

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE

PAR  
LALONDE, Jean-François

CONTRIBUTION AUX TECHNIQUES DE MESURE DES CONTRAINTES  
RÉSIDUELLES DES PIÈCES BRUTES ET USINÉES PAR DIFFRACTION AUX  
NEUTRONS

MONTREAL, LE 5 MARS 2009

© Jean-François Lalonde, 2009

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean-François Chatelain, directeur de mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Souheil-Antoine Tahan, codirecteur de mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Victor Songméné, Président du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stéphane Chalut, examinateur externe  
Aricam Inc.

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 29 JANVIER 2009

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

## REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier l'École de Technologie Supérieure (ÉTS), Bombardier Aéronautique et le Conseil National de Recherches Canada (CNRC) pour leurs appuis financiers qui m'ont permis de me consacrer entièrement à la réalisation de ce projet de maîtrise.

De plus, je voudrais souligner la participation de M. Hugo Landry, du Laboratoire institutionnel de fabrication de l'ÉTS (LIFE), qui de par son assistance technique a contribué au succès du volet expérimental de ce projet.

Je souhaite également remercier M. Michael Gharghouri, chercheur au Centre canadien de faisceaux de neutrons (CCFN) pour les nombreuses heures consacrées lors des mesures de contraintes, pour son accueil et son aide à Chalk River, ainsi que pour toutes les explications scientifiques qu'il me transmettait avec passion.

Surtout, j'aimerais exprimer ma sincère reconnaissance envers le directeur de ce mémoire, M. Jean-François Chatelain, qui a su me faire confiance tout au long de ce projet et ce, malgré la tangente beaucoup plus expérimentale que prévue. Ses judicieux conseils et son expérience m'ont permis de mener ce projet à terme, et ont aussi contribué grandement à mon apprentissage durant mon passage à la maîtrise.

Enfin, à une personne très importante qui de par ses encouragements, sa patience et son aide à la maison tout en m'offrant une jolie petite fille m'a permis de réaliser ce projet, Marie-Ève, je te remercie infiniment.

# CONTRIBUTION AUX TECHNIQUES DE MESURE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DES PIÈCES BRUTES ET USINÉES PAR DIFFRACTION AUX NEUTRONS

LALONDE, Jean-François

## RÉSUMÉ

Des études ont démontré que les contraintes résiduelles jouent un rôle important dans la distorsion des composantes usinées. Ce phénomène engendre plusieurs problèmes dans le domaine de l'aéronautique aux niveaux de l'assemblage et du taux de rebuts. Il est donc essentiel de mieux comprendre ce phénomène afin de trouver éventuellement des solutions pour minimiser les impacts.

Ce projet d'étude propose une approche expérimentale afin de valider l'influence des contraintes résiduelles présentes dans le matériau brut avant l'usinage d'une composante. Il existe maintenant un aluminium dont le procédé de mise en forme a été contrôlé afin de minimiser les contraintes résiduelles. Ce type de matériau a donc permis d'effectuer une étude comparative de l'influence des contraintes présentes avant l'usinage. L'utilisation d'une méthode de mesure non-destructive de contraintes par faisceaux de neutrons et le mesurage des déformations géométriques par balayage laser sont des méthodes assez nouvelles qui ont également permis de réaliser ce projet.

Les résultats obtenus montrent que le matériau dont les contraintes initiales sont minimales est en mesure de pallier au problème de la distorsion. Ce qui prouve que les contraintes résiduelles présentes dans le matériau brut sont en partie responsables de la distorsion. Toutes les pièces usinées dans le matériau standard ont subi des déformations tandis que les pièces usinées dans le matériau avec procédé contrôlé ont subi très peu de déformations. Au niveau des causes possibles, il a été observé que la distribution des contraintes, leurs signes, ainsi que leurs intensités peuvent être à l'origine des déformations.

**Mots clés :** aluminium, balayage laser, contraintes résiduelles, déformations, diffraction par faisceaux de neutrons, distorsion, mesure des contraintes, pièce usinée à parois minces.

# CONTRIBUTION TO THE TECHNIQUES OF MEASURING RESIDUAL STRESSES OF RAW MATERIAL AND MACHINED PARTS WITH THE NEUTRON DIFFRACTION

LALONDE, Jean-François

## ABSTRACT

Studies as showed that residual stresses have a responsibility in the distortion of the machined components. This phenomenon generates several problems on the aeronautics domain, especially on assembly processes and on the rejection rate. It is therefore essential to understand this phenomenon in order to possibly find solutions that can minimize the impacts.

This study therefore proposes an experimental approach in order to validate the influence of the residual stresses present in raw material before the machining of a component. Aluminum whose process of working was controlled to minimize the residual stresses is now available on the market. This type of material thus made it possible to carry out a comparative study on the influence of the constraints present before machining. The use of neutron diffraction, a nondestructive method to measure the constraints and a laser scanning technique to measure the geometrical deformations are rather new methods which also made it possible to perform this project.

The results obtained show that the material whose initial constraints are minimal is able to solve the problem of the distortion. This is a proof that the residual stresses present in rough material are partly responsible for the distortion. All the parts machined in standard material underwent deformations while the parts machined in material with controlled process underwent very few deformations. It was observed that the distribution of the constraints, their signs, and their intensities can be at the origin of the deformations.

**Key words:** aluminum, laser scanning, residual stresses, deformations, neutron diffraction, distortion, stress measurement, machined part with thin walls.

## TABLE DES MATIÈRES

|  | Page |
|--|------|
| INTRODUCTION.....  | 1    |
| CHAPITRE 1 THÉORIE SUR LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES.....                            | 3    |
| 1.1 Définition générale des contraintes résiduelles .....                          | 3    |
| 1.2 Production des contraintes résiduelles.....                                    | 4    |
| 1.3 Types de contraintes résiduelles .....   | 4    |
| 1.4 Effets des contraintes résiduelles sur les performances d'une composante ..... | 7    |
| 1.5 Sommaire de la section.....  | 9    |
| CHAPITRE 2 ÉVALUATION DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES .....                            | 10   |
| 2.1 Introduction.....  | 10   |
| 2.2 Les techniques de mesure des contraintes résiduelles .....                     | 11   |
| 2.2.1 Hole-drilling et Ring Core.....  | 11   |
| 2.2.2 Déflexion .....  | 13   |
| 2.2.3 Sectionnement.....   | 14   |
| 2.2.4 Crack Compliance Method («Slitting»).....                                    | 15   |
| 2.2.5 Diffraction par rayons-X.....  | 17   |
| 2.2.6 Synchrotron.....   | 19   |
| 2.2.7 Diffraction par neutrons.....  | 19   |
| 2.2.8 Techniques ultrasoniques.....  | 20   |
| 2.2.9 Méthodes magnétiques .....   | 21   |
| 2.2.10 Effets piezospectroscopiques (Raman).....                                   | 22   |
| 2.2.11 Méthodes photoélastiques.....   | 22   |
| 2.3 Choix d'une technique de mesure.....   | 23   |
| 2.3.1 Introduction.....  | 23   |
| 2.3.2 Guide de sélection.....  | 25   |
| 2.3.3 Utilisation des tableaux du guide de sélection.....                          | 30   |
| CHAPITRE 3 LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES ET LA DISTORSION .....                      | 33   |
| 3.1 Intérêts des contraintes résiduelles pour le domaine de l'aéronautique .....   | 33   |
| 3.2 Production des contraintes résiduelles responsables de la distorsion.....      | 35   |
| 3.2.1 Schématisation du phénomène de distorsion .....                              | 36   |
| 3.2.2 Design de la composante .....  | 37   |
| 3.2.3 Matériau utilisé .....   | 40   |
| 3.2.4 Contraintes du montage .....   | 40   |
| 3.2.5 Contraintes du matériau brut .....   | 43   |
| 3.2.6 Contraintes d'usinage .....  | 46   |
| 3.3 Sommaire de la section.....  | 52   |
| CHAPITRE 4 MODÉLISATION ET PRÉDICTION DE LA DISTORSION .....                       | 53   |
| 4.1 Introduction.....  | 53   |

|  |   |     |
|--|---|-----|
| 4.2  | Avancement actuel.....  | 53  |
| 4.3  | Logiciel AdvantEdge™.....   | 54  |
| 4.3.1  | Validation du logiciel.....   | 54  |
| 4.3.2  | Essai du logiciel AdvantEdge.....   | 58  |
| CHAPITRE 5 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE.....              |   | 59  |
| 5.1  | Objectifs.....  | 59  |
| 5.2  | Description des essais.....   | 59  |
| 5.3  | Les types d'aluminium.....  | 62  |
| 5.4  | Distribution des échantillons pour les essais.....  | 62  |
| 5.5  | Résumé de la procédure expérimentale.....   | 64  |
| 5.6  | Évaluation des contraintes résiduelles avec la méthode de diffraction par neutrons.....   | 65  |
| 5.6.1  | Introduction.....   | 65  |
| 5.6.2  | Installations et montage.....   | 65  |
| 5.6.3  | Méthodologie pour la prise des mesures.....   | 69  |
| 5.6.4  | Calcul des contraintes.....   | 71  |
| 5.6.5  | Échantillons de références.....   | 75  |
| 5.7  | Usinage des composantes.....  | 79  |
| 5.7.1  | Introduction.....   | 79  |
| 5.7.2  | Machine.....  | 79  |
| 5.7.3  | Les outils de coupe.....  | 80  |
| 5.7.4  | Méthode d'usinage.....  | 81  |
| 5.8  | Mesure des déformations : Balayage laser.....   | 86  |
| 5.8.1  | Introduction.....   | 86  |
| 5.8.2  | Acquisition des données.....  | 86  |
| 5.8.3  | Traitement et analyse des données.....  | 87  |
| CHAPITRE 6 ANALYSE ET COMPARAISON DES RÉSULTATS..... |   | 90  |
| 6.1  | Introduction.....   | 90  |
| 6.2  | Comparaison des résultats obtenus pour les six composantes.....                           | 90  |
| 6.2.1  | Comparaison des contraintes pour les échantillons de matériau standard.....               | 90  |
| 6.2.2  | Comparaison des contraintes pour les échantillons de matériau avec procédé contrôlé.....  | 94  |
| 6.2.3  | Comparaison des deux types d'échantillons.....  | 98  |
| 6.3  | Analyse des contraintes sur les échantillons de matériau.....                             | 101 |
| 6.3.1  | Analyse des contraintes sur une pièce de matériau standard.....                           | 101 |
| 6.3.2  | Analyse des contraintes sur une pièce de matériau avec procédé contrôlé.....              | 114 |
| 6.3.3  | Contraintes résiduelles induites par l'usinage.....                                       | 123 |
| 6.3.4  | Synthèse des différences entre les deux types de matériaux au niveau des contraintes..... | 123 |
| 6.4  | Résultats des mesures de déformations.....  | 131 |
| 6.5  | Analyse de la distorsion en fonction des contraintes.....                                 | 136 |
| 6.5.1  | Impact de la distribution des contraintes.....  | 136 |
| 6.5.2  | Impact de l'intensité des contraintes résiduelles du matériau brut.....                   | 143 |
| 6.5.3  | Contraintes après l'usinage vs déformation.....   | 146 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 6.6         | Synthèse de l'analyse.....   | 148 |
|             | CONCLUSION.....  | 150 |
|             | RECOMMANDATIONS .....  | 154 |
| ANNEXE I    | RÉSUMÉS DES PARAMÈTRES DE COUPE ET DES SÉQUENCES<br>D'USINAGE..... | 156 |
| ANNEXE II   | COORDONNÉES DES POINTS DE MESURES .....                            | 158 |
| APPENDICE A | EXPÉRIMENTAL REPORT CNBC-710 .....                                 | 164 |
|             | LISTE DE RÉFÉRENCES .....  | 169 |

## LISTE DES TABLEAUX

|             | Page  |
|-------------|---|
| Tableau 2.1 | Questions pratiques.....26  |
| Tableau 2.2 | Caractéristiques du matériau.....27                               |
| Tableau 2.3 | Caractéristiques de mesures.....28                                |
| Tableau 2.4 | Avantages et inconvénients .....29                                |
| Tableau 3.1 | Composition du 7475-T7351 .....51                                 |
| Tableau 5.1 | Description des spécimens utilisés pour les essais .....63        |
| Tableau 5.2 | Caractéristiques des différents échantillons de référence .....77 |
| Tableau 5.3 | Caractéristiques des outils de coupe .....81                      |

## LISTE DES FIGURES

|             | Page  |
|-------------|---|
| Figure 1.1  | Champ de contraintes résiduelles. ....6   |
| Figure 1.2  | Contraintes résiduelles additionnées aux contraintes appliquées dans le domaine élastique. ....8  |
| Figure 2.1  | Méthodes de Hole-drilling (gauche) et de Ring Core (droite). .... 12  |
| Figure 2.2  | Méthode de déflexion avec jauge de déformation. .... 14   |
| Figure 2.3  | Terminologie de la méthode de Crack compliance. .... 17   |
| Figure 2.4  | Diffractomètre pour le mesurage au rayon-X. .... 18   |
| Figure 2.5  | Schématisation d'un diffractomètre au neutron. ....20   |
| Figure 2.6  | Exemple d'analyse avec la méthode photoélastique. ....23  |
| Figure 2.7  | Profondeur de pénétration des différentes techniques, des procédés et des défauts. ....24   |
| Figure 3.1  | Dessin illustrant le phénomène d' « Oil-canning ». ....34   |
| Figure 3.2  | Schématisation du phénomène de distorsion. ....36   |
| Figure 3.3  | Méthode du «Picture Frame Removal». ....37  |
| Figure 3.4  | Différence du pourcentage de matière enlevé. ....38   |
| Figure 3.5  | Déformation de la composante usinée selon la longueur. ....39   |
| Figure 3.6  | Exemple de distributions de contraintes différentes dans un brut de matière. ....42   |
| Figure 3.7  | Position de la composante usinée en fonction du matériau brut. ....43   |
| Figure 3.8  | Profils typiques de contraintes résiduelles sur A) plaque d'aluminium 7050-T74 et B) plaque d'aluminium après relâchement de contraintes (7050-T7451). ....45 |
| Figure 3.9  | Exemple de contraintes résiduelles induites lors de procédés d'usinage. ....47  |
| Figure 3.10 | Contraintes résiduelles causées par des efforts mécaniques. ....48  |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figure 3.11 | Diagrammes de phases A) Binaire B) Tertiaire.....                               | 51 |
| Figure 4.1  | Forces numériquement bruitées obtenues à l'aide du logiciel AdvantEdge .....    | 56 |
| Figure 5.1  | Dimensions du matériau brut utilisé.....  | 60 |
| Figure 5.2  | Dimensions de la composante usinée.....   | 60 |
| Figure 5.3  | Schéma des étapes effectuées lors des essais expérimentaux.....                 | 61 |
| Figure 5.4  | Résumé de la procédure expérimentale pour les pièces #1 et 4. ....              | 64 |
| Figure 5.5  | Résumé de la procédure expérimentale pour les pièces #2, 3, 5 et 6. ....        | 64 |
| Figure 5.6  | Identification et disposition des spectromètres.....                            | 66 |
| Figure 5.7  | Montage pour la mesure des contraintes avec la diffraction par neutrons.....    | 67 |
| Figure 5.8  | Détails du montage pour le mesurage.....  | 68 |
| Figure 5.9  | Points de mesures effectuées avec le faisceau de neutrons. ....                 | 70 |
| Figure 5.10 | Illustration de la loi de Bragg. ....   | 71 |
| Figure 5.11 | Illustration du volume instrumental de mesure. ....                             | 73 |
| Figure 5.12 | Forme du volume instrumental de mesure en fonction du demi angle $\theta$ ..... | 74 |
| Figure 5.13 | Machine Charmilles Robofil 2030SI.....  | 76 |
| Figure 5.14 | Coupes au fil effectuées.....   | 76 |
| Figure 5.15 | Graphique de la calibration du paramètre $\theta$ . ....                        | 78 |
| Figure 5.16 | Mazak NEXUS 410A.....   | 80 |
| Figure 5.17 | Outils de coupe utilisés.....   | 80 |
| Figure 5.18 | Montage du premier stage d'usinage.....   | 82 |
| Figure 5.19 | Plaque de montage pour le stage 2. ....   | 83 |
| Figure 5.20 | Attaches laissées suite à l'usinage du stage 2. ....                            | 84 |
| Figure 5.21 | Méthode du "Picture Frame Removal". ....  | 85 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Figure 5.22 | MMC Mitutoyo Bright-Strato 7106 munie d'une tête laser Metris LC50. ....  | 87  |
| Figure 5.23 | Références pour la superposition des mesures et du CAD dans le logiciel PolyWorks. ....                                 | 88  |
| Figure 5.24 | Visualisation de résultats PolyWorks en 3D et en 2D. ....   | 89  |
| Figure 6.1  | Comparaison des mesures de contraintes longitudinales des pièces 2 et 3 par rapport à la pièce 1. ....                  | 91  |
| Figure 6.2  | Comparaison des mesures de contraintes transversales des pièces 2 et 3 par rapport à la pièce 1. ....                   | 92  |
| Figure 6.3  | Comparaison des mesures de contraintes normales des pièces 2 et 3 par rapport à la pièce 1. ....                        | 93  |
| Figure 6.4  | Comparaison des mesures de contraintes longitudinales des pièces 5 et 6 par rapport à la pièce 4. ....                  | 95  |
| Figure 6.5  | Comparaison des mesures de contraintes transversales des pièces 5 et 6 par rapport à la pièce 4. ....                   | 96  |
| Figure 6.6  | Comparaison des mesures de contraintes normales des pièces 5 et 6 par rapport à la pièce 4. ....                        | 97  |
| Figure 6.7  | Comparaison des mesures de contraintes longitudinales des pièces #1 et 4. ....  | 99  |
| Figure 6.8  | Comparaison des mesures de contraintes transversales des pièces #1 et 4. ....   | 99  |
| Figure 6.9  | Comparaison des mesures de contraintes normales des pièces #1 et 4. ....  | 100 |
| Figure 6.10 | Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des X pour les pièces #1, 2, 3. ....      | 102 |
| Figure 6.11 | Contraintes longitudinales mesurées dans la direction des X avant l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard". .... | 103 |
| Figure 6.12 | Contraintes transversales mesurées dans la direction des X avant l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard". ....  | 103 |
| Figure 6.13 | Contraintes normales mesurées dans la direction des X avant l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard". ....       | 104 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Figure 6.14 | Contraintes mesurées dans la direction des X avant et après l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard".....                                | 105 |
| Figure 6.15 | Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des Y pour les pièces #1, 2 et 3 "Matériau standard".....         | 107 |
| Figure 6.16 | Contraintes mesurées dans la direction Y avant l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard".....   | 108 |
| Figure 6.17 | Contraintes mesurées dans la direction des Y avant et après l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard".....                                | 110 |
| Figure 6.18 | Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des Z pour les pièces #1, 2 et 3 "Matériau standard".....         | 112 |
| Figure 6.19 | Contraintes mesurées dans la direction des Z avant et après l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard".....                                | 113 |
| Figure 6.20 | Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des X pour les pièces #4, 5 et 6 "Matériau procédé contrôlé"..... | 114 |
| Figure 6.21 | Contraintes mesurées dans la direction X avant l'usinage pour la pièce # 4 "Matériau procédé contrôlé".....                                     | 115 |
| Figure 6.22 | Contraintes mesurées dans la direction des X avant et après l'usinage pour la pièce # 4 "Matériau procédé contrôlé".....                        | 117 |
| Figure 6.23 | Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des Y pour les pièces #4, 5 et 6 "Matériau procédé contrôlé"..... | 118 |
| Figure 6.24 | Contraintes mesurées dans la direction Y avant l'usinage pour la pièce # 4 "Matériau procédé contrôlé".....                                     | 119 |
| Figure 6.25 | Contraintes mesurées dans la direction des Y avant et après l'usinage pour la pièce # 4 "Matériau procédé contrôlé".....                        | 120 |
| Figure 6.26 | Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des Z pour les pièces #4, 5 et 6 "Matériau procédé contrôlé"..... | 122 |
| Figure 6.27 | Contraintes mesurées dans la direction des Z avant et après l'usinage pour la pièce # 4 "Matériau procédé contrôlé".....                        | 122 |
| Figure 8.28 | Points de mesures utilisées pour la comparaison des contraintes selon la direction des Y pour les pièces #1 et 4. ....                          | 124 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Figure 6.29 | Exemple de comparaison de la distribution des contraintes dans la direction des Y pour les deux types de matériaux.....                            | 125 |
| Figure 6.30 | Exemple de comparaison de l'intensité des contraintes pour les deux types de matériaux.....  | 126 |
| Figure 6.31 | Points de mesures utilisées pour la comparaison des contraintes entre le dessous et le dessus pour les pièces #1 et 4 dans la direction des Y..... | 127 |
| Figure 6.32 | Comparaison des contraintes mesurées dans le bas et le haut pour l'échantillon #1.....   | 128 |
| Figure 6.33 | Comparaison des contraintes mesurées dans le bas et le haut pour l'échantillon #4.....   | 128 |
| Figure 6.34 | Points de mesures utilisées pour la comparaison des contraintes entre le dessous et le dessus pour les pièces #1 et 4 dans la direction des X..... | 129 |
| Figure 6.35 | Comparaison des contraintes mesurées dans la direction des X pour l'échantillon #1.....  | 130 |
| Figure 6.36 | Comparaison des contraintes mesurées dans la direction des X pour l'échantillon #4.....  | 130 |
| Figure 6.37 | Déformations pièces en matériau standard #1, #2, #3.....   | 132 |
| Figure 6.38 | Déformations pièces en matériau avec procédé contrôlé # 4, #5, #6.....   | 133 |
| Figure 6.39 | Vue de section XY déformations des pièces #1, #2, #3 en matériau standard.....   | 134 |
| Figure 6.40 | Vue de section XY déformations des pièces #4, #5, #6 en matériau avec procédé contrôlé.....  | 135 |
| Figure 6.41 | Points de mesures utilisées pour la comparaison des contraintes entre le dessous et le dessus pour les pièces 1 à 6 dans la direction des Y.....   | 137 |
| Figure 6.42 | Comparaison des contraintes longitudinales entre le dessous et le dessus.....  | 138 |
| Figure 6.43 | Comparaison des contraintes normales entre le dessous et le dessus.....  | 139 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Figure 6.44 | Comparaison des contraintes et des déformations mesurées pour les pièces #1, 2 et 3.....        | 140 |
| Figure 6.45 | Comparaison des contraintes et des déformations mesurées pour les pièces #4, 5 et 6.....        | 142 |
| Figure 6.46 | Analyse contraintes résiduelles vs limites établies pour les pièces #1, 2 et 3.....             | 144 |
| Figure 6.47 | Analyse contraintes résiduelles vs limites établies pour les pièces #4, 5 et 6.....             | 145 |
| Figure 6.48 | Distribution des contraintes résiduelles avant et après l'usinage pour les pièces #1 et #4..... | 147 |
| Figure 6.49 | Déformations obtenues après l'usinage pour les pièces #1 et #4.....                             | 148 |

