définis comme suit :

$$\begin{bmatrix} M_x^{HT} \\ M_y^{HT} \\ M_{xy}^{HT} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_s \end{bmatrix}_i z_i t_i \quad (4.70)$$

Les équations (4.66) et (4.69) sont réécrites sous la forme :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_x^{HT} \\ N_y^{HT} \\ N_{xy}^{HT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{N}_x \\ \overline{N}_y \\ \overline{N}_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.71)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_x^{HT} \\ M_y^{HT} \\ M_{xy}^{HT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{M}_x \\ \overline{M}_y \\ \overline{M}_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.72)$$

Finalement en bref ,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \overline{N} \end{bmatrix}_{x,y} &= \begin{bmatrix} N \end{bmatrix}_{x,y} + \begin{bmatrix} N^{HT} \end{bmatrix}_{x,y} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \end{bmatrix}_{x,y} + \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k \end{bmatrix}_{x,y} \\ \begin{bmatrix} \overline{M} \end{bmatrix}_{x,y} &= \begin{bmatrix} M \end{bmatrix}_{x,y} + \begin{bmatrix} M^{HT} \end{bmatrix}_{x,y} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \end{bmatrix}_{x,y} + \begin{bmatrix} D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k \end{bmatrix}_{x,y} \end{aligned} \quad (4.73)$$

[N] et [M] sont respectivement, les résultantes en forces et en moment, égales respectivement à la somme des composantes mécaniques et hygrothermiques.

L'équation (4.73) se met sous la forme contractée :

$$\begin{bmatrix} N \\ - \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & | & B \\ - & - & - \\ B & | & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ - \\ k \end{bmatrix} \quad (4.74)$$

Les relations forces déformations et contraintes déformations, sont identiques à ceux dérivées pour le chargement mécanique (4.44), à la seule différence ; c'est que les forces et moments hygrothermiques, sont ajoutés aux forces et moments mécaniques appliqués.

#### 4.3.7.e Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles, sont introduites dans les stratifiés multidirectionnels durant la fabrication. Sur le plan microscopique, les contraintes résiduelles sont introduites

dans les couches unidirectionnelles autour des fibres, à cause des imperfections dans les propriétés thermiques des constituants. Des contraintes résiduelles sont aussi développées dans les couches à cause de l'anisotropie sur le plan macroscopique.

En l'absence de forces externes appliquées,  $[N]=0$  et  $[M]=0$  ; les relations hygrothermiques (4.71) et (4.72) se réduisent à :

$$\begin{bmatrix} N_x^{HT} \\ N_y^{HT} \\ N_{xy}^{HT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.75)$$

$$\begin{bmatrix} M_x^{HT} \\ M_y^{HT} \\ M_{xy}^{HT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.76)$$

L'intervention de ces relations, donne les déformations en membrane  $[\varepsilon^0]$  et courbures  $[k]$ , produits par un changement hygrothermique seulement. Dans ce cas ces déformations sont aussi appelées, les déformations non mécaniques.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x^{HT} \\ N_y^{HT} \\ N_{xy}^{HT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ b_{12} & b_{22} & b_{26} \\ b_{16} & b_{26} & b_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x^{HT} \\ M_y^{HT} \\ M_{xy}^{HT} \end{bmatrix} \quad (4.77)$$

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{26} \\ c_{16} & c_{26} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x^{HT} \\ N_y^{HT} \\ N_{xy}^{HT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ d_{12} & d_{22} & d_{26} \\ d_{16} & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x^{HT} \\ M_y^{HT} \\ M_{xy}^{HT} \end{bmatrix} \quad (4.78)$$

Les déformations hygrothermiques dans la sous couche  $i$  sont obtenues par l'équation (4.22) :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z_i \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

Les déformations résiduelles dans chaque sous couche  $i$  sont données par :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_{i \text{ résiduelles}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_s \end{bmatrix}_i \quad (4.80)$$

Les contraintes résiduelles dans chaque sous couche  $i$  sont données par :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_{i \text{ résiduelles}} = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \varepsilon_{xe} \\ \varepsilon_{ye} \\ \gamma_{se} \end{bmatrix}_{i \text{ résiduelles}} \quad (4.81)$$

#### 4.3.7.f Analyse des stratifiés multidirectionnels

Les effets hygrothermiques représentent la superposition de l'effet de température et de l'humidité .

Les efforts et les moments hygrothermiques sont définis par :

$$\begin{aligned} N_x^{HT} &= N_x^H + N_x^T \\ N_y^{HT} &= N_y^H + N_y^T \\ N_{xy}^{HT} &= N_{xy}^H + N_{xy}^T \end{aligned} \quad (4.82)$$

$$\begin{aligned} M_x^{HT} &= M_x^H + M_x^T \\ M_y^{HT} &= M_y^H + M_y^T \\ M_{xy}^{HT} &= M_{xy}^H + M_{xy}^T \end{aligned} \quad (4.83)$$

Avec :

$$\begin{aligned} N_x^{HT} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{11} \alpha_x + Q'_{12} \alpha_y + Q'_{16} \alpha_{xy}) \Delta T t_i + \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{11} \beta_x + Q'_{12} \beta_y + Q'_{16} \beta_{xy}) \Delta C(i) t_i \\ N_y^{HT} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{12} \alpha_x + Q'_{22} \alpha_y + Q'_{26} \alpha_{xy}) \Delta T t_i + \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{12} \beta_x + Q'_{22} \beta_y + Q'_{26} \beta_{xy}) \Delta C(i) t_i \\ N_{xy}^{HT} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{16} \alpha_x + Q'_{26} \alpha_y + Q'_{66} \alpha_{xy}) \Delta T t_i + \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{16} \beta_x + Q'_{26} \beta_y + Q'_{66} \beta_{xy}) \Delta C(i) t_i \\ M_x^{HT} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{11} \alpha_x + Q'_{12} \alpha_y + Q'_{16} \alpha_{xy}) \Delta T t_i z_i + \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{11} \beta_x + Q'_{12} \beta_y + Q'_{16} \beta_{xy}) \Delta C(i) t_i z_i \\ M_y^{HT} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{12} \alpha_x + Q'_{22} \alpha_y + Q'_{26} \alpha_{xy}) \Delta T t_i z_i + \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{12} \beta_x + Q'_{22} \beta_y + Q'_{26} \beta_{xy}) \Delta C(i) t_i z_i \\ M_{xy}^{HT} &= \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{16} \alpha_x + Q'_{26} \alpha_y + Q'_{66} \alpha_{xy}) \Delta T t_i z_i + \sum_{i=1}^{(h/dz)+1} (Q'_{16} \beta_x + Q'_{26} \beta_y + Q'_{66} \beta_{xy}) \Delta C(i) t_i z_i \end{aligned} \quad (4.84)$$

#### 4.4 Analyse unidimensionnelle

Soit une plaque d'épaisseur  $h$ , exposée à la même humidité sur ses six faces. Les directions suivant  $x$  et  $y$  sont infinies, le contenu de l'humidité et de la température dans la plaque varie suivant  $z$ .

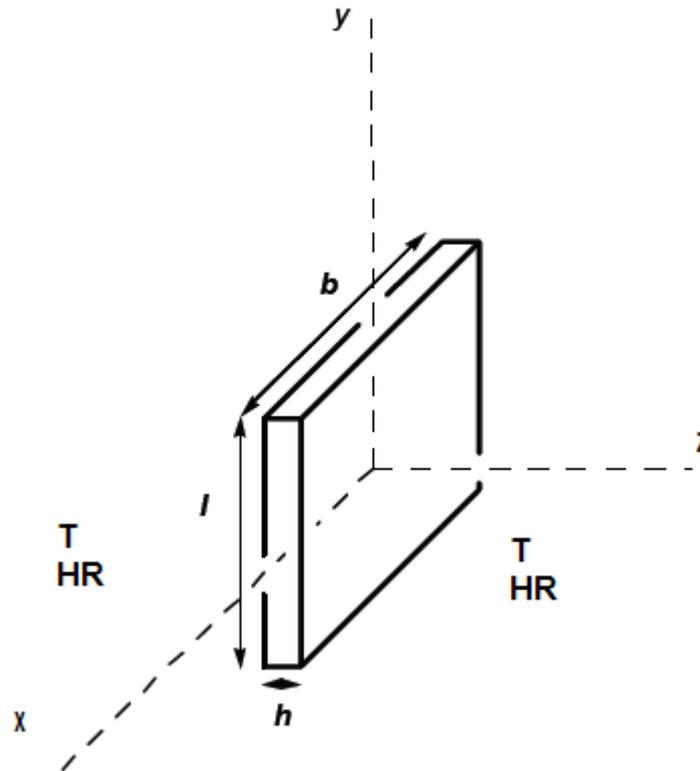


Figure 4.5 : Géométrie représentative d'une plaque mince.

La distribution de concentration est décrite par l'équation de Fick :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} D_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (4.85)$$

Les conditions initiales et les conditions aux limites pour le cas d'absorption sont :

$$t = 0 \quad -\frac{h}{2} < z < \frac{h}{2} \quad \longrightarrow C = C_0$$

$$t = 0 \quad z = \pm \frac{h}{2} \quad \longrightarrow C = C_s \quad (4.86)$$

Springer [59] démontra que la température approche l'équilibre  $10^6$  fois plus vite que la concentration d'humidité .par exemple, pour une plaque composite d'épaisseur 12.7mm, type graphite fibrille T-300/1034, exposé à 90% d'air humide et à une température de 350°K, la température à travers la plaque devient uniforme au bout de 15 secondes ; cependant la concentration atteint l'équilibre au bout de 13 ans. C'est ainsi que dans plusieurs applications, la température à l'intérieur du matériau peut être prise comme étant, la température ambiante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (4.87)$$

La solution de l'équation différentielle pour le cas d'absorption est donnée par [59] :

$$\frac{C - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \frac{4}{\Pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos \frac{(2n+1)\Pi z}{h} \exp \left[ -\frac{D_z (2n+1)^2 \Pi^2 t}{h^2} \right] \quad (4.88)$$

#### 4.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de détaillé les équations permettant la modélisation hygrothermiques des composites, ce qui permet de passer a la prochaine étape qui est l'élaboration du code de calcul AGINGMAT.

## **CHAPITRE 5**

### **RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

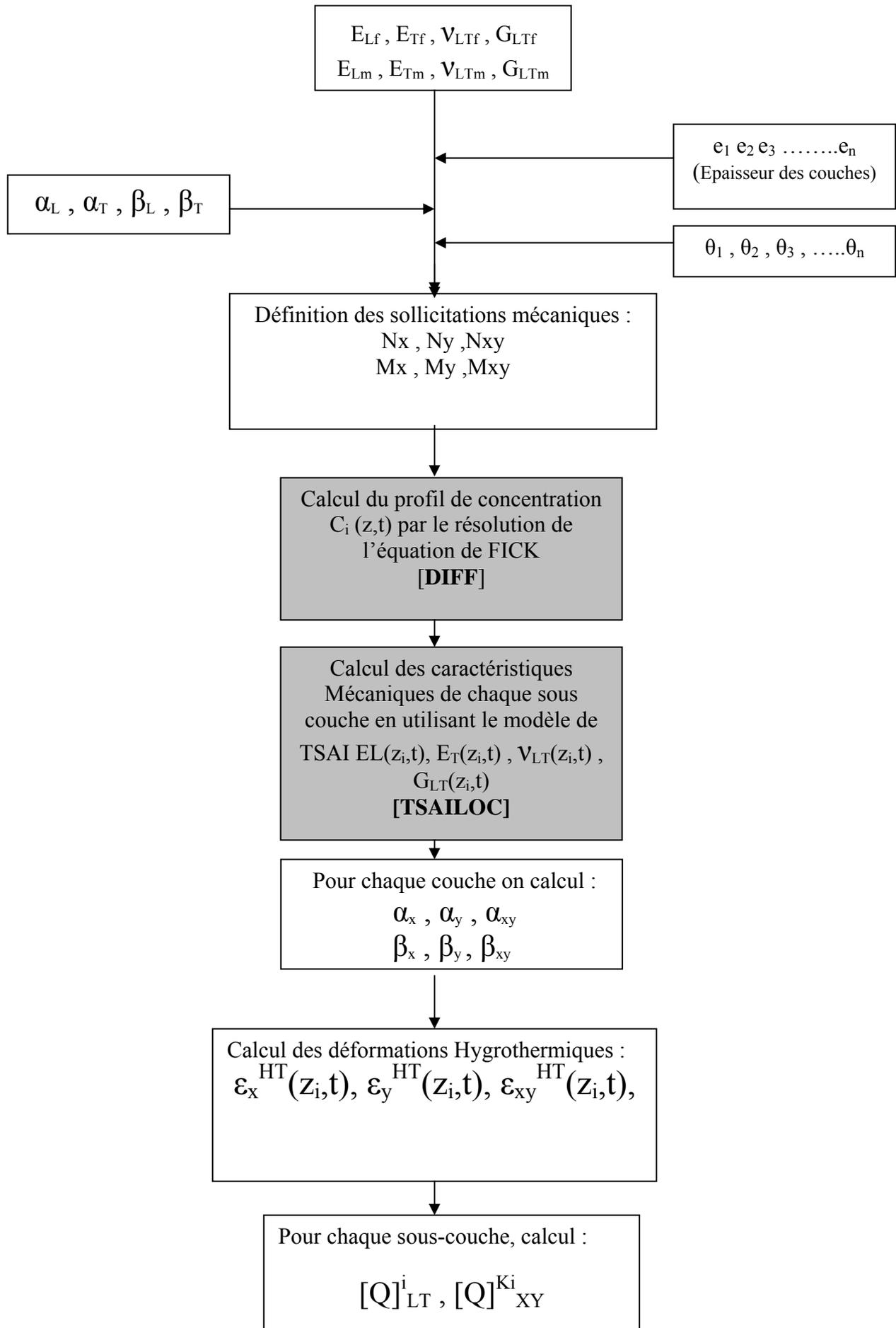
Dans ce chapitre on va présenter les résultats obtenus par la simulation numérique du vieillissement des composites. Durant cette étude un programme Fortran AGINGMAT a été développé afin de simuler le comportement des composites durant le vieillissement hygrothermique en transitoire.

#### 5.1 Organigramme

Notre code de calcul établi correspond à l'organigramme en figure 5.1, il permet de déterminer les comportements hygrothermiques des composites à fibres unidirectionnelles, en phase d'absorption, en transitoire pour la détermination des contraintes résiduelles, c'est le AGINGMAT :

Il est constitué des sous-programmes suivants :

1. TSAILOC : est un sous-programme présenté dans le chapitre 3 qui permet l'évaluation des propriétés mécaniques incluant le vieillissement en fonction du temps à travers le modèle de TSAI.
  
2. DIFF : est un sous programme qui calcul le profil de concentration à travers l'épaisseur du stratifié en fonction du temps,



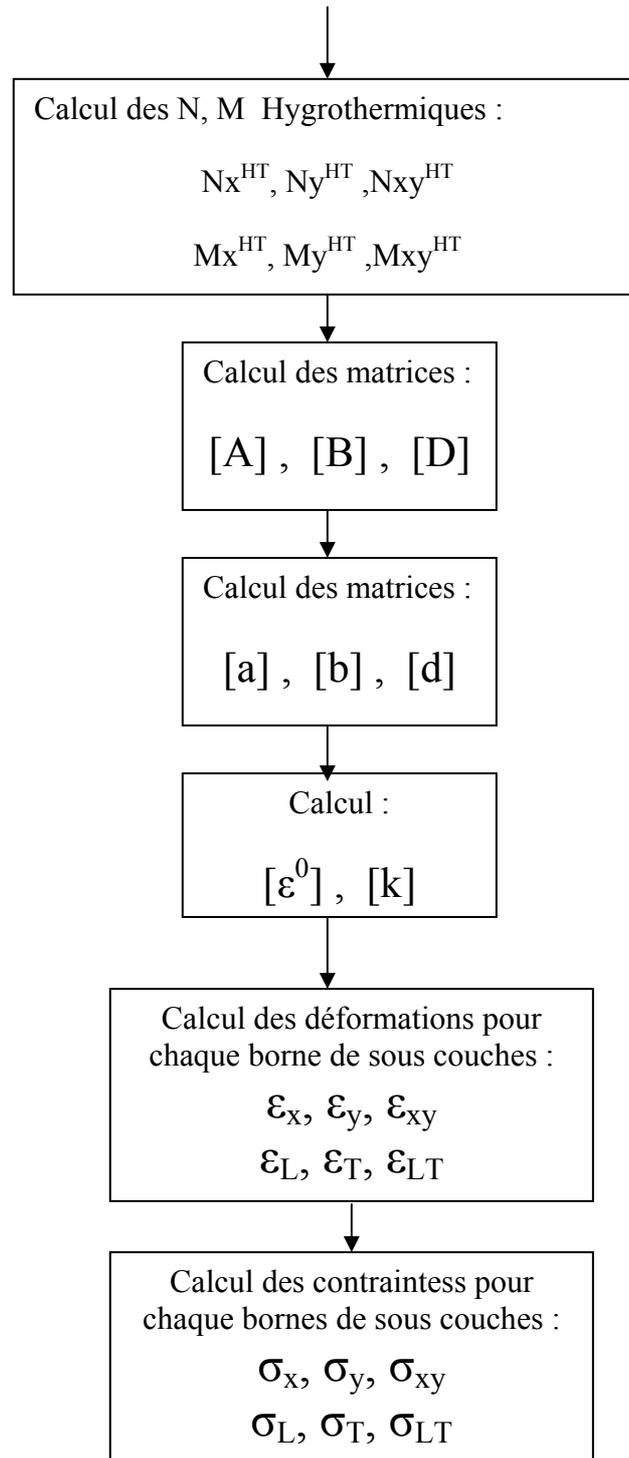


Figure 5.1 : Organigramme AGINGMAT de calcul des contraintes et déformations hydrothermomécaniques.

## 5.2 Influence de la température et humidité sur le phénomène d'absorption

A travers le sous-programme DIFF on a simulé la prise en eau  $M_t$  du T300/5208 donnée par l'équation 5.1 en fonction de la racine carrée du temps d'exposition, pour différents environnements, les résultats obtenus sont représentés dans la figure 5.2.

$$\frac{M_t}{M_s} = 1 - \frac{8}{\Pi^2} * \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} * \exp\left(-D \frac{(2n+1)^2}{h^2} \Pi^2 t\right) \quad (5.1)$$

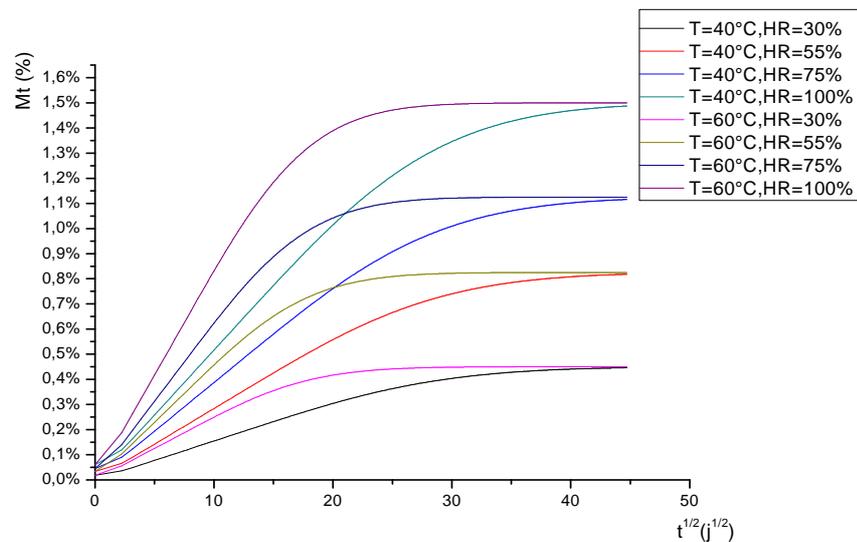


Figure 5.2 : Courbes de prise en eau pour différents environnements pour un modèle de Fick 1D.

Afin d'analyser l'évolution de la diffusion  $D$ , en fonction de la température, la figure 5.3 représente l'évolution de la diffusion  $D$  du T300/5208.

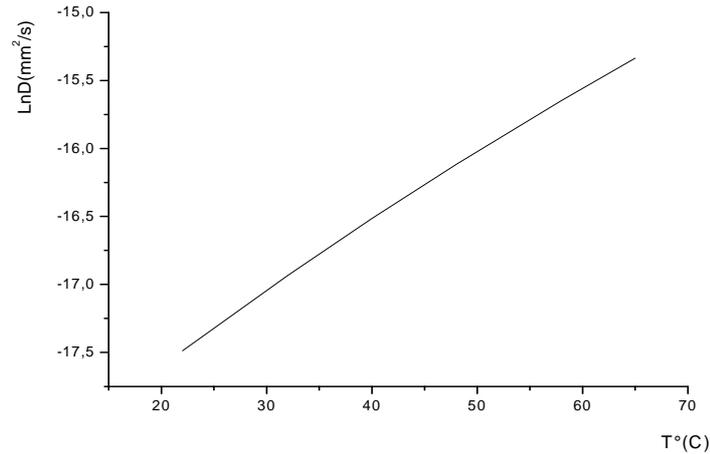


Figure 5.3 : Loi d'Arrhenius appliquée aux coefficients de diffusion obtenus en humidité relative.

Pour une humidité relative donnée, la cinétique d'absorption diffère en fonction de la température. En effet, quelle que soit la température, la quantité d'eau absorbée par le matériau à saturation est la même, ce qui confirme que le phénomène d'absorption d'eau est thermoactive, c'est à dire que plus la température est élevée, plus le plateau de saturation est atteint rapidement.

Il apparaît que pour une température donnée, le coefficient de diffusion n'évolue pas avec le taux d'humidité relative HR. Par contre, le seuil de saturation  $M_s$  augmente avec HR. , il est vérifié que  $M_s$  suit une loi de puissance du type  $M_s = a(HR)^b$  .

### 5.3 Calcul des profils de concentration

Nous considérons un stratifié en graphite/époxy T300/5208 d'épaisseur  $h=5\text{mm}$  placé dans un environnement de température  $T=32^\circ\text{C}$  , et d'humidité  $HR=55\%$  , à travers l'équation de FICK (équation 4.88 ) programmé dans le sous programme DIFF nous calculons les profils de concentration à travers l'épaisseur de la plaque ( $z$ ) pour différentes durées d'exposition pour le cas d'absorption, les résultats de la simulation sont présentés dans la figure 5.4.

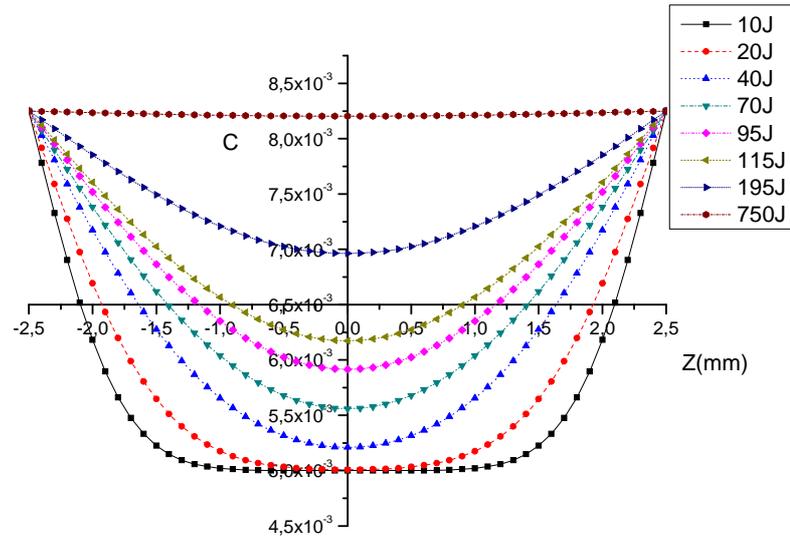


Figure 5.4 : Profils de concentration à travers l'épaisseur d'un stratifié en T300/5208 pour différentes durées de vieillissement.

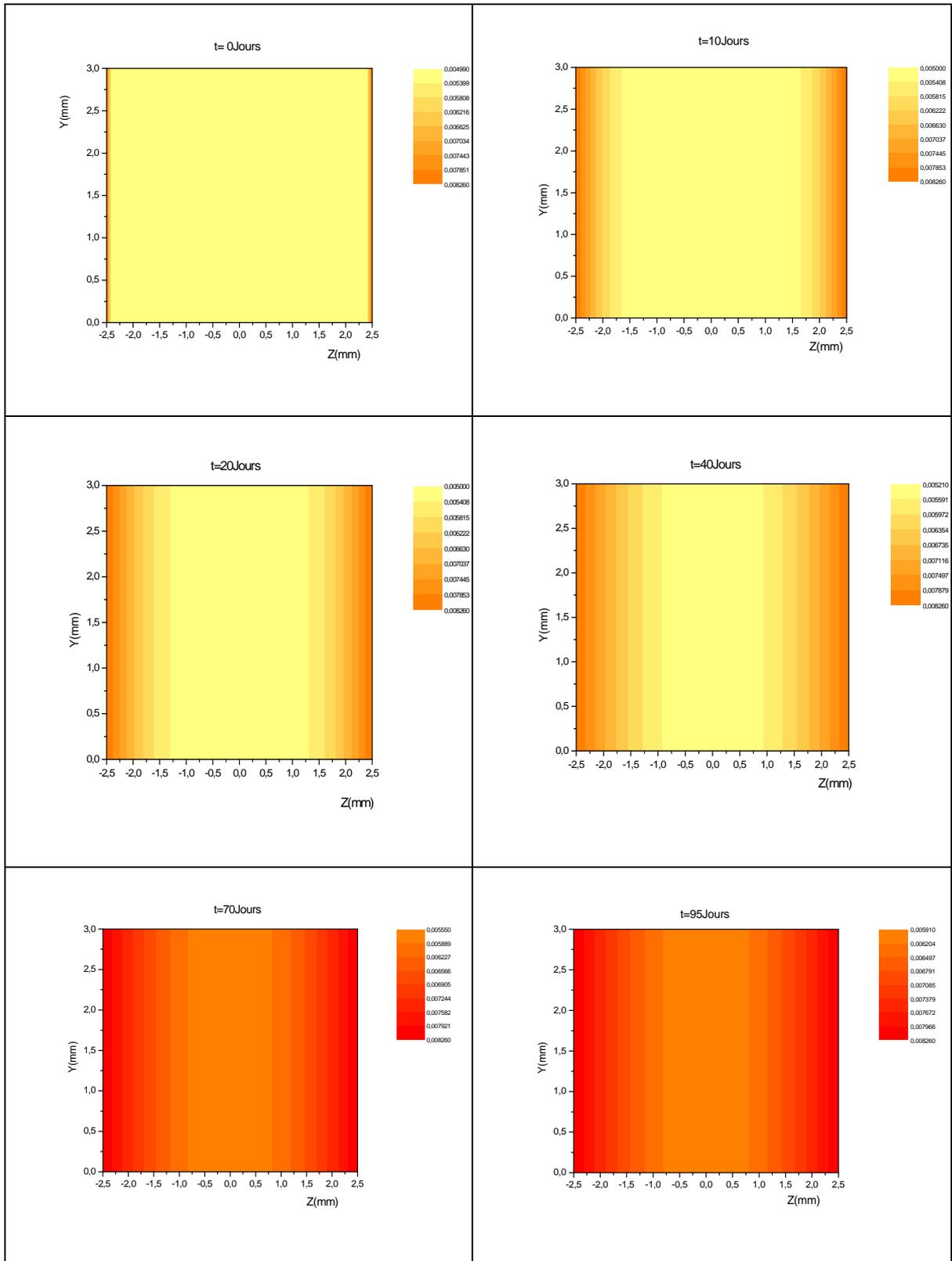


Figure 5.5.a : Présentation 2D des profils de concentration à travers l'épaisseur pour  $t=0$  jours, 10 jours, 20 jours, 40 jours, 70 jours, 95 jours.

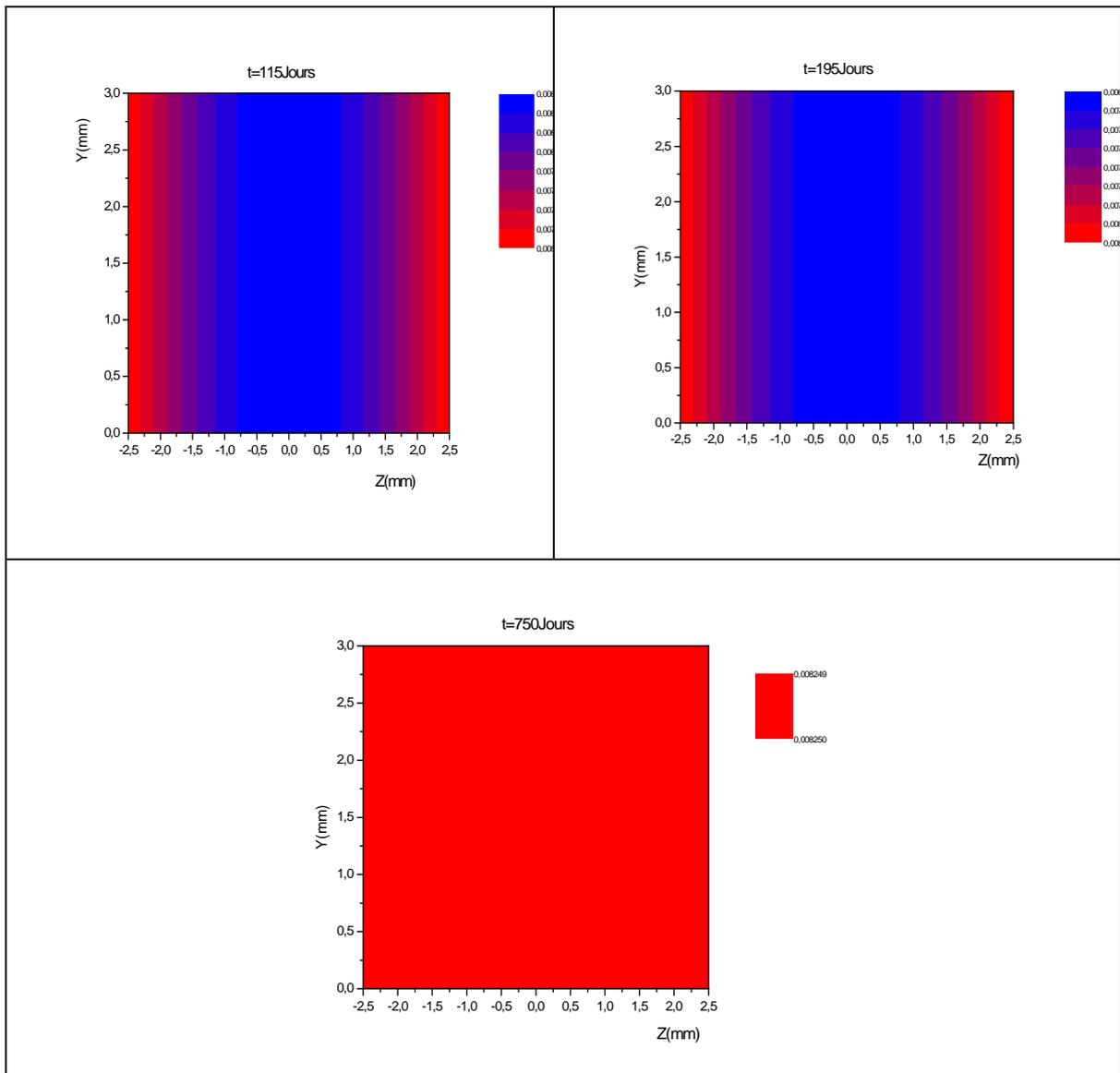


Figure 5.5.b : Présentation 2D des profils de concentration à travers l'épaisseur pour  $t=115$  jours, 195 jours, 750 jours.

La figure 5.5.a et b sont des présentations 2D des profils de concentration représentées sur la figure 5.4, la concentration  $C$  dépend de  $z$  seulement, et elle indépendante de  $y$  à cause de l'environnement constant.

#### 5.4 Analyse de comportement des stratifiés vieillis pour le cas d'une distribution constante de la concentration

Comme une 1ere étape et afin de valider notre programme, on va simuler le comportement des stratifiés qui subissent un vieillissement hygrothermique avec une distribution constante le long de l'épaisseur du stratifié ce qui n'est pas le cas physique.

Le stratifié considéré est un stratifié en T300/5208, constitué de 4 couches respectivement d'épaisseur [1.5, 1.0, 1.5, 1.0] (mm) et [15°/-30°/-15°/30°] d'angles.

Le comportement de stratifié est simulé dans différents environnements qui présentent des cas réels dans les quelles notre stratifié va opérer, comme l'indique l'organigramme suivant :

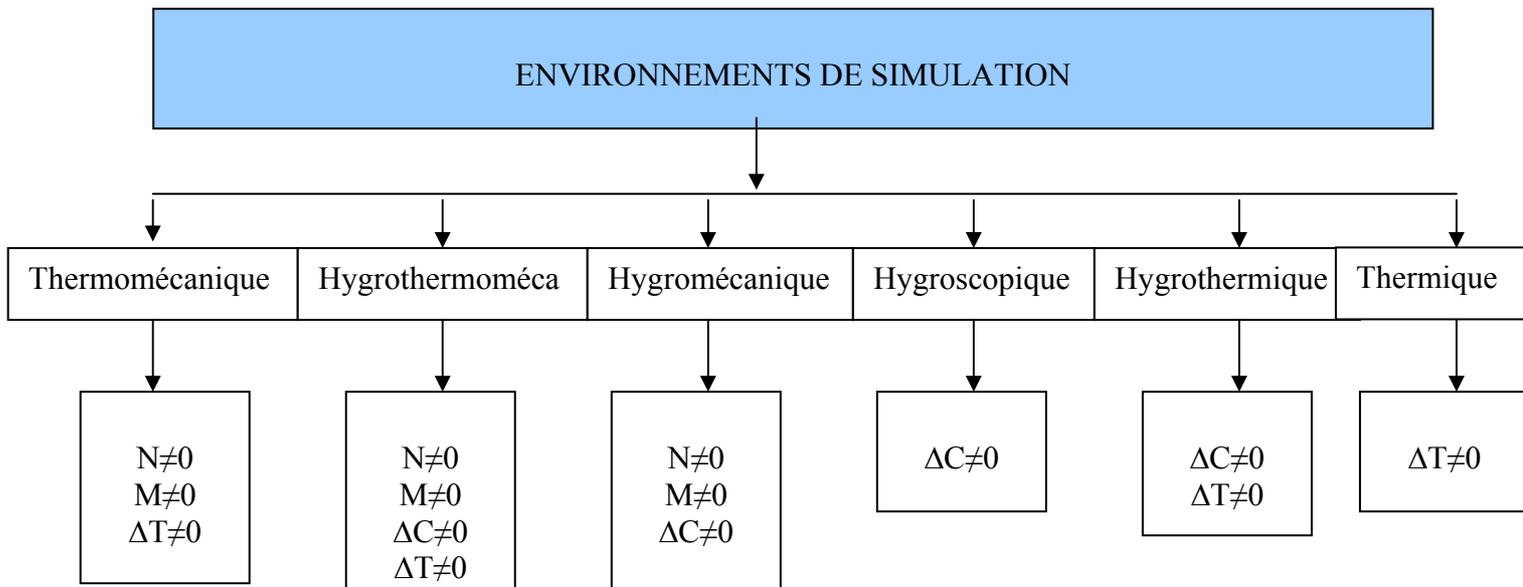


Figure 5.6 : Environnements de simulation.

Les forces et les gradients utilisés sont :

$$N_x=1000 \text{ N/mm}, N_y=500 \text{ N/mm}, N_{xy}=250 \text{ N/mm}$$

$$M_x=0, M_y=0, M_{xy}=0$$

$$\Delta T=-180^\circ\text{C}, \Delta C=0.36\%$$

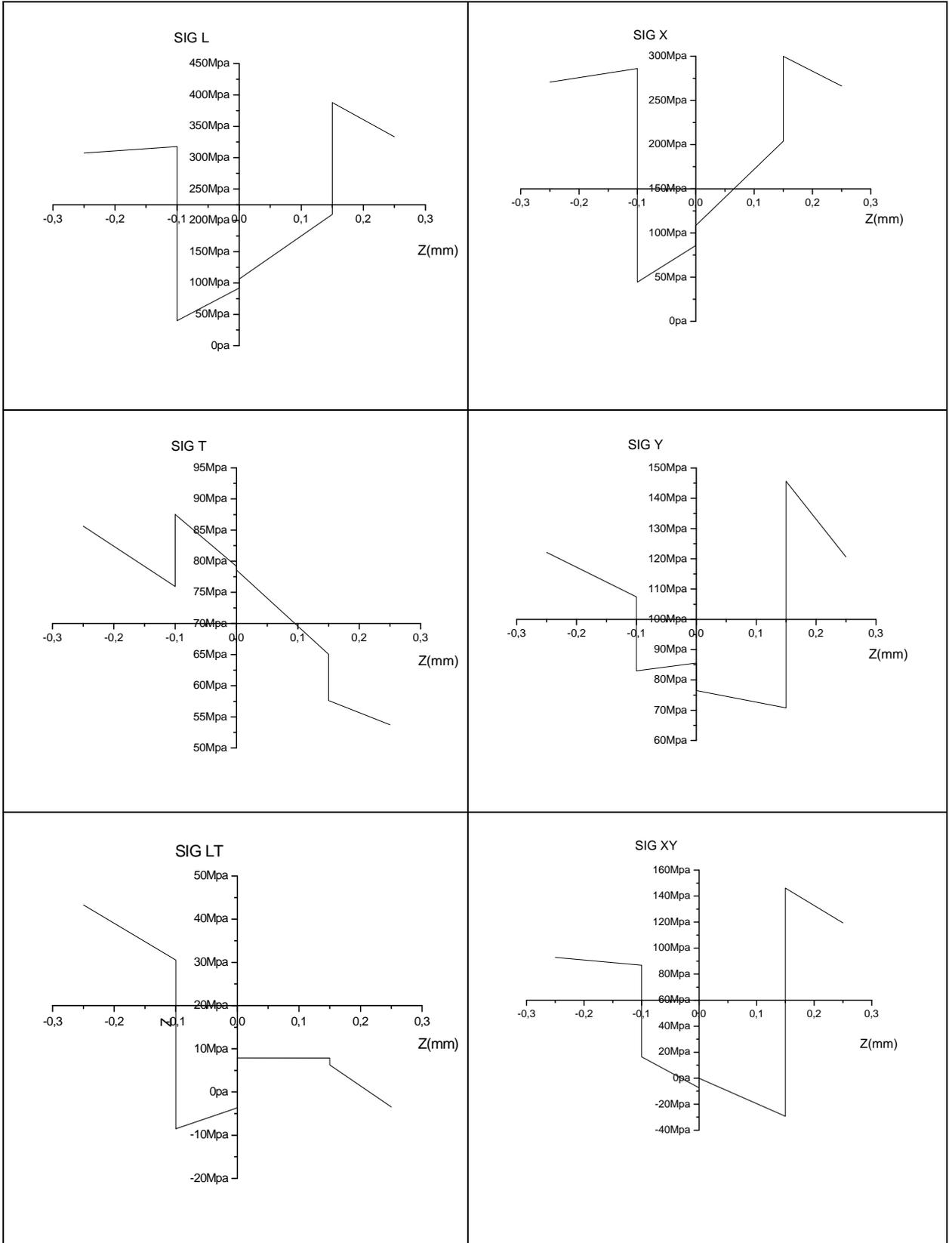


Figure 5.7 : Contraintes thermomécaniques dans les repères LT et XY du [15°/-30°/-15°/30°] graphite/époxyde  $\Delta T = -180^\circ\text{C}$ .

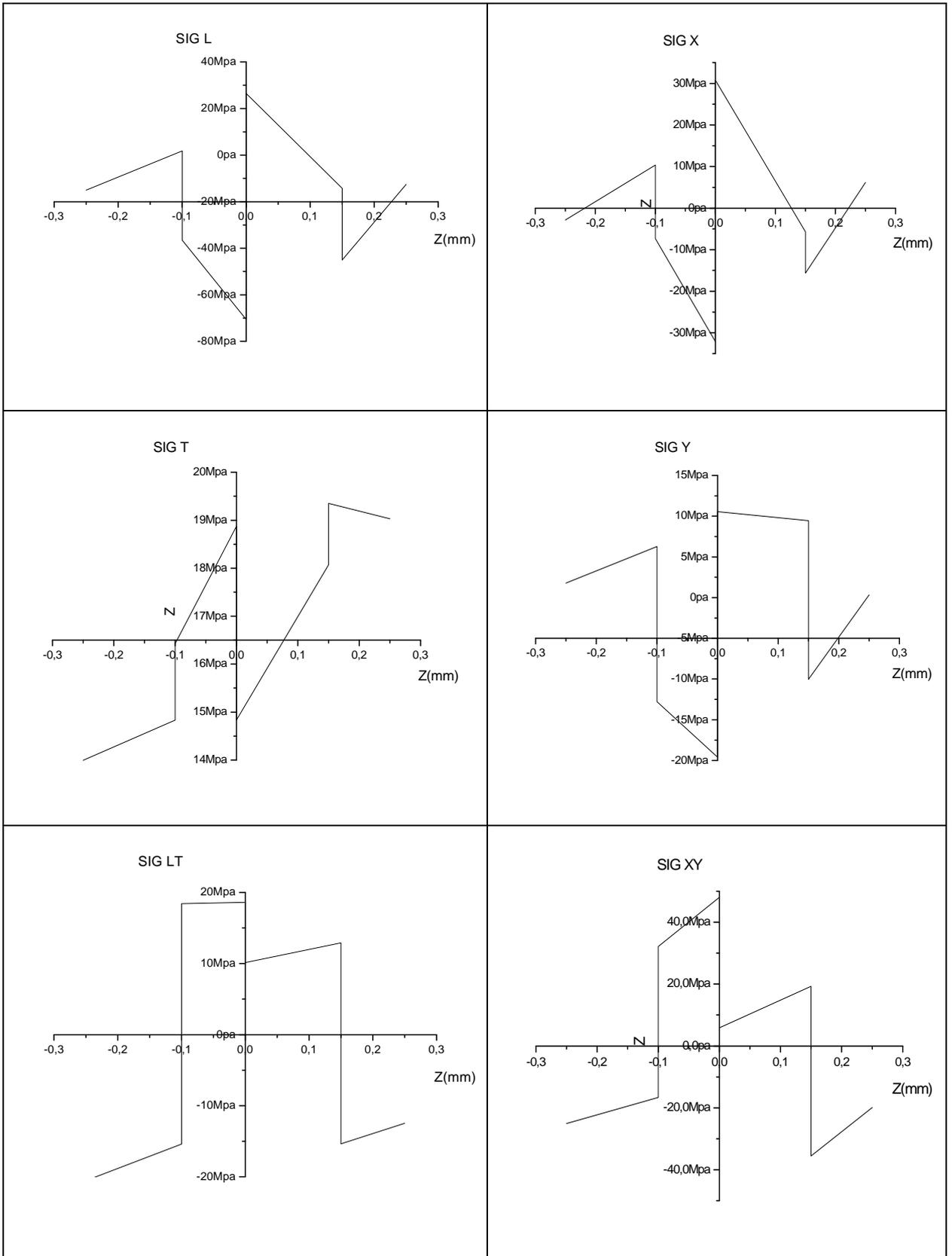


Figure 5.8 : Contraintes thermiques dans les repères LT et XY du [15°/-30°/-15°/30°] graphite/époxyde  $\Delta T = -180^\circ\text{C}$ .

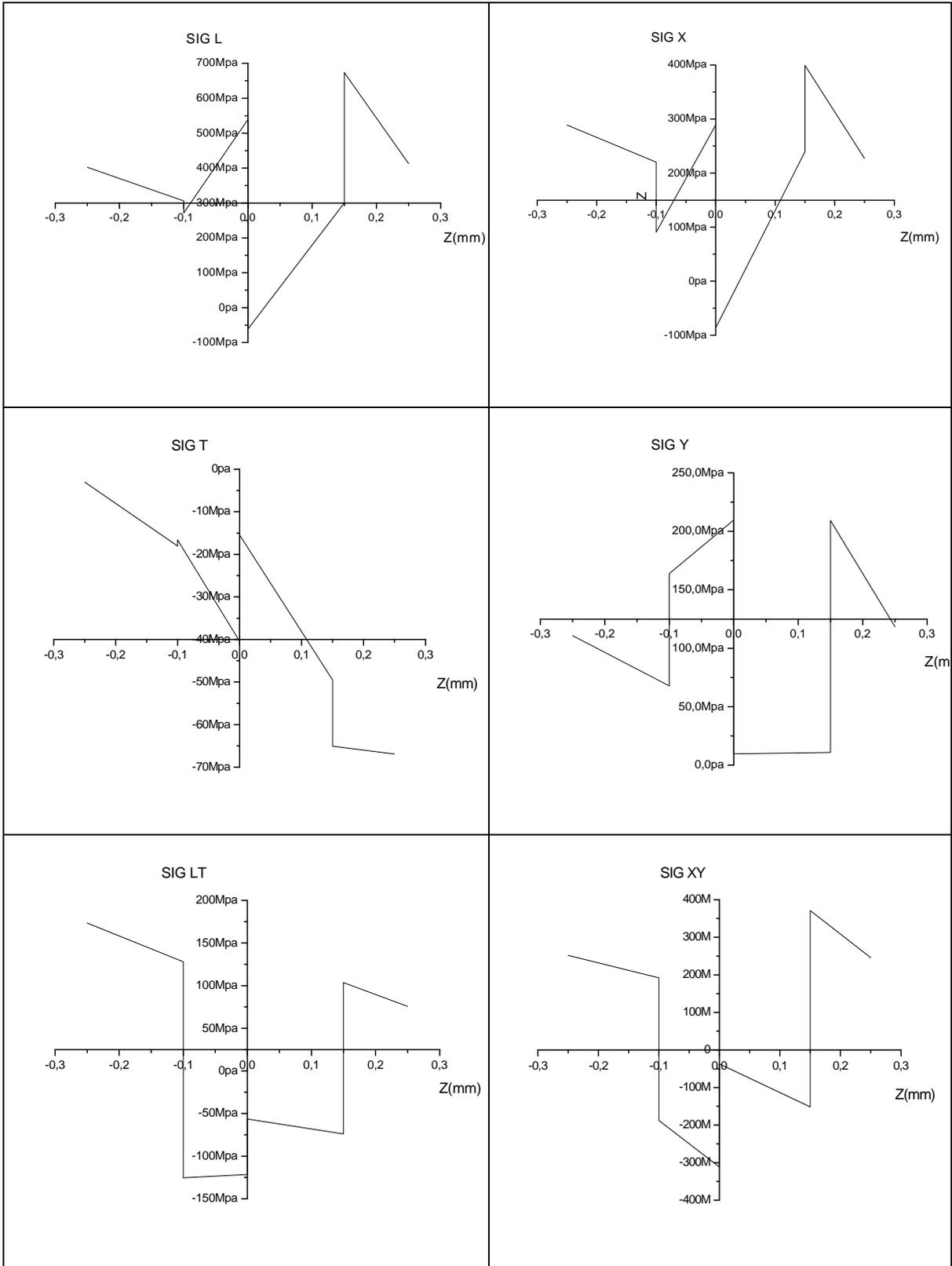


Figure 5.9 : Contraintes hygromécaniques dans les repères LT et XY du  $[15^\circ/-30^\circ/-15^\circ/30^\circ]$  graphite/époxyde  $\Delta C=0.36\%$ .

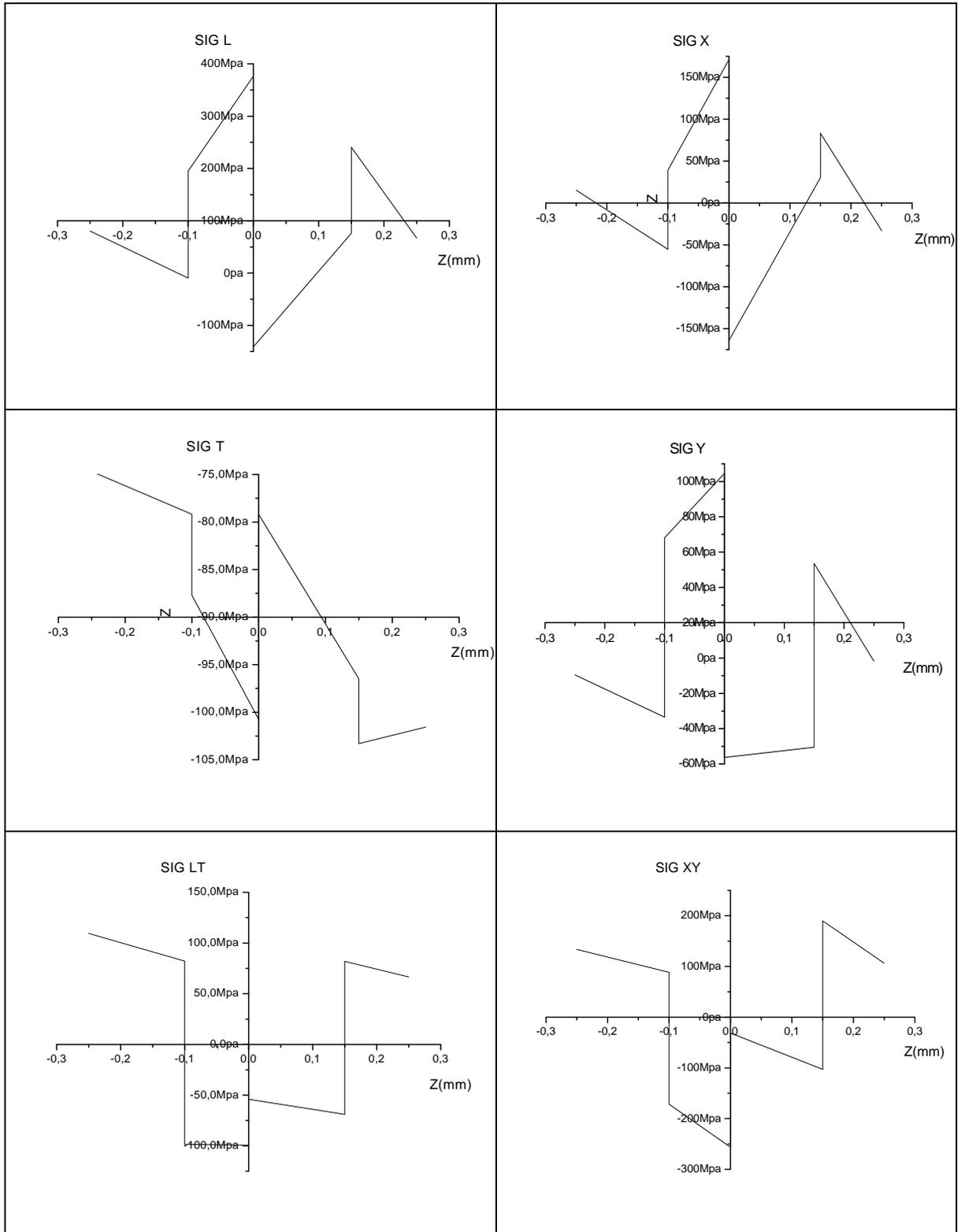


Figure 5.10 : Contraintes hygroscopiques dans les repères LT et XY du  $[15^\circ/-30^\circ/-15^\circ/30^\circ]$  graphite/époxyde  $\Delta C=0.36\%$ .

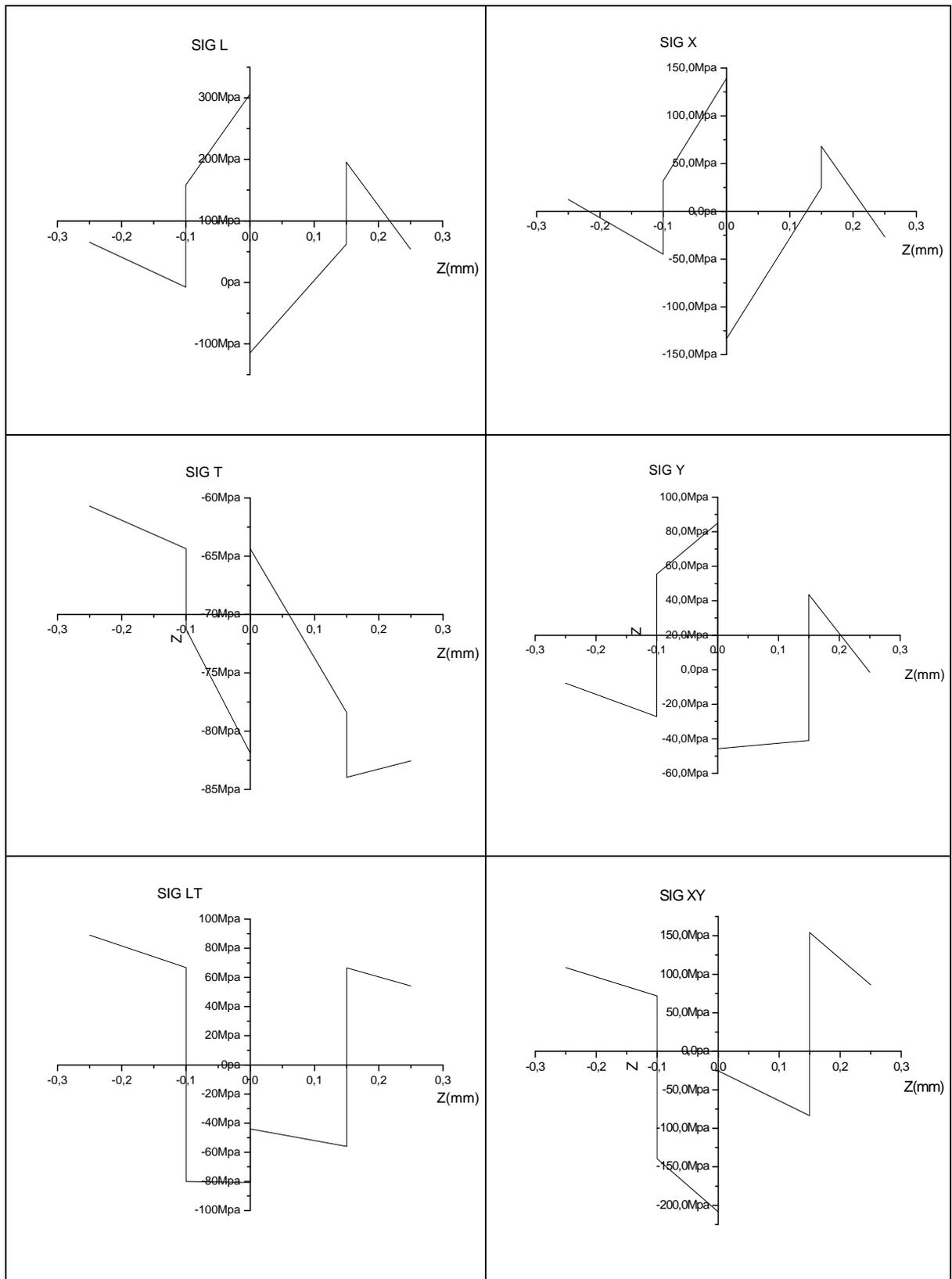


Figure 5.11 : Contraintes hydrothermiques dans les repères LT et XY du  $[15^\circ/-30^\circ/-15^\circ/30^\circ]$  graphite/époxyde  $\Delta C=0.36\%$ ,  $\Delta T=-180^\circ\text{C}$ .

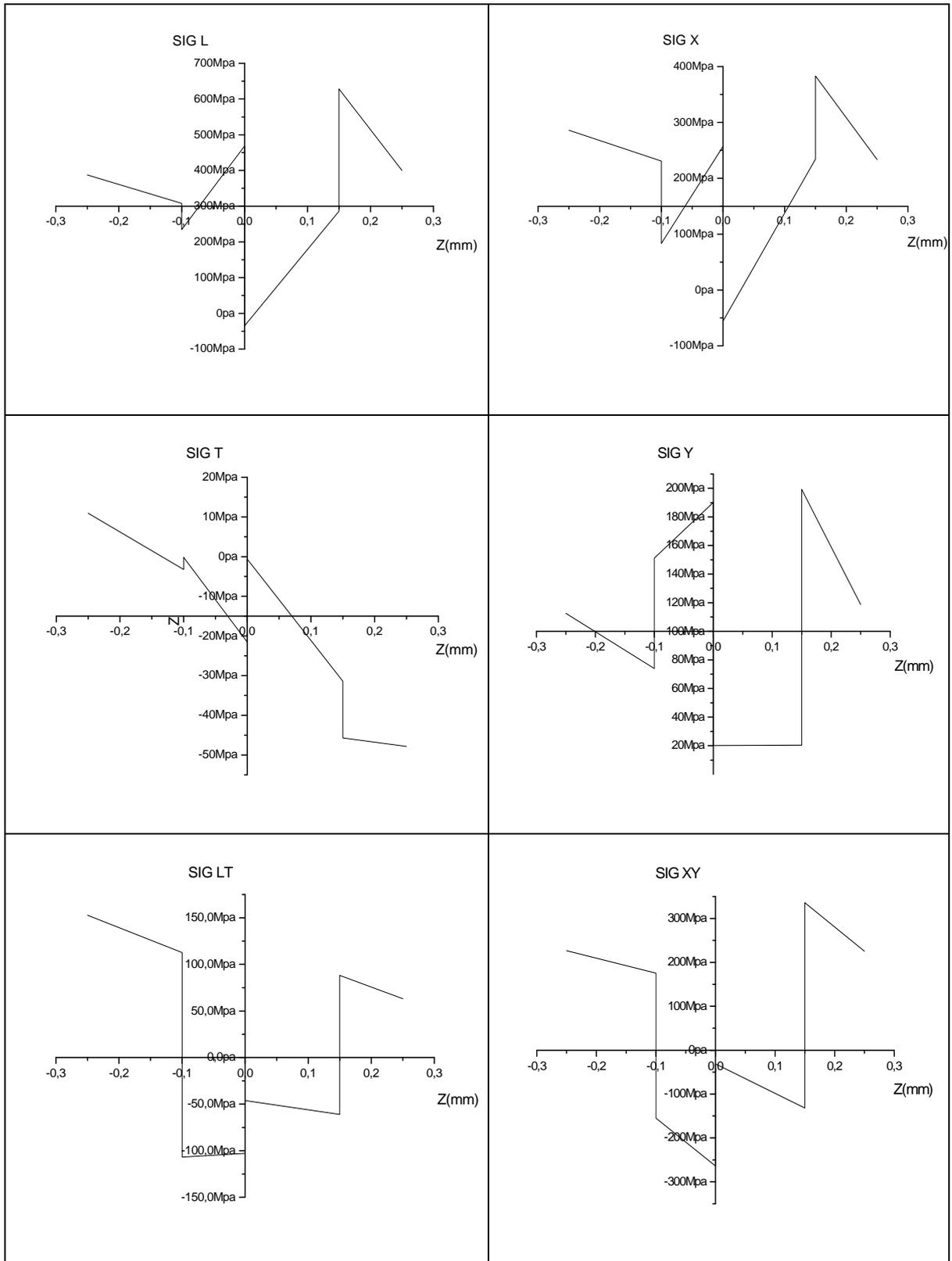


Figure 5.12 : Contraintes hydrothermomécaniques dans les repères LT et XY du [15°/-30°/-15°/30°] graphite/époxyde  $\Delta C=0.36\%$ ,  $\Delta T=-180^{\circ}\text{C}$ .

#### 5.4.1 Validation des résultats

Les résultats obtenus ont été valides avec les résultats de J. M Berthelot [52], et les résultats de Benkhedda [35].

#### 5.5 Analyse du comportement des stratifiés vieillis pour le cas d'une distribution Fickienne de la concentration

Dans ce paragraphe , on va simuler le comportement des stratifiés qui subissent un vieillissement hygrothermique avec une distribution Fickienne de la concentration comme expliquer dans la figure 5.4 ,5.5 , le calcul des contraintes résiduelles dans chaque sous-couche (nœud  $i$ ) , va être fait en prenant en considération la valeur locale de la concentration dans le même nœud , cette valeur est donnée par le sous-programme DIFF , les caractéristiques mécaniques utilisées pour évaluer les contraintes résiduelles sont aussi calculées localement (nœud  $i$ ) c'est-à-dire que ces caractéristiques ne sont plus des constantes, mais dépendent du temps et  $z$  ( $E_L=f(z,t), E_T= f(z,t), G_{LT}= f(z,t)$ ).

Le stratifié considéré est un stratifié symétrique en T300/5208, constitué de 8 couches respectivement d'épaisseur 0.125 mm et  $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$  d'angle .

Le comportement de stratifié est simulé dans les environnements indiqués dans le tableau 5.1, la valeur de la concentration est donnée par le sous-programme DIFF, le temps de vieillissement utilisé est un dixième du temps de saturation  $t=t_{sat}/10=422$  heures , le comportement des contraintes et déformations est donné par le programme global AGINGMAT.

Tableaux 5.1 : Environnement de simulation pour les stratifiés symétriques.

Environnements	ENV 1	ENV 2	ENV 3	ENV 4
HR %	0%	33%	66%	100%

### 5.5.1 Analyse des caractéristiques mécaniques

Afin d'analyser la dégradation du stratifié, on va représenter le comportement des caractéristiques mécaniques le long de l'épaisseur d'un stratifié en T300/5208 pour différents environnements et à  $T=30^{\circ}\text{C}$ , les résultats présentés ci-dessous sont des résultats du sous-programme TSAILOC.

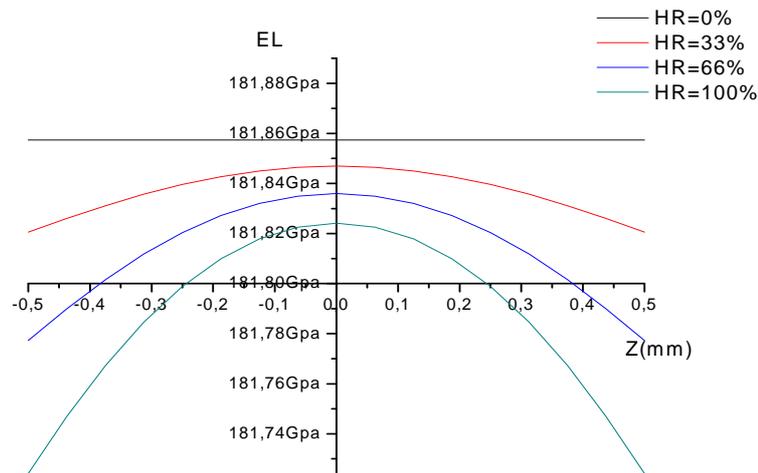


Figure 5.13 : Module de Young longitudinale le long de l'épaisseur d'un stratifié en T300/5208 pour  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422$  Heures.

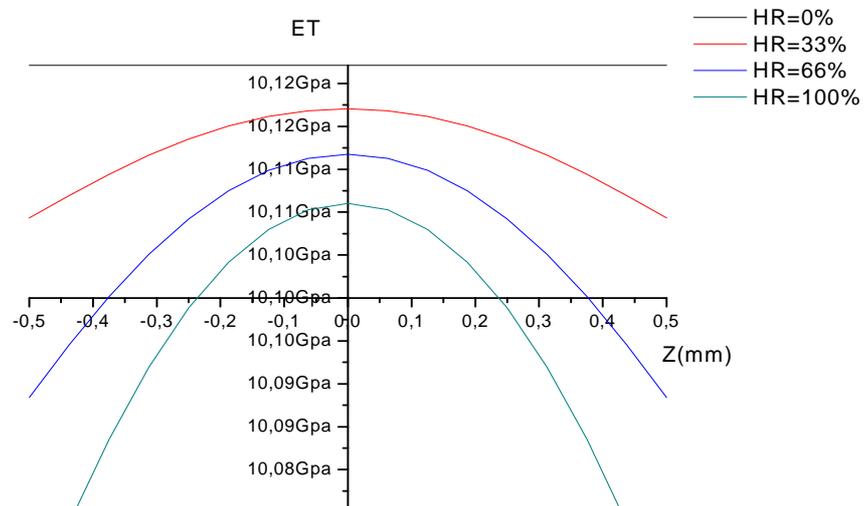


Figure 5.14 : Module de Young transversale le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422$  Heures.

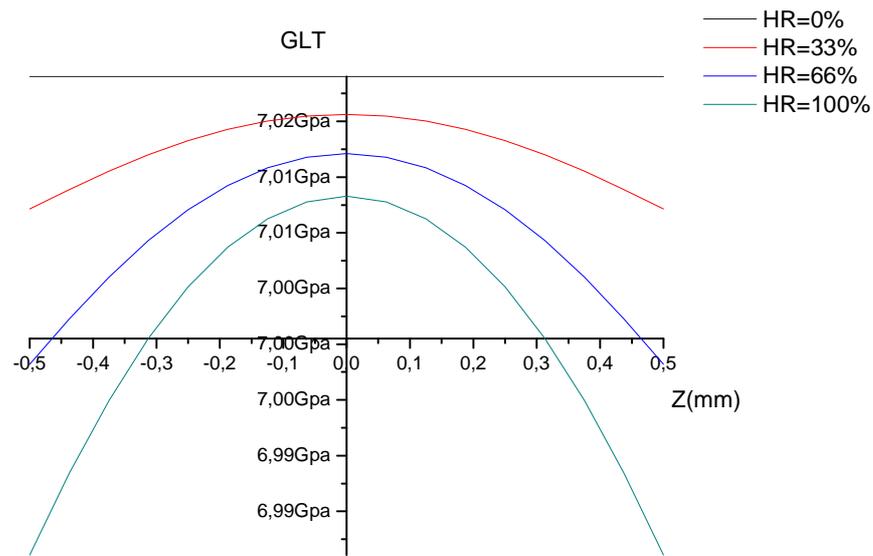


Figure 5.15 : Module de cisaillement longitudinal le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422$  Heures.