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

|      |  |
|------|--|
| CAO  | Conception assistée par ordinateur               |
| CCFN | Centre canadien de faisceaux de neutrons         |
| CNRC | Conseil national de recherches du Canada         |
| CVD  | Chemical vapor deposition                        |
| EACL | Énergie atomique du Canada limité                |
| ÉTS  | École de technologie supérieure                  |
| FEM  | Finite element method                            |
| Html | Hypertext Markup Language                        |
| LANL | Los Alamos National Laboratory                   |
| MMT  | Machine à mesurer tridimensionnelle              |
| NIST | National Institute of Standards and Technologies |
| NPL  | National Physical Laboratory                     |
| PVD  | Physical vapor deposition                        |

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

### SYMBOLES

|                              |  |
|------------------------------|--|
| A                            | Surface  |
| dA                           | Variation de surface   |
| <i>d</i>                     | Distance interplanaire   |
| <i>d</i> <sub>0</sub>        | Distance planaire de référence                                     |
| E                            | Module de Young  |
| $\varepsilon$                | Déformation  |
| $\epsilon_{ijk}$             | Opérateur de permutation<br>(« Alternating symbol »)               |
| <i>F</i> <sub><i>i</i></sub> | Vecteur des forces selon la direction <i>i</i>                     |
| { <i>hkl</i> }               | Indices de Miller  |
| L                            | Longitudinale  |
| M                            | Matrice  |
| $\underline{m}$              | Direction de mesure de déformation                                 |
| <i>M</i> <sub><i>i</i></sub> | Vecteur des moments selon la direction <i>i</i>                    |
| N                            | Normale  |
| <i>n</i> <sub><i>j</i></sub> | Vecteur de direction selon la direction <i>j</i>                   |
| <i>n</i> <sub><i>l</i></sub> | Vecteur de direction selon la direction <i>l</i>                   |
| P                            | Charge   |
| R                            | Renforcement   |
| T                            | Transversale   |
| <i>x</i> <sub><i>j</i></sub> | Vecteur des distances selon la direction <i>j</i> (bras de levier) |
| $\alpha$                     | Matrice  |
| $\beta$                      | Renforcement   |
| $\chi^2$                     | Chi carré  |
| $\lambda$                    | Longueur d'onde  |
| $\nu$                        | Coefficient de Poisson   |
| $\theta$                     | Demi-angle de déviation  |
| $\sigma_{ij}$                | Tenseur de contrainte selon les directions <i>i</i> et <i>j</i>    |

|                          |   |
|--------------------------|---|
| $\sigma_{initials\_std}$ | Contraintes initiales dans l'aluminium standard                 |
| $\sigma_{initials\_pc}$  | Contraintes initiales dans l'aluminium avec procédé contrôlé    |
| $\sigma_{kl}$            | Tenseur de contrainte selon les directions <i>k</i> et <i>l</i> |
| $\sigma_{usage}$         | Contraintes d'usage   |
| 2D                       | Deux dimensions   |
| 3D                       | Trois dimensions  |

### UNITÉS DE MESURES

|               |                          |
|---------------|--------------------------|
| cm            | centimètre               |
| kN            | kilonewton               |
| G             | Mesure de l'accélération |
| GPa           | giga pascal              |
| HP            | Horse power              |
| mm            | millimètre               |
| MPa           | méga pascal              |
| m/min         | mètre par minute         |
| po            | pouce                    |
| po/min        | pouce par minute         |
| rpm           | révolution par minute    |
| $\mu\text{m}$ | micromètre               |

## INTRODUCTION

La durée de vie d'une composante structurale est généralement déterminée par l'interaction entre les défauts de la composante et les contraintes auxquelles elle est exposée. Les contraintes sont la combinaison de celles appliquées en service et de celles développées lors de la fabrication, communément appelées contraintes résiduelles. Ces dernières peuvent être bénéfiques et/ou destructives pour la performance d'une composante. Les différents procédés et les différentes méthodes utilisés lors des étapes de fabrication d'une composante jouent donc tous un rôle important dans la distribution finale des contraintes résiduelles. De ce fait, la distribution des contraintes résiduelles induites lors de l'usinage peut affecter les caractéristiques mécaniques d'une composante. Comme l'usinage implique des efforts ainsi que des phénomènes thermiques importants, il est donc possible que la composante ne soit pas en mesure de résister aux charges et qu'il se produise alors une déformation permanente appelée distorsion.

Avec la tendance actuelle qui vise l'optimisation de la performance des matériaux combinée à une diminution du poids des composantes, l'analyse et la compréhension des contraintes résiduelles prend de plus en plus d'importance. Cela est d'autant plus vrai dans le domaine de l'aéronautique où l'amélioration de la productivité, la répétitivité ainsi que les tolérances dimensionnelles et géométriques des pièces sont des facteurs primordiaux. C'est pourquoi plusieurs scientifiques tentent de développer des modèles par éléments finis (FEM) capables de prédire les contraintes résiduelles induites par différents procédés de fabrication. Ces modèles permettront par la suite de minimiser le phénomène de distorsion tout en diminuant le nombre d'étapes et également de modifier les méthodes d'usinage sans affecter les propriétés des composantes. Cependant, il faut d'abord être en mesure d'identifier et de comprendre correctement tous les facteurs pouvant influencer la distorsion.

Ce projet de recherche s'adresse au problème en proposant une approche expérimentale principalement axée sur l'influence des contraintes résiduelles provenant du matériau brut. Il est possible que ces contraintes soient à l'origine de la distorsion de pièces usinées. Cela est

particulièrement vrai pour les composantes à parois minces. C'est un problème qui a été observé chez la compagnie Bombardier Aéronautique. Ce mémoire s'inscrit donc dans un projet qui vise à mieux comprendre l'influence des contraintes résiduelles et de tenter des explications du phénomène afin de développer d'éventuelles solutions.

Certains fournisseurs d'aluminium offrent maintenant des produits dont le procédé de mise en forme a été contrôlé et maîtrisé afin de minimiser les contraintes résiduelles à l'intérieur du matériau. Ce genre de matériau a donc permis d'effectuer une étude comparative de l'influence des contraintes présentes avant l'usinage. L'utilisation d'une méthode de mesure non-destructive de contraintes par faisceaux de neutrons et le mesurage des déformations géométriques par balayage laser sont des méthodes assez nouvelles qui nous ont permis la réalisation ce projet.

Ce mémoire est composé de six chapitres. Les deux premiers chapitres comportent une revue de littérature abordant les théories existantes concernant la définition, la production, les types et les effets des contraintes résiduelles, ainsi qu'un résumé des méthodes expérimentales d'évaluation des contraintes résiduelles. Un guide de sélection des techniques de mesure y est également proposé. Par la suite, une schématisation du phénomène de la distorsion en fonction des contraintes résiduelles et des différentes sources possibles est présentée au chapitre 3. L'intérêt des contraintes résiduelles pour le domaine de l'aéronautique y est également discuté. Le chapitre suivant présente une étude effectuée concernant la modélisation et la prédiction de la distorsion par la méthode des éléments finis.

Les deux derniers chapitres constituent le cœur du travail. Le chapitre 5 présente les objectifs et la procédure expérimentale utilisée. Il explique respectivement les grandes étapes expérimentales qui sont l'évaluation des contraintes résiduelles par la méthode de diffraction par neutrons, l'usinage des composantes et la mesure des déformations par balayage laser. Enfin, au chapitre 6, les résultats obtenus sont analysés et certaines conclusions sont tirées par rapport aux méthodes de mesures utilisées et par rapport à l'influence de la distribution des contraintes sur la distorsion.

## CHAPITRE 1

### THÉORIE SUR LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Avant d'analyser les méthodes pour mesurer et prédire les contraintes résiduelles, il est important de comprendre les notions théoriques de base associées à ce phénomène physique. Pour ce faire, ce chapitre répond à certaines questions telles que : Quelle est la définition d'une contrainte résiduelle? Comment sont produites les contraintes résiduelles? Quels sont les différents types de contraintes résiduelles? Quels sont les effets des contraintes résiduelles sur les performances d'une composante?

#### 1.1 Définition générale des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont des tensions ou des compressions qui existent dans un volume de matière sans aucune application de force externe (force appliquée ou changement de température). En d'autres mots, les contraintes résiduelles sont des contraintes auto-équilibrées présentes dans le matériel sous des conditions de température uniforme et sans aucune force externe (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996), (Kandil, 2001), (Physique & Industrie, 2006), (Withers, 2001a), (Withers, 2001b), (National Physical Laboratory, 2006). Par conséquent, selon le principe de linéarité élastique, la somme des forces et des moments agissant sur chacune des sections de la pièce entière seront égales à zéro (Young, May 2005).

$$F_i = \iint_A \sigma_{ij} n_j dA = 0 \quad (1.1)$$

$$M_i = \iint_A (e_{ijk} x_j \sigma_{kl} n_l) dA = 0 \quad (1.2)$$

## 1.2 Production des contraintes résiduelles

Selon la littérature, les contraintes résiduelles résultent de déformations élastiques ou plastiques non-uniformes qui, de manière permanente, provoquent des incompatibilités dans l'état de déformation (Physique & Industrie, 2006). Une seconde définition dit que les contraintes résiduelles proviennent des mauvais ajustements entre les différentes régions d'un matériau et ce, à différents niveaux : macroscopique et microscopique (Kandil, 2001), (Withers, 2001a). Ces déformations peuvent être induites mécaniquement, thermiquement ou via les phases de transformations d'un matériau. La plupart des procédés manufacturiers et des traitements de surfaces produisent des contraintes résiduelles :

- produits primaires: moulage, formage, forgeage, extrudage, laminage, pliage, etc;
- enlèvement de matière: usinage, électroérosion, etc;
- assemblage: soudage, brasage, etc;
- traitements de surfaces mécaniques: grenailage, chocs laser, etc;
- traitements thermiques, chimiques et thermochimiques : trempe, carburation, nitruration, carbonituration, recouvrement PVD, CVD, etc.

D'un point de vue technique, les procédés manufacturiers ou les traitements de surfaces ou les assemblages de matériaux vont toujours induire des déformations irréversibles. En réalité, aucune composante mécanique n'est exempte de contraintes résiduelles.

## 1.3 Types de contraintes résiduelles

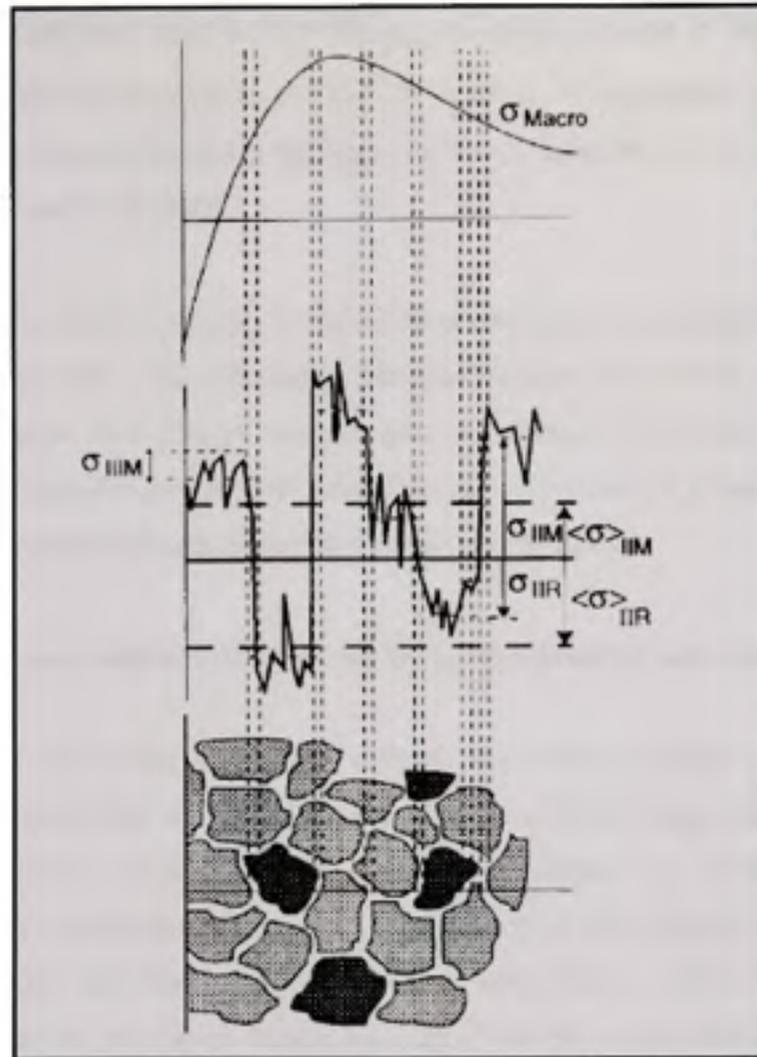
Les contraintes résiduelles peuvent être classées en fonction de l'échelle de grandeur auxquelles elles sont significatives et selon les techniques de mesure utilisées pour les étudier. Les contraintes dites macroscopiques agissent sur de longues distances tandis que les contraintes microscopiques agissent à l'échelle du grain ou à l'échelle atomique du matériau. Un système de standardisation a donc été établi pour diviser les contraintes résiduelles en trois types appelés contraintes résiduelles de *types I, II* et *III* (Kandil, 2001), (Physique & Industrie, 2006), (Withers, 2001a).