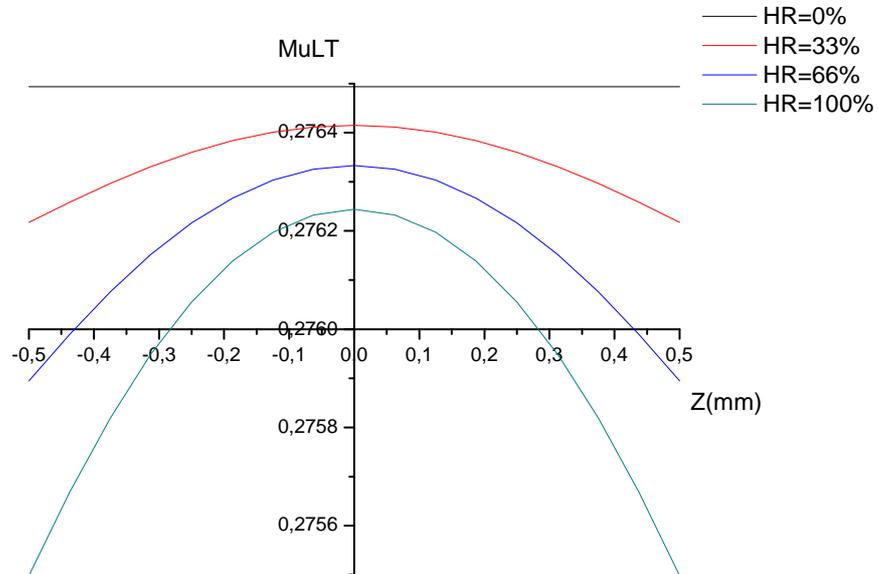


Figure 5.16 : Coefficient de poisson le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422$  Heures.

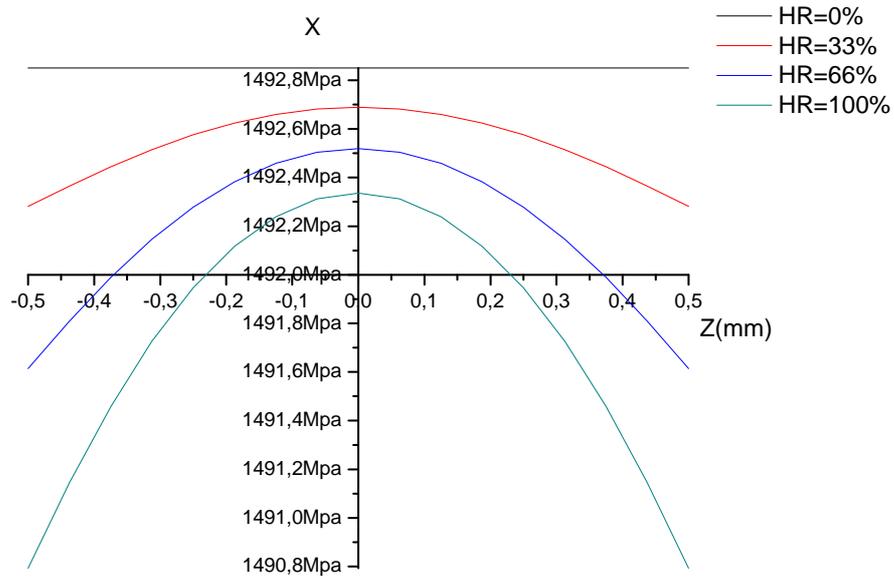


Figure 5.17 : Résistance en traction longitudinale le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422$  Heures.

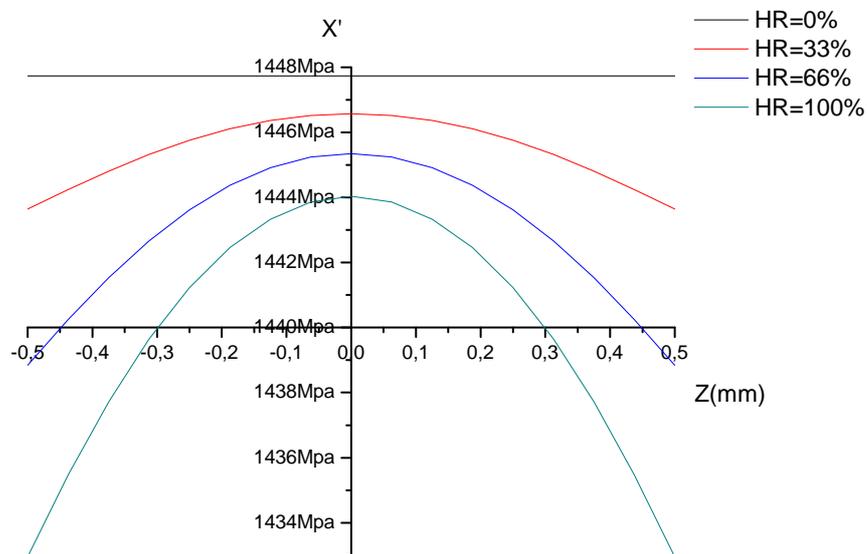


Figure 5.18 : Résistance en compression longitudinale le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422$  Heures.

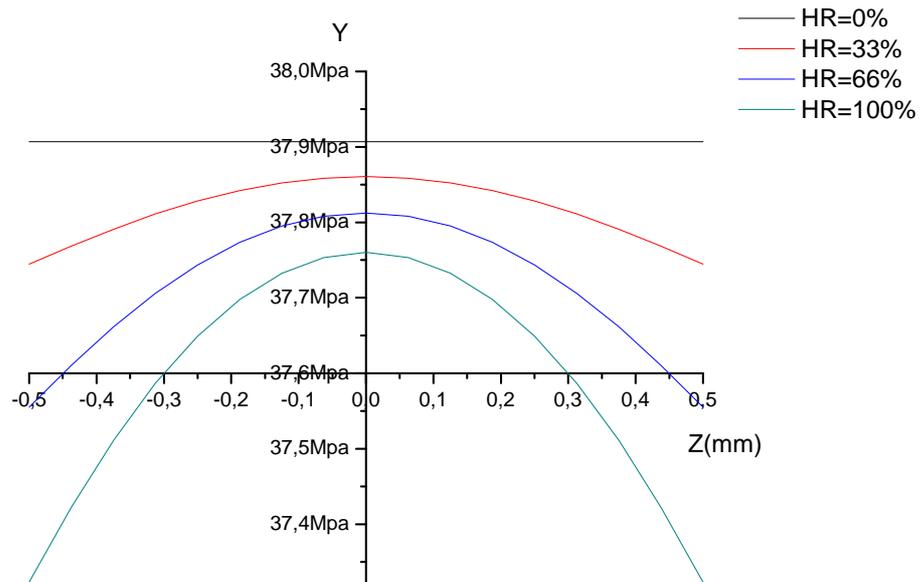


Figure 5.19 : Résistance en traction transversale le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422$  Heures.

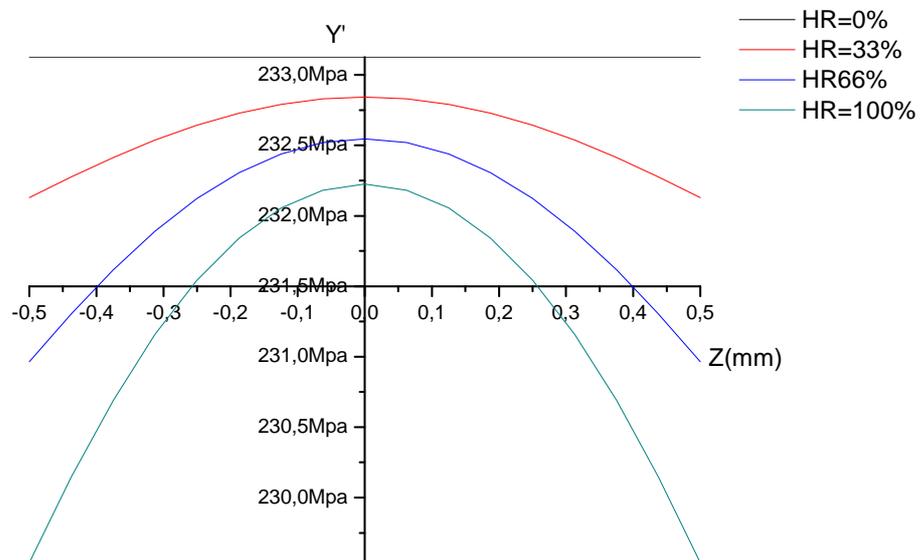


Figure 5.20 : Résistance en compression transversale le long de l'épaisseur du stratifié en T300/5208 pour  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422$  Heures.

Les figures 5.13 à 5.20 représentent le comportement des caractéristiques mécaniques le long de l'épaisseur d'un stratifiés en T300/5208 pour un cas de distribution Fickienne de concentration, une dégradation de ces dernier est remarque le long de l'épaisseur , les couches qui sont en contact avec le milieu extérieur sont les plus influence , les couche internes sont moins influences a cause le processus d'absorption qui est très lent, les chutes de performances mécaniques sont fonction de l'environnement , la quantification des chutes est bien détaillée dans le chapitre 3.

#### 5.5.2 Analyse du comportement du $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$ pour $T_{opr}=20^\circ\text{C}$ , $60^\circ\text{C}$ , $100^\circ\text{C}$ à $t=422\text{Heure}$

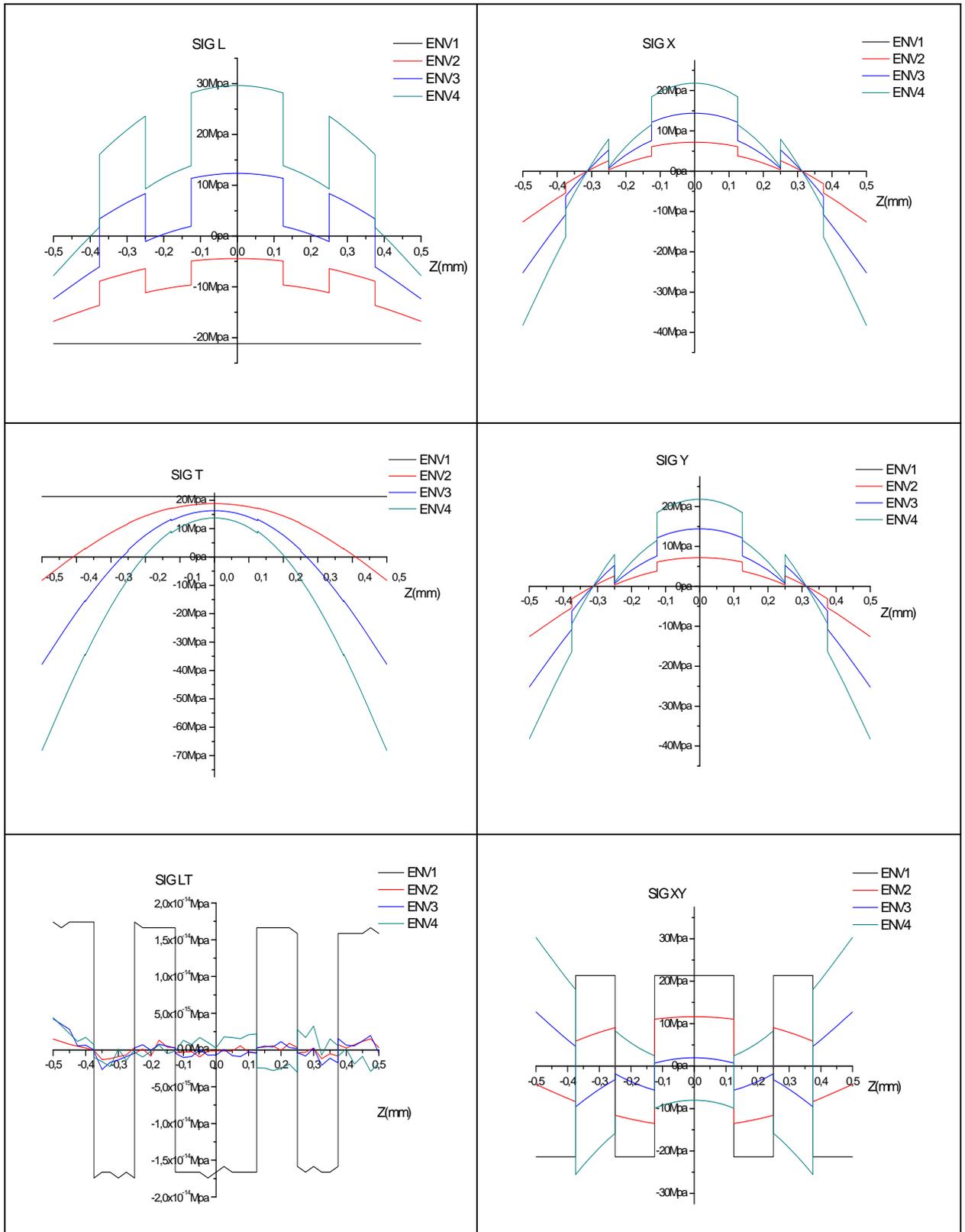


Figure 5.21 : Contraintes hygrothermiques dans les repères LT et XY du  $[45^\circ/-45^\circ]_{2S}$  graphite/époxyde  $T_{opr}=20^\circ\text{C}, t=422\text{H}$ .

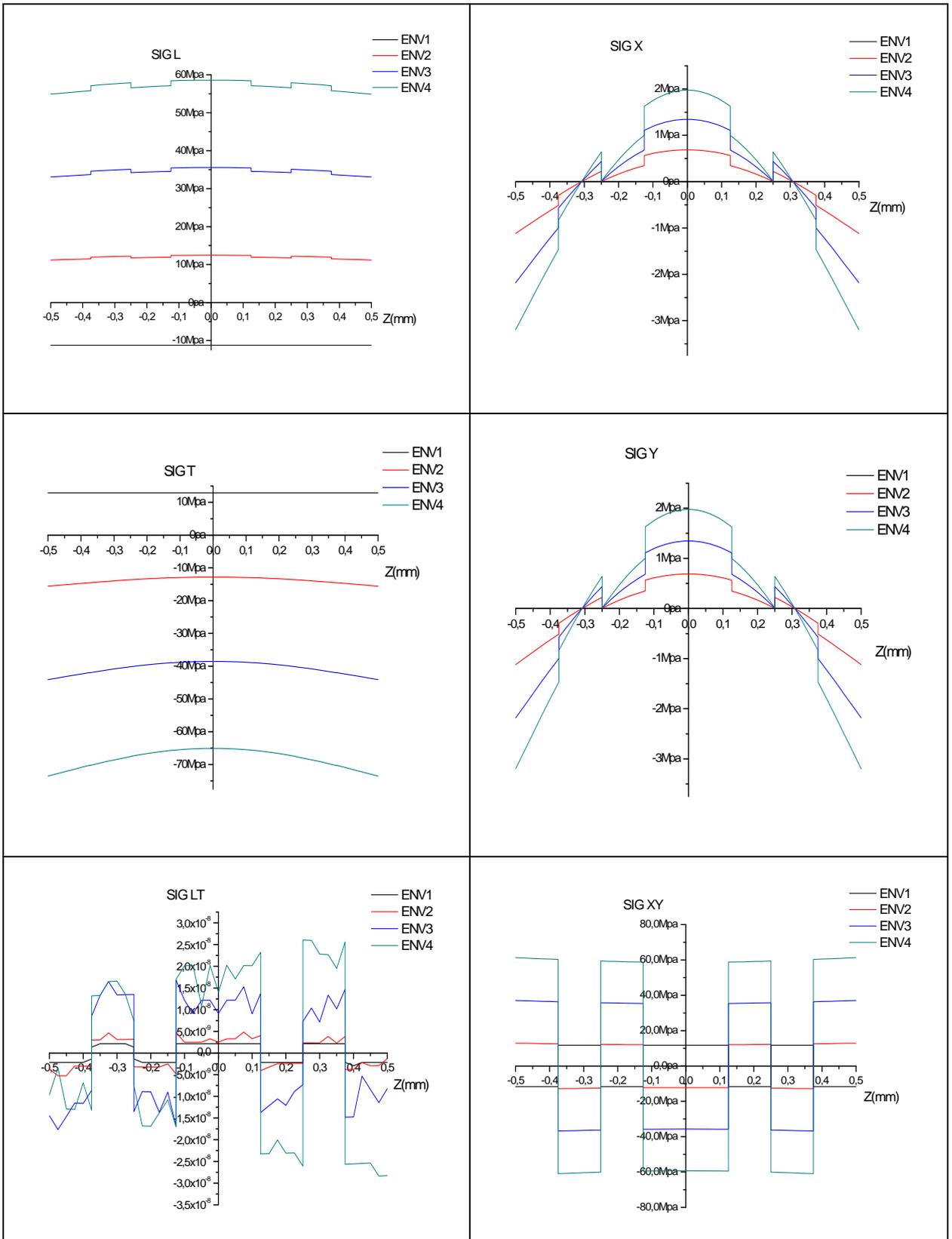


Figure 5.22 : Contraintes hygrothermiques dans les repères LT et XY du  $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$  graphite/époxyde  $T_{top}=60^\circ\text{C}$ ,  $t=422\text{H}$ .

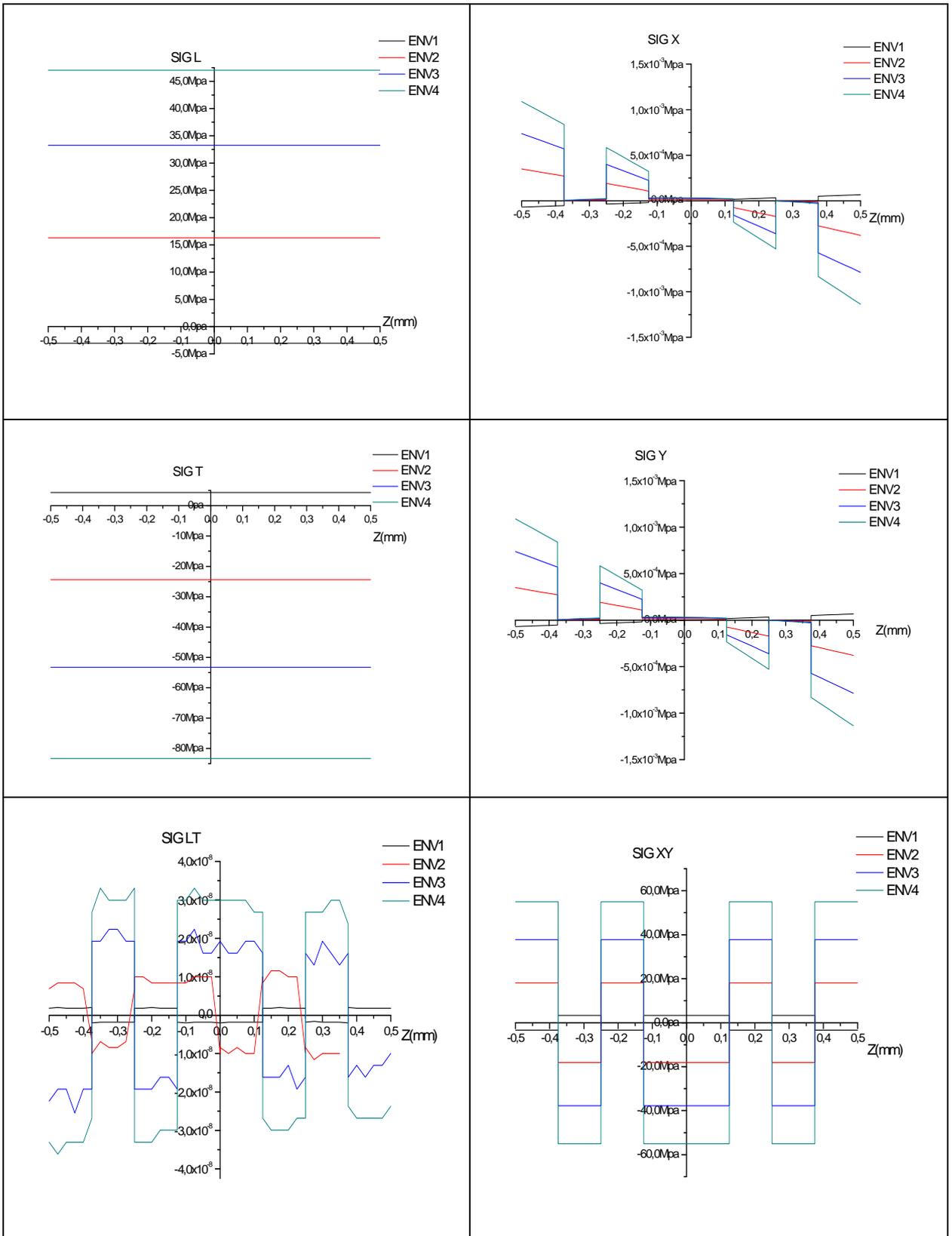


Figure 5.23 : Contraintes hygrothermiques dans les repères LT et XY du  $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$  graphite/époxyde  $T_{op}=100^\circ$ ,  $t=422H$ .

Les figures 5.21,22,23 présentent les contraintes hygrothermiques pour le stratifié T300/5208 considéré, la température et l'humidité jouent un rôle motrice dans le comportement des contraintes résiduelles, le couplage de ces deux derniers génère des niveaux différents de contraintes , la contrainte transversale est à 50% de la résistance en traction transversale pour une température d'opération égale à 20°C , par contre à 60°C cette dernière est à environ 27% de la limite de résistance pour l'environnement 2 , la température a permet de relaxer les contraintes hygrothermiques .

Tableau 5.2 : évaluation de la contrainte transversale pour le cas de traction

	SIG T (traction transvesale)(Mpa)			SIG T (traction transvesale)/Y*100		
	ENV 1	ENV 2	ENV 3	ENV 1	ENV 2	ENV 3
20°C	20	17	14	50%	42%	35%
60°C	-	-	-	-	-	-
100°C	-	-	-	-	-	-

Tableau 5.3 : évaluation de la contrainte transversale pour le cas de compression

	SIG T (compression transvesale)(Mpa)			SIG T (compression transvesale)/Y*100		
	ENV 1	ENV 2	ENV 3	ENV 1	ENV 2	ENV 3
20°C	-10	-35	-68	4%	14%	28%
60°C	-13	-38	-65	5%	15%	26%
100°C	-25	-54	-84	10%	22%	34%

5.5.3 Analyse du comportement du [20°/-20°]<sub>2s</sub> pour Topr=20°C , 60°C, 100°C à t=422Heures

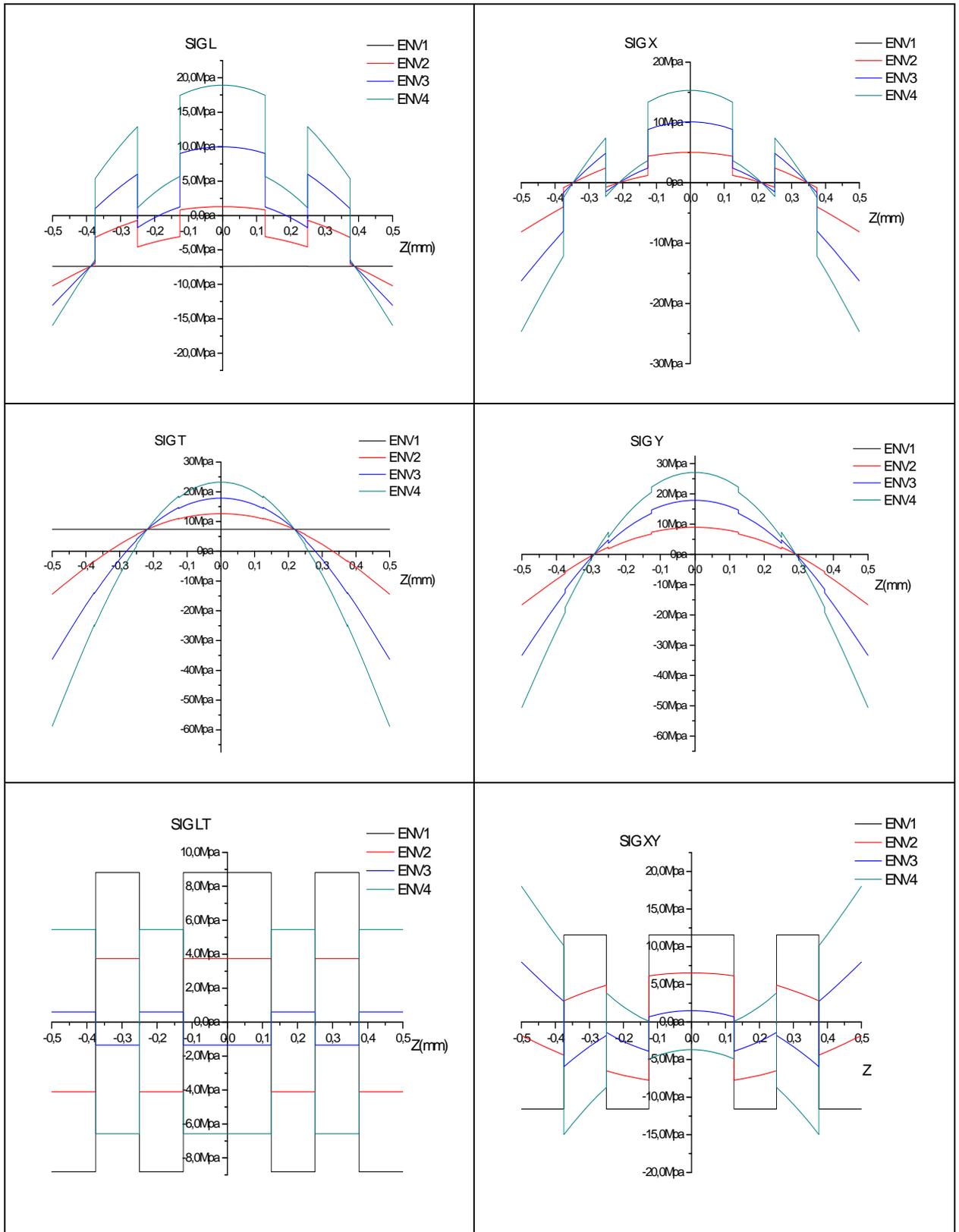


Figure 5.24 : Contraintes hydrothermiques dans les repères LT et XY du  $[20^{\circ}/-20^{\circ}]_{2s}$  graphite/époxyde  $TU=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta C(z,t), t=422\text{H}$ .

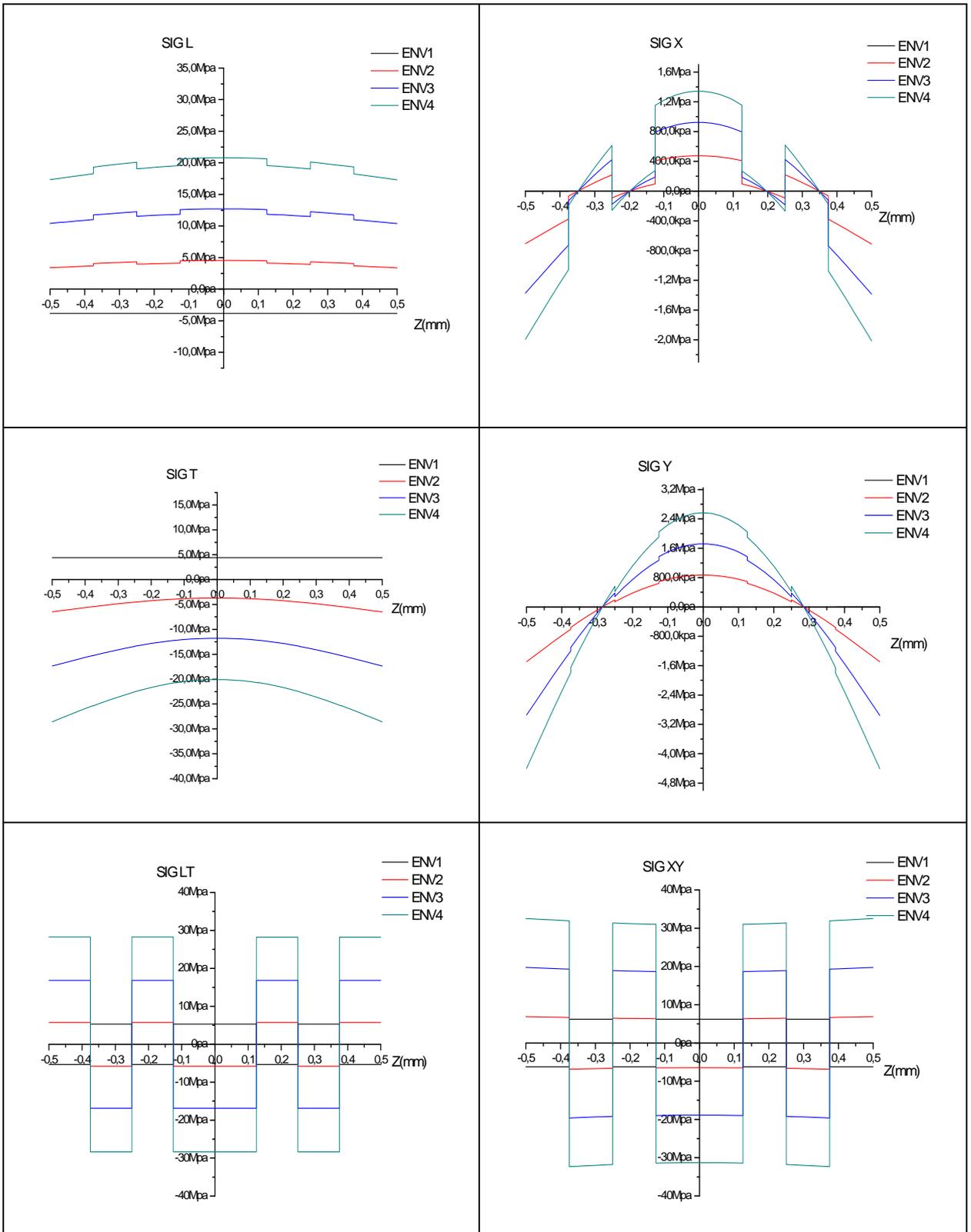


Figure 5.25 : Contraintes hygrothermiques dans les repères LT et XY du  $[20^\circ/-20^\circ]_{2S}$  graphite/époxyde  $TU=60^\circ\text{C}$ ,  $\Delta C(z,t), t=422\text{H}$ .

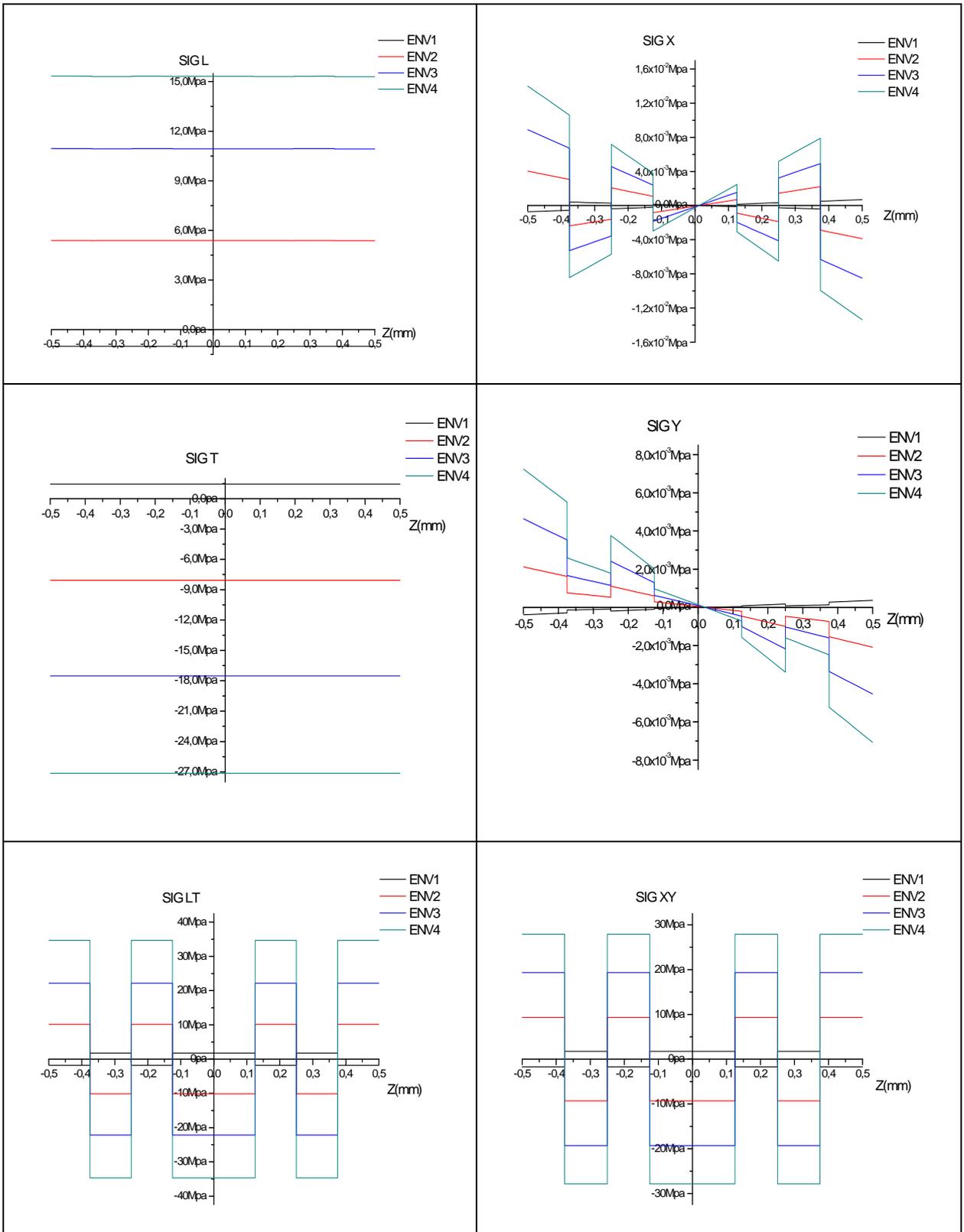


Figure 5.26 : Contraintes hydrothermiques dans les repères LT et XY du  $[20^{\circ}/-20^{\circ}]_{2s}$  graphite/époxyde  $TU=100^{\circ}C$ ,  $\Delta C(z,t), t=422H$ .