Les contraintes résiduelles de *Type I*, également appelées *macros contraintes résiduelles*, sont distribuées de façon continue sur une largeur de plusieurs grains et représentent le niveau moyen de contrainte. Un changement dans l'équilibre de ce type de contraintes va toujours engendrer une variation macroscopique des dimensions.

Les contraintes résiduelles de *Type II*, aussi appelées *micros contraintes résiduelles*, sont uniformes pour une variation inférieure ou égale à la grosseur du grain du matériau. Les contraintes de type II sont pratiquement toujours présentes dans les matériaux polycristallins. Ceci est simplement dû au fait que les différents grains dans un même voisinage sont orientés différemment et par conséquent, leurs propriétés élastiques et thermiques vont être différentes. Il y a également une présence significative des contraintes de type II lorsque la microstructure du matériau contient plusieurs phases ou lorsque des transformations de phases se produisent. Un changement dans l'équilibre de ce type de contraintes peut également engendrer un changement de dimensions (macroscopique) et ce, à cause de l'addition des déformations microscopiques.

Les contraintes résiduelles de *Type III* sont continues seulement à l'échelle sous microscopique ou atomique. Les dislocations, les vides ainsi que les atomes impurs sont à l'origine de ce type de contraintes. Un changement dans l'équilibre de ce type n'engendre pas un changement macroscopique de dimensions.

En somme, il est possible de dire que la contrainte résiduelle totale en un point du matériau peut être exprimée par la superposition des trois types de contraintes. Pour mieux visualiser les trois types de contraintes, la Figure 1.1 présente un champ de contraintes résiduelles pour un matériau à deux phases M (matrice) et R (renforcement). On note parfois M et R par  $\alpha$  et  $\beta$ .



**Figure 1.1** Champ de contraintes résiduelles.

(Tiré de Withers, 2001a)

Source : Cette figure a été tirée de l'article de journal de M. P. J. Withers, *Residual stress -Part 1 : Measurement techniques*, p 356. Cet article a été publié dans le journal *Materials Science and Technology*, vol. 17 en avril 2001.

À partir de cette figure, il est possible de constater que les contraintes résiduelles ( $\sigma_I$  ou  $\sigma_{macro}$ ,  $\sigma_{II}$  et  $\sigma_{III}$ ) peuvent être caractérisées en fonction de différentes échelles de longueur ( $l_{0,I}$ ,  $l_{0,II}$  et  $l_{0,III}$ ) au-delà desquelles elles sont auto-équilibrées : pour le type I,  $l_{0,I}$  représente une fraction considérable de la composante; pour le type II,  $l_{0,II}$  est comparable à

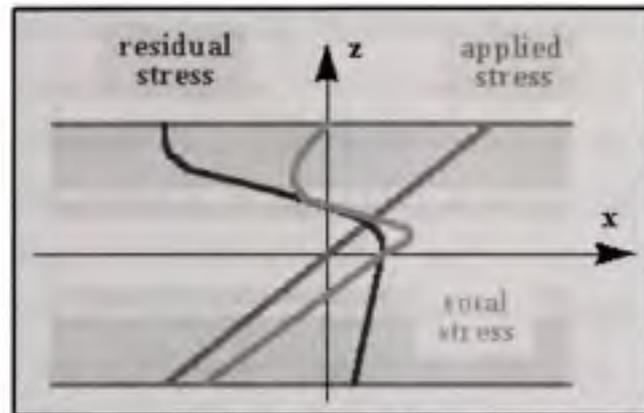
la dimension d'un grain, et pour le type III,  $l_{0,III}$  est plus petit que le diamètre d'un grain. Cette information est très importante lors de l'évaluation des contraintes résiduelles puisque les différentes techniques utilisées possèdent différentes capacités de mesure de longueurs. Ce sujet sera traité au CHAPITRE 2.

Pour terminer, si l'on fait le lien entre les types de contraintes et la production des contraintes résiduelles, on dira que : les contraintes macroscopiques proviennent généralement des traitements thermiques, de l'usinage, des procédés secondaires et des assemblages; et que les contraintes microscopiques proviennent généralement du coefficient d'expansion thermique, des mauvais jeux entre les phases et des transformations de phases.

#### **1.4 Effets des contraintes résiduelles sur les performances d'une composante**

L'importance des contraintes résiduelles dépend du matériau utilisé, de la composante fabriquée et des applications de cette dernière. Aucune réponse unique ne peut être donnée puisque les contraintes résiduelles peuvent être bénéfiques ou destructives pour les performances d'une composante. Elles peuvent également être critiques ou insignifiantes. Chaque cas doit donc être étudié selon son propre mérite (Vishay, 2006). L'objectif de ce chapitre n'étant pas de couvrir en détails tous les effets des contraintes résiduelles sur les performances, seules certaines théories importantes seront abordées dans cette section. Le but étant de considérer l'intérêt qu'on accorde au mesurage des contraintes résiduelles.

Généralement, les contraintes résiduelles en compression ont un effet bénéfique sur la durée de vie en fatigue et sur la corrosion car elles retardent l'initiation et la propagation de fissures (Physique & Industrie, 2006). Au contraire, les contraintes résiduelles en tension réduisent les performances mécaniques. Dans le domaine élastique, les contraintes résiduelles peuvent être simplement additionnées à la contrainte appliquée (Figure 1.2) (Physique & Industrie, 2006), (Withers, 2001a).



**Figure 1.2 Contraintes résiduelles additionnées aux contraintes appliquées dans le domaine élastique.**

(Physique & Industrie, 2006)

Source : Cette figure a été tirée du site Internet de Physique & Industrie. Ce site est accessible via [http://www.physiqueindustrie.com/residual\\_stress.php](http://www.physiqueindustrie.com/residual_stress.php).

Pour cette raison, les contraintes résiduelles en compression permettent de réduire le niveau de contrainte de la couche où la force appliquée est la plus élevée. Cela mène à une augmentation apparente de la limite en fatigue. Cependant lorsque la contrainte totale excède la contrainte de limite élastique, le matériau est plastiquement déformé et cela mène alors à un changement dans le champ de contraintes résiduelles. Dans le cas de la présence de la plasticité, on dit alors qu'il y a *adaptation* de la structure par rapport à la force appliquée (Physique & Industrie, 2006). En d'autres termes, on pourrait dire que les contraintes résiduelles changent.

Dans le cas de chargements cycliques, des fissures peuvent s'initier et se propager pour un niveau de contrainte inférieur à la limite élastique. Cela mène donc à une redistribution (relaxation) des contraintes résiduelles. On dit alors qu'il y a *accommodation* de la structure par rapport à la force appliquée. Il a été démontré que les contraintes résiduelles en compression ont un effet de fermeture des fissures et par conséquent, elles ralentissent la propagation de ces dernières (Physique & Industrie, 2006).

Finalement, le phénomène le plus important à considérer dans le cas de la présente étude est la *relaxation* des contraintes résiduelles. La relaxation peut être due à la fatigue, aux traitements thermiques (trempe) ou à l'enlèvement de couches de matière (usinage). La relaxation peut être définie comme un relâchement ou une redistribution des contraintes résiduelles qui permet de retrouver l'état d'équilibre interne de la composante. Le problème relié à ce phénomène est qu'il engendre généralement des changements dimensionnels au niveau macroscopique (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996), (Kandil, 2001), (Physique & Industrie, 2006).

### **1.5 Sommaire de la section**

La théorie concernant les contraintes résiduelles permet de mieux comprendre leur provenance, les différents types ainsi que l'influence de ces dernières sur des composantes mécaniques. Il est important de bien différencier les types de contraintes impliquées dans une problématique pour ensuite choisir la méthode d'évaluation qui convient le mieux.

## CHAPITRE 2

### ÉVALUATION DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

#### 2.1 Introduction

Durant les dernières décennies, différentes méthodes quantitatives et qualitatives ont été développées afin de mesurer les contraintes résiduelles. De façon générale, ces méthodes sont divisées en deux catégories : les techniques destructives et les techniques non-destructives. Plusieurs sources traitent des techniques de mesure des contraintes résiduelles (Withers, 2001a), (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996), (National Physical Laboratory, 2006), (Physique & Industrie, 2006), (Kandil, 2001), (Hauk et Behnken, 1997), (Totten, Howes et Inoue, 2002), (Schindler, Bertschinger et Semenov, 2002), (Los Alamos National Laboratory, 2006), (Prime, 1999a), (Tanner, 2003), (Brand et Prask, 1994), (Iwata et Ogawa, 1997), (Kishida, Sasaki et Itoh, 1990), (Leggatt et al., 1996), (Li et al., 1996), (Prime, 2001).

La première série de méthodes est basée sur la destruction de l'état d'équilibre des contraintes résiduelles après sectionnement, usinage ou enlèvement de couches minces sur la composante mécanique (pièce). La redistribution des forces internes mène aux déformations locales qui sont mesurées pour évaluer le champ de contraintes résiduelles. Les contraintes résiduelles sont déduites des déformations mesurées à l'aide de la théorie des déformations dans le domaine élastique (approche analytique ou par la méthode des éléments finis). Ces techniques sont uniquement sensibles aux contraintes résiduelles macroscopiques (*Type I*).

Les principales méthodes sont :

- perçage de trou (« Hole-Drilling method »);
- contour d'anneau (« Ring core method »);
- déflexion (« Bending deflection method »);
- sectionnement (« Sectionning »);
- « crack compliance method (Slitting)».

La seconde série de méthodes est basée sur la relation entre les paramètres physiques et cristallographiques du matériau et les contraintes résiduelles. Certaines de ces méthodes permettent dévaluer les contraintes résiduelles de types I, II et III. Les méthodes les plus développées sont :

- méthode de diffraction par *rayons-X* ou synchrotrons (« Hard X-rays ») ou par *neutrons*;
- les techniques *ultrasoniques*;
- les méthodes *magnétiques*;
- effets piezospectroscopiques (Raman);
- méthodes photoélastiques.

Les sections qui suivent décrivent brièvement chacune de ces méthodes.

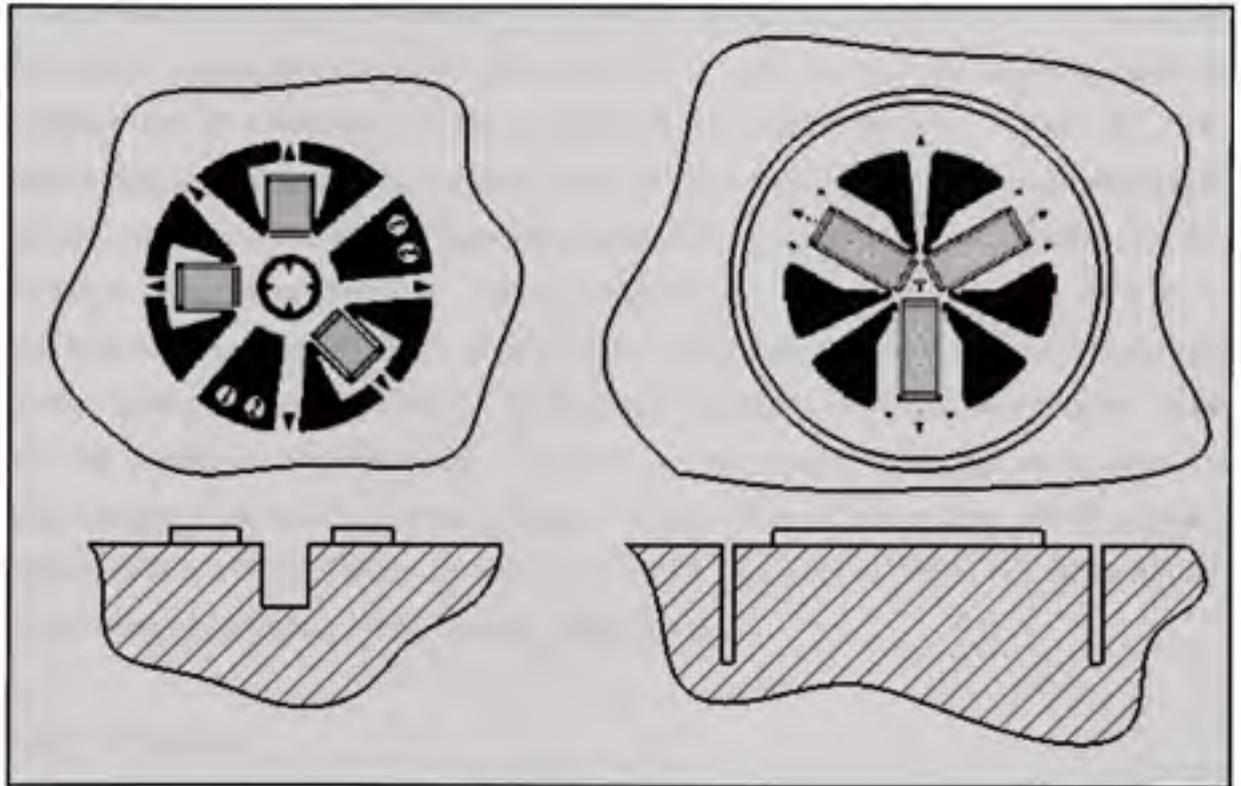
## **2.2 Les techniques de mesure des contraintes résiduelles**

### **2.2.1 Hole-drilling et Ring Core**

Les méthodes « Hole-Drilling » et « Ring Core » sont les plus communes pour mesurer les contraintes résiduelles. Elles impliquent toutes deux un enlèvement de matière localisé et le mesurage des déformations aux abords de la zone soustraite. Les déformations sont généralement mesurées à l'aide de jauges de déformation.

La méthode « Hole-Drilling » s'effectue en perçant un trou de petit diamètre, généralement entre 1 et 4 mm, jusqu'à une profondeur approximativement égale à 1.2 fois le diamètre utilisé (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996), (Withers, 2001a). Une jauge de déformation à trois éléments appelée rosette est utilisée pour mesurer les déformations aux abords du trou. La méthode « Ring Core » est similaire à l'exception que le trou est remplacé par le perçage d'un anneau de diamètre intérieur variant entre 15 et 150 mm. Les

déformations sont également mesurées à l'aide d'une rosette mais à l'intérieur de l'anneau. Cette méthode permet d'atteindre une profondeur d'environ 25-150% de la valeur du diamètre intérieur (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996), (Withers, 2001a). Les deux méthodes sont illustrées à la Figure 2.1.



**Figure 2.1 Méthodes de Hole-drilling (gauche) et de Ring Core (droite).**

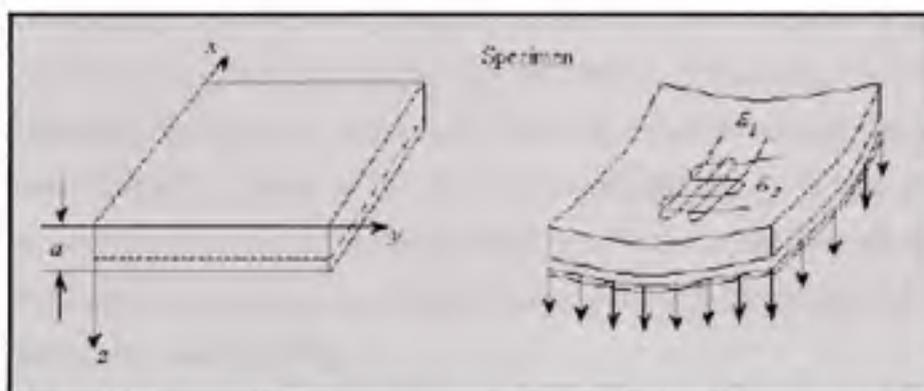
Les méthodes de « Hole-Drilling » et « Ring Core » sont souvent décrites comme étant des méthodes semi-destructives. L'enlèvement de matière peut parfois être toléré ou même réparé. Dans les deux cas, les contraintes résiduelles existent dans le matériau avant le perçage du trou ou de l'anneau et elles peuvent être calculées à partir des déformations mesurées par les jauges (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996). Malgré le fait qu'elle offre certains avantages comme une meilleure sensibilité due au relâchement quasi complet de la surface et une moins grande influence des erreurs mineures d'excentricité ou

de diamètre du trou (anneau) percé, la méthode du « Ring Core » demeure la moins utilisée. Cela est dû principalement au fait que les résultats obtenus sont moins locaux, que le diamètre de l'anneau cause plus de dommages et qu'il faut parfois déconnecter et reconnecter les jauges pour pouvoir percer l'anneau. La méthode du « Hole-Drilling » est donc privilégiée. Cependant, cette méthode comporte également certains inconvénients. Le premier étant le manque de sensibilité ( $\pm 50$  MPa). Puisque les relâchements de contraintes décroissent rapidement en fonction de la distance à partir du bord du trou, les jauges ne mesurent que 25 à 40% des contraintes résiduelles originales (Withers, 2001a). De plus, étant donné la précision de mesure des jauges de déformation, une erreur de dimension du diamètre du trou ou une erreur d'excentricité peut introduire une erreur significative dans les calculs des contraintes résiduelles. En dépit de ces inconvénients, cette méthode demeure la plus utilisée. Le « Hole-Drilling » est donc une technique bien implantée expérimentalement et théoriquement. La disponibilité d'équipements et d'outils de perçage de précision ainsi que des procédures expérimentales connues et prouvées limitent les erreurs et donc les désavantages liés à cette méthode (Leggatt et al., 1996), (Zhou et Rao, 1993), (Sasaki, Kishida et Itoh, 1997), (Kishida, Sasaki et Itoh, 1990), (Dupas et al., 1998), (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996), (Oettel, 2000, Issue 1).

### 2.2.2 Déflexion

Cette méthode est surtout utilisée pour déterminer les contraintes dues à l'ajout d'une couche de recouvrement («coating») ou à un enlèvement de couche («layer removal»). On la retrouve également sous les noms «Curvature» et «Layer removal» (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996). Le principe de cette méthode repose sur l'équilibre des contraintes et des moments internes lorsque de fines couches sont graduellement enlevées à l'aide de méthodes d'usinage chimiques ou électrochimiques (ou ajoutées). La déflexion de la composante engendrée par le re-balancement des contraintes internes est mesurée et les contraintes résiduelles sont calculées à partir de théories appartenant au domaine élastique. La valeur de la déflexion peut être mesurée de façon discrète (instruments de mesures conventionnels) ou en continue (jauges de déformation ou capteurs de déplacements). La

plupart du temps, la méthode continue est privilégiée puisqu'elle nécessite un temps d'analyse et de calculs moins longs. La Figure 2.2 représente un exemple de la méthode de déflexion avec des jauges de déformations comme instruments de mesures. Cette méthode est destructive. Elle permet de mesurer des contraintes de type I seulement. Sa précision est déterminée par l'instrument de mesure utilisé. Cette méthode n'est pas utilisée pour l'enlèvement de matière par usinage puisqu'elle n'est pas en mesure de différencier les contraintes résiduelles des contraintes induites lors de l'usinage (Ekmekçi, 2004). (Kandil, 2001).