Les figures 5.24 à 26 présentent les contraintes résiduelles pour un stratifié  $[20^\circ/-20^\circ]_{2s}$ , l'anisotropie est un paramètre très influant sur le comportement des contraintes, en comparant le SIG T de la figure 5.22 avec le SIG T de la figure 5.25, on trouve que la configuration  $[20^\circ/-20^\circ]_{2s}$  a permis de réduire l'ordre de contrainte par exemple à l'environnement 2 la contrainte a passé de -12MPa pour la configuration  $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$  à -4MPa pour la configuration  $[20^\circ/-20^\circ]_{2s}$ , pour l'environnement 3 on passe de -38MPa à -12.5MPa, donc l'anisotropie permet de réduire les contraintes résiduelles.

Tableau 5.4 : évaluation de la contrainte transversale pour le cas de traction

	SIG T (traction transversale)(Mpa)			SIG T (traction transversale)/Y*100		
	ENV 1	ENV 2	ENV 3	ENV 1	ENV 2	ENV 3
20°C	10	18	24	25%	45%	60%
60°C	-	-	-	-	-	-
100°C	-	-	-	-	-	-

Tableau 5.5 : évaluation de la contrainte transversal pour le cas de compression

	SIG T (compression transversale)(Mpa)			SIG T (compression transversale)/Y*100		
	ENV 1	ENV 2	ENV 3	ENV 1	ENV 2	ENV 3
20°C	-10	-35	-58	4%	14%	23%
60°C	-4	-15	-27	1%	6%	10%
100°C	-8	-17	-27	3%	6%	10%

### 5.6 Etude du comportement du T300/5208 et le AS/3501-5 vieillis

Nous examinons dans cette simulation le comportement des deux stratifiés, le AS/3501-5, et le T300/5208 comme le montre la figure 5.27, les caractéristiques des deux matériaux sont données dans le tableau 5.2, 5.3.

Les stratifiés utilisés sont des stratifiés symétriques constitués de 8 couches  $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$ , les épaisseurs des couches sont respectivement 0.125 mm.

- On simule la diffusion pour différents environnements (Voir tableau 5.1) pour un temps de vieillissement de 422Heures.

Tableau 5.6 : Caractéristiques mécaniques du T300/5208 et du AS/3501-5 à T=20°C.

	$E_x$ (Gpa)	$E_y$ (Gpa)	$\nu_x$	$G_{xy}$ (Gpa)	$\alpha_x(10^{-6}K^{-1})$	$\alpha_y(10^{-6}K^{-1})$	$\beta_x$	$\beta_y$
T300/5208	181	10.3	0.28	7.17	0.02	22.5	0.0	0.6
AS/3501-5	138	8.96	0.30	7.10	0.31	28.1	0.0	0.44

Tableau 5.7 : Caractéristiques de diffusion du T300/5208 et du AS/3501-5.

	Diffusivité $mm^2/s$	Concentration maximale
T300/5208	$D=132(-6750/T)$	$C_m=0.015HR$
AS/3501-5	$D=768(-7218/T)$	$C_m=0.019HR$

2

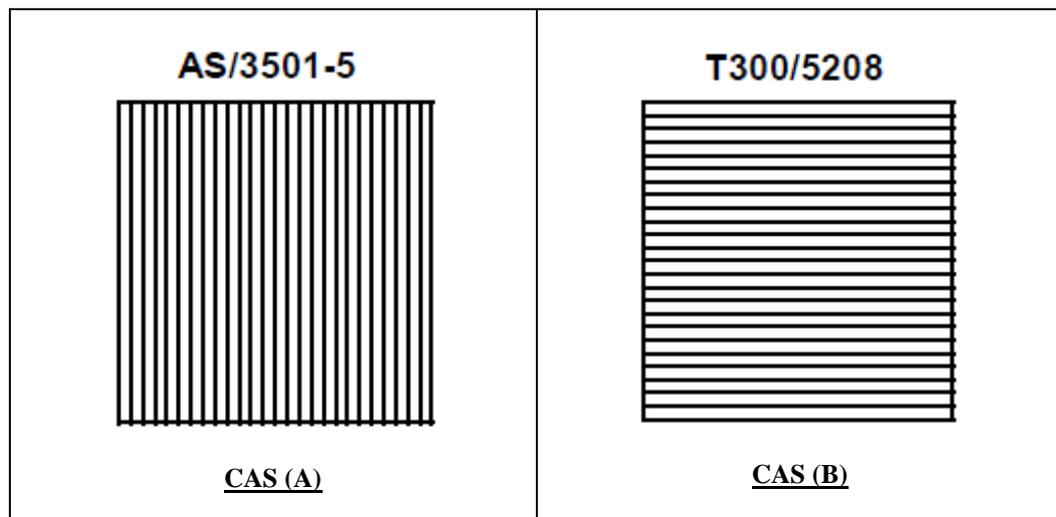


Figure 5.27 : Stratifiés en T300/5208 et AS/3501-5.

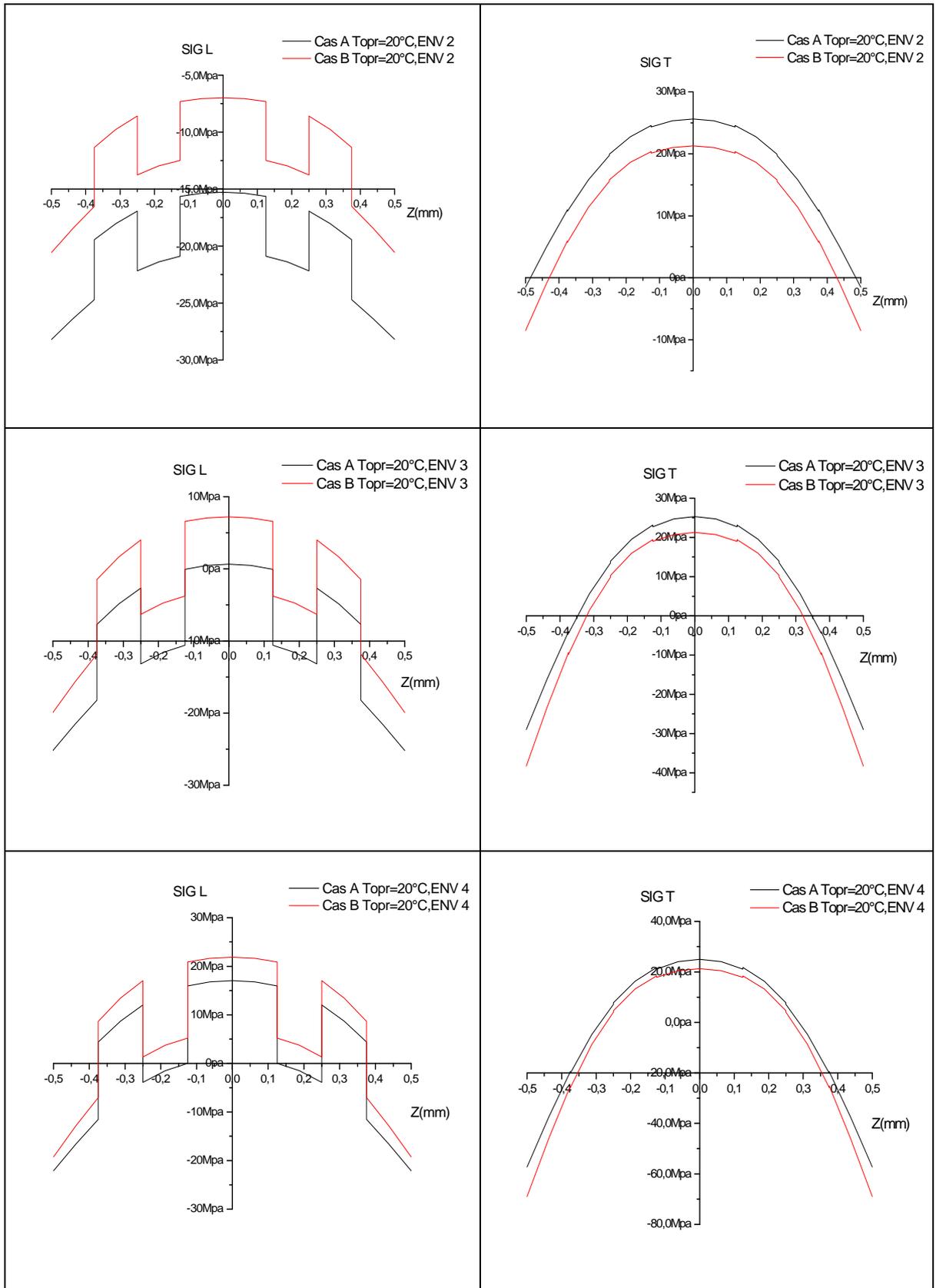


Figure 5.28 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

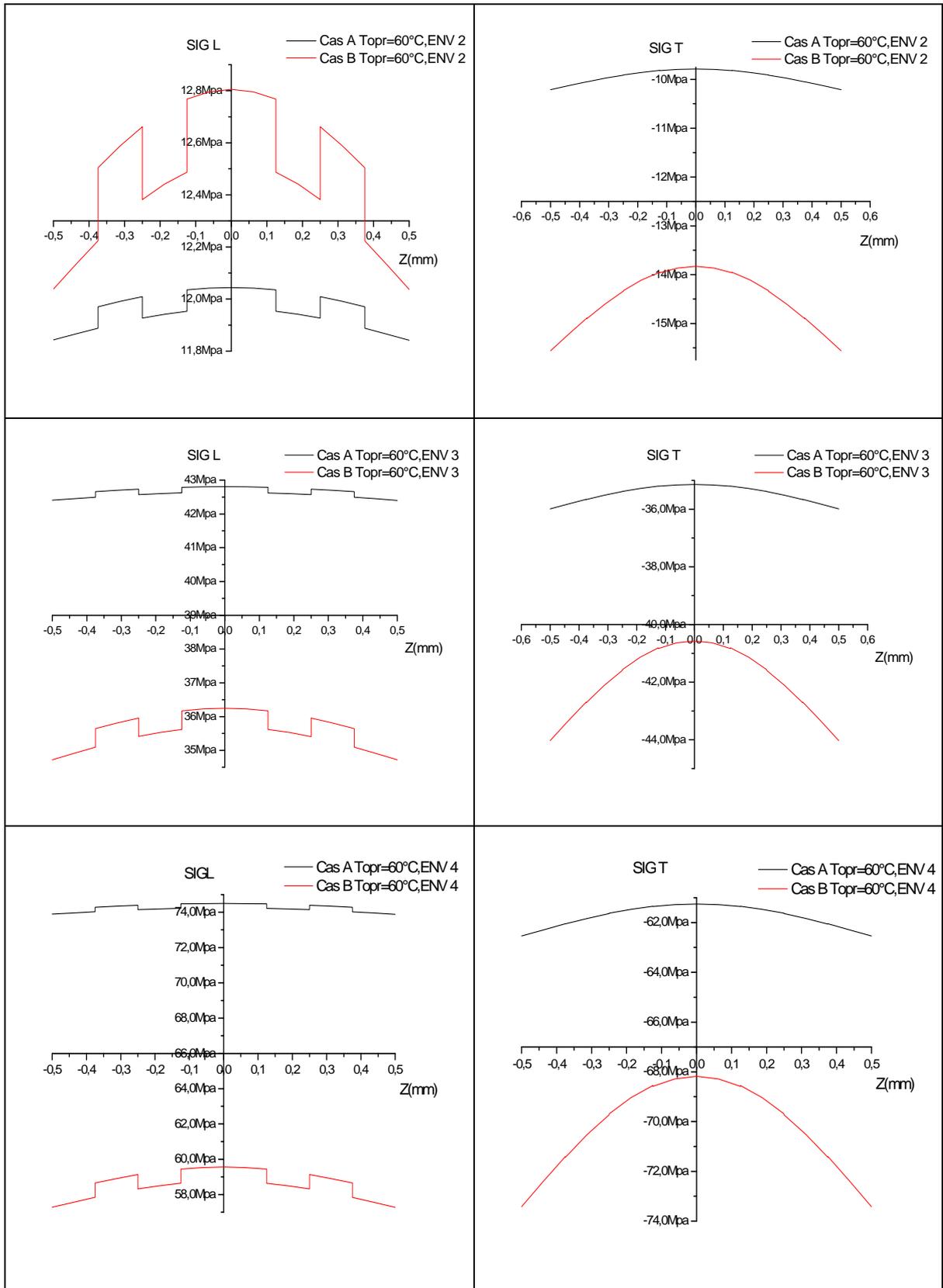


Figure 5.29 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=60°C, t=422h

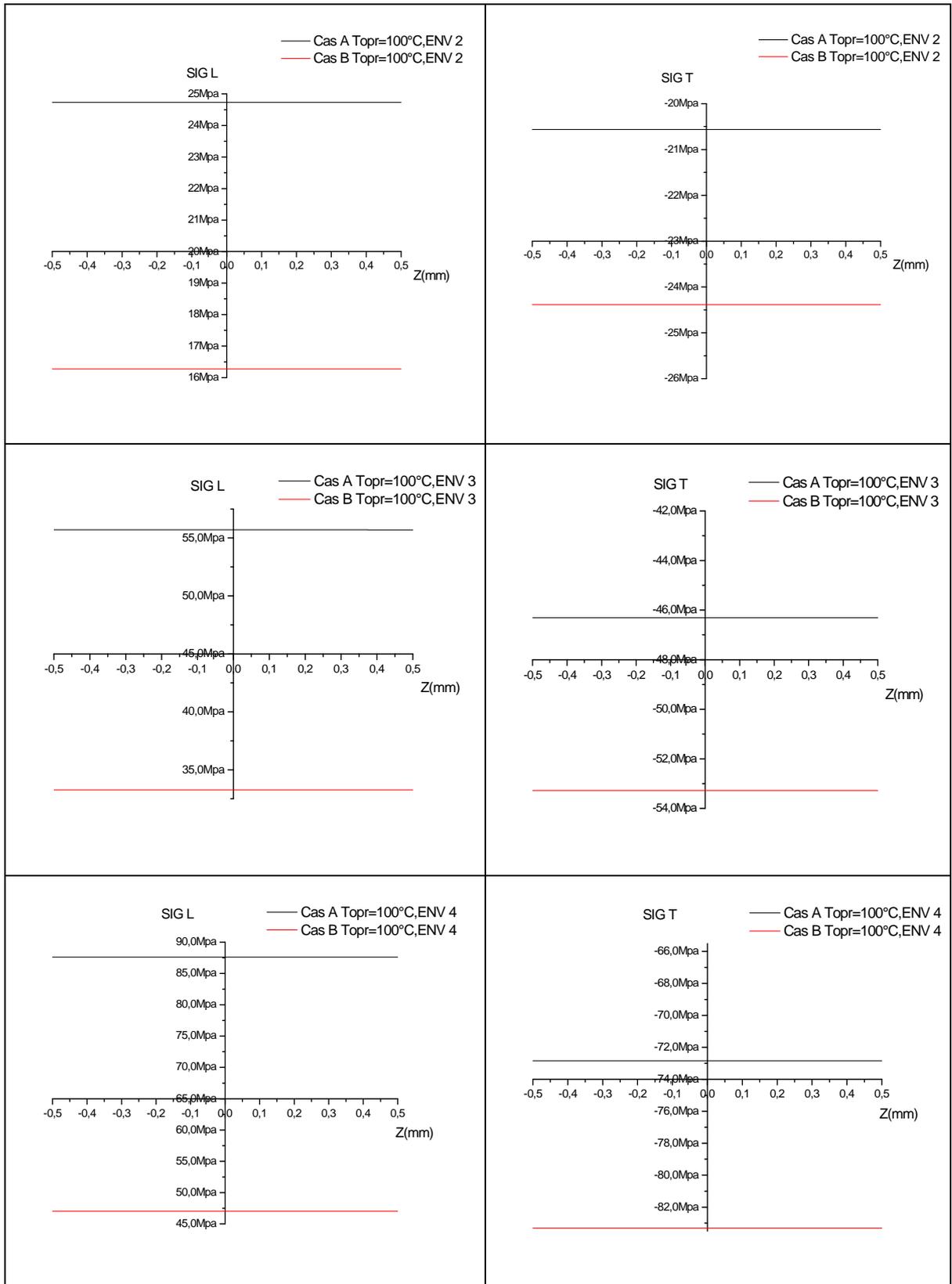


Figure 5.30 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

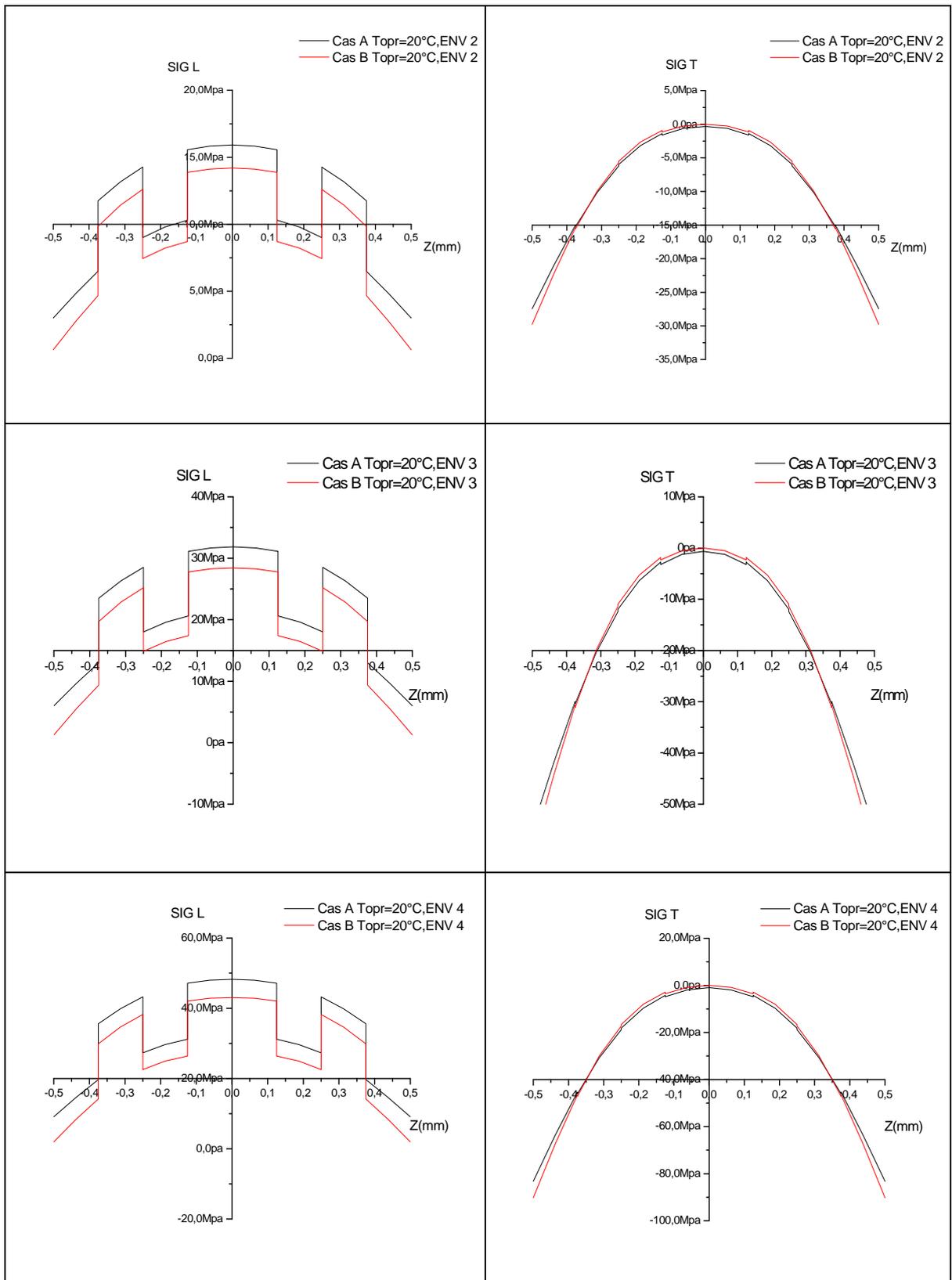


Figure 5.31 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

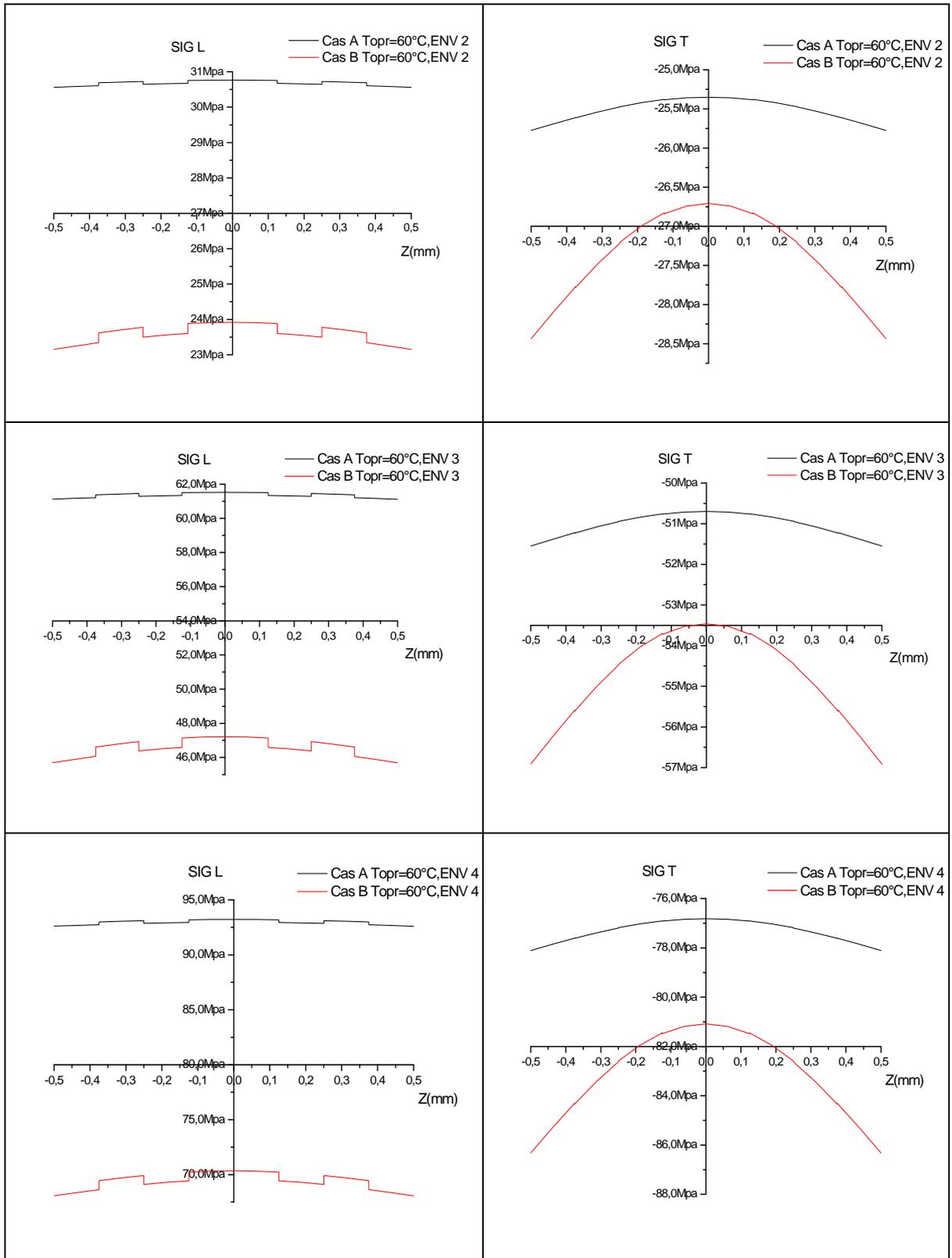


Figure 5.32 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

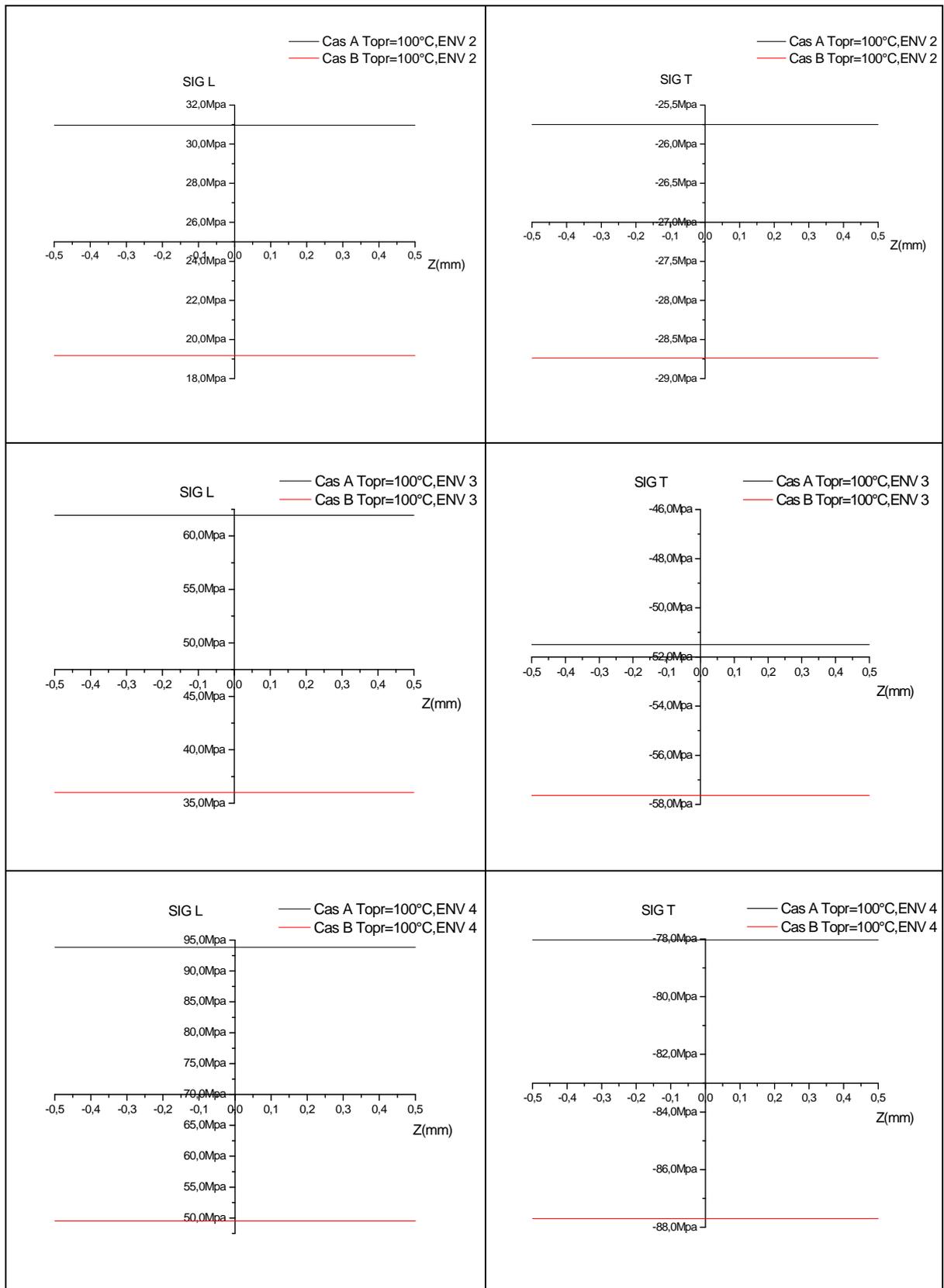


Figure 5. 33 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

Les figures 5.28-5.33 présentent les contraintes résiduelles longitudinales et transversales pour stratifié simple (Cas B) et les stratifiés hybrides (Cas A) pour un environnement hygrothermique et hygroscopique, à travers l'épaisseur de la plaque à 20°C, 60°C, 100°C pour des environnements variables.

La contrainte transversale est la plus sensible par l'hygrothermie, pour un environnement hygrothermique les stratifiés en AS/3501-5 (cas A) est plus sollicité que le T300/5208 (cas B) et cela est dû aux coefficients de déformation thermique qui sont plus importants que les coefficients du T300/5208 (voir tableau 5.2), par contre pour un chargement hygroscopique c'est le stratifié en T300/5208 qui est le plus sollicité et cela est dû aux coefficients d'expansion hygroscopiques qui sont plus importants que celui du AS/3501-5

### 5.7 Étude du comportement hygrothermique des stratifiés hybrides vieillis

Afin d'analyser les effets d'hybridation, le stratifié T300/5208 du paragraphe 5.5.1 est hybridé en remplaçant les deux couches qui sont en contact avec le milieu extérieur, par deux couches en AS/3501-5 comme le montre la figure 5.34.

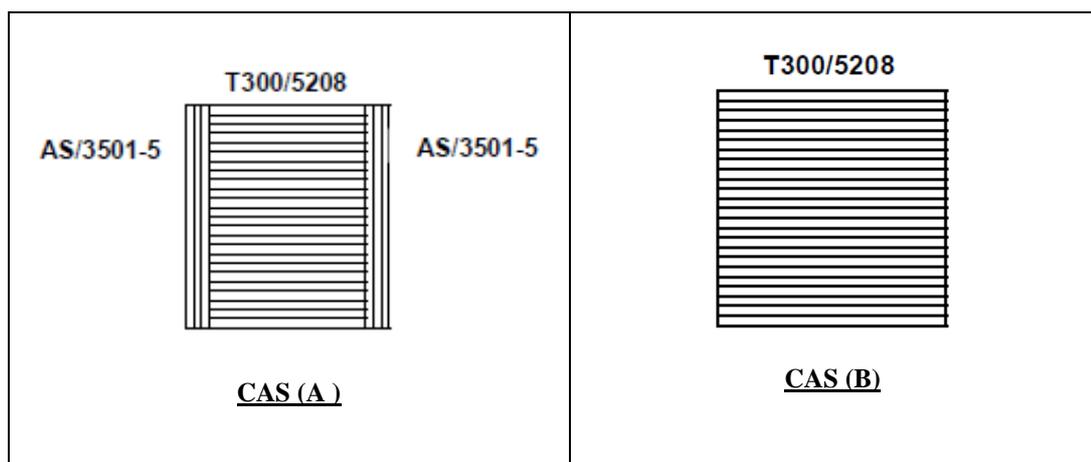


Figure 5.34 : Hybridation d'un stratifié en T300/5208.