**Figure 2.2 Méthode de déflexion avec jauge de déformation.**

(Ekmekçi, 2004)

Source : Cette figure a été tirée de l'article de B. Ekmekçi, *Residual Stress Measurement with Layer Removal Method*, Figure 1, p2. Cet article a été présenté lors de la conférence *First Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium*.

### 2.2.3 Sectionnement

La méthode de sectionnement fait appel au principe de relaxation des contraintes. Lorsqu'une composante est sectionnée, les contraintes résiduelles présentes à l'intérieur du matériau se relâchent. On peut alors mesurer ces relâchements et calculer les contraintes résiduelles. Il existe deux approches pour mesurer les contraintes résiduelles avec la méthode du sectionnement. : L'utilisation des contraintes ou l'utilisation des déformations surfaciques comme paramètres (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996).

Dans la première approche, ce sont les contraintes de sectionnement qui servent de mesurande. Cette approche est appelée « Sectioning method ». Pour mesurer une pièce en trois dimensions, les distributions de contraintes sur les nouvelles surfaces exposées, avant les sectionnements, sont évaluées à partir des relaxations de déformations observées sur la surface pendant le sectionnement. Le sectionnement est successivement répété sur la composante jusqu'à ce qu'on n'observe plus de déformations.

La seconde approche focus surtout sur la source des contraintes résiduelles qu'on appelle déformation inhérente<sup>1</sup>. En se basant sur cette approche, les déformations inhérentes sont directement évaluées à partir des déformations observées sur la surface de l'objet et les contraintes résiduelles peuvent être estimées à l'aide de relations contraintes-déformations dans le domaine élastique. De nos jours, c'est cette approche qui est la plus utilisée. Elle permet de mesurer plus facilement un modèle tridimensionnel et elle permet également de prévenir la propagation des erreurs de mesures (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996), (Petrucci et Zuccarello, 1996).

La méthode de sectionnement est surtout utilisée en Amérique. On la retrouve très peu dans la littérature européenne. C'est bien entendu une méthode destructive.

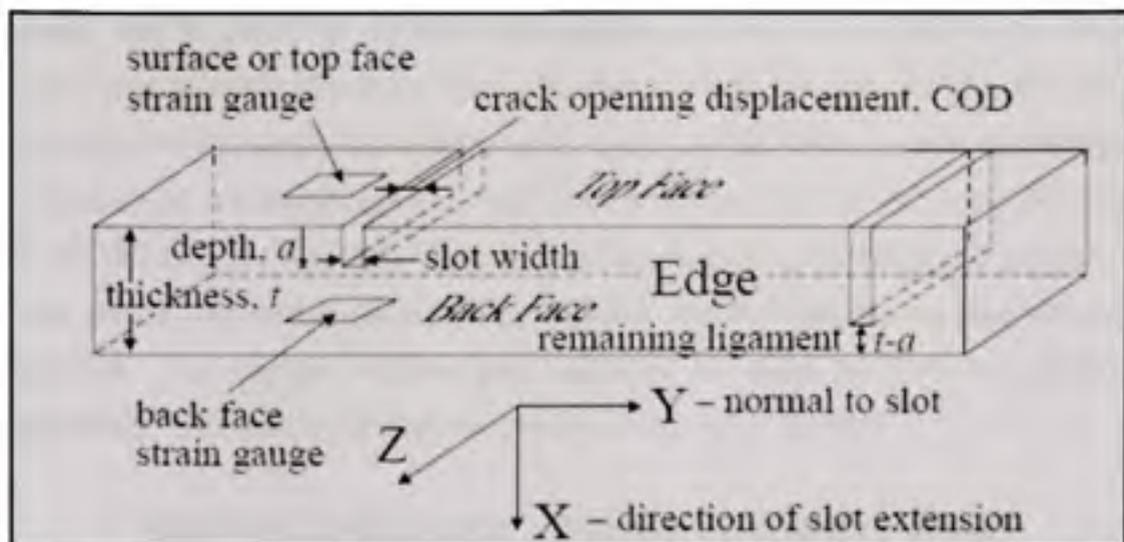
#### **2.2.4 Crack Compliance Method («Slitting»)**

Cette méthode est dérivée de la méthode de sectionnement avec l'approche de la déformation inhérente comme paramètre de mesure. Le principe consiste à effectuer une rainure dans la

---

<sup>1</sup> Inhérent, e : qui appartient nécessairement à. Dans la littérature, les déformations inhérentes sont la source des contraintes résiduelles et sont exprimées comme étant des déformations incompatibles. À titre d'exemple, lorsqu'une pièce libre de contraintes est exposée à un changement de température local, une contrainte thermique est alors produite à l'intérieur de la composante. La dilatation thermique (déformation) due au changement de température est identifiée comme étant une déformation inhérente Lu, Jian, et Society for Experimental Mechanics. 1996. *Handbook of measurement of residual stresses*. Lilburn, Géorgie, Upper Saddle River, N.J.: Fairmont Press ; Distributed by Prentice Hall PTR, xv, 238 p.

composante à étudier pour relâcher les contraintes résiduelles normales à la surface et pour faire déformer la pièce. Cette rainure est effectuée de façon incrémentale en fonction de la profondeur. Les déformations sont enregistrées pour chacune des profondeurs à l'aide de jauges de déformations placées sur la surface aux abords de la rainure. À partir des déformations, il est alors possible de calculer les contraintes en fonction de la profondeur. De plus, en installant une jauge sur la face arrière de la pièce (Figure 2.3), cette méthode offre l'avantage de pouvoir mesurer les contraintes à travers la pièce entière et non seulement près de la surface. La coupe peut être effectuée à l'aide de la coupe au fil («Wire EDM»), par fraisage ou par lame de scie. Cette méthode est surtout utilisée au États-Unis et elle a été développée et exploitée par le Dr Michael B. Prime (Los Alamos National Laboratory). La procédure d'application de cette méthode est détaillée dans la littérature se trouvant sur le site internet <http://www.lanl.gov/residual> (Prime, 2003a). Elle offre certains avantages tels que la facilité d'exécution, des coûts abordables, une sensibilité intéressante pour une large plage de profondeur. La méthode a été testée jusqu'à une profondeur de 166 mm. C'est la profondeur qui détermine les limites possibles des dimensions du brut. La longueur et la largeur du brut ne doivent pas excéder 1.5 fois la profondeur de la pièce (Prime, 2002a). Par exemple, pour une pièce ayant une profondeur de 100 mm, les dimensions maximales du brut sont de 150 mm de longueur par 150 mm de largeur. Au-delà de cette distance, la relaxation latérale de contrainte peut engendrer une erreur non négligeable. Pour une pièce de grande taille, il faut donc exécuter plusieurs coupes espacées de 1.5 fois sa profondeur ou y découper des échantillons de petites tailles. Cette deuxième option implique toutefois la présence de contraintes dues à la relaxation de l'échantillon lors de sa coupe. Cette relaxation peut engendrer une diminution de la contrainte mesurée de l'ordre de 25% (Prime, 2004). Il est toutefois possible de compenser cette erreur lors des calculs. La Figure 2.3 illustre la terminologie utilisée pour la mise en œuvre de la méthode de «Crack compliance». Les revues de littératures, les rapports techniques et les articles scientifiques en lien avec cette méthode sont nombreux et accessibles via le site de Los Alamos National Laboratory : (Los Alamos National Laboratory, 2006), (Prime, 2003a), (Prime, 1999a), (Prime, 2001), (Prime, 2002a), (Prime, 2002c), (Prime, 2002b), (Prime, 2003b), (Prime, 2005), (Prime, 2006), (Milan, 2005), (Schindler, 2000), (Schindler, Bertschinger et Semenov, 2002).



**Figure 2.3 Terminologie de la méthode de Crack compliance.**

(Prime, 1999a)

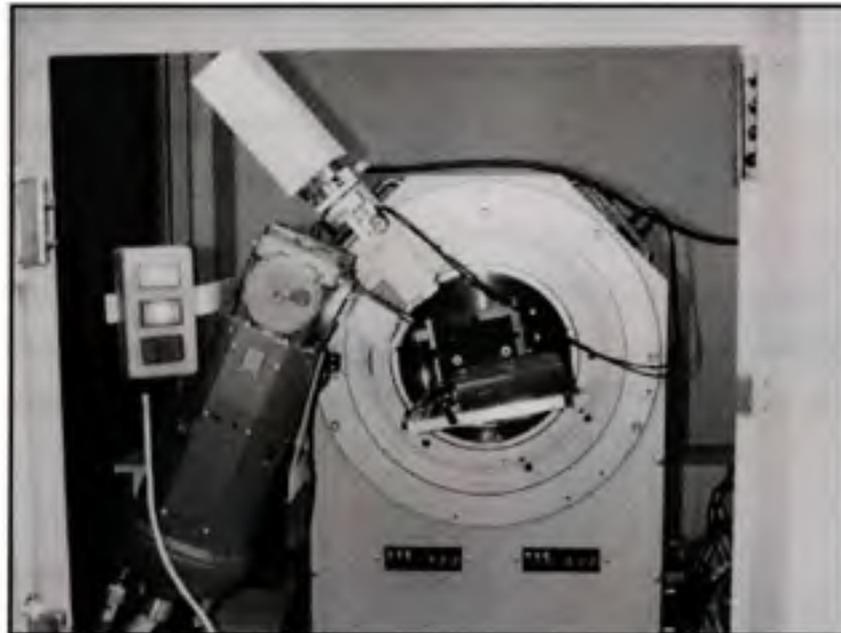
Source : Cette figure a été tirée d'un article électronique rédigé par M. Michael B. Prime, *Residual stress measurement by successive extension of slot : The crack compliance method*. Cet article est disponible sur le site des Laboratoires Los Alamos à l'adresse électronique <http://www.lanl.gov/residual/crackcmp.pdf>.

### 2.2.5 Diffraction par rayons-X

La méthode de diffraction par rayons-X est la plus commune et la plus utilisée parmi les méthodes non-destructives existantes (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996), (Withers, 2001a), (Kandil, 2001), (Iwata et Ogawa, 1997), (National Physical Laboratory, 2006). Comme son nom le dit, cette technique repose sur le principe de la diffraction. Des faisceaux rayons-X monochromatiques sont projetés sur la surface de la composante à étudier et sont déviés par les atomes composants le matériau. Les atomes du matériau doivent être ordonnés selon un réseau polycristallin<sup>2</sup>. Pour une longueur d'onde connue et un

<sup>2</sup> Un arrangement est dit CRISTALLIN lorsque les atomes sont positionnés de façon régulière et que les motifs géométriques se répètent également de façon régulière Dorlot, Jean-Marie, Jean-Paul Bailon et Jacques

changement dans l'angle de Bragg, les changements de distances inter planaires peuvent être mesurées. Par la suite, les déformations élastiques peuvent être calculées à partir des distances inter planaires (Hauk et Behnken, 1997). Cette méthode est très précise. La technique permet de mesurer les contraintes de type I, II et III. Elle est cependant limitée par sa profondeur de pénétration qui n'est pas très élevée (environ 50 mm pour l'aluminium) (Withers, 2001a), (Li et al., 1996). Pour cela, on dit que c'est une technique de surface. Pour une plus grande profondeur, elle est parfois jumelée à la méthode d'enlèvement de couches (destructive). La machine utilisée pour effectuer ce genre de tests est appelée un diffractomètre. La Figure 2.4 montre un exemple de ce type d'appareil.



**Figure 2.4 Diffractomètre pour le mesurage au rayon-X.**  
(National Physical Laboratory, 2006)

Source : Cette figure a été tirée du site Internet du National Physical Laboratory. Ce site est accessible via <http://www.npl.co.uk/materials/residualstress/index.html>.

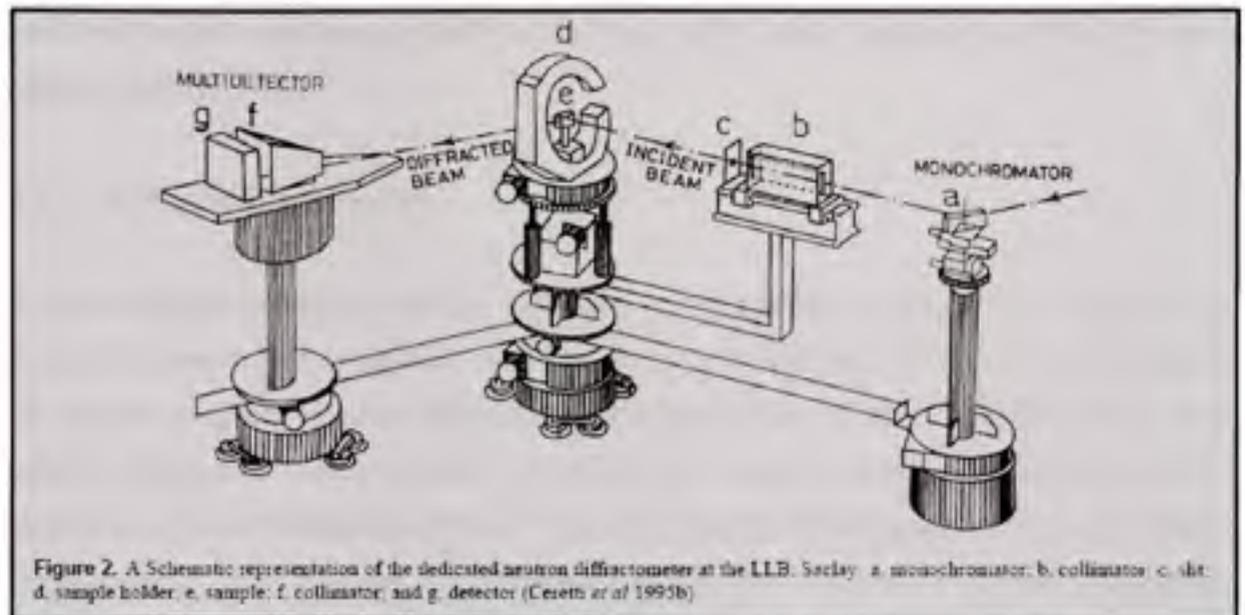
### 2.2.6 Synchrotron

La méthode du synchrotron (« Hard X-Rays ») utilise les mêmes principes que la diffraction par rayons-X. La différence se situe au niveau du faisceau projeté. Le synchrotron produit un faisceau d'énergie beaucoup plus puissant. Ces rayons-X ont une plus grande pénétration dans le matériau que les rayons-X conventionnels (environ 1 à 2 mm pour la plupart des matériaux) (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996), (Withers, 2001a), (Kandil, 2001), (National Physical Laboratory, 2006). Cette augmentation de la profondeur de pénétration permet à la méthode du synchrotron de fournir une résolution spatiale élevée. Ainsi, il est possible de tracer une représentation tridimensionnelle des déformations. L'augmentation de la profondeur de pénétration constitue le premier avantage de cette méthode par rapport à celle du rayon-X conventionnel. Elle permet de mesurer des contraintes jusqu'à une profondeur d'environ 100 mm pour l'aluminium. Un second avantage intéressant est la grosseur du faisceau (1 à 10 mm de diamètre). Ce diamètre de faisceau fait en sorte que la résolution spatiale n'est plus limitée par l'instrument de mesure, mais par la grosseur des grains à l'intérieur de l'échantillon. Le temps de mesure est également beaucoup plus rapide (Kandil, 2001). On parle d'une fraction de seconde avec le synchrotron versus 1 heure de travail avec la méthode de diffraction par rayons-X conventionnelle.

### 2.2.7 Diffraction par neutrons

La méthode de diffraction par neutrons utilise les mêmes principes que pour la diffraction par rayons-X (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996), (National Physical Laboratory, 2006). L'utilisation des neutrons permet cependant une augmentation importante de la profondeur de pénétration. Cette méthode est capable de lire à des profondeurs allant jusqu'à 250 mm pour l'aluminium (Withers, 2001a). Tout comme pour le synchrotron, la méthode par neutrons possède une excellente résolution spatiale et permet de tracer une représentation tridimensionnelle des déformations. Cette méthode d'évaluation des contraintes est capable de collecter une grande quantité de données (via la position du capteur) d'une pièce entière (dépendant de son épaisseur). C'est ce qui fait de cette méthode un outil particulièrement

utile pour valider des modèles théoriques. Par contre, cette méthode est très coûteuse et son accessibilité est très limitée. C'est pourquoi elle n'est pas très répandue. Le laboratoire de recherche du CNRC situé à Chalk River en Ontario est l'un des rares centres de recherches à offrir ce genre de technologie (McIvor, 2003) au Canada.



**Figure 2.5 Schématisation d'un diffractomètre au neutron.**

(Albertini *et al.*, 1999)

Source : Cette figure a été tirée d'un article rédigé par Albertini, Gianni, Giovanni Bruno, Adele Carrado, Fabrizio Fiori, Massimo Rogante et Franco Rustichelli, *Determination of residual stresses in materials and industrial components by neutron diffraction*, figure 2, p58. Cet article a été publié dans le journal *Measurement Science & Technology*, vol. 10, no 3.

### 2.2.8 Techniques ultrasoniques

Les techniques ultrasoniques utilisent la sensibilité de la vitesse des ondes ultrasoniques voyageant à travers le solide par rapport au niveau de contraintes. Un changement de vitesse des ondes ultrasoniques dans un matériau est directement affecté par la magnitude et la direction des contraintes présentes. Cette technique peut donc tenir compte des trois types de contraintes résiduelles (I, II et III), mais sans les différencier. La pénétration peut être très

élevée ( $> 10$  cm). Par contre, la résolution est médiocre (environ 5 mm) puisque les changements de vitesses dépendent du champ de contraintes se trouvant sur la trajectoire de l'onde toute entière. De plus, le coefficient « acoustoélastique » nécessaire pour l'analyse est généralement calculé expérimentalement. Cette méthode offre l'avantage de pouvoir mesurer les macros contraintes à travers un volume important de matériel. Elle est surtout utilisée pour des opérations de maintenance (National Physical Laboratory, 2006), (Withers, 2001a), (Kandil, 2001).

### **2.2.9 Méthodes magnétiques**

Les propriétés ferromagnétiques des matériaux ferromagnétiques sont sensibles à l'état de contrainte interne dû à la striction magnétique qui provoque des effets magnéto-élastiques. La striction magnétique est le phénomène par lequel chaque domaine magnétique est étiré selon la direction de la magnétisation. À un niveau d'énergie minimum, la magnétisation est alignée avec les directions cristallines. C'est ce qu'on appelle les lignes d'axes magnétiques. Un changement dans le niveau de contraintes engendre une variation du nombre de domaines magnétiques alignés selon chaque ligne d'axe magnétique. Cela mène à une réduction de l'énergie magnéto-élastique. Même si la dépendance des contraintes par rapport aux paramètres magnétiques est forte, il y a plusieurs autres variables à considérer, tel que, la dureté du matériau, la texture, la grosseur du grain, etc. qui vont également affecter les mesures. Pour cette raison, une combinaison de plusieurs techniques est nécessaire pour éliminer les variables indésirables. Les principaux avantages de cette méthode sont sa rapidité d'exécution, la portabilité de l'équipement, la possibilité de mesurer les contraintes bi-axiales, et la profondeur de pénétration de l'ordre de 6 à 10 mm. Les principales lacunes sont le nombre limité de matériaux que la méthode peut couvrir (ferromagnétiques seulement) et sa sensibilité inhérente envers une variété d'éléments microstructuraux (National Physical Laboratory, 2006), (Withers, 2001a), (Kandil, 2001), (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996).

### **2.2.10 Effets piezospectroscopiques (Raman)**

L'effet de Raman (National Physical Laboratory, 2006) fait appel à l'interaction de la lumière avec la matière. Un rayon laser provoque la vibration des liens atomiques. L'analyse de la lumière dispersée, connue sous le nom de spectre de Raman, révèle certaines informations sur l'état physique de l'échantillon et sur sa structure chimique. Les lignes du spectre de Raman varient linéairement avec le niveau des contraintes. Cette technique n'est pas destructive et possède une excellente résolution spatiale (environ 1  $\mu\text{m}$ ) (Withers, 2001a). Avec l'utilisation d'un microscope optique, il est possible de sélectionner ce qui nous intéresse sur une distance de seulement quelques microns. Cette méthode est essentiellement surfacique.

### **2.2.11 Méthodes photoélastiques**

Ce sont des méthodes d'extensométrie indirecte (Withers, 2001a). L'effet physique mis en cause est un effet optique de la biréfringence accidentelle de certains matériaux transparents, causée par l'application d'un état de contraintes. Cela fait également appel à la nature ondulatoire de la lumière. Ce sont les franges obtenues en projetant une lumière blanche ou monochromatique à travers des polarisateurs et à travers la pièce transparente (ou la couche de recouvrement dans le cas des pièces non transparentes) qui permettent d'évaluer les niveaux de contraintes. La Figure 2.6 montre un exemple de résultat obtenu avec la photoélasticité. Les techniques photoélastiques ont été beaucoup utilisées pour l'étude sur modèles réduits transparents de géométries compliquées en 2 et 3 dimensions. C'est une technique non destructive. La technique de recouvrement photoélastique (matériau non transparent) est une technique surfacique seulement (2D). Il est toujours possible d'évaluer en trois dimensions en jumelant cette méthode à celle de l'enlèvement de couches. Les principaux inconvénients sont alors que la pièce étudiée sera détruite et que les temps d'exécution et d'analyse seront très longs. C'est pourquoi cette technique n'est pas très utilisée dans le domaine d'évaluation des contraintes résiduelles.



**Figure 2.6 Exemple d'analyse avec la méthode photoélastique.**  
(Tennessee Tech University, 2006)

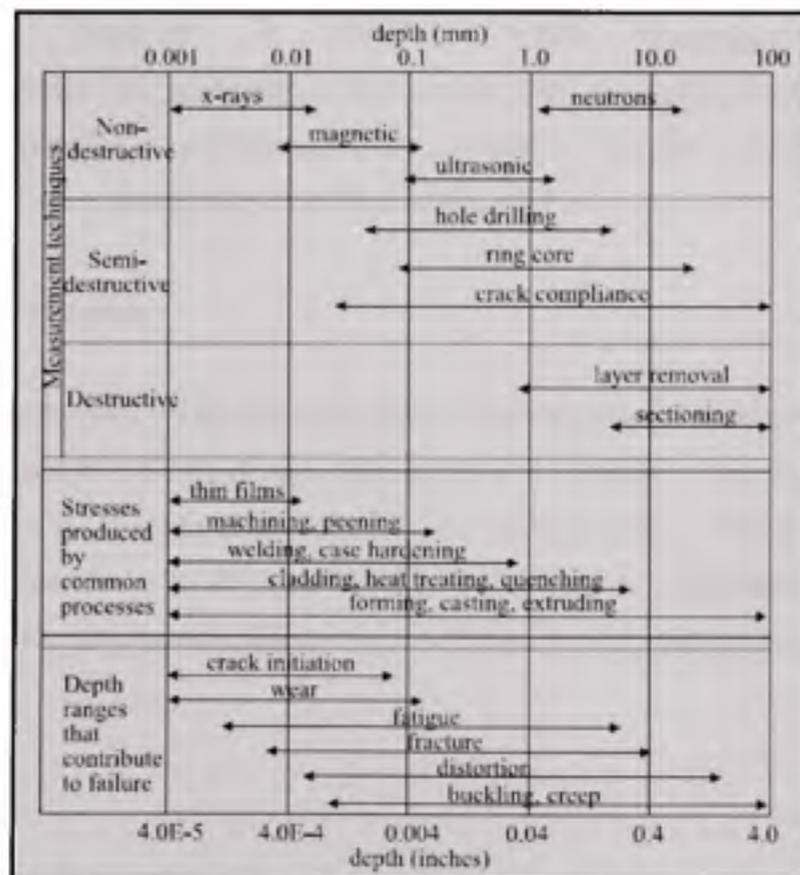
Source : Cette figure a été tirée du site Internet du Tennessee Tech University. Ce site est accessible via [http://www.tntech.edu/me/labs/Exp\\_Analysis.html](http://www.tntech.edu/me/labs/Exp_Analysis.html).

## **2.3 Choix d'une technique de mesure**

### **2.3.1 Introduction**

Lors du choix d'une technique de mesure, plusieurs facteurs doivent être considérés si nous voulons évaluer de façon efficace les contraintes résiduelles de la composante à étudier. Un premier facteur important à considérer serait le type de contraintes que l'on désire étudier. Comme nous l'avons vu lors de l'explication des types de contraintes résiduelles, ces dernières sont fonction de différentes échelles de longueurs. Puisque chaque technique de mesure possède une résolution et une précision, il est possible que certaines méthodes ne soient pas assez précises pour détecter des contraintes de types II et III. Il faut donc préalablement connaître l'influence des différents types de contraintes sur la composante étudiée en fonction du phénomène que l'on désire cibler. Par exemple, lors de la conception d'un matériau composite, nous pourrions être intéressés par le développement des contraintes résiduelles de type II dues aux différentes phases, afin de mieux connaître les transferts de chargements de la matrice vers le renforcement (fibres) (Withers, 2001a). Dans une toute autre étude, nous pourrions nous intéresser à la durée de vie en fatigue d'une composante

métallique. Dans ce cas, ce sont les contraintes de type I (macros contraintes) qui seraient intéressantes. Les contraintes de types II et III ont souvent une influence négligeable dans ce type d'analyse. La profondeur à laquelle agit le défaut ou le procédé est également un facteur important dans le choix de la technique. La Figure 2.7 montre une évaluation approximative des échelles de profondeurs que peuvent couvrir les différentes techniques en comparaison avec les échelles de profondeurs où agissent certains procédés et certains défauts.



**Figure 2.7 Profondeur de pénétration des différentes techniques, des procédés et des défauts.**

(Prime, 1999a)

Source : Cette figure a été tirée d'un article électronique rédigé par M. Michael B. Prime, *Residual stress measurement by successive extension of slot : The crack compliance method*. Cet article est disponible sur le site des Laboratoires Los Alamos à l'adresse électronique <http://www.lanl.gov/residual/crackcmp.pdf>.

Par la suite, plusieurs autres facteurs tels que le type de matériau, la catégorie de méthodes (destructive ou non-destructive), la géométrie de la composante, le facteur économique, la disponibilité de la méthode et les délais, etc., sont à considérer. Comment s'y retrouver? Pour faciliter le choix d'une technique, le NPL (National Physical Laboratory) a développé un guide basé sur trois tableaux contenant les principaux attributs de chaque technique. Ce guide s'adresse tout d'abord aux personnes qui n'ont pas une connaissance approfondie dans le domaine du mesurage des contraintes résiduelles. Une version interactive est disponible à l'adresse Internet [http://resource.npl.co.uk/cgi-bin/download.pl?area=npl\\_publications&path\\_name=/npl\\_web/pdf/matc4.pdf](http://resource.npl.co.uk/cgi-bin/download.pl?area=npl_publications&path_name=/npl_web/pdf/matc4.pdf). Ce guide ne contient que les principales techniques utilisées (surtout en Europe). La section qui suit est une traduction et une adaptation de ce guide (Kandil, 2001).

### **2.3.2 Guide de sélection**

Pour faciliter la sélection, les attributs de chacune des techniques à considérer lors du choix d'une technique ont été divisés et regroupés selon trois tableaux. Les concepteurs de ces tableaux précisent qu'il s'agit d'une sélection de premier stage. Certaines réflexions et vérifications doivent être effectuées par la suite en fonction de l'application pour s'assurer que la technique choisie répond adéquatement aux besoins. Les trois tableaux sont présentés comme suit :

**Tableau 2.1**  
**Questions pratiques**  
 (Kandil, 2001)

| Techniques          | Tableau 1 - Questions Pratiques                  |                              |                  |                         |                               |                |                            |   |  |                            |
|---------------------|--|------------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|---|--|----------------------------|
|                     | Grosueur de la composante                        | Avec contact ou Sans contact | Destructive ?    | Laboratoire ou portable | Disponibilité de l'équipement | Vitesse        | Disponibilité de standards | Coût de l'équipement  | Coût de message <sup>1</sup> (\$ CAD)  | Niveau d'expertise requise |
| Hole Drilling       | Structures<br>Artefacts<br>Coatings <sup>2</sup> | Contact                      | Non              | Les deux                | Très bonne                    | Rapide/moyenne | ASTM E837-99 <sup>4</sup>  | Bas   | 70 - 300 \$                            | Bas/Moyen                  |
| Diffraction Rayon X | Structures<br>Artefacts<br>Coatings              | Sans contact                 | Non <sup>3</sup> | Les deux                | Généralement accessible       | Rapide/moyenne | Aucune <sup>5</sup>        | Moyen   | 70 - 300 \$                            | Moyen                      |
| Spectrométrie       | Artefacts<br>Coatings <sup>2</sup>               | Sans contact                 | Non              | Laboratoire             | Spécialistes seulement        | Rapide         | Aucune                     | Installations gouvernementales / pas sur le marché <sup>6</sup> | Élevé (échelle de prix non disponible) | Élevé                      |
| Neutrons            | Artefacts  | Sans contact                 | Non              | Laboratoire             | Spécialistes seulement        | Moyenne/lente  | Aucune <sup>5</sup>        | Installations gouvernementales / pas sur le marché <sup>6</sup> | 300\$/heure                            | Élevé                      |
| Diffusion           | Artefacts<br>Coatings                            | Contact                      | Oui              | Laboratoire             | Généralement accessible       | Moyenne        | Aucune                     | Bas   | 70 - 300 \$                            | Bas/Moyen                  |
| Magnétiques         | Structures<br>Artefacts                          | Sans contact                 | Non              | Les deux                | Généralement accessible       | Rapide         | Aucune                     | Moyen   | Bas (échelle de prix non disponible)   | Bas                        |
| Ultrasoniques       | Structures<br>Artefacts                          | Contact                      | Non              | Les deux                | Généralement accessible       | Rapide         | Aucune                     | Moyen   | Bas (échelle de prix non disponible)   | Moyen                      |
| Raman               | Structures<br>Artefacts<br>Coatings              | Sans contact                 | Non              | Les deux                | Généralement accessible       | Rapide         | Aucune                     | Moyen   | Bas (échelle de prix non disponible)   | Moyen                      |
| Crack Compliance    | Structures<br>Artefacts<br>Coatings              | Contact                      | Oui              | Laboratoire             | Très bonne                    | Rapide/moyenne | Los Alamos Laboratory      | Moyen   |  | Bas/Moyen                  |

1 Dépend du type d'instrument utilisé, de la grosseur et de la géométrie de l'échantillon et bien sûr du nombre d'échantillons (grosueur du lot)  
 2 Couche de recouvrement épaisse seulement  
 3 Peut être destructives si utilisée de pair avec l'enlèvement de couches  
 4 Deux guides pratiques (pour Hole Drilling et XRD) ont été développés par NPL  
 5 Ces types d'installations font généralement partie de laboratoires gouvernementaux ou d'agences inter gouvernementales  
 6 Un protocole standard international est en cours de préparation par VAMAS TWAQD

Source : Ce tableau est une adaptation d'un tableau tiré d'un rapport écrit par F. A. Kandil, J D Lord, A T Fry et P V Grant, *A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection*, p. 16. Ce rapport a été présenté au National Physical Laboratory, Teddington dans le cadre du projet de recherche CPM4.5.

Le Tableau 2.1 contient les caractéristiques qui font référence entre autres aux types de méthodes (destructives ou non), aux coûts, disponibilité de l'équipement, portabilité, vitesse de mesurage, existence d'une procédure standard et le niveau d'expertise requis.

**Tableau 2.2**  
**Caractéristiques du matériau**  
 (Kandil, 2001)

| Techniques   | Tableau 2 - Caractéristiques du Matériau          |                        |                                  |                      |                                  |  |
|--|---|------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|--|
|  | Type de matériau                                  | Matériaux Composites ? | Structure cristalline ou amorphe | Coated ? (recouvert) | Préparation de surface           | État de surface  |
| Hole Drilling  | Métaux<br>Plastiques<br>Céramiques                | oui                    | les deux                         | oui                  | Polissage pour la pose de jauges | Plat - La préparation ne doit pas affecter les contraintes |
| Diffraction Rayon X  | Métaux<br>Céramiques                              | oui                    | Crystalline                      | oui                  | Important                        | Important car peut affecter la diffraction                 |
| Synchrotron  | Métaux<br>Céramiques                              | oui                    | Crystalline                      | oui                  | Important                        | Pas important  |
| Neutrons   | Métaux<br>Céramiques                              | oui                    | Crystalline                      | non                  | Pas critique                     | Pas important  |
| Deflection   | Tous  | oui                    | N/A                              | oui                  | Pas critique                     | Pas important  |
| Magnétiques  | Matériaux ferromagnétiques <sup>1</sup> seulement | non                    | Crystalline                      | non                  | Pas critique                     | Pas important  |
| Ultrasoniques  | Métaux<br>Céramiques                              | oui                    | Crystalline                      | oui                  | Pas critique                     | Pas important  |
| Raman  | Polymers<br>Céramiques                            |                        | les deux                         | oui                  | Pas critique                     | Pas important  |
| Crack Compliance   | Métaux<br>Plastiques<br>Céramiques                | oui                    | les deux                         | oui                  | Polissage pour la pose de jauges | Plat - La préparation ne doit pas affecter les contraintes |
| 1 Très sensible à la microstructure - deuxième phase, dislocations, inclusions, etc. |   |                        |                                  |                      |                                  |  |

Source : Ce tableau est une adaptation d'un tableau tiré d'un rapport écrit par F. A. Kandil, J D Lord, A T Fry et P V Grant, *A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection*, p. 16. Ce rapport a été présenté au National Physical Laboratory, Teddington dans le cadre du projet de recherche CPM4.5.

Le Tableau 2.2 couvre les détails concernant les propriétés du matériau de la composante à étudier comme la classe, le type de réseau, les informations sur les propriétés requises, la préparation de surface etc. en fonction des possibilités de chacune des techniques.