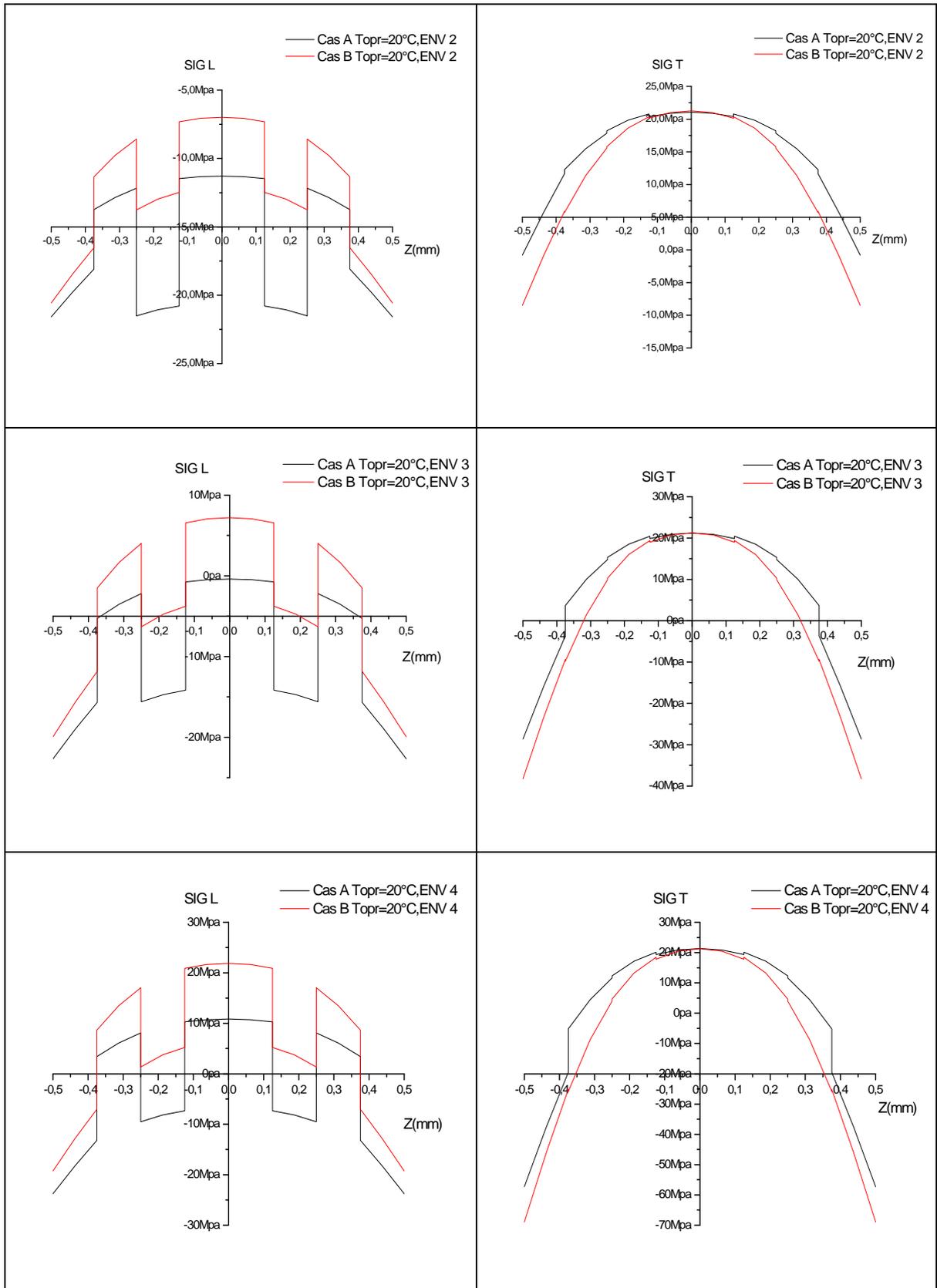


Figure 5.35 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

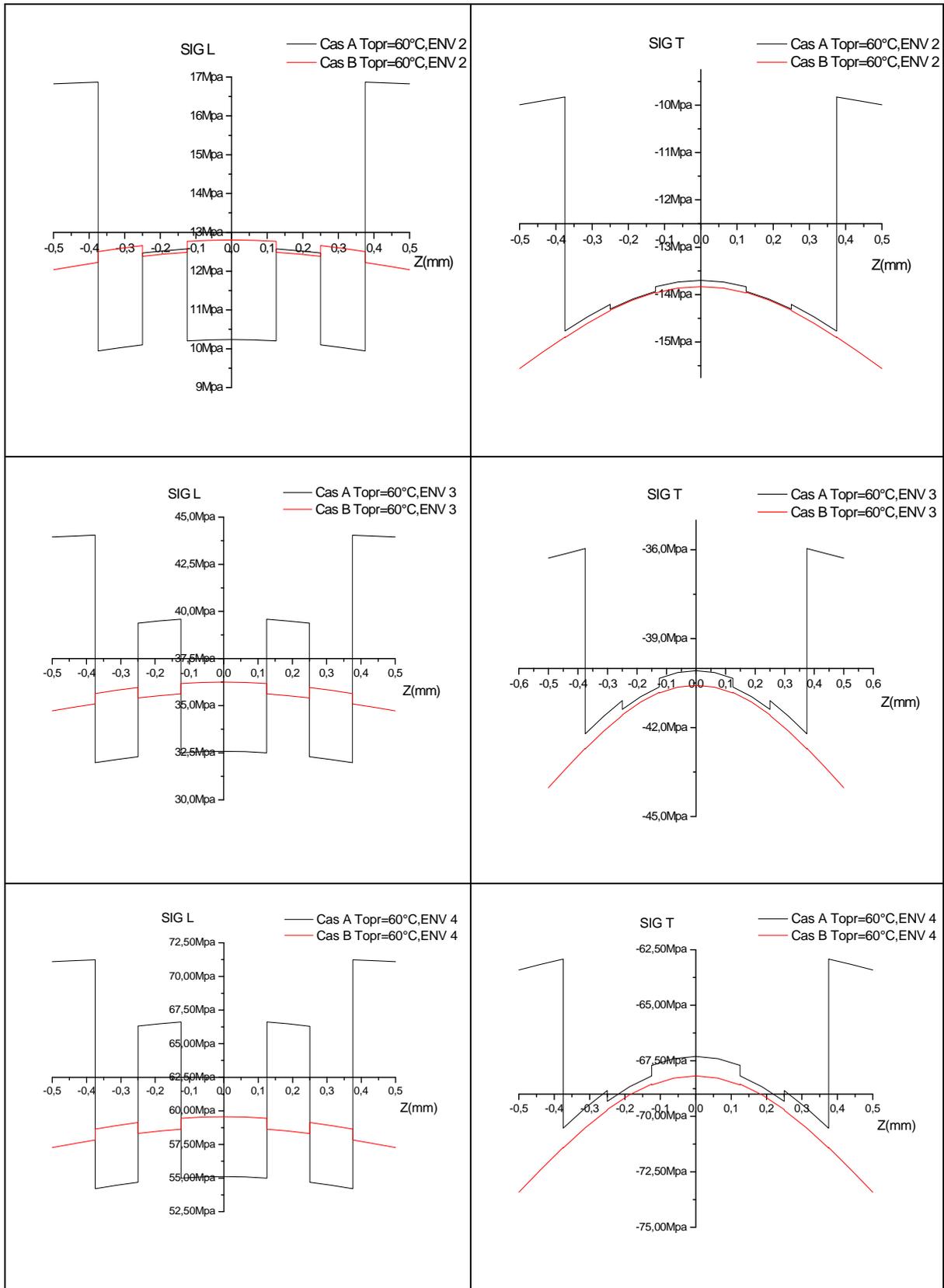


Figure 5.36 : Contraintes hydrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

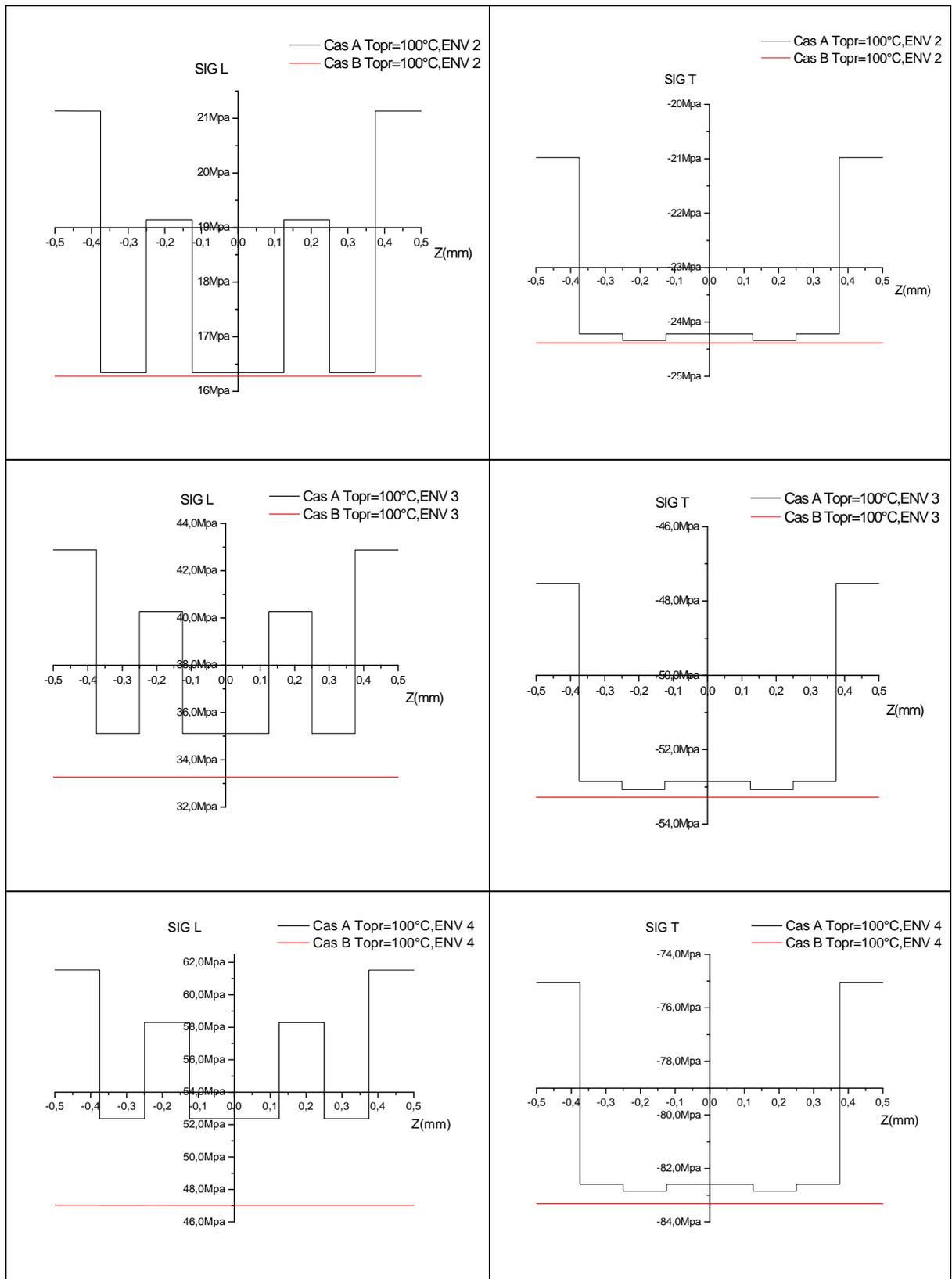


Figure 5.37 : Contraintes hydrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

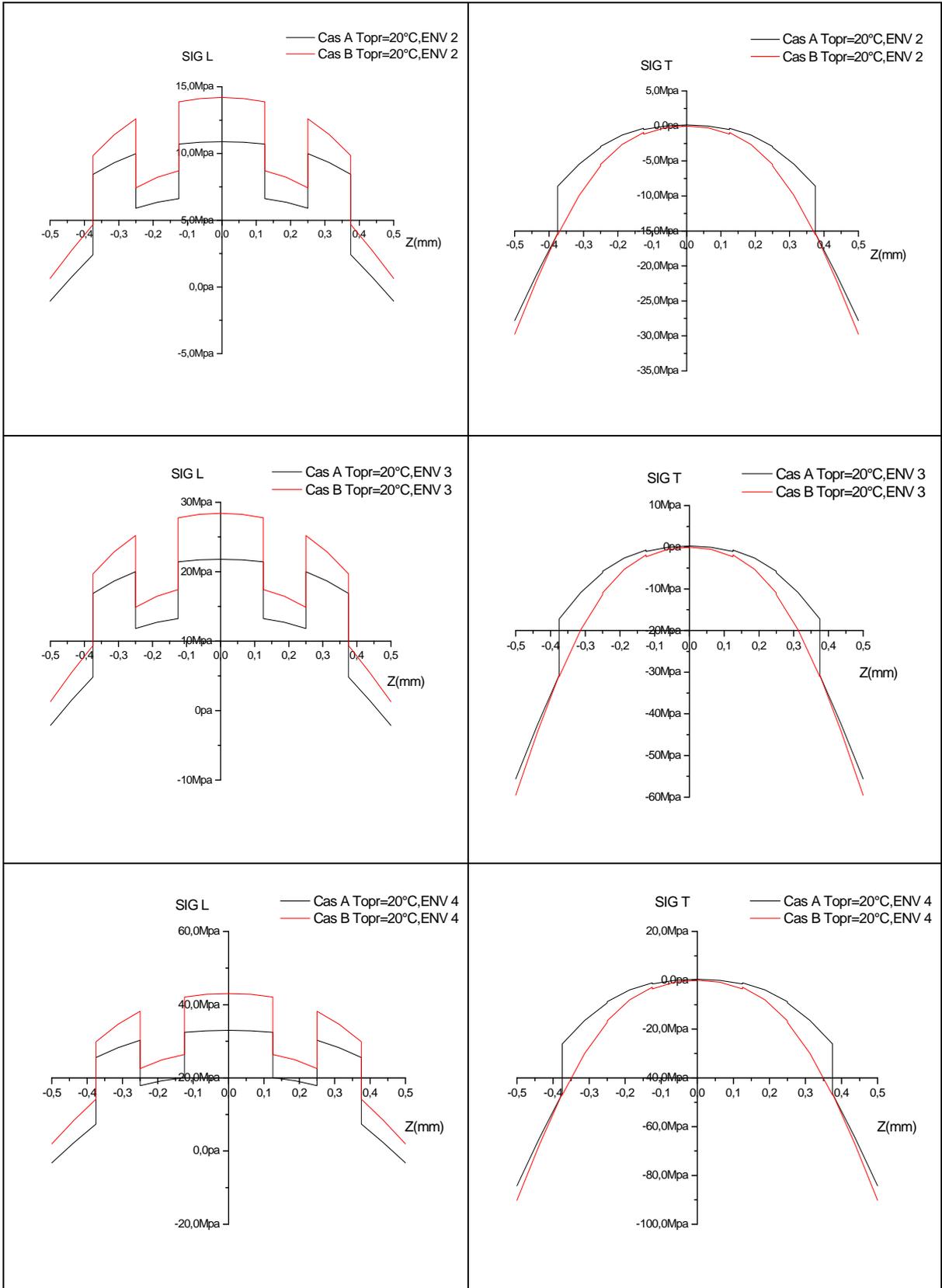


Figure 5.38 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=20°C, t=422h

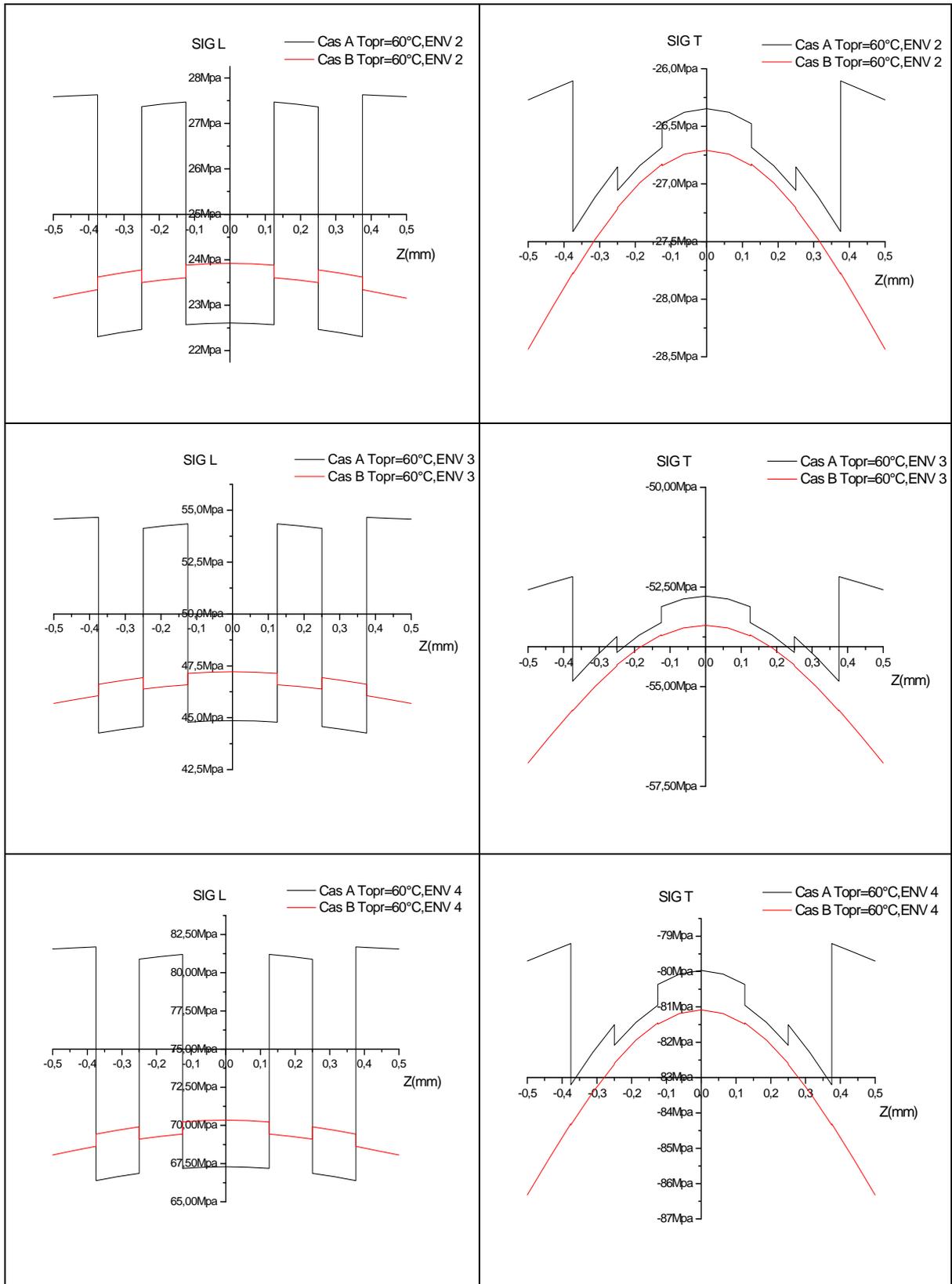


Figure 5.39 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=60°C, t=422h

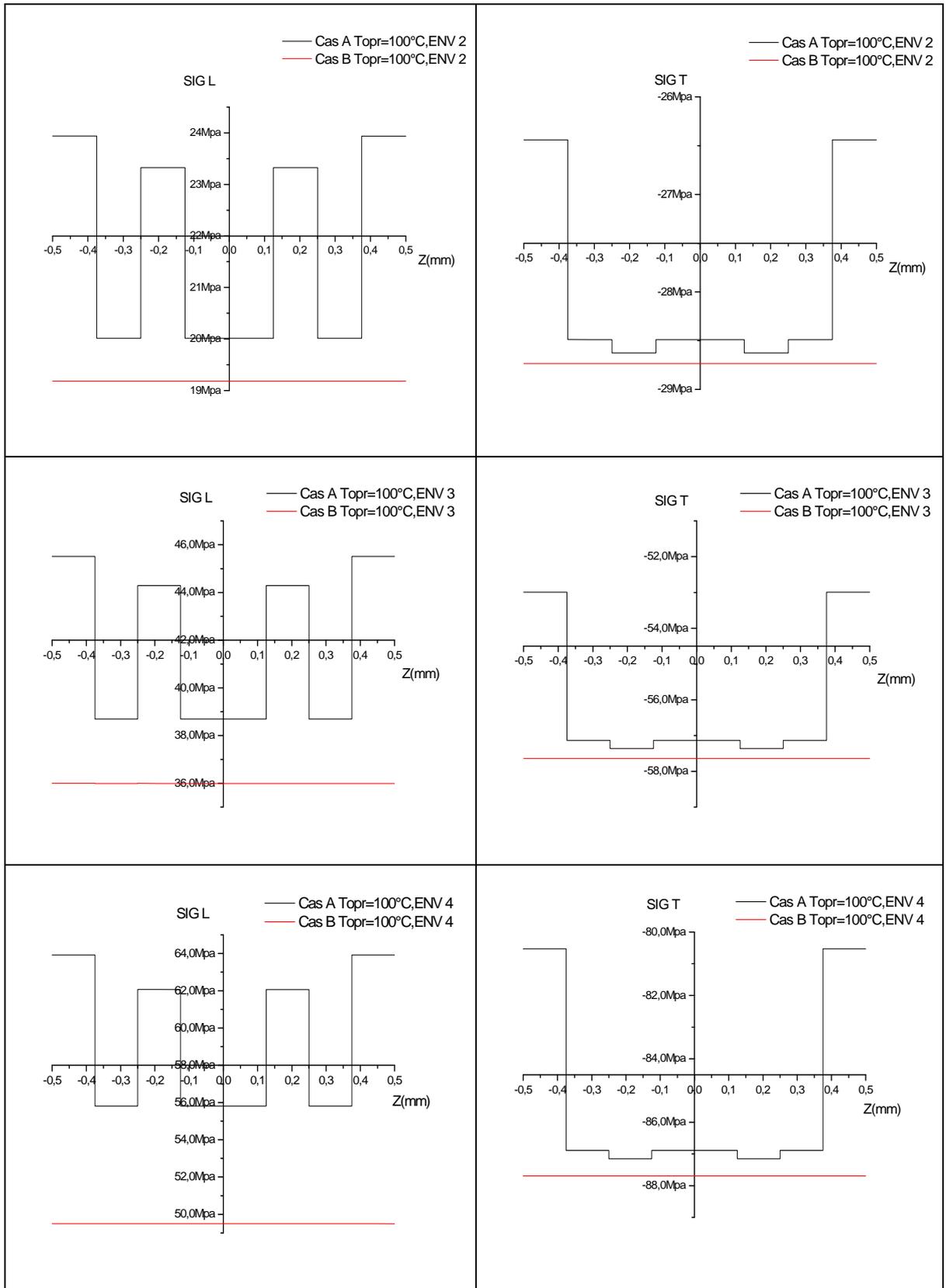


Figure 5.40 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=100°C, t=422h

Les figures 5.35-5.40 présentent les contraintes résiduelles longitudinales et transversales pour stratifié simple (Cas B) et les stratifiés hybrides (Cas A) pour un environnement hygrothermique et hygroscopique, à travers l'épaisseur de la plaque à 20°C, 60°C, 100°C pour des environnements variables. Pour le cas A et le cas B les plis internes sont en traction et les plis externes sont en compression. Pour une même température qui est faible, au même instant et à des environnements différents les plis internes gardent les mêmes valeurs des contraintes en traction pour un stratifié simple et pour le stratifié hybride. Par contre les valeurs des contraintes en compression varient avec la variation de l'humidité relative plus cette valeur est importante plus les contraintes en compression sont importantes, mais qui restent loin de la résistance en compression. Ces résultats sont dus au fait que les plis externes sont sujets à l'absorption dont le processus est très lent. Les plis internes n'ont pas eu le temps suffisant pour recevoir l'effet hygroscopique. Le stratifié hybride présente des contraintes de compression moins importantes que le stratifié simple. A une température élevée les contraintes dans tous les stratifiés aussi bien pour le cas A que le cas B sont en compression, plus l'humidité relative augmente plus les contraintes sont importantes, à une HR de 100% les contraintes de compression atteignent la limite à la rupture à partir de HR=66% pour les plis internes, par contre dans les plis externes les limites à la rupture des contraintes sont atteintes pour une HR =100%.

### 5.8 Étude du comportement hygrothermique hybride d'un stratifié en AS/3501-5

Afin d'analyser les effets d'hybridation, le stratifié AS/3501-5 est hybridé en remplaçant les deux couches qui sont en contact avec le milieu extérieur par deux couches en T300/5208 comme le montre la figure 5.41.

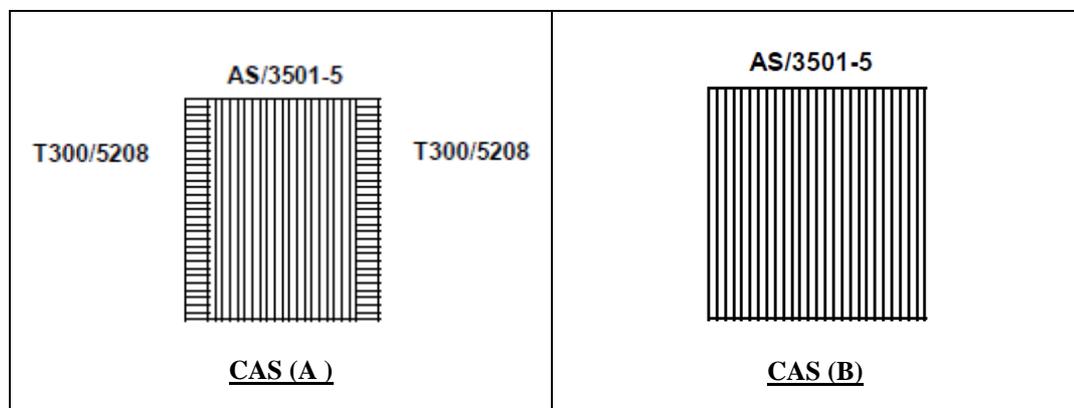


Figure 5.41 : Hybridation d'un stratifié en AS/3501-5.

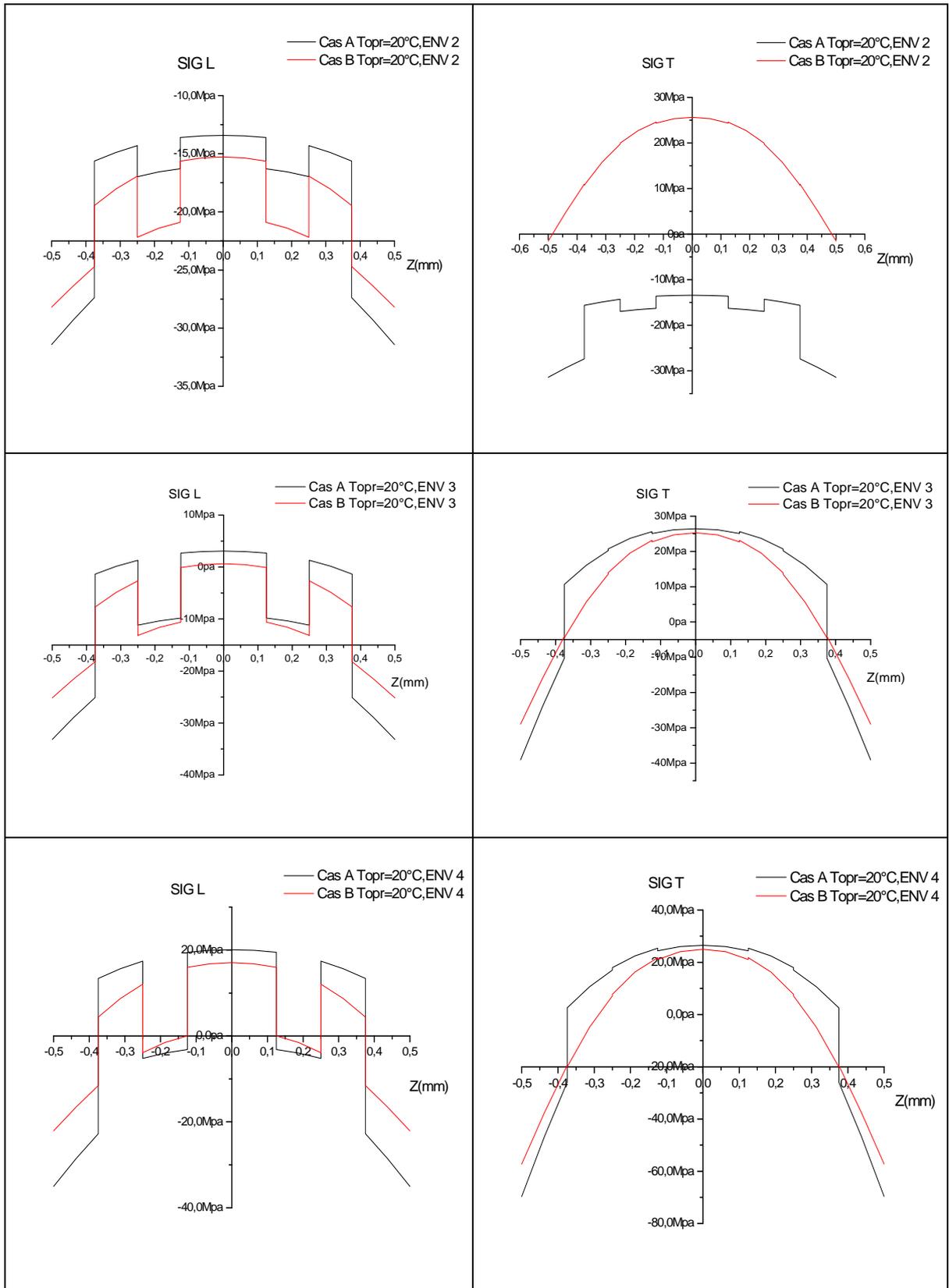


Figure 5.42 : Contraintes hydrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

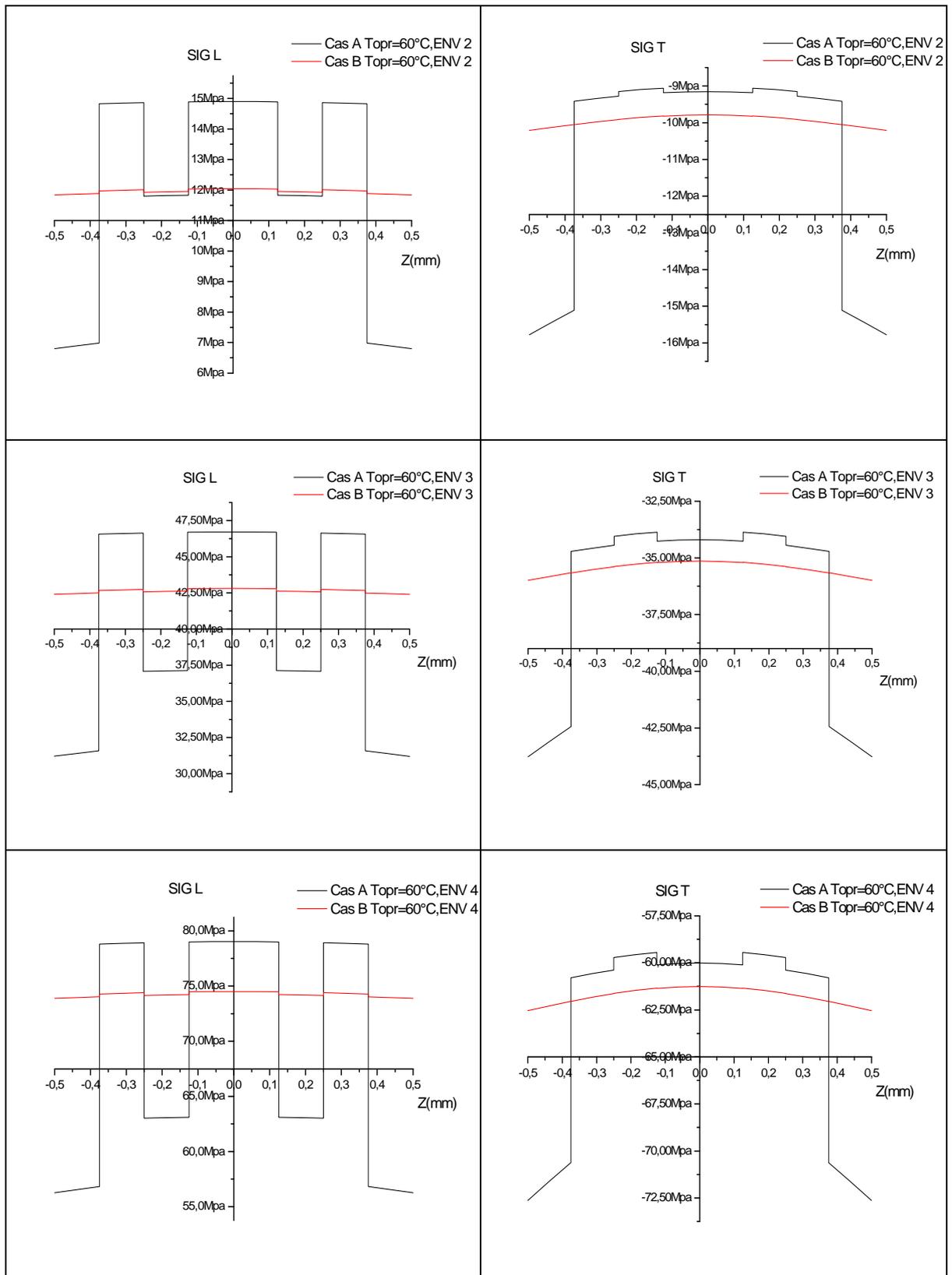


Figure 5.43 : Contraintes hydrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