**Tableau 2.3**  
**Caractéristiques de mesures**  
 (Kandil, 2001)

| Techniques          | Tableau 3 - Caractéristiques de mesure  |  |                     |                                 |                                   |   |   |  |
|---------------------|---|--|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|--|
|                     | Résolution  | Pénétration  | Type de contraintes | État de contraintes             | Gradients de contraintes          | Incertitude   | Résolution spatiales Volumiques   | Remarques  |
| Hole Drilling       | Incréments de 50 à 100 µm de prof   | ≈ au diamètre du trou                                  | Macro               | Uniaxial<br>Biaxial             | Oui, mais difficile à interpréter | ± 50 Mpa, varie avec la profondeur  | 1-2 mm dans 1-2 mm de prof  |  |
| Diffractioe Rayon X | 20 µm de prof<br>1 mm latéralement  | 5 µm - Ti<br>50 µm - Al<br>1mm - Enlèvement de couches | Macro<br>Micro      | Uniaxial<br>Biaxial             | Oui, avec enlèvement de couches   | ± 20 Mpa, limité par plusieurs facteurs   | 0,1 - 1 mm <sup>3</sup><br>0,05 - 0,1 mm  |  |
| Synchrotron         | 20 µm latéral au faisceau<br>1 mm parallèle   | > 500 µm<br>100 mm - Al                                | Macro<br>Micro      | Uniaxial<br>Biaxial<br>Triaxial | Oui                               | ± 10 x 10 <sup>4</sup> déformations, limité par le nombre de grains de l'échantillon (statistiques) | 0,1 mm <sup>3</sup>   | Mesure des déformations seulement  |
| Neutron             | 500 µm  | 100 mm - Al<br>25 mm - Fe<br>4 mm - Ti                 | Macro<br>Micro      | Uniaxial<br>Biaxial<br>Triaxial | Oui                               | ± 50 x 10 <sup>-4</sup> (déformations), limité par le nombre d'échantillons (statistiques)          | > 1 mm <sup>3</sup>   |  |
| Déflexion           | Dépend du matériau et de la méthode de mesure   | N/A  | Macro               | Uniaxial<br>Biaxial             | Oui                               | Limité par la méthode de mesure de la déformation   |   | Cette méthode peut être combinée à d'autres méthodes telles que XRD ou magnétique pour obtenir des informations sur les profils de contraintes   |
| Magnétiques         | 1 mm  | ∅: 300 µm  | Macro               | Uniaxial<br>Biaxial             | Non                               | 10%   | > 2 mm <sup>3</sup>   | Sensible à la microstructure, l'anisotropie et la texture  |
| Ultrasoniques       | 5 mm  | > 100 mm   | Macro               | Uniaxial<br>Biaxial             | Non                               | 10%   | 1 - 400 mm <sup>3</sup>   |  |
| Raman               | 0,5 µm  | Surface  | Macro               | Uniaxial<br>Biaxial             |                                   | environ 50 Mpa  |   |  |
| Crack Compliance    | 1 à 12 fois la distance entre le bord de la coupe et le centre de la jauge <sup>1</sup> | Testé jusqu'à 186 mm                                   | Macro               | Uniaxial<br>Biaxial             | Oui                               | peut varier entre ± 10 Mpa et ± 30 Mpa  | dépend de la distance entre le bord de la coupe et le centre de la jauge, on parle généralement de 1mm et moins | Généralement, seules les contraintes normales à la face de coupe sont déterminées. Lorsque l'on fait une coupe dans un matériau ayant un champ de contraintes résiduelles en tension élevé, on peut provoquer une fissure qui s'auto-propage |

1 L'incrément doit être suffisant pour faire varier la jauge de déformation

Source : Ce tableau est une adaptation d'un tableau été tirée d'un rapport écrit par F. A. Kandil, J D Lord, A T Fry et P V Grant, *A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection*, p. 16. Ce rapport a été présenté au National Physical Laboratory, Teddington dans le cadre du projet de recherche CPM4.5.

Le Tableau 2.3 inclus les informations sur les caractéristiques physiques de chaque technique telles que la résolution, la pénétration, la surface ou le volume couvert, le type de contraintes, l'état des contraintes, les gradients de contraintes, et l'incertitude.

**Tableau 2.4**  
**Avantages et inconvénients**  
 (Kandil, 2001)

| Techniques          | Tableau 4 - Avantages et inconvénients   |   |
|---------------------|--|---|
|                     | Avantages  | Inconvénients   |
| Hole Drilling       | Rapide, simple, très disponible, portable, grande variété de matériaux, utilisation de méthodes de perçage profondes (deep hole drilling) pour les composantes épaisses. | Interprétation des données, destructive, déformation limitée, sensibilité limitée, résolution limitée.  |
| Diffraction Rayon-X | Versatile, généralement accessible, grande variété de matériaux, systèmes d'acquisition portables, macro et micro contraintes.   | Système principal en laboratoire, mesure primaires, petites composantes.  |
| Synchrotron         | Améliore la pénétration et la résolution du rayon-X, profil en profondeur, rapide, macro et micro contraintes.   | Réservée aux spécialistes, en laboratoire seulement, peu disponible.  |
| Neutron             | Pénétration et résolution excellentes, Profils 3D, macro et micro contraintes.   | Réservée aux spécialistes, en laboratoire seulement, peu disponible.  |
| Déflexion           | Relativement simple, grande variété de matériaux, peut être combinée avec d'autres techniques pour donner un profil de contraintes sur toute la composante.              | Limitée à des formes simples, destructive, en laboratoire seulement.  |
| Magnétiques         | Très rapide, grande variété de techniques magnétiques, portable.   | Applicable sur des matériaux ferromagnétiques seulement, besoin de séparer le signal dû à la microstructure de celui dû au contraintes.   |
| Ultrasoniques       | Généralement disponible, très rapide, peu dispendieuse, portable.  | Résolution limitée, mesure sur tout le volume (pas de profil en fonction de la profondeur).   |
| Raman               | Grande résolution, systèmes portables disponibles.   | Mesure en surface seulement, interprétation difficile, calibration, variété de matériaux limitée.   |
| Crack Compliance    | Couvre une grande plage de profondeur, très disponible, grande variété de matériaux.   | Généralement, seules les contraintes normales à la face de coupe sont déterminées, lorsque l'on fait une coupe dans un matériau ayant un champ de contraintes résiduelles en tension élevé, on peut provoquer une fissure qui s'auto-propage. |

Source : Ce tableau est une adaptation d'un tableau été tirée d'un rapport écrit par F. A. Kandil, J D Lord, A T Fry et P V Grant, *A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection*, p. 16. Ce rapport a été présenté au National Physical Laboratory, Teddington dans le cadre du projet de recherche CPM4.5.

Finalement, le Tableau 2.4 est un tableau récapitulatif contenant les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes.

### 2.3.3 Utilisation des tableaux du guide de sélection

La section qui suit comporte des informations et des spécifications concernant les tableaux. Ce qui permet de comprendre certains détails et d'orienter la démarche de l'utilisateur lors du choix d'une technique de mesure des contraintes résiduelles.

Une première étape consiste à utiliser les tableaux 2.1 et 2.2 ensemble. Ces deux tableaux traitent des aspects pratiques ainsi que de la compatibilité avec les types de matériaux. Parfois, certains attributs (ex : méthode destructive ou non, laboratoire ou portable) peuvent être utilisés directement comme critères de sélection; d'autres (comme les coûts, la disponibilité et la vitesse) sont plutôt utilisés pour comparer les méthodes entre-elles. Suite à cette première étape, plusieurs techniques risquent d'être éliminées.

Le type de matériau et la grosseur de la composante peuvent également être utilisés comme première étape de sélection. Ces deux attributs peuvent éliminer un grand nombre de techniques inadéquates. Dans le tableau 2.1, le terme *Structures* est utilisé pour identifier les composantes de grandes tailles telles que les ponts, les canalisations, la machinerie ou toutes autres composantes de ce type qui ne peuvent pas être déplacées pour des tests en laboratoire. Une méthode portable est alors requise. Le terme *Artefacts* est utilisé pour représenter les composantes de petites tailles qui peuvent être transportées en laboratoire pour faire les tests. Le terme *Coating* est pour sa part utilisé pour les composantes ayant une couche de recouvrement. Cette couche de recouvrement doit absolument être d'une épaisseur significative (d'impact mesurable).

La plupart des techniques sont considérées comme étant non-destructives. La technique de « *Hole Drilling* » est souvent considérée comme étant semi-destructive car les trous percés sont de petites tailles et peuvent parfois être tolérés ou réparés. Cela dépend de la grosseur de la composante étudiée ainsi que de son application. Les méthodes de « *Déflexion* » et de « *Crack Compliance* » sont toujours destructives. Toutes les autres techniques sont classées comme étant non-destructives. Cependant, il faut parfois modifier certaines composantes

pour être en mesure d'effectuer le montage. Si un tel cas se présente, la pièce peut être considérée comme étant inutilisable par la suite. Les finis de surfaces nécessaires à certaines méthodes peuvent également altérer les propriétés d'une composante. Dans le cas où aucune modification ne serait tolérée sur la composante, il faut vérifier que la méthode non-destructive choisie ne nécessite pas de préparation de surface.

Les personnes inexpérimentées doivent savoir que tout changement apporté à une composante en termes de fini de surface, usinage ou sectionnement peut sérieusement affecter la distribution de contraintes internes et que les mesures qui seront effectuées ne refléteront pas l'état de contrainte originalement présent.

La disponibilité de l'équipement est liée de près aux coûts et donne une bonne indication du nombre d'installations pratiquant le type de mesurage concerné. L'attribut vitesse fait référence au temps pour effectuer une mesure de base. Les temps de montage ne font pas partie de cette évaluation. Il faut parfois en tenir compte car le temps de montage peut être long et alors s'avérer un facteur important. Cela est particulièrement vrai pour les techniques de *Neutron* et de *Synchrotron* où les montages doivent être planifiés jusqu'à plusieurs mois à l'avance.

Il est très difficile d'obtenir des prix spécifiques et détaillés. Les coûts de l'équipement ont été classés en termes de grandeur (bas, moyen et installation gouvernementale). Ces coûts peuvent être intéressants pour les personnes qui désirent acquérir leurs propres instruments et fonder leur département ou centre de mesure. Dans le cas contraire, ce sont les coûts de mesurage qui nous intéressent. Ces coûts dépendent de plusieurs facteurs. C'est pourquoi les coûts de mesurage ont été exprimés sous forme de marge. Les chiffres donnés au tableau 2.1 proviennent de compagnies européennes. Au Canada et aux États-Unis, il y a très peu de compagnies qui se spécialisent dans ce domaine et par conséquent, il n'y a pas réellement d'échelles de prix établies. Toutes ces méthodes se retrouvent surtout au stade de la recherche (université et centres de recherches gouvernementaux). Les coûts donnés font

référence aux cas de bases (tests simples). Il est possible d'effectuer des mesures en 3D avec certaines méthodes. Cependant, ce type de mesurage n'est pas inclus dans les coûts.

Le tableau 2.3 est utilisé pour s'assurer que les caractéristiques de mesure de la ou des techniques sélectionnées sont en mesure de répondre efficacement aux besoins des utilisateurs. Les données techniques utilisées proviennent des différentes références utilisées pour rédiger ce document<sup>3</sup>. Toutes les techniques présentées peuvent mesurer les contraintes résiduelles au niveau macroscopique. Pour les contraintes résiduelles de niveau microscopique, seules les méthodes de *Diffraction Rayon-X*, *Synchrotron* et *Neutron* peuvent effectuer le mesurage.

Le tableau 2.4 est présenté en guise de résumé ou de complément pour éclairer l'utilisateur sur les différentes méthodes. Il permet d'effectuer une comparaison rapide entre les différentes techniques et de tenir compte de certaines caractéristiques qui peuvent parfois nous échapper.

L'incertitude peut également être un facteur important lors du choix d'une technique. Il existe différents facteurs pouvant influencer la précision des mesures. Ces facteurs peuvent être physiques ou mathématiques. Par exemple : les instruments utilisés ont leurs limitations; le fini de surface ou l'usinage peut modifier les contraintes; les équations mathématiques utilisées pour calculer les contraintes à partir des déformations peuvent propager et même amplifier les erreurs. Plusieurs projets de recherche ont été ou sont présentement effectués pour déterminer l'incertitude des différentes méthodes de mesure des contraintes résiduelles.

---

<sup>3</sup> Voir section *LISTE DE RÉFÉRENCES*

## CHAPITRE 3

### LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES ET LA DISTORSION

Des théories et des explications ont été données concernant la production des contraintes résiduelles au CHAPITRE 1 de ce document. Ces informations sont de caractère général et s'appliquent à plusieurs domaines. Dans cette section, des informations plus détaillées seront données au sujet de la production des contraintes résiduelles, mais plus particulièrement en lien avec la fabrication et le domaine de l'aéronautique. Il sera entre autre question des contraintes induites par les procédés de fabrication du matériau brut et des contraintes induites par le procédé d'usinage.

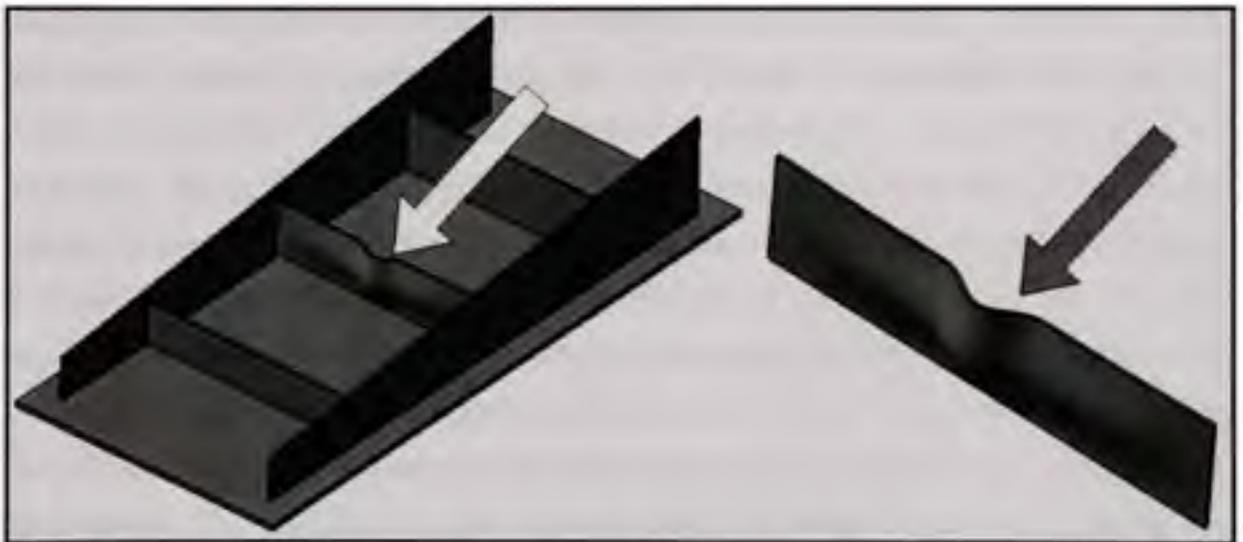
#### **3.1 Intérêts des contraintes résiduelles pour le domaine de l'aéronautique**

Depuis quelques années, l'industrie de l'aéronautique montre un intérêt croissant vis-à-vis l'étude des contraintes résiduelles. En particulier au niveau des procédés de fabrication. Dans ce domaine, les problèmes reliés à la distorsion se divisent principalement en deux catégories (Young, May 2005).

La première catégorie concerne les problèmes reliés à l'assemblage. La distorsion de composantes peut engendrer certaines difficultés lors des opérations d'assemblage. Une pièce ayant de la distorsion peut être trop rigide pour être conformée en place. Il faut alors recourir à des ajustements (« shimming ») ou à des opérations d'étirement à chaud (« hot straightening »). Une centaine de livres de calles d'épaisseur ou calles d'ajustement (« shims ») peut être utilisée dans l'assemblage d'un avion. Ce qui implique une augmentation de poids de l'appareil ainsi qu'une augmentation du temps d'assemblage.

La seconde catégorie concerne les propriétés du matériau de la composante. Une composante ayant de la distorsion sera pré-chargée durant l'assemblage. La structure sera alors précontrainte et elle pourrait potentiellement rompre sous l'application d'une charge plus petite que celle déterminée lors de la conception. En d'autres termes, la distorsion des

composantes engendre une diminution de la limite élastique du matériau. Les structures à parois minces qui subissent de la distorsion ou qui sont précontraintes peuvent subir une déformation plastique permanente après l'usinage ou lors de l'assemblage. Dans le domaine de l'aéronautique, pour désigner ce phénomène, on utilise les termes «buckle» ou «oil-canning» (Frick, 1999). Il s'agit d'une déformation de forme ondulatoire quelconque. La Figure 3.1 illustre ce phénomène. L'«oil-canning» diminue également la résistance et la fatigue des composantes métalliques (Young, May 2005). Il faut parfois augmenter l'épaisseur de certaines pièces pour palier à ce problème. Cette solution a pour effet d'augmenter la masse de l'avion. Cela implique donc une limite au niveau des performances atteignables et également une augmentation du coût de l'appareil.



**Figure 3.1** Dessin illustrant le phénomène d' « Oil-canning ».

En somme, peu importe la catégorie de problèmes liés à la distorsion, il faut retenir que la distorsion engendre des problèmes et qu'elle augmente le temps et les coûts de production et qu'elle peut même nuire à l'optimisation des performances de l'avion.

À titre indicatif, une étude réalisée en 2001 par la compagnie Boeing sur quatre différents programmes d'avions montre que les coûts liés à des problèmes de distorsion s'élevaient à plus de 290 millions de dollars (Bowden, 2001). Dans ce même rapport, il fut également

mentionné que la probabilité que la distorsion cause une déformation excédant les tolérances dimensionnelles et géométriques permises sur les composantes comportant des parois minces, était d'environ 47%. D'autres études estiment que les coûts en retouches («re-work») et en rebuts («scrap») dus uniquement à la distorsion après usinage s'élèvent à environ 10 millions de dollars annuellement (coût par fabricant) (Prime, 1999b), (Bowden, 2001).

### **3.2 Production des contraintes résiduelles responsables de la distorsion**

Tel que vu dans la section 1.4, il existe un phénomène important que l'on nomme *relaxation* des contraintes résiduelles. La relaxation peut être due à la fatigue, aux traitements thermiques (trempe) ou à l'enlèvement de couches de matière (usinage). La relaxation peut être définie comme un relâchement ou une redistribution des contraintes résiduelles qui permet de retrouver l'état d'équilibre interne de la composante. Le problème relié à ce phénomène est qu'il engendre généralement des changements dimensionnels au niveau macroscopique (Lu et Society for Experimental Mechanics, 1996), (Kandil, 2001), (Physique & Industrie, 2006). Ces changements dimensionnels se traduisent par ce que l'on peut appeler la distorsion. Cette définition explique le phénomène physique de façon générale. Si l'on regarde maintenant la distorsion à un niveau plus détaillé : c'est-à-dire au niveau des variables qui peuvent influencer et provoquer le phénomène de relaxation et par conséquent de distorsion. Ces dernières sont nombreuses et parfois dépendantes les unes des autres. La plupart des articles ou publications scientifiques traitent seulement d'un ou de quelques paramètres à la fois. Afin de mieux comprendre le phénomène, les sections suivantes présentent les différentes variables qui peuvent influencer la distorsion.

### 3.2.1 Schématisation du phénomène de distorsion

Avant d'effectuer des essais expérimentaux et d'analyser la distorsion de composantes en fonction de l'usinage, il est important de visualiser toutes les variables qui peuvent influencer la distorsion et par conséquent les résultats. Pour parvenir à étudier une variable, il faut être en mesure de contrôler ou d'isoler les autres. Comme la distorsion peut être le fruit de l'addition de plusieurs variables, cela est d'autant plus important. C'est selon cette optique et à partir de tous les articles lus et cités dans la liste des références que le schéma de la Figure 3.2 a été conçu. Il ne s'agit pas d'un schéma d'expériences. Le tableau est expliqué dans les paragraphes qui suivent. On y retrouve les références, les hypothèses ainsi que les liens entre les différentes variables.

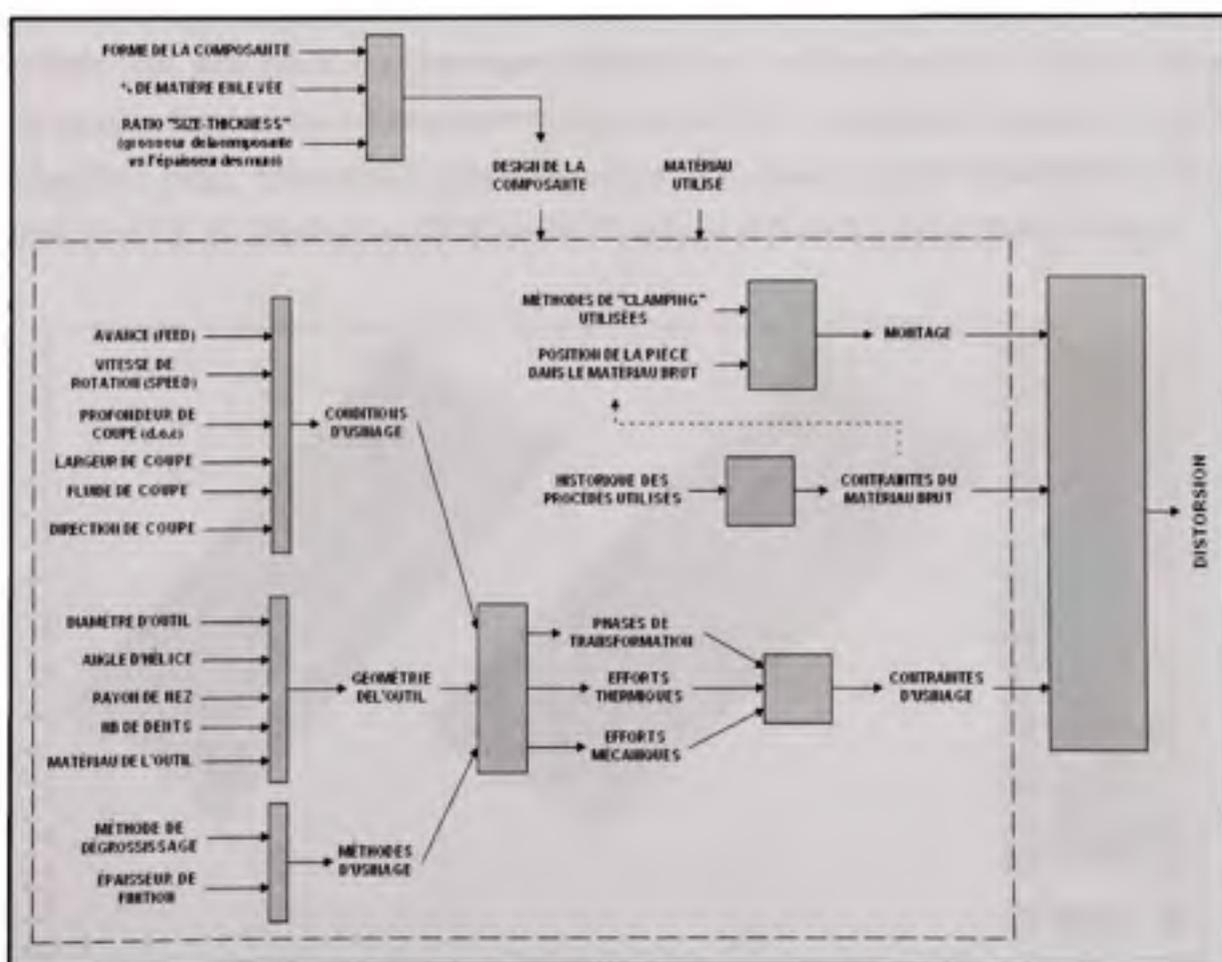


Figure 3.2 Schématisation du phénomène de distorsion.

### 3.2.2 Design de la composante

Le design de la composante est un paramètre qui peut agir sur toutes les variables impliquées dans le phénomène de la distorsion. D'où le rectangle en lignes pointillées sur le schéma de la Figure 3.2. Ce paramètre est divisé en trois différentes sources : la forme de la composante, le pourcentage de matière enlevé et le ratio «Size-Thickness».

#### 3.2.2.1 Forme de la composante

La forme de la composante à usiner peut influencer les trois types de contraintes (montage, matériau brut et usinage). Des formes plus complexes impliquent des montages plus difficiles, avec plusieurs étapes et donc plusieurs serrages. Par exemple, la composante utilisée lors des essais expérimentaux nécessite une méthode appelée «Picture Frame Removal». Cette méthode illustrée par la figure suivante est expliquée plus en détails dans le Chapitre 5.7.4.3. Étant donné la faible épaisseur de la pièce, il aurait été impossible de la tenir dans un étau standard sans la déformer ou sans lui induire des contraintes de serrage.

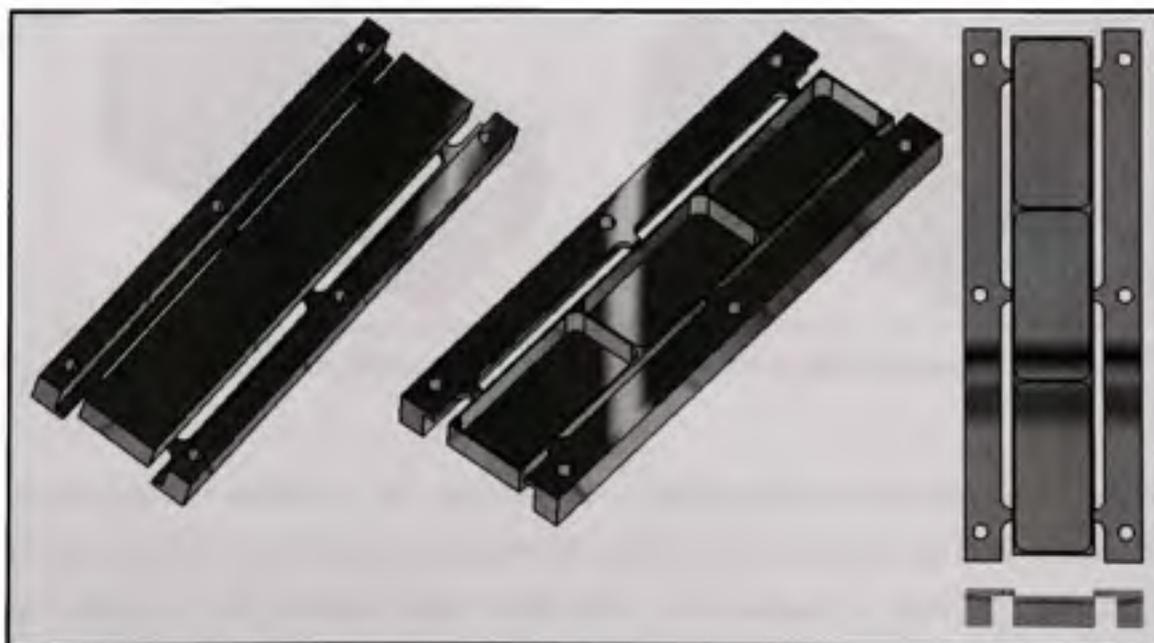


Figure 3.3 Méthode du «Picture Frame Removal».

La forme de la composante peut également imposer un usinage plus complexe avec des conditions de coupe plus difficiles, des outils et des méthodes d'usinage différentes. À titre indicatif, un rayon de coin de 0.250 pouce avec une hauteur de 2 pouces peut entrer dans cette catégorie. Les contraintes d'usinage peuvent donc varier en fonction du design. Toujours au niveau de la forme, cette dernière peut influencer le choix du procédé de mise en forme du brut. L'utilisation d'une pièce coulée en est un exemple.

### 3.2.2.2 Pourcentage de matière enlevé

Sous le paramètre du design, on retrouve ensuite le pourcentage de matière enlevée. Selon qu'on enlève plus ou moins de matière, l'impact des contraintes de montage, du matériau brut et d'usinage aura une influence plus ou moins importante. Par exemple, si l'on enlève seulement une petite poche dans une grande pièce, les contraintes ne seront pas assez significatives pour faire déformer la composante qui possède encore un volume de matière important. La Figure 3.4 illustre ce phénomène.



Figure 3.4 Différence du pourcentage de matière enlevé.

La composante de gauche ne sera pas sensible au phénomène de distorsion tandis que celle de droite sera plus sensible aux contraintes résiduelles et pourrait subir de la distorsion. Une étude interne a été effectuée chez Bombardier Aéronautique à partir de la liste des composantes usinées ayant un problème de distorsion et nécessitant une étape de redressage.

Toutes les composantes de cette liste avaient subi un enlèvement de matière correspondant à une valeur comprise entre 90% et 97% du volume total du bloc de matière utilisé. De façon générale, on associe le phénomène de distorsion aux composantes usinées à parois minces (Young, May 2005), (Wang et al., 2005), (Wang et al., 2006).

### 3.2.2.3 Ratio «Size-Thickness»

La troisième source correspond au ratio «Size-Thickness». Il s'agit du ratio entre l'épaisseur des murs et la grosseur de la pièce. Ce paramètre va de pair avec le pourcentage de matière enlevé et s'applique aux composantes à parois minces. Il est cependant bon de la dissocier du fait que ce paramètre est utilisé dans l'industrie aéronautique afin de corriger les problèmes de distorsion. Lorsqu'une composante éprouve des problèmes de distorsion, on augmente l'épaisseur des murs afin de résoudre le problème. Cette pratique courante implique bien entendu plusieurs modifications et approbations de la part des concepteurs aéronautiques qui devront revoir, recalculer et valider certains paramètres de l'avion tels que le design, l'assemblage, l'aérodynamisme, le poids et le balancement. En plus d'être administrativement longue, cette manière de faire diminue les performances de l'avion. Le ratio «Size-Thickness» est également intéressant au niveau de l'analyse dimensionnelle de la déformation. Par exemple, pour la composante utilisée lors des essais expérimentaux, on note que la courbure de la pièce est dans le sens de la longueur.



**Figure 3.5 Déformation de la composante usinée selon la longueur.**

### **3.2.3 Matériau utilisé**

Le matériau utilisé est un paramètre qui peut agir sur toutes les variables impliquées dans le phénomène de distorsion. Par ces propriétés, le matériau utilisé peut dicter le montage, les procédés de mise en forme ainsi que tous les paramètres d'usinage. Au niveau du montage, on peut parler de dureté du matériau et du sens du grain. Au niveau des contraintes du brut, on retrouve des propriétés comme les températures de phases, la malléabilité, la grosseur du grain, la limite élastique et plusieurs autres. Au niveau de l'usinage, on touche à l'usinabilité, la dureté, la résistance, la limite élastique, etc. La plupart des propriétés du matériau utilisé peuvent avoir une influence sur la grandeur des contraintes résiduelles et par conséquent sur la distorsion finale de la composante.

Dans la littérature, deux sujets intéressants semblent vouloir faire surface. Il s'agit du grain et de la limite élastique du matériau. Le grain qui est surtout étudié au niveau des procédés de transformation (Sitdikov et al., 2005), (Mahidhara, 1995), (Abo-Elkhier et Soliman, 2006), (Tanaka et al., 2002) pourrait de par sa taille et sa disposition dans le brut de matière avoir une influence sur la distribution et l'amplitude des contraintes résiduelles. Au niveau de la limite élastique du matériau, certains chercheurs prétendent que les contraintes résiduelles provoquent de la distorsion lorsque la somme des contraintes (usinage, brut et montage) dépasse la limite élastique du matériau. Ce qui pourrait expliquer pourquoi l'utilisation d'un matériau brut ayant des contraintes résiduelles initiales faibles permettrait d'éliminer la distorsion. Une analyse de cette hypothèse sera faite au CHAPITRE 6.

### **3.2.4 Contraintes du montage**

Les contraintes associées au montage peuvent provenir de deux sources : la technique de serrage et la position de la pièce dans le matériau brut.

### 3.2.4.1 Technique de serrage

La technique de serrage peut effectivement induire des contraintes dans le matériau. Il est possible que le matériau brut soit déformé lors du serrage à cause de sa forme irrégulière. Par exemple, si une pièce rectangulaire ayant une concavité vers le haut est fixée sur une table à succion, cette dernière subira un étirement et des contraintes en tension seront alors induites dans le matériau. Des contraintes en compression peuvent également être induites lors de serrage dans un étau (fraisage) ou dans des mors (tournage). À ce niveau, une étude en tournage a déjà été faite et on a noté une déformation de la pièce différente entre un mandrin et un trois mâchoires (Nowag et al., 2006). La rigidité du montage joue également un rôle important. C'est elle qui permet ou non le relâchement des contraintes pendant l'usinage. S'il y a possibilité que la pièce se relâche pendant l'usinage, certaines méthodes de dégrossissage et finition permettront d'obtenir une composante sans distorsion lors du desserrage final. Dans le cas contraire, certaines étapes de desserrage et resserrage sont nécessaires pendant l'usinage. Ce qui crée des étapes supplémentaires. Une méthode qui est utilisée en industrie et qui favorise le relâchement consiste à retenir la composante en laissant un contour et de petites attaches. Cette technique discutée dans le CHAPITRE 5.7.4.3 se nomme «Picture frame removal». Les seuls inconvénients liés à cette méthode sont qu'il faut utiliser un brut de matière plus grand et qu'il faut couper manuellement les attaches par la suite. Dans certains cas de mesure et d'analyse des contraintes résiduelles, il faut tenir compte que cette technique peut induire des contraintes résiduelles localisées lors du coupage des attaches. En somme, il faut retenir que les contraintes liées aux techniques de serrage peuvent parfois être contrôlées et même éliminées. Elles peuvent également servir à éliminer des contraintes provenant de d'autres sources (ex : l'usinage).

### 3.2.4.2 Position de la composante usinée

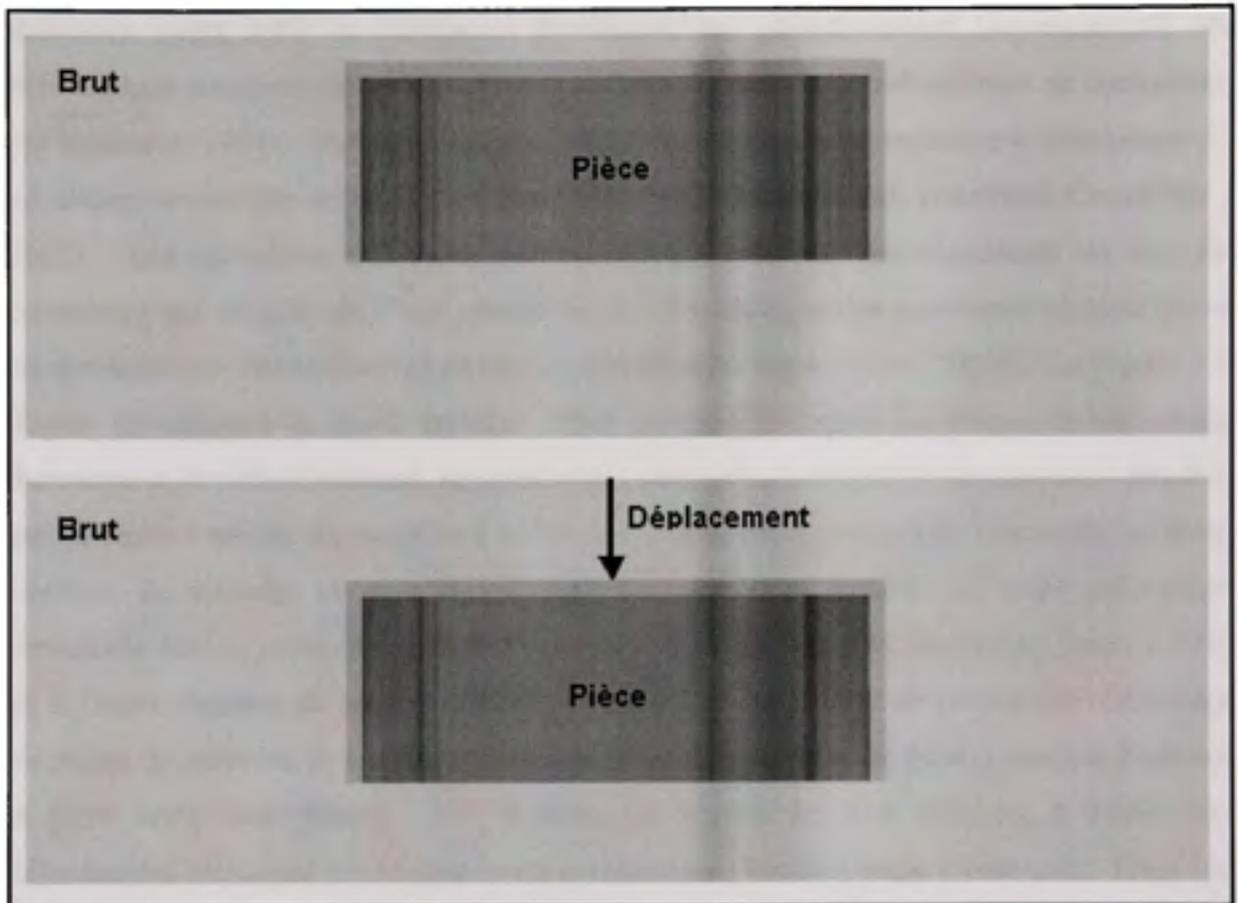
La position de la composante usinée dans le morceau de matériau brut peut également jouer un rôle important au niveau de la distorsion. Cette variable dépend tout d'abord de la distribution des contraintes provenant du matériau brut. La Figure 3.6 illustre deux distributions différentes de contraintes pour un même brut de matière. La distribution des

contraintes initiales n'est pas toujours symétrique. Tout dépend des opérations de mise en forme et de l'ordre de ces dernières. Il se peut qu'un morceau ait subi une coupe à la fin du procédé. Ce qui a eu pour effet de relâcher les contraintes sur une partie de ce dernier. Comme ces dernières peuvent être de distributions différentes, la position de la pièce usinée à l'intérieur du brut de matière peut faire varier le résultat final.