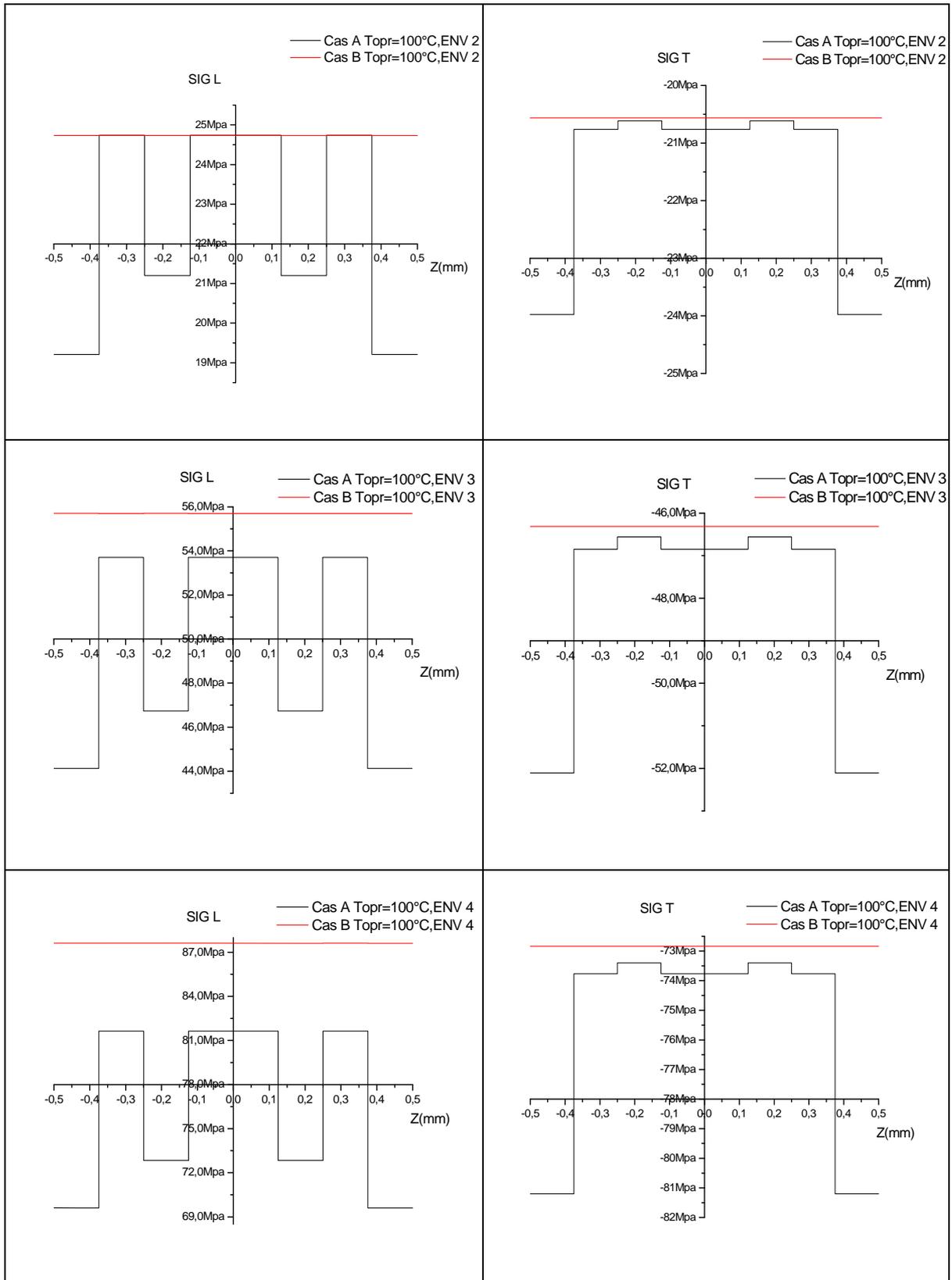


Figure 5.44 : Contraintes hydrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=100°C, t=422h

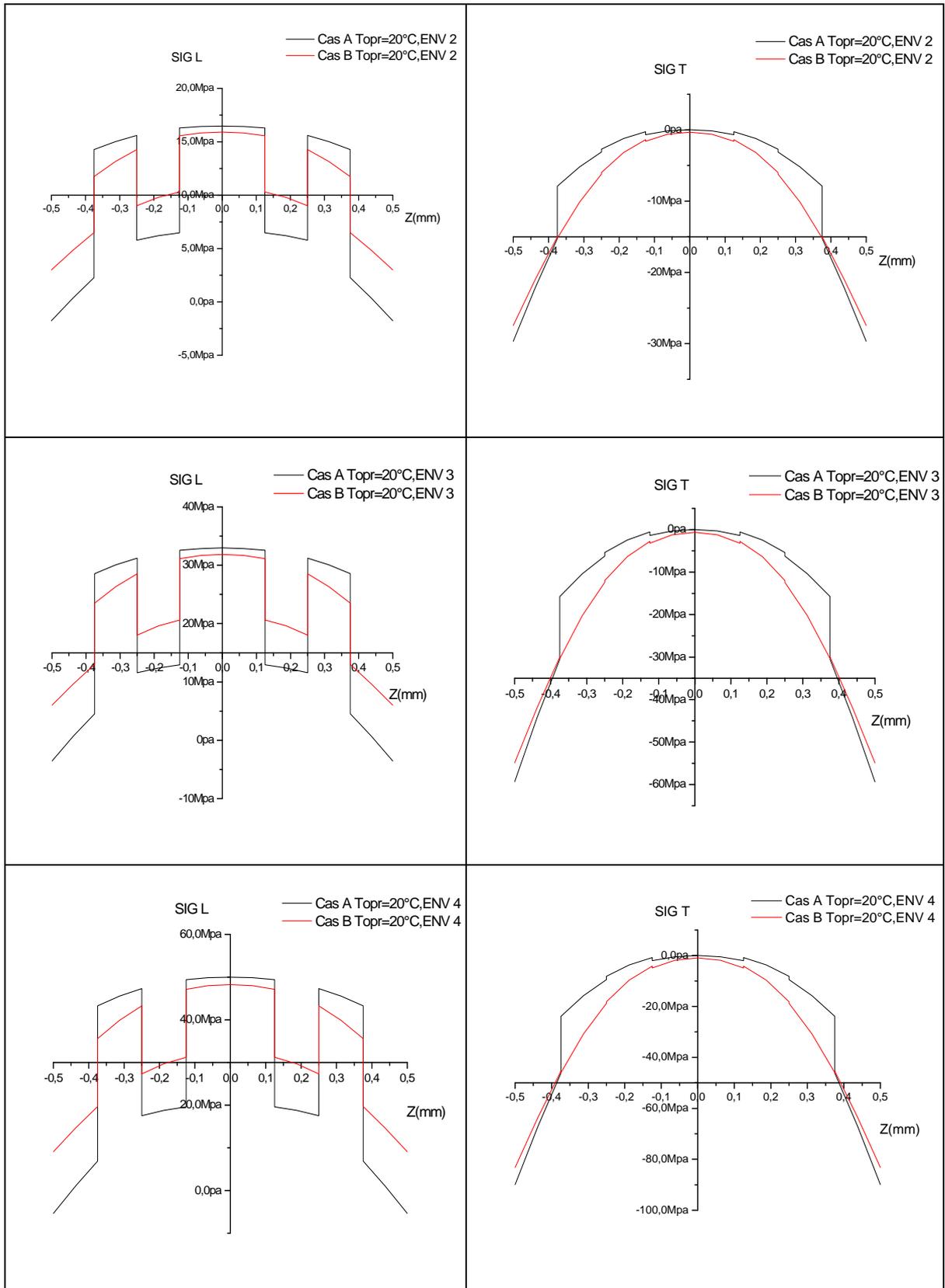


Figure 5.45 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

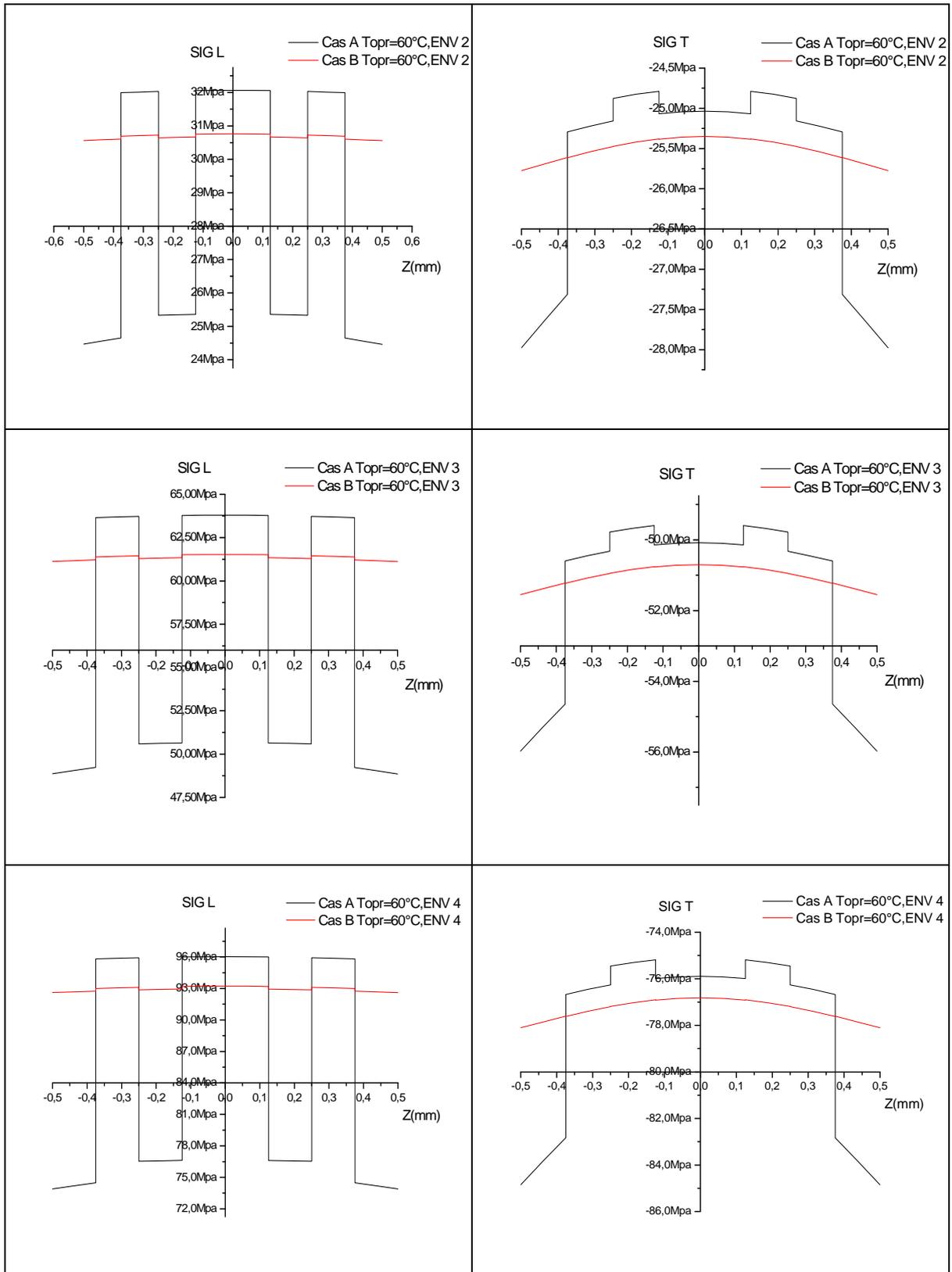


Figure 5.46 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

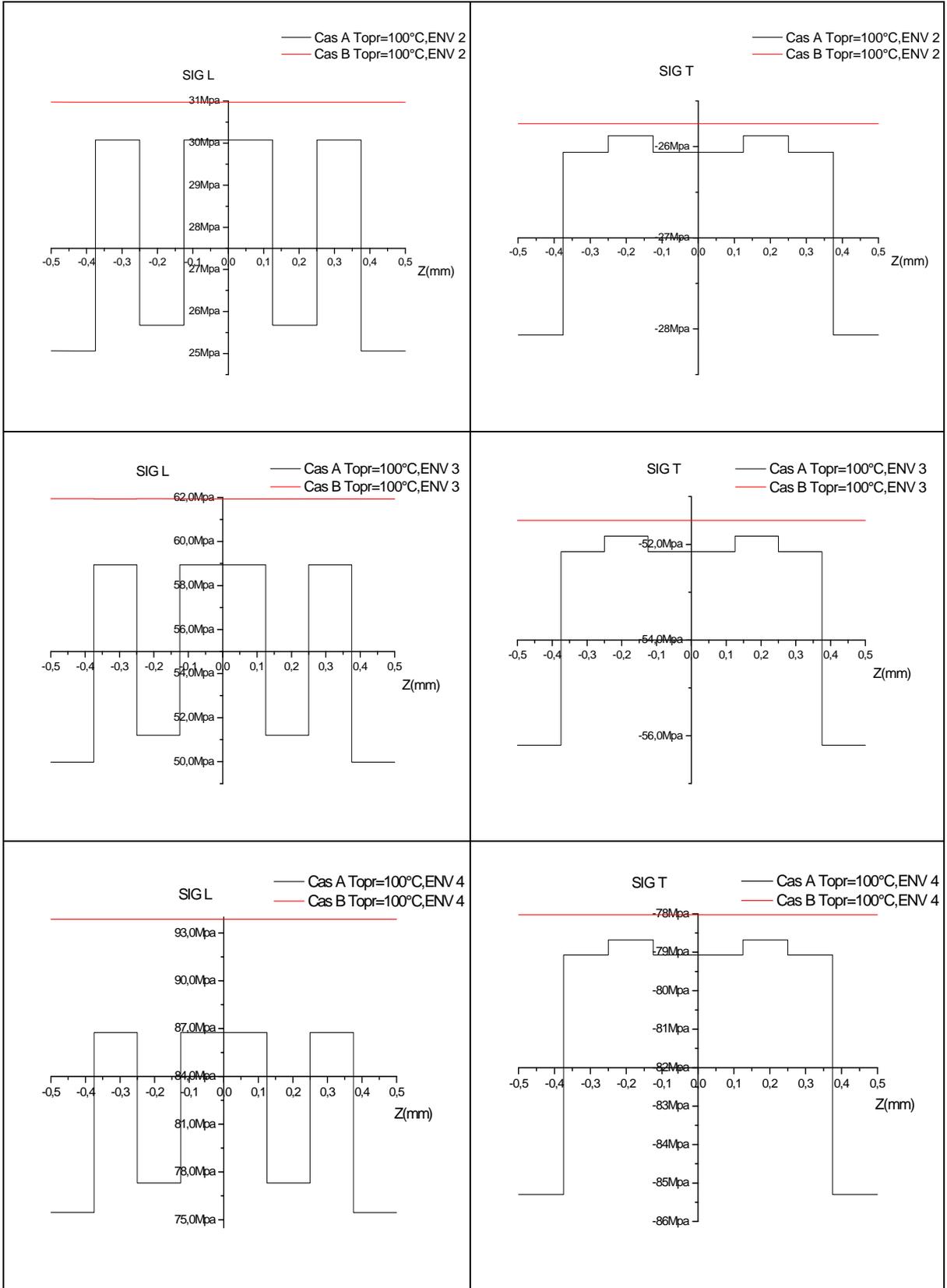


Figure 5.47 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=100°C, t=422h

Les figures 5.42-5.47 présentent les contraintes résiduelles longitudinales et transversales pour stratifié simple (Cas B) et les stratifiés hybrides (Cas A) pour un environnement hygrothermique et hygroscopique, à travers l'épaisseur de la plaque à 20°C, 60°C, 100°C pour des environnements variables. Pour le cas A et le cas B les plis internes sont en traction et les plis externes sont en compression pour une température faible, pour une température élevée tous les plis sont en compression, plus le niveau d'humidité est élevé les contraintes sont plus importantes, l'utilisation de la configuration hybride (Cas B) a permis de réduire le niveau des contraintes des plis internes, et cela est dû à la diffusion faible des couches extérieures en T300/5208, donc les couches en T300/5208 ont joué un rôle d'obstacle pour le passage d'eau, en examinant le niveau de contrainte pour le cas hygroscopique par rapport à l'état de contrainte pour le cas hygrothermique, on voit que la température relaxe le niveau des contraintes.

### 5.9 Étude comparative du comportement hygrothermique des stratifiés hybrides

Dans ce paragraphe on va présenter le comportement des deux configurations hybrides étudiées dans les deux paragraphes précédents, afin de déterminer laquelle des deux configurations est préférable.

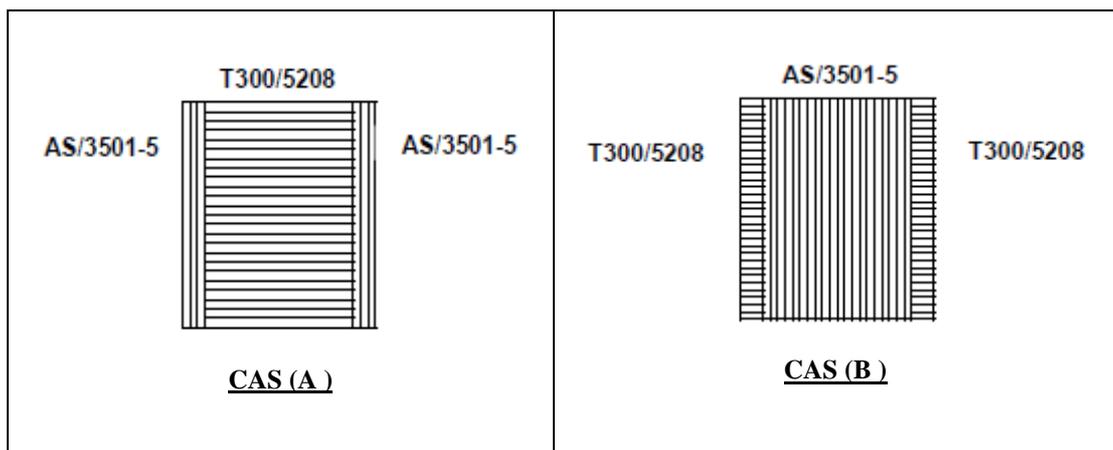


Figure 5.48 : Configurations hybrides.

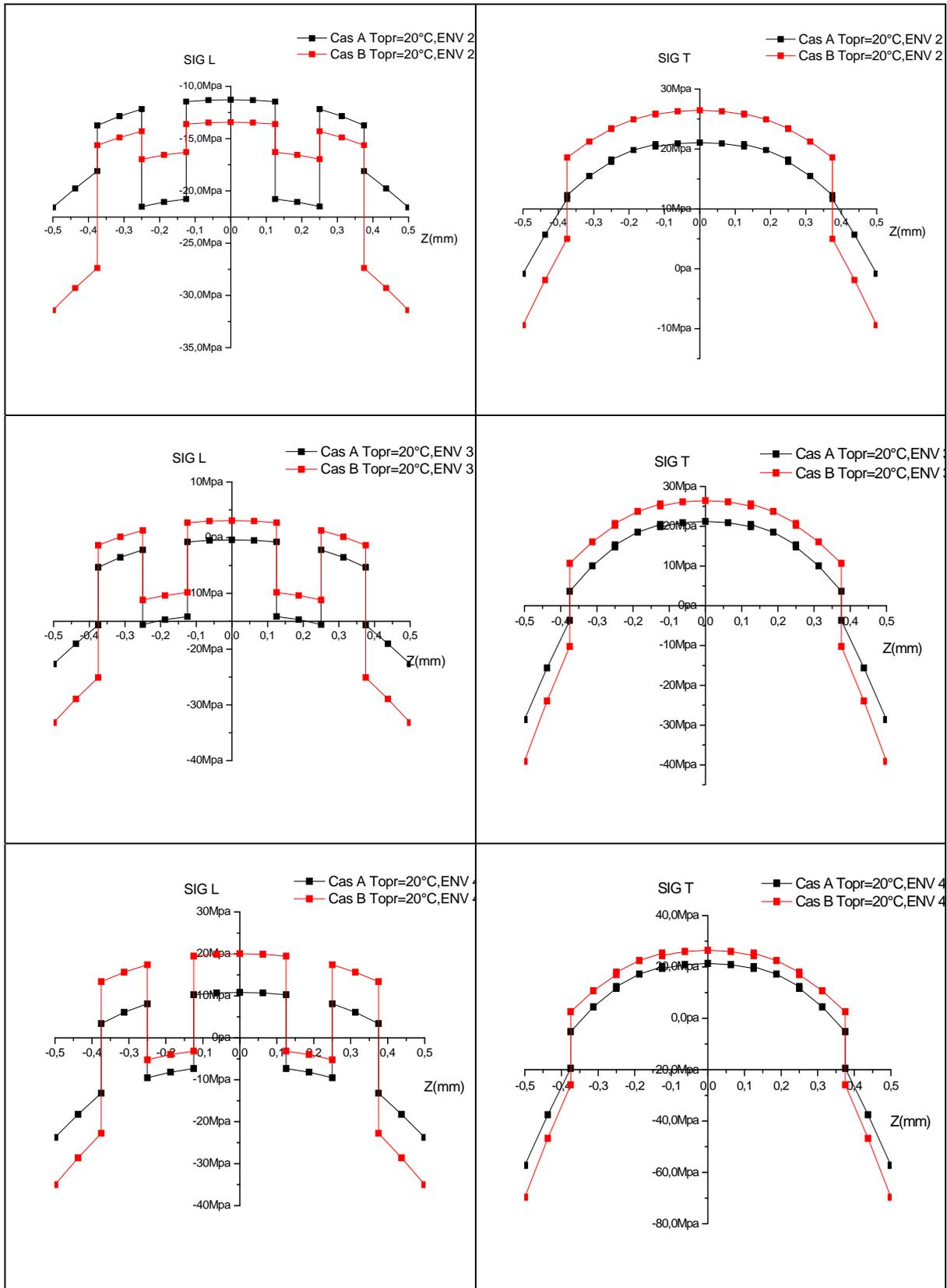


Figure 5.49 : Contraintes hygrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=20°C, t=422h

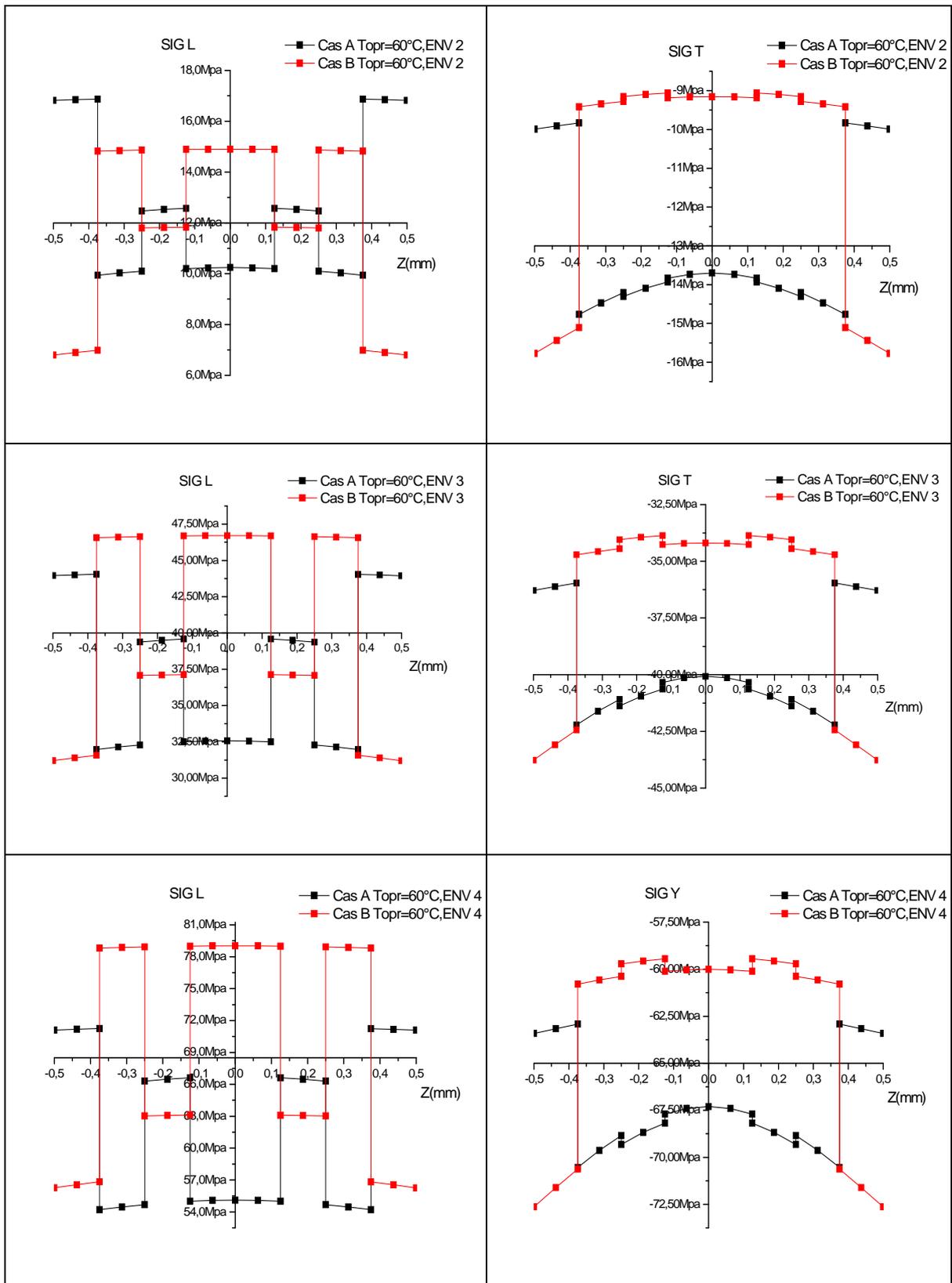


Figure 5.50 : Contraintes hydrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

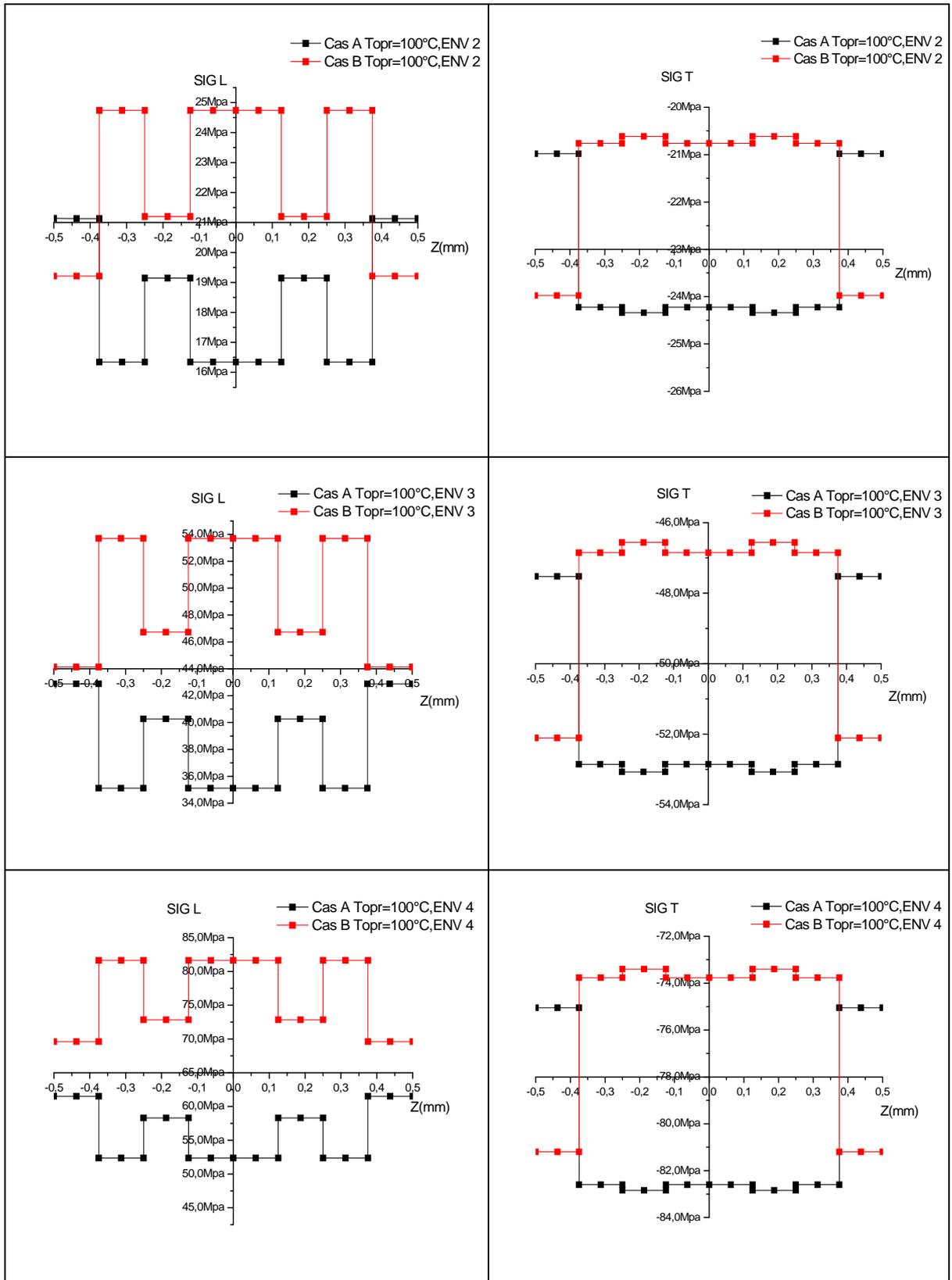


Figure 5.51: Contraintes hydrothermiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=100°C, t=422h

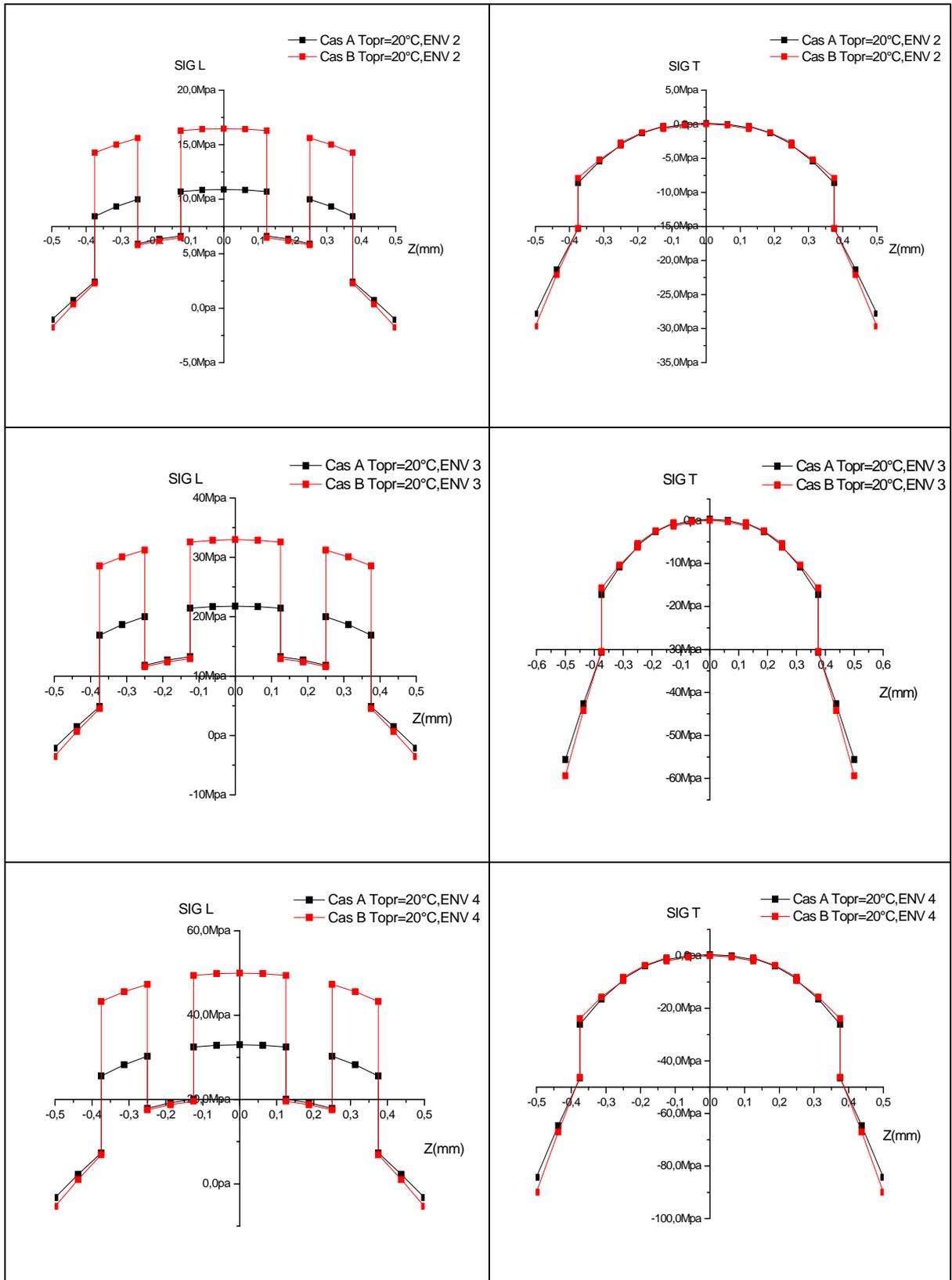


Figure 5.52 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=20°C, t=422h

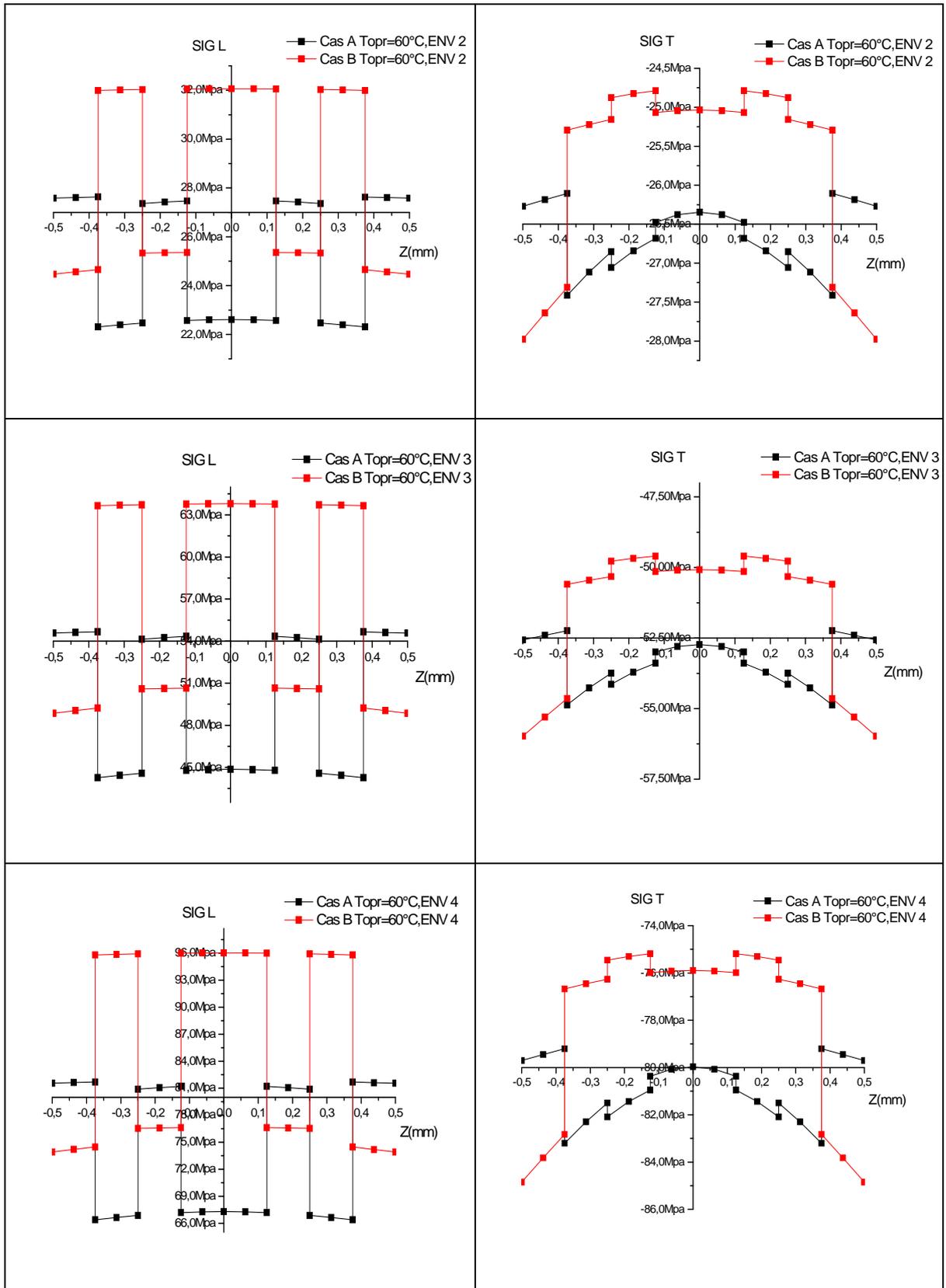


Figure 5.53 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=60°C, t=422h

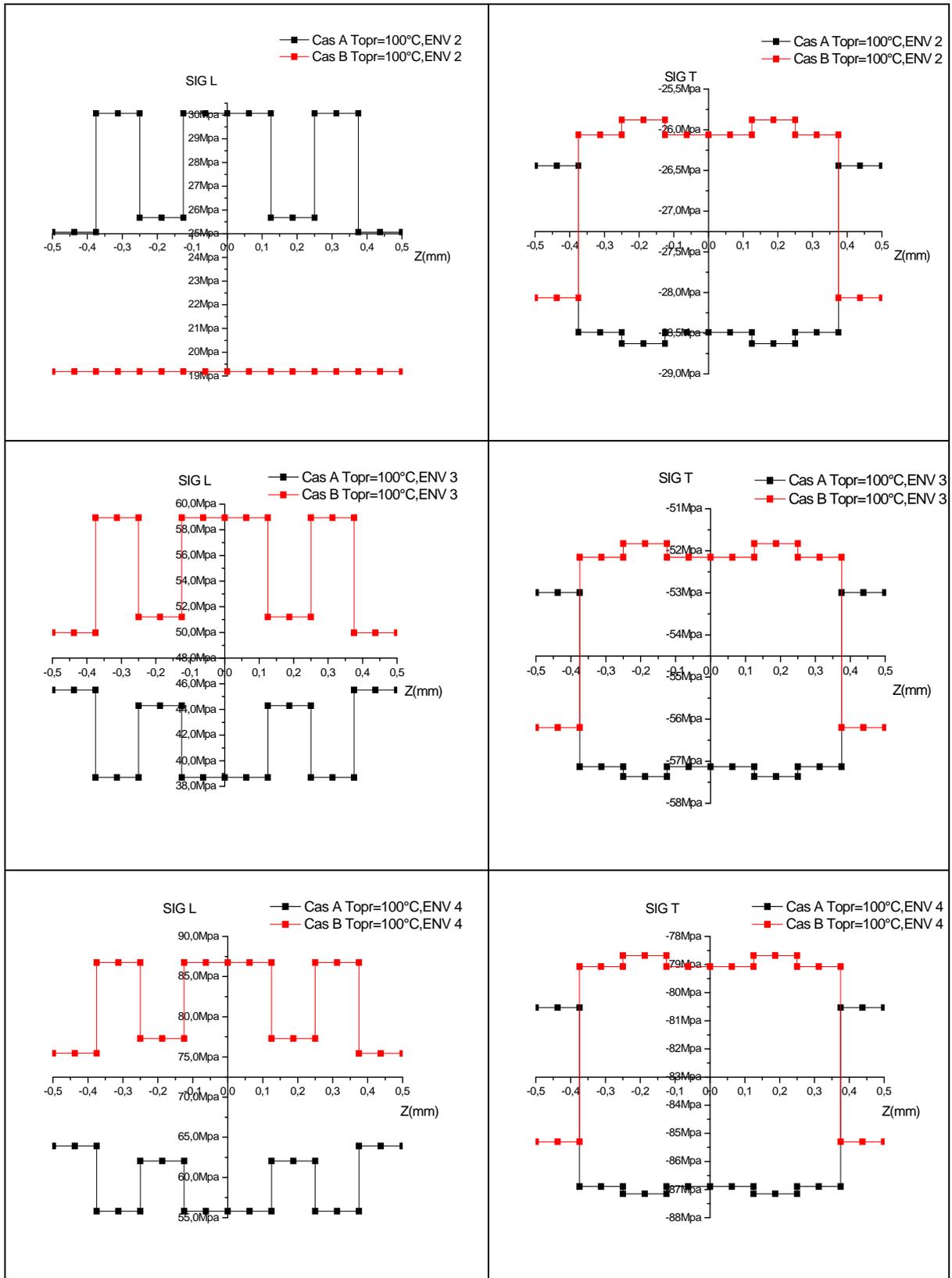


Figure 5.54 : Contraintes hygroscopiques longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=100°C, t=422h

À travers les figures 5.49 -5.54, la configuration B T300/5208-AS/3501-5- T300/5208 est la plus intéressante de point de vu contrainte des couches internes, cette dernière permet de réduire les contraintes hygrothermiques des couches internes

### 5.10 Effets de la fraction volumique

Dans ce paragraphe, le stratifié en T300/5208 utilise dans le paragraphe 5.5.1 est hybride en augmentant la fraction volumique de 0.6 à 0.74 pour les deux couches qui sont en contact avec le milieu extérieure , la configuration modifiée par la fraction volumique est représentée dans la figure 5.55

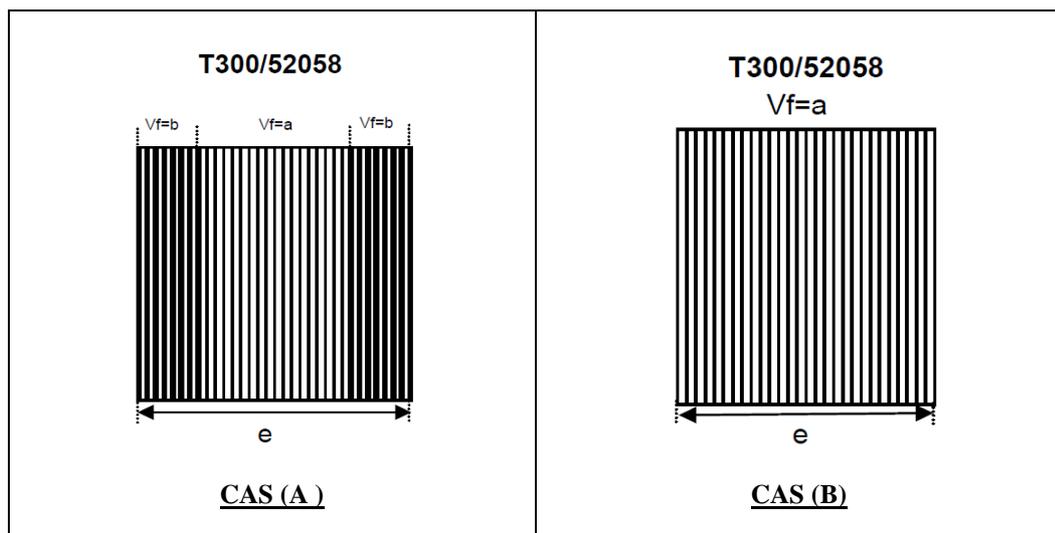


Figure 5.55 : Configuration hybridée en fraction volumique.

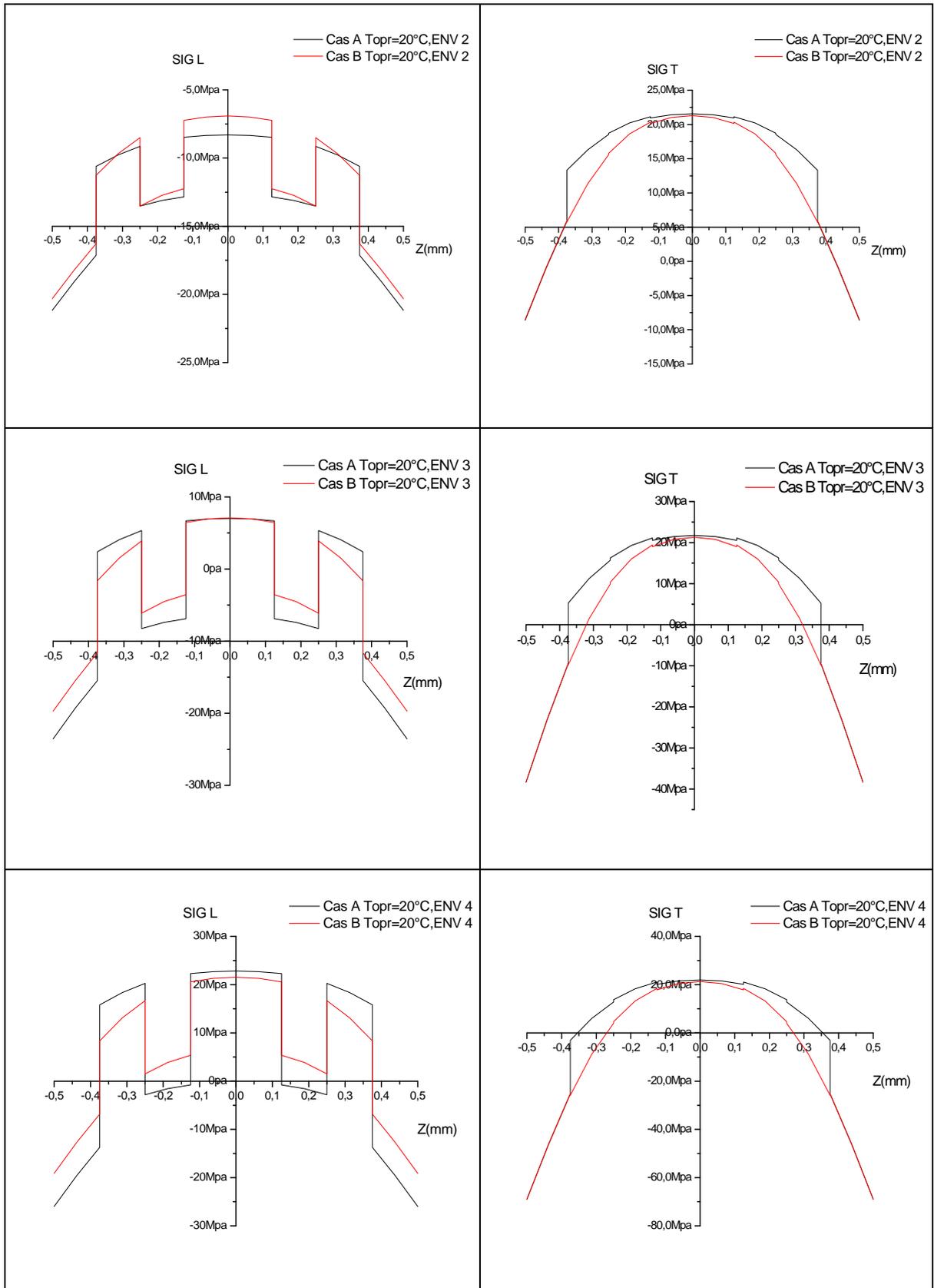


Figure 5.56 : Contraintes hydrothermique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à Topr=20°C, t=422h

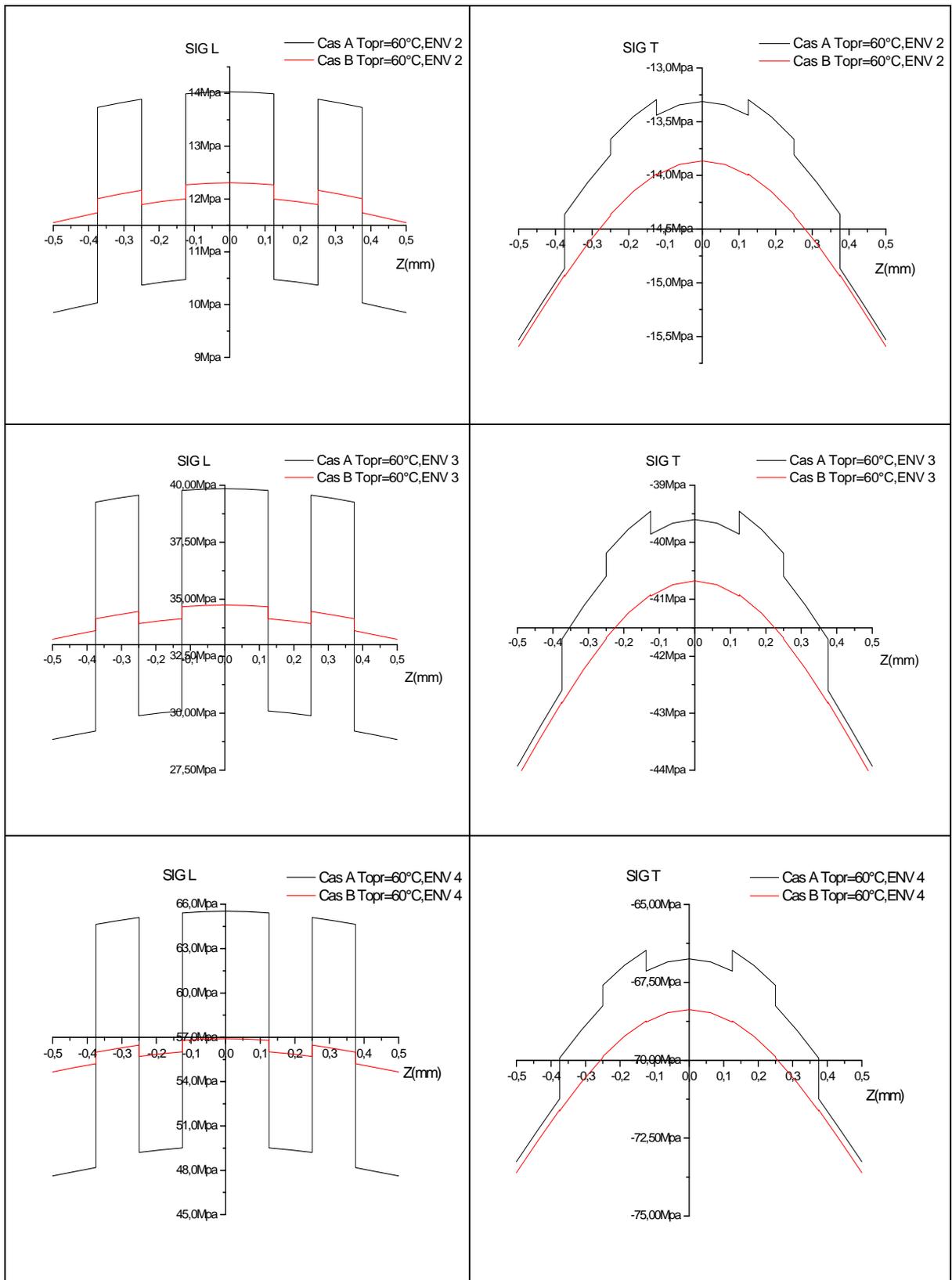


Figure 5.57 : Contraintes hydrothermique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

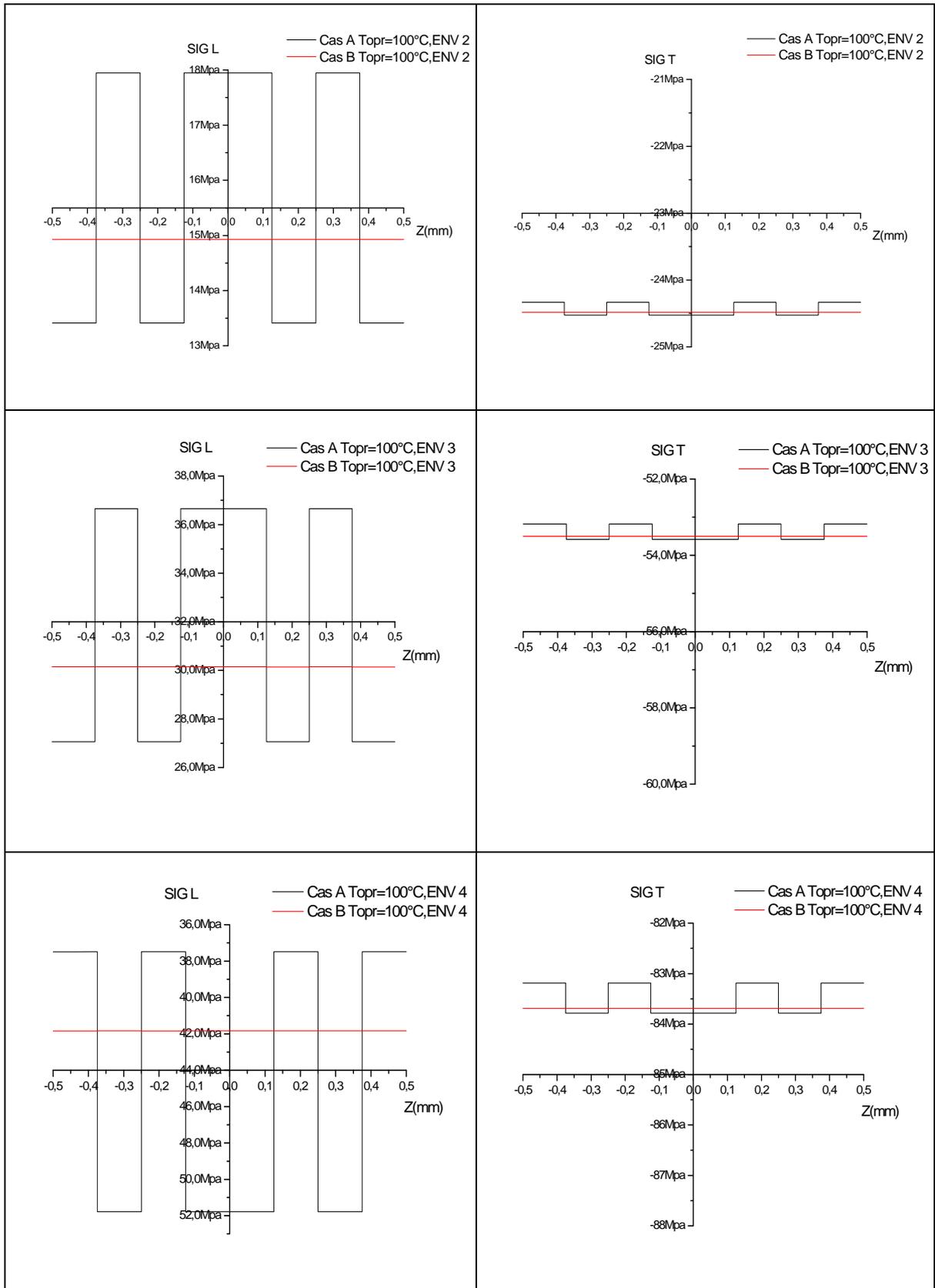


Figure 5.58 : Contraintes hydrothermique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

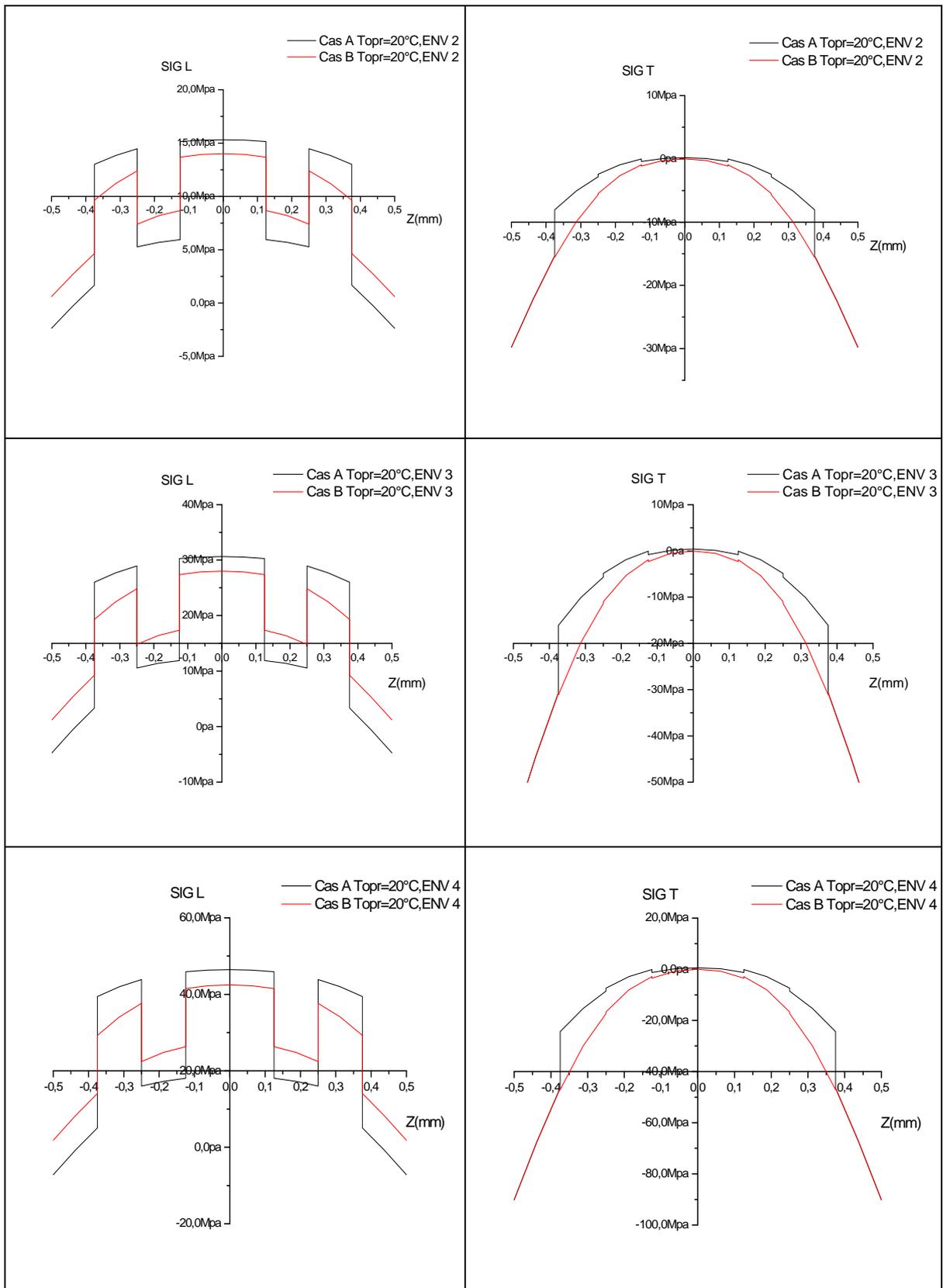


Figure 5.59 : Contraintes hygroscopique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

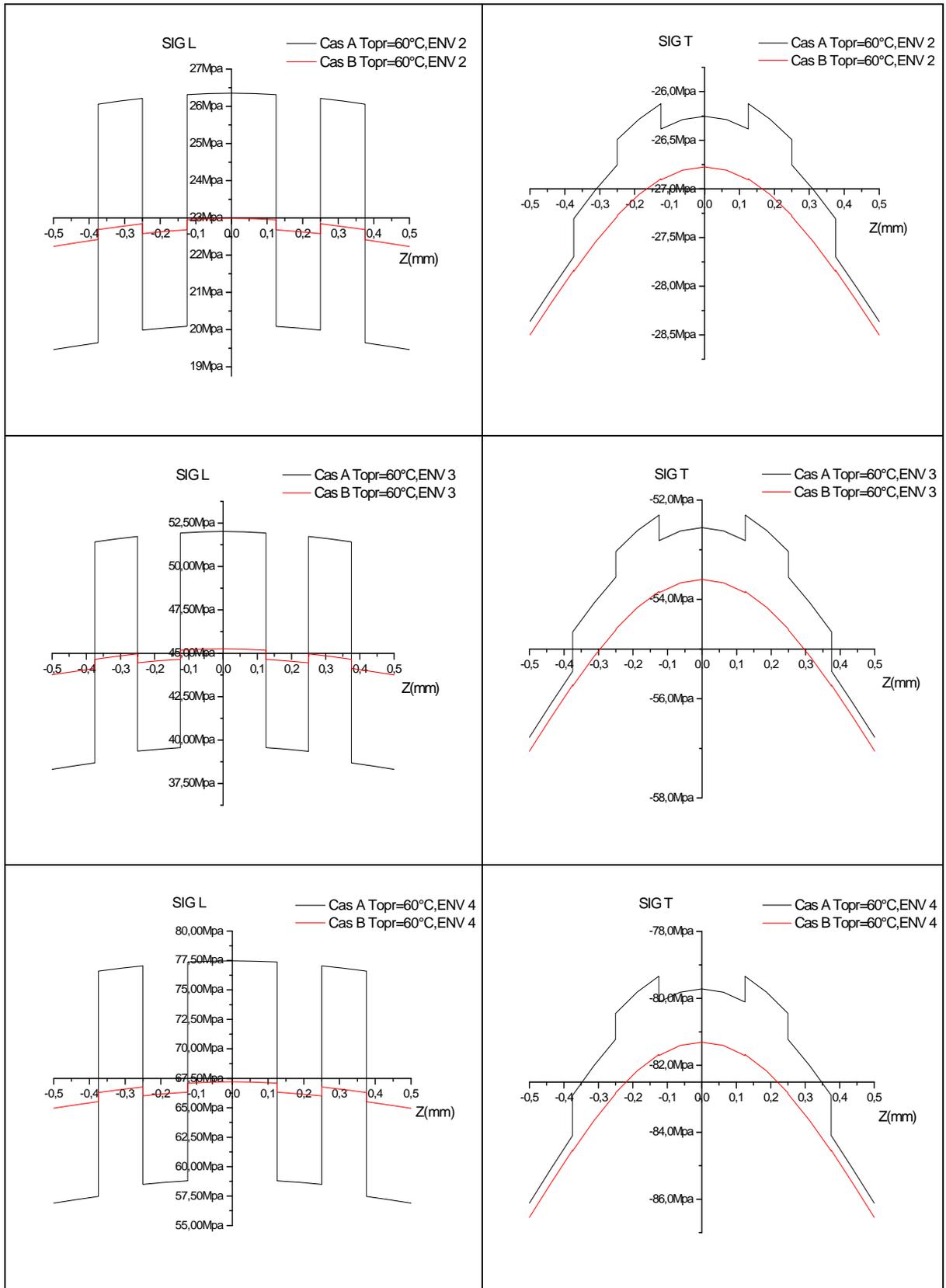


Figure 5.60 : Contraintes hygroscopique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

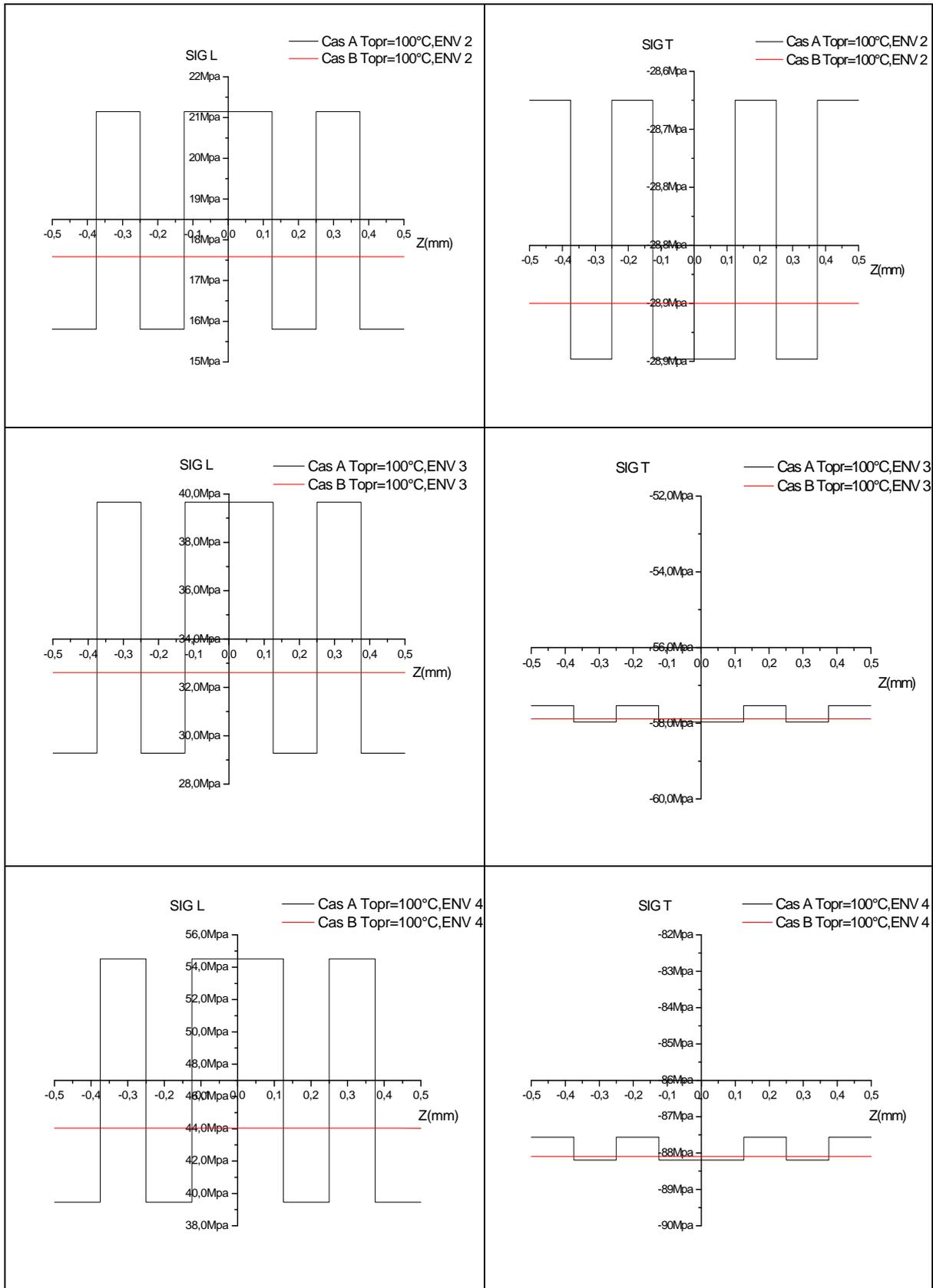


Figure 5.61 : Contraintes hygroscopique longitudinales et transversales pour les deux cas A et B à  $T_{opr}=100^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

L'effet de la fraction volumique des couches extérieures est très intéressant, l'avantage se voit à travers les figures 5.57 et 5.60 , la configuration A permet d'isoler les couches internes et joue un rôle d'obstacle contre la diffusion d'eau, la contrainte transversale hygrothermique au centre du stratifié est passée de -13.8 Mpa pour le stratifié simple au -13.25 Mpa pour le stratifié hybridé à une température de 60°C et une humidité de 33% ,pour une humidité de 66% et toujours au centre du stratifié la contrainte hygrothermique transversale est passée de -41.75 Mpa à -39.5 Mpa , pour l'environnement HR=100% elle passe de -68.5 Mpa au -66.75 Mpa , le même comportement est remarqué pour le cas des contraintes hygroscopiques , la configuration A est avantageuse juste pour des températures faibles , pour des hautes températures le phénomène de diffusion est très accéléré par la température et les deux couches hybrides perdent le rôle de l'obstacle.

#### 5.11 Effets de prise en compte des chutes des caractéristiquement mécaniques pour le calcul des contraintes résiduelles

Afin d'évaluer l'effet de la prise en compte des caractéristiques mécaniques durant le calcul des contraintes hygrothermiques nous avons présenté ci-dessous le comportement du stratifié en T300/5208 utilisé dans le paragraphe 5.6 , les résultats présentés sont calculés par deux différentes hypothèses , le premier c'est le Tsai simplifié où les caractéristiques mécaniques sont supposés des constantes et elles ne dépendent pas de la température et de l'humidité, le deuxième c'est le cas de la microanalyse où les caractéristiques mécaniques sont fonction de la température et de l'humidité d'opération .

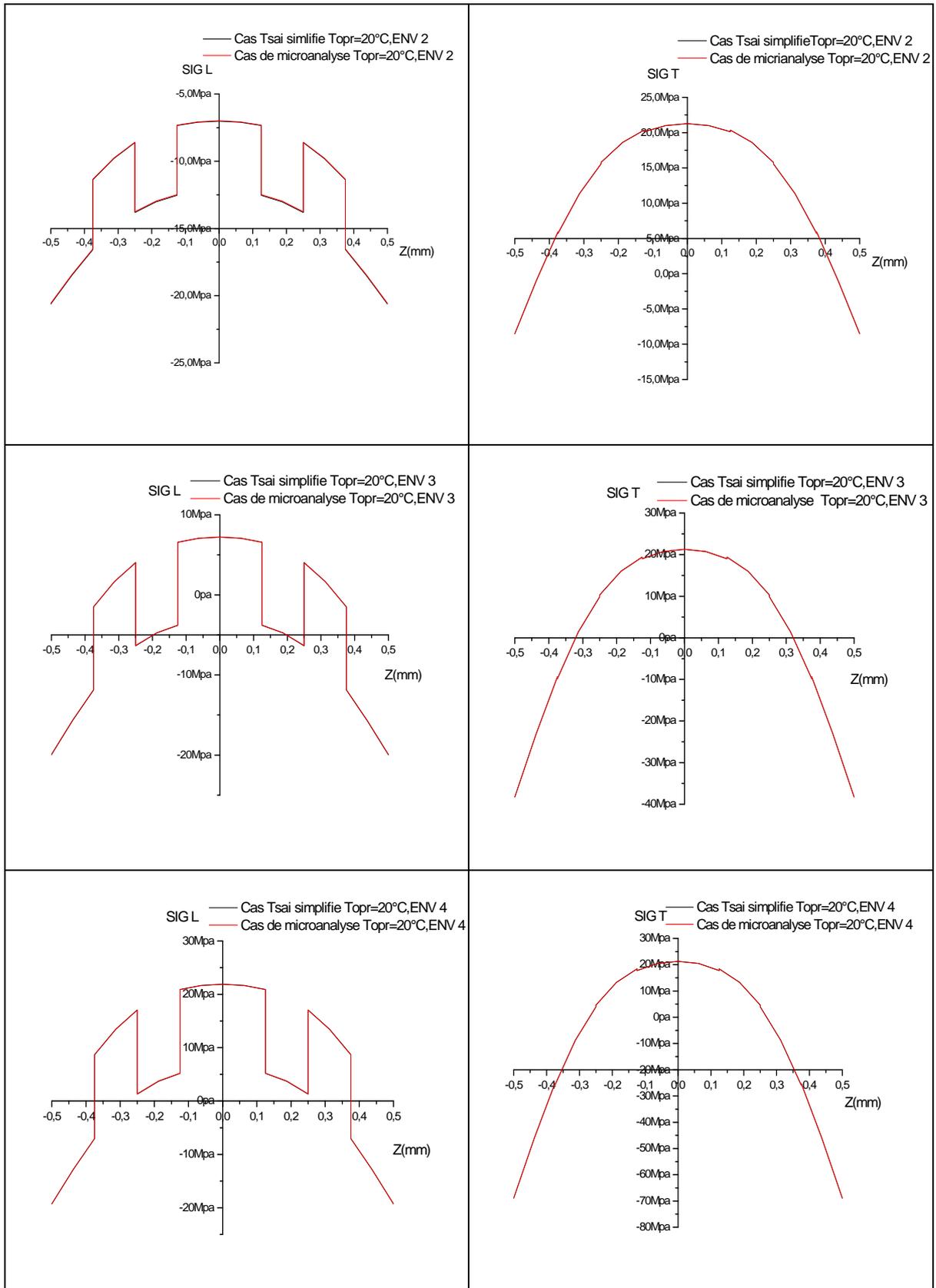


Figure 5.62 : Contraintes hygrothermique longitudinales et transversales pour le cas Tsai simplifié et de la microanalyse à  $T_{opr}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

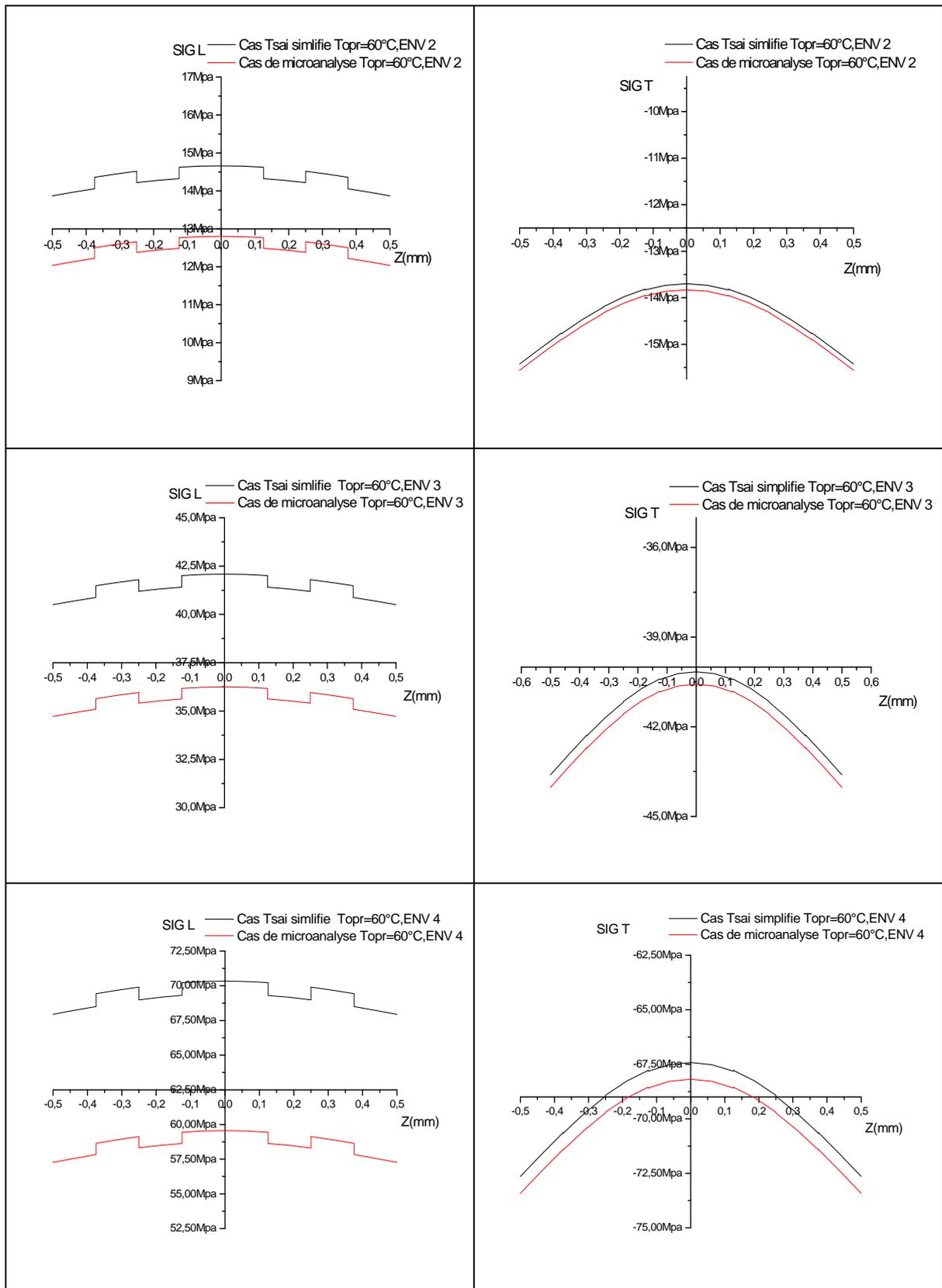


Figure 5.63 : Contraintes hygrothermique longitudinales et transversales pour le cas Tsai simplifié et de la microanalyse à  $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$ ,  $t=422\text{h}$

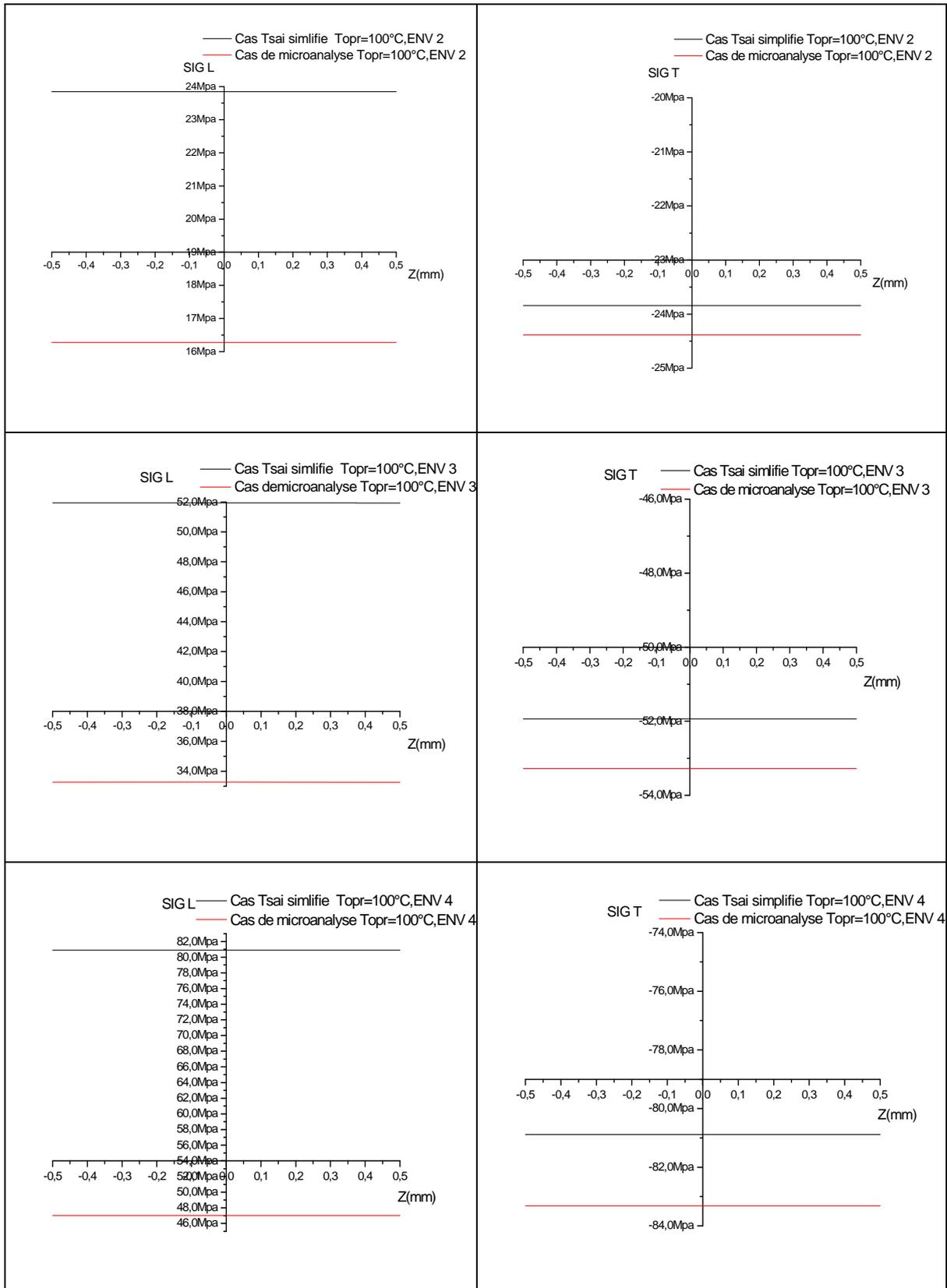


Figure 5.64 : Contraintes hygrothermique longitudinales et transversales pour le cas Tsai simplifié et de la microanalyse à Topr=100°C, t=422h

Comme expliqué au début du paragraphe 5.11, les figures 5.62, 63, 64 présentent les contraintes hygrothermiques pour un stratifié en T300/5208 pour le cas des caractéristiques mécaniques constantes et indépendantes de la température et humidité, et le cas de la microanalyse où les caractéristiques mécaniques sont fonction de la température et de l'humidité à travers le modèle de Tsai, les figures montrent que le comportement du stratifié est le même pour les deux hypothèses déjà citées à des températures faibles comme le montre la figure 5.62, par contre pour des températures relativement élevées le comportement est différent en termes des valeurs de contraintes, la valeur de la contrainte longitudinale à l'environnement 3 et  $T_{opr}=60^{\circ}\text{C}$  passe de 42 Mpa à 36 Mpa pour le cas de la microanalyse, pour l'environnement 4 elle passe de 70 Mpa à 59 Mpa, la contrainte transversale hygrothermique et aussi influée par la prise en compte de la microanalyse, à une température d'utilisation égale à  $100^{\circ}\text{C}$  l'ensemble des contraintes longitudinales et transversales sont constantes pour n'importe quel environnement, et cela est dû à la saturation.

### 5.12 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre sont des résultats donnés par le code de calcul appelé AGINGMAT développé durant cette étude, ce code permet de simuler le comportement hygrothermique de n'importe quel stratifié simple ou hybrides, et pour n'importe quel environnement.

## CONCLUSION GENERALE

Au cours de ce travail, nous avons quantifié et analysé les matériaux composites en termes des contraintes résiduelles, l'intérêt essentiel du travail a été la quantification des contraintes résiduelles dans différents environnements.

L'originalité du travail réside dans l'utilisation de plusieurs sous-programmes pour évaluer le comportement des contraintes résiduelles, le sous-programme DIFF détermine les profils de concentration pour les utiliser localement aux calculs des contraintes résiduelles, le sous-programme TSAILOC évalue la chute des caractéristiques mécaniques à travers l'épaisseur en prenant en considération la valeur de la concentration en chaque nœud de sous-couche.

Les équations qui décrivent le comportement des contraintes résiduelles ont été établies.

Le code de calcul appelé AGINGMAT établi durant cette étude nous a permis de simuler les contraintes résiduelles pour différents environnements en termes de température et d'humidité.

Le modèle de Tsai a augmenté l'exactitude des résultats obtenus, par l'évaluation des chutes des différentes caractéristiques mécaniques pour la matrice et la fibre.

L'utilisation des profils de concentration donnés par l'équation de Fick a amélioré les résultats et a donné une correspondance à la physique du comportement.

Les contraintes résiduelles atteignent des fois les limites de résistance, donc il est indispensable de les prendre en considération durant les phases d'engineering.

L'utilisation des stratifiés hybrides est très intéressante, ils offrent une bonne protection contre les la dégradation hygrothermiques des couches internes des stratifiés

Le code calcul développé AGINGMAT permet de simuler le comportement des contraintes résiduelles pour n'importe quel environnement et pour n'importe quel stratifié simple ou hybride.

Nous souhaitons dans le futur, aborder le vieillissement sur l'aspect expérimental, pour rendre compte de ce qui peut avoir lieu à l'échelle fibre matrice des composites hybrides.

Une étude sur la fatigue, d'une structure hybride soumise à des chargements hygrothermiques peut aussi être faite.

Puisque les phénomènes physico-chimiques intervenant dans la polymérisation s'accompagnent d'une exothermie de réaction, une étude sur cet aspect peut être approchée par une résolution numérique des problèmes thermo-chimiques et mécaniques.

## LISTE DES SYMBOLES

[A] :	Matrice de rigidité en membrane
[B] :	Matrice de rigidité en membrane-flexion-torsion
[C] :	Matrice de rigidité en flexion
C (z,t) :	Concentration dans le temps suivant z
C <sub>0</sub> :	Concentration initiale
C <sub>s</sub> :	Concentration à la saturation
D :	Diffusivité
E <sub>fx</sub> :	Module longitudinal de Young dans la direction de la fibre
E <sub>fx</sub> <sup>0</sup> :	Module longitudinal de Young dans la direction de la fibre à la température de référence
E <sub>fy</sub> :	Module transversal de Young dans la direction de la fibre
E <sub>fy</sub> <sup>0</sup> :	Module transversal de Young dans la direction de la fibre à la température de référence
E <sub>x</sub> :	Module longitudinal de Young dans le pli
E <sub>x</sub> <sup>0</sup> :	Module longitudinal de Young dans le pli à la température de référence
E <sub>y</sub> :	Module transversal de Young dans le pli
E <sub>y</sub> <sup>0</sup> :	Module transversal de Young dans le pli à température de référence
E <sub>m</sub> :	Module de Young de la matrice
E <sub>m</sub> <sup>0</sup> :	Module de Young de la matrice à la température de référence
E <sub>L</sub> :	Module d'élasticité longitudinal
E <sub>T</sub> :	Module d'élasticité transversal
E <sub>a</sub> :	Energie d'activation de la diffusion
G <sub>fx</sub> :	Module de cisaillement de la fibre
G <sub>fx</sub> <sup>0</sup> :	Module de cisaillement de la fibre à la température de référence
G <sub>m</sub> :	Module de cisaillement de la matrice
G <sub>m</sub> <sup>0</sup> :	Module de cisaillement de la matrice à la température de référence
G <sub>xy</sub> :	Module de cisaillement dans le pli
G <sub>xy</sub> <sup>0</sup> :	Module de cisaillement du stratifié à la température de référence

$G_{LT}$ :	Module de cisaillement
HR :	Humidité relative
LTT' :	Repère local du stratifié
$M_t$ :	Masse d'humidité absorbée à l'instant t
$M_s$ :	Masse à la saturation
M :	Point matériel appartenant au plan moyen
$M_x, M_y$ :	Moments fléchissant respectivement dans la direction x et dans la direction y.
$M_x^{HT}, M_y^{HT}$ :	Moments hygrothermique respectivement dans la direction x et y.
$N_x, N_y$ :	Efforts résultant respectivement dans la direction x et dans la direction y.
$N_x^{HT}, N_y^{HT}$ :	Efforts hygrothermique respectivement dans la direction x et y.
[Q] :	Matrice de rigidité.
$Q_{ij}$ :	Constantes de rigidité dans le repère LT
$Q'_{ij}$ :	Constantes de rigidité dans le repère xy
R :	Constante des gaz
S :	Résistance au cisaillement longitudinal
[S] :	Matrice de souplesse
[T] :	Matrice de transition qui relie les contraintes dans le repère local avec celle du repère global.
[T'] :	Matrice de transition qui relie les contraintes dans le repère local avec celle du repère global.
$T_{opr}$ :	Température d'utilisation
$T_g$ :	Température de transition
$T_g^0$ :	Température de transition à la température de référence
$T_{rm}$ :	Température de référence
$T^*$ :	Température adimensionnelle
$V_f$ :	Fraction volumique des fibres
$V_m$ :	Fraction volumique de la matrice
X :	Résistance de tension longitudinale
X' :	Résistance de compression longitudinale
x, y, z :	Repère global du stratifié
Y :	Résistance de tension transversale
Y' :	Résistance de compression transversal

$a, c, f, h, b, e$ :	Constantes empiriques
$h$ :	Epaisseur du stratifié
$h_k$ :	Epaisseur du pli d'ordre $k$
$i$ :	Numéro de la sous couche
$k$ :	Numéro du pli
$k_x, k_y, k_{xy}$ :	Déformations en courbures
$n$ :	Nombre total des plis
$t$ :	Temps
$t_i$ :	Epaisseur de la sous couche
$u_0$ :	Déplacement du point M suivant l'axe $x$ .
$v_0$ :	Déplacement du point M suivant l'axe $y$ .
$w_0$ :	Déplacement du point M suivant l'axe $z$ .
$z_i$ :	Cote du $i$ ème sous couche par rapport au plan moyen
$z_k$ :	Cote du pli d'ordre $k$
$\theta$ :	Angle de rotation de l'axe $X$ par rapport à l'axe $L$
$\alpha_L$ :	Coefficient de dilatation thermique longitudinal
$\alpha_T$ :	Coefficient de dilatation thermique transversal
$\beta_L$ :	Coefficient d'expansion hygroscopique longitudinale
$\beta_T$ :	Coefficient d'expansion hygroscopique transversal
$\alpha_x, \alpha_y$ :	Coefficient de dilatation thermique respectivement suivant $x, y$ , et le plan $xy$
$\beta_x, \beta_y$ :	Coefficient d'expansion hygroscopique respectivement suivant $x, y$ , et le plan $xy$
$\nu_{LT}$ :	Coefficient de poisson dans le repère $LT$
$\nu_{xy}$ :	Coefficient de poisson dans le repère $XY$
$\nu_f$ :	Coefficient de poisson de la fibre
$\nu_f^0$ :	Coefficient de poisson de la matrice à la température de référence
$\nu_m$ :	Coefficient de poisson de la matrice
$\nu_m^0$ :	Coefficient de poisson de la matrice à la température de référence
$\sigma (M)$ :	Tenseur des contraintes
$\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{LT}$ :	Contraintes suivant $L, T$ et le plan $LT$
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ :	Contraintes suivant les axes $ox, oy$ , et le plan $xy$
$\varepsilon_{xx}^0, \varepsilon_{yy}^0, \varepsilon_{xy}^0$ :	Déformations en membrane
$\varepsilon_L, \varepsilon_T, \varepsilon_{LT}$ :	Déformations linéaires respectivement suivant les axes $L, T$ , et le plan $LT$
$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$ :	Déformations linéaires respectivement suivant les axes $x, y$ , et le plan $xy$

- $\gamma$  : Déformations en cisaillement
- $\Delta C$  : Humidité d'opération – humidité de cuisson
- $\Delta T$  : Température d'opération – température de cuisson

## BIBLIOGRAPHIE

1. F. R. Jones, M. A. Shah, M. G. Bader, and L. Boniface, in “The Analysis of Residual Dicyandiamide (DICY) and Its Effects on the Performance of GRP in Water and Humid Environments”, London, 4.443-4.456 (1987).
2. N. Boualem, Z. Sereir, Accelerated aging of unidirectional hybrid composites under the long-term elevated temperature and moisture concentration, *Theor. Appl. Fract. Mech.* (2011), doi:[10.1016/j.tafmec.2011.01.007](https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2011.01.007)
3. Z.Serir ,E A Adda Bedia ,Use of hybrid composites for the reduction of hygroscopic stresses at the edge of plates exposed to the symmetrical environmental conditions ,*Materials and design* ,vol 28 , pp 448-458 ,2007.
4. A. Tounsi , E. Adda Bedia. “ Some observations on the evolution of transversal hygroscopic stresses in laminated composites plates: Effect of anisotropy”.*International Journal of Composites Structures*;59:445–54,2003.
5. Z. Sereir, E.A. Adda-Bedia and A. Tounsi “Effect of temperature on the hygrothermal behaviour of unidirectional laminated plates with asymmetrical environmental conditions” *Composite Structures, Volume 72, Issue 3, Pages 383-392, March 2006.*
6. J. Crank *The Mathematics of Diffusion.* Oxford University Press, London, 1975.
7. Y.J. Weitsman , Effects of fluids on polymeric composites. A review. In *Polymer Matrix Composites*, edited by R. Talreja, Pergamon, pages 369–401, 1998.
8. M.R VanLandingham, RF .Edujlee, and J.W.Gillespie, “ Moisture Diffusion in Epoxy Systems” , *Journal of Applied Polymer Science*, Vol 71, pp.387-798, 1999.
9. Sylvain Popineau, Thèse de Doctorat « Ecole des Mines de Paris » Spécialité “Sciences et Génie des Matériaux” Durabilité en milieu humide d’assemblages structuraux colles type aluminium/composite, novembre 2006.
10. Walid trabelsi ,These Docteur de l’École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers Spécialité “Mécanique et Matériaux” Vieillessement de matériaux composites carbone/époxy pour applications aéronautiques, décembre 2006

11. J. Mercier, « Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites », *thèse de doctorat*, Ecole des Mines de Paris, 2006.
12. H.S. Kim, X. M. Wang and N.A.H Nik Abdulah, "Effect of temperature on fatigue crack growth in the polymer ABS", *J fatigue & fracture of engineering materials & structures*, vol 17.n°3, pp361-367, 1994.
13. G.S. Springer, "Moisture Content of Composites Under Transient Conditions", *Journal of Composite Materials*, vol 11,1977.
14. JN Reddy, DH Robbins JR, « Theories and computational models for composite laminates », *American society of mechanical engineering* pp.147-169, June 1994.
15. M.D Issac and O. Ishai, « *Engineering Mechanics of Composite Materials* », Oxford university press pp189-252, 1994.
16. J.G. Sloan and J.R Vinson, « Behavior of rectangular composite material plates under lateral and hygrothermal loads », *ASME winter annual meeting, San Francisco*, pp.1-13, December, ASME paper 78-WA/Aero-5, 1978.
17. G.S. Springer, C.H. Shen, "Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials", *Journal of Composite Materials*, vol 10, p 2-20, January 1976.
18. S. W. Tsai, "Composites Design" *Think Composites*, Dayton, Paris, Tokyo, 1987.
19. T.C. Chen, B.H. Hwang, « Transient hygrothermal stresses induced in two dimensional problems by nonlinear theory of coupled heat and moisture », *J.ASME*, vol.61, pp. 938-943, December 1994.
20. A.Benkhedda, Thèse de magister «étude hygrothermomecanique des matériaux composites a matrice polymere », université de Blida ,institut d'aéronautique ,2001
21. R.C.Wetherhold and J.R. Vinson, « An analytical model for bonded joint analysis in composite structures including hygrothermal effects », *J. Journal of applied mechanics*, pp.1-12, 25 Mars 1977.
22. E. Adda Bedia, W.S. Han and G. Verchery, "An asymptotic characterisation of the moisture diffusion in polymer matrix composites with cyclic environmental conditions", *Journal of Composites structures* –Elsevier (UK), Vol 49 (3), pp 269- 274, 2000.
23. A. Benkeddad, "Conception d'un Logiciel d'Analyse des Plaques stratifiées avec Prise en Compte des Contraintes Hygrothermiques transitoires", *Thèse de l'Université de Bourgogne*,1994.

24. E. Adda Bedia « Méthodes de résolution pour la diffusion de l'humidité sous les conditions d'environnement cycliques », *thèse Ecole nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne*, 1994.
25. F. Jacquemin « Modélisation et simulation des contraintes internes dans les structures tubulaires composites épaisses » *Thèse de Doctorat*, Ecole Nationale des Mines, Saint Etienne, 2000.
26. M.R. Wisnom, M. Gigliotti, N. Ersoy, M. Campbell and K.D. Potter Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer–matrix composite structures *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 37, Issue 4, Pages 522-529 April 2006*.
27. A. Tounsi, E. Adda Bedia, “ Simplified method for prediction on transient hygroscopic stresses in polymer matrix composites with symmetric environmental conditions” *Applied Composites Structures* Elsevier (UK), edited by PWR Beaumont, Kluwer Academic publishers, Vol (10) pp. 1-18, 2003.
28. A. Tounsi, E. Adda Bedia, A. Benachour, “New computational method for prediction of transient hygroscopic stresses during moisture desorption in laminated composite plate with different degree of anisotropy”, *Journal of thermoplastic Composite Material*, Vol 18, January 2005
29. A.Tounsi, E. Adda Bedia and G. Verchery “Influence of anisotropy on the transient hygroscopic stresses in polymer matrix composites with cyclic environmental conditions” *Composite Structures, Volume 55, Issue 4, Pages 393- 405, March 2002*
30. A.Tounsi, M.Bouazza, E. Adda Bedia, “Computation of transient hygroscopique stresses in unidirectional laminated composite plates with cyclic and asymmetrical environmental conditions”, *Journal of Mechanics & Material in Design*, Springer Edited by Springer, Vol 1, pp 271-286, 2005.
31. A. Tounsi, M. Bouazza , SA Meftah, E. Adda Bedia, “ On the transient hygroscopic stresses in polymer matrix laminated composites plates with cyclic and unsymmetric envirenmental conditions”, *International Journal of polymers and polymers composites*, Rapra technology LTD (UK),Vol 13,issue n° 5, pp 489-504, 2005.
32. A Tounsi, E. Adda Bedia, Z. Sereir, H. Benhassaini “Effect of fibre orientation and cyclic environmental conditions on the non-mechanical residual stresses in resin matrix composite panels” , *The Arabian Journal for science engineering*, Volume 28, Number 1A, pp 1-21, 2003.

33. A.Benkhedda, Thèse de doctorat «Etude hygrothermique des matériaux composites a matrice polymère avec la prise en compte de l'effet du vieillissement lors de la désorption en transitoire », université de Blida, département d'aéronautique , juillet 2008.
34. B.F. Boukhoulda, E. Adda-Bedia and K. Madani, "The effect of the fibre orientation angle in composite materials on moisture absorption and material degradation after hygrothermal ageing" *Journal of of Composites structures* Elsevier (UK), Vol 74, issue n°4, pp 406-418, 2006.
35. R.J. Morgan, J.E. O'Neal, D.L. Fanter, "The Effect of Moisture on the Physical and Mechanical Integrity of Epoxies", *Journal of Materail Science*, vol 15, p 751-764, 1980.
36. O. Ishai, "Environmental Effects on Deformation, Strength and degradation Unidirectional Glass Fiber Reinforced Plastics, Experimental Study", vol 15, n°7, p 491-499,1976.
37. G.S. Springer, "Moisture Content of Composites Under Transient Conditions", *Journal of Composite Materials*, vol 11,1977.
38. P. Peyser and W. D. Bascom, *Journal of Materials Science* 16, 75-83 ,1981.
39. J.Verdu, "Traite des matières plastiques : vieillissement physique, Techniques de l'ingénieur, A3151, 1990.
40. M. E. R. Shanahan, *Journal of Applied Polymer Science* 69, 363-369 (1997).
41. A.C. Loos, G.S. Springer, "Moisture absorption of graphite-epoxy composites immersed in liquids and in humid air", *J. Composites Materials*, vol. 13, p 131, 1979.
42. Y.J.Weitsman, Ya-J.Guo, "A correlation between fluid-induced damage and anomalous fluid sorption in polymeric composites", *Composites Sc. & Technology* 62, pp.889- 908, 2002.
43. B. Dewimille, A.R. Bunsell The modelling of hygrothermal aging in glass fibre reinforced epoxy composites , *Journal of Physics D*, 15, p2079, 1982.
44. C.H.Shen et G.S.Springer "Moisture absorption and desorption of composite materials", C.H.Shen, G.S. Springer, *Environmental effects on composites materials*, ed. G.S. Springer, Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, 1981.
45. B. Dewimille, A.R. Bunsell The modelling of hygrothermal aging in glass fibre reinforced epoxy composites , *Journal of Physics D*, 15, p2079, 1982.
46. : N. Dubois, Caractérisation et modélisation du vieillissement de matériaux composites , stage Mastère, Septembre 2003.

47. B. Guetta, Vieillissement hygrothermique des composites a matrice PSP. Etude cinétique, mécanique et spectroscopie, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1987.
48. Y.J.Weitsman, “Moisture in composites, sorption and damage”, fatigue of composites materials, Elsevier Science Pub., 1991, pp385-429.
49. B. Dewimille, Vieillissement hygrothermique d’un matériau composite fibres de verre-resine epoxyde, these ENSMP, Juillet 1981.
50. D.Leveque, A.Schieffer, Analyse multi echelle des effets du vieillissement sur la tenue mécanique des composites a matrice organique, ONERA, Revue des composites et des matériaux avances, Vol. 12, , pp.139-162, 2002.
51. J. M Berthelot, « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures », Masson, Paris ,1992.
52. G. Stab, Laminar composite. London: Butterworth-Heinemann; 1999.
53. R.M Jones, “Mechanics of Composite Material”, *Hemisphere Publishing Corporation*, New York ,1975.
54. C.C Chamis, “Simplified composite micromechanical equations for hygrothermal, and mechanical properties”. *SAMPE 14–23*, Quart 1984;15:
55. R.F Gibson , “ Principles of Composite Materials, Mechanics” , *McGraw Hill*, New York ,1994.
56. R.M Christinsen, “Mechanics of composite Materials”, *John Wiley*, New York 1979.
57. Z. Sereir, E. Adda Bedia , A. Tounsi, “Effect of the accelereed moisture diffusivity on the hygrothermal behavior laminated plate with symmetrical environmental conditions”, *Journal of thermal stresses*, Taylor & Francis Edition, Vol 28, pp 889- 908, 2005.
58. I. Ghorbel, “ Mecanismes d’endommagement des tubes verre-resine pour le transport d’eau chaude” influence de la ductilité de la matrice, *thèse de doctorat* Ecole des Mines de Paris, Juillet 1990.
59. C.H. Shen and G. Springer, “Moisture absorption and desorption of composite materials”, *J. of composite materials*, Vol.10, pp.2-20, January 1976.