**Figure 3.6 Exemple de distributions de contraintes différentes dans un brut de matière.**

Par exemple, si l'amplitude des contraintes est plus importante sur le dessus de la pièce que sur le dessous, le balancement des contraintes suite à la relaxation en fonction de la position de la pièce usinée peut alors augmenter ou diminuer la déformation. Lorsque l'on additionne des contraintes identiques (en tension ou en compression), on augmente le risque de déformation. Tandis que lorsqu'on additionne une contrainte en tension avec une contrainte en compression, on diminue le risque de déformation. Le fait de se situer dans une zone où les contraintes sont toutes uniformes (aucune variation brusque) ou symétriques peut également diminuer le risque de déformation. Dans l'industrie aéronautique, les programmeurs ont tendance à surfacer le minimum sur le premier côté de la composante et à surfacer le reste lors de la seconde étape. Lorsque l'on constate une déformation suite à l'usinage et à l'inspection de la première pièce, une pratique courante consiste à déplacer la composante usinée à l'intérieur du matériau brut afin d'éliminer la distorsion. On enlève environ la même épaisseur de matière lors du surfacage du premier côté et du second. On parvient ainsi à obtenir une distribution symétrique des contraintes et à éliminer la distorsion. La figure suivante montre la position de la pièce usinée en fonction du matériau brut avant et après le déplacement.

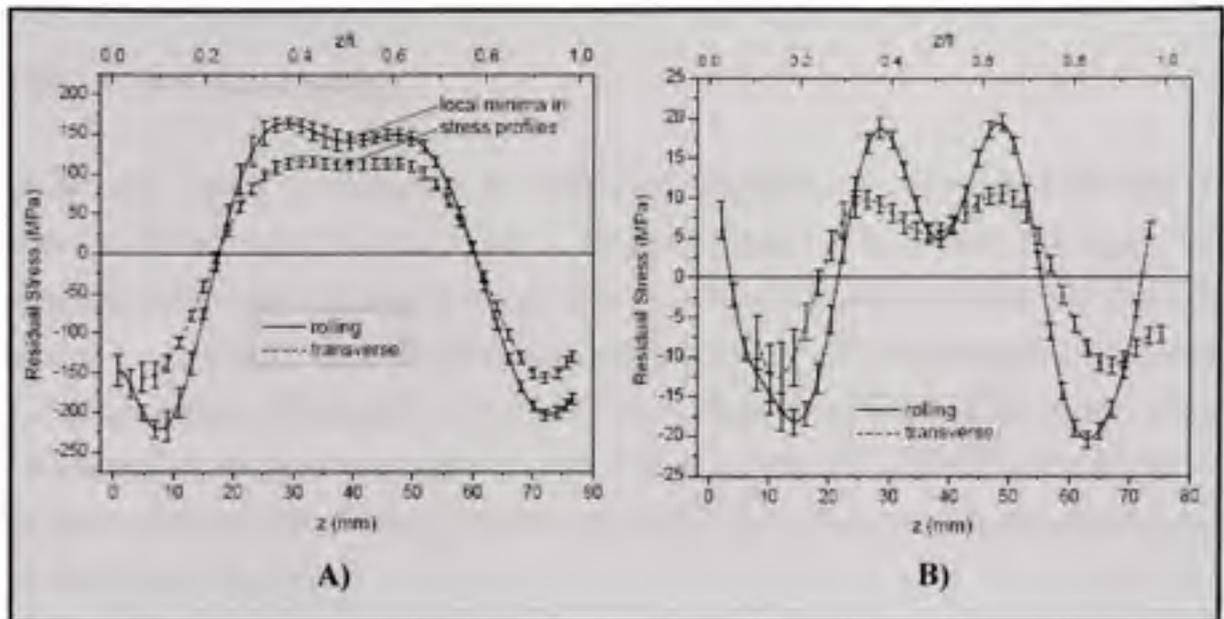


**Figure 3.7 Position de la composante usinée en fonction du matériau brut.**

### **3.2.5 Contraintes du matériau brut**

Dans le domaine aéronautique, l'aluminium est un matériau largement utilisé et ce sous plusieurs formes. Les bruts de matériaux peuvent provenir de différents procédés tels que le laminage, le forgeage ou l'extrusion. Ils subissent également des traitements thermiques permettant de renforcer certaines propriétés (limite élastique, fatigue, dureté, etc.). Toutes ces étapes de préparation induisent inévitablement des contraintes résiduelles à l'intérieur du matériau brut. La distribution de contraintes peut prendre différentes formes selon les procédés utilisés.

Par exemple, un alliage d'aluminium 7050-T7451 est une plaque d'aluminium à haute résistance ayant subi un traitement thermique, un refroidissement («quenching»), un durcissement structural par précipitation («artificial aging») et un relâchement de contraintes par étirement (Tx51). Des informations détaillées concernant les traitements thermiques de cet alliage se trouvent dans le ASM Handbook (ASM International. Handbook Committee., 2002). Les opérations effectuées sur cet alliage induisent thermiquement un état de contraintes qui, dans le cas d'une plaque mince, se traduit par des contraintes résiduelles en compression près des surfaces et en tension au centre du corps (Prime, 2002a). La Figure 3.8 illustre un exemple de profil typique. Plus précisément, après les étapes de traitement thermique et de refroidissement, les contraintes résiduelles sont habituellement aussi grandes que la limite élastique du matériau à ce moment. Après le durcissement structural, la limite élastique du matériau est plus élevée, mais les contraintes induites à l'étape précédente demeurent dans la pièce. La grandeur de ces contraintes peut alors représenter jusqu'à 50% de la limite élastique du produit final (Prime, 2002a). Les profils de contraintes résiduelles résultants de procédés de transformation sont généralement lisses et ils se propagent à travers la pièce brute toute entière. Par la suite, ces contraintes sont relâchées à travers les déformations plastiques (en tension ou en compression) lors de l'étape d'étirement. Dans les plaques et les produits extrudés ayant subis des opérations de relâchement de contraintes, les contraintes résiduelles ont un ordre de grandeur moins élevé que dans les produits initiaux. Les profils de contraintes des produits ayant subis un relâchement sont généralement complexes. Le profil peut passer de la compression à la tension plusieurs fois à travers l'épaisseur du matériau (Young, May 2005).



**Figure 3.8** Profils typiques de contraintes résiduelles sur A) plaque d'aluminium 7050-T74 et B) plaque d'aluminium après relâchement de contraintes (7050-T7451).

(Prime, 2002a)

Source : Cette figure a été tirée d'un article électronique rédigé par M. Michael B. Prime, *Residual Stress, Stress Relief, and Inhomogeneity in Aluminium Plate*. Cet article est disponible sur le site des Laboratoires Los Alamos à l'adresse électronique <http://www.lanl.gov/residual/alumsm.pdf>.

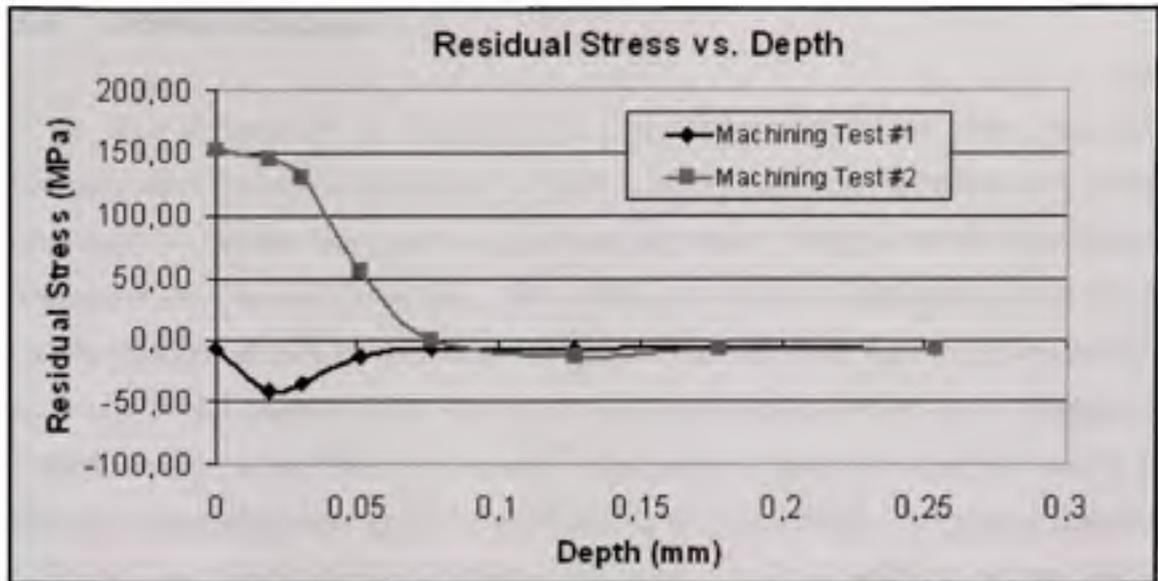
La Figure 3.8 provient d'essais expérimentaux, effectués par les Laboratoires Los Alamos, sur une plaque d'aluminium 7050-T74 ayant subi un relâchement par étirement (Tx51). Elle montre deux profils qui illustrent bien les informations données ci-dessus.

Plusieurs chercheurs travaillent afin de réduire les contraintes induites par les procédés de transformation. Que ce soit expérimentalement ou par l'utilisation de la méthode des éléments finis, leur objectif est de développer de nouveaux procédés ou de nouvelles méthodes de contrôle qui vont permettre de minimiser les contraintes résiduelles (Tanner, Robinson et Whelan, 1998), (Tanner, Robinson et Cudd, 2000), (Bowden, 2001), (Akiyama et Kuboki, 2002), (Prime, 2002a), (Tanaka et al., 2002), (Walker et Hom, 2002), (Prime, 2003b), (Tanner, 2003), (Tanner et Robinson, 2003), (Dolan et Robinson, 2004), (Tanner et Robinson, 2004), (Wang et al., 2004), (Zhao et Zhang, 2004), (Koc, Culp et Altan, 2006).

### 3.2.6 Contraintes d'usinage

La seconde source de production de contraintes résiduelles qui est intéressante pour le domaine de l'aéronautique étant donné sa large utilisation est le procédé d'usinage. Les contraintes résiduelles induites par ce procédé proviennent d'une combinaison des sources suivantes : (1) inégalité des déformations plastiques dans les différentes portions du produit due à des efforts mécaniques; (2) inégalité des déformations plastiques due aux efforts thermiques; (3) changement volumique et transformation plastique pendant la transformation de phase de l'état solide (Totten et Mackenzie, 2003). Ces trois sources sont expliquées plus en détail dans cette section.

Les contraintes induites par l'usinage peuvent avoir un ordre de grandeur similaire aux contraintes résiduelles de procédés, mais isolé au niveau d'une couche mince près de la surface. La Figure 3.9 illustre des profils de contraintes mesurés après usinage. La forme et l'amplitude de la courbe des contraintes induites par le procédé d'usinage dépendent des conditions d'usinage (outils, vitesses, profondeurs de coupe, etc.), de la géométrie de l'outil et de la méthode utilisée. Plusieurs études antérieures et présentes traitent de ce sujet (Young, May 2005), (Zhang, Huang et Li, 2006), (Salio, Berruti et De Poli, 2006), (Outeiro, Umbrello et M'Saoubi, 2006), (Nowag et al., 2006), (Capello, 2006), (Hua et al., 2005), (Capello, 2005), (Liu et al., 2004), (Dahlman, Gunnberg et Jacobson, 2004), (Chen, El-Wardany et Harris, 2004), (Bhat et al., 2003), (Outeiro et al., 2002), (Sai, Salah et Lebrun, 2001), (Rao et Shin, 2001), (Lin et al., 2000).



**Figure 3.9 Exemple de contraintes résiduelles induites lors de procédés d'usinage.**  
(Young, May 2005)

Source : Ce graphique a été tracé à partir de données expérimentales tirées de la thèse de M. Keith A. Young, *Machining-induced residual stress and distortion of thin parts*, p. 5. La thèse a été présentée à St-Louis dans le cadre du Doctorat en science du Washington University. Une conversion des unités a été effectuée afin de travailler avec le système métrique.

Dans le domaine aéronautique, certaines composantes sont usinées avec des épaisseurs pouvant aller jusqu'à 0.38mm (0.015 in). Des mesures prises par la méthode des rayon-X montrent que les contraintes résiduelles induites par l'usinage peuvent être dominantes sur une profondeur d'environ 0.127mm (0.005 in) à partir de la surface. Dans le cas où une composante à parois minces serait usinée, les contraintes résiduelles induites peuvent alors représenter environ 33% de l'état de contrainte final. Ce pourcentage peut même se rendre jusqu'à 66% dans le cas où la paroi mince est usinée des deux côtés (Young, May 2005). Les contraintes résiduelles induites lors de l'usinage peuvent donc avoir un effet important et doivent par conséquent être considérées lors de l'analyse de la distorsion.

### 3.2.6.1 Efforts mécaniques

Afin de bien comprendre la génération des contraintes résiduelles dues aux efforts mécaniques, considérons l'exemple de la Figure 3.10. Il s'agit d'un assemblage de 3 barres rectangulaires de mêmes dimensions et également espacées. Les deux barres extérieures ont été fabriquées avec le même matériau. Ils possèdent un module d'élasticité de 206.84 GPa, une limite élastique de 206.84 MPa et un module plastique de 41.37 GPa. La barre du milieu possède une limite élastique plus élevée de 413.7 MPa, mais des modules élastiques et plastiques identiques aux barres extérieures. Les parties supérieures des trois barres sont encastrées et par conséquent, tous les degrés de liberté sont bloqués. Les parties inférieures sont fixées à une plaque rigide de poids négligeable. À cet assemblage est attachée une charge  $P$  située au centre de la plaque.

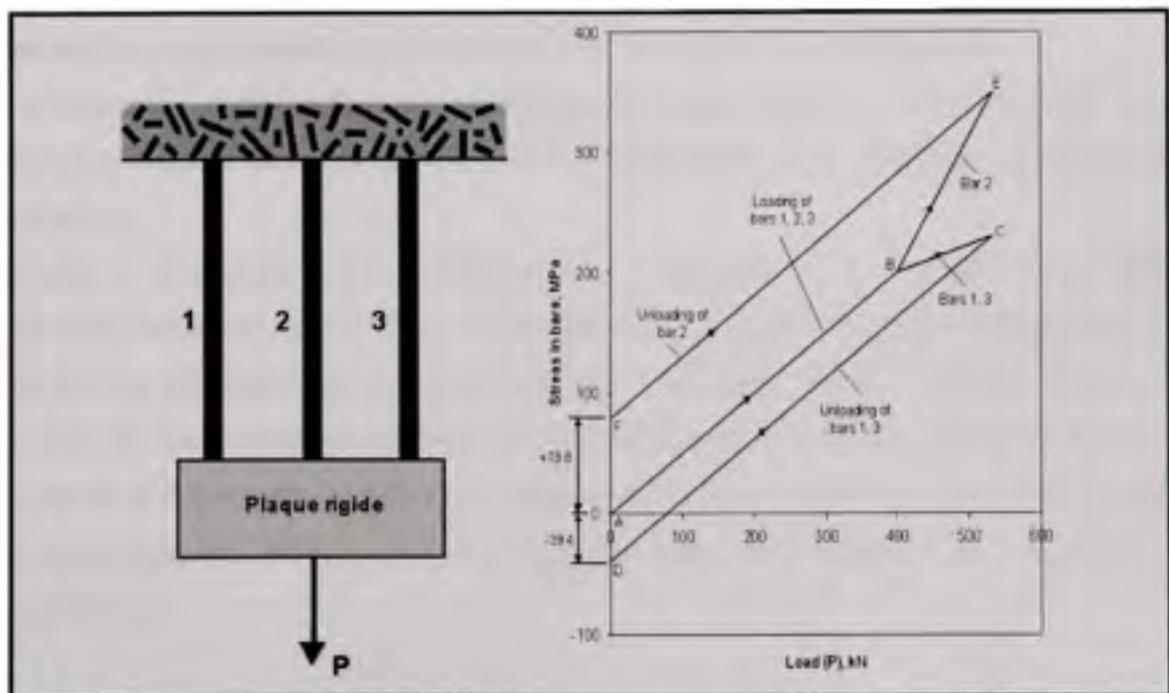


Figure 3.10 Contraintes résiduelles causées par des efforts mécaniques.

(Totten et Mackenzie, 2003)

Source : Cette image a été reproduite à partir d'une image tirée du livre de M. George E. Totten, *Handbook of aluminum*, p. 308.

Maintenant, considérons deux différents schémas de charge. Dans le premier cas, la charge  $P$  augmente graduellement de 0 à 400.3 kN. Chaque barre subit 133.45 kN et le stress pour chacune des barres ne dépasse jamais sa limite élastique. Par la suite, la charge est enlevée pour revenir à zéro et aucune contrainte résiduelle n'a été introduite.

Dans un second cas,  $P$  augmente de 0 à 533.8 kN et retourne à zéro. Lorsque  $P$  excède 400.3 kN, les deux barres extérieures déforment plastiquement et commence à prendre et donc à partager moins de charge à cause du module plastique qui est plus petit que le module élastique. Sur la Figure 3.10, l'historique de chargement des barres extérieures est représenté par le trajet ABCD et celui de la barre du centre par le trajet ABEF. Il est possible de constater que lorsque  $P$  revient à zéro, les contraintes dans les trois barres ne reviennent pas à zéro. La barre du centre a une contrainte en tension de 78.8 MPa et les deux autres barres ont une contrainte en compression de 39.4 MPa. Tant qu'il n'y a pas de charge extérieure sur l'assemblage, les contraintes résiduelles dans les trois barres sont en équilibre.

La comparaison entre ces deux cas de chargement montre que la présence de déformations plastiques inégales dans les trois barres est responsable de la génération de contraintes résiduelles.

À partir de ce modèle, il est possible de faire le parallèle et de dire que les contraintes résiduelles mécaniques peuvent se produire dans une composante lorsque la distribution des déformations plastiques dans le matériau est non homogène. Lors de l'usinage, des charges dépassant la limite élastique du matériau sont appliquées à certains endroits de façon non homogène et des contraintes résiduelles peuvent alors être induites. Les contraintes induites mécaniquement en surface lors de l'usinage sont généralement des contraintes en compression.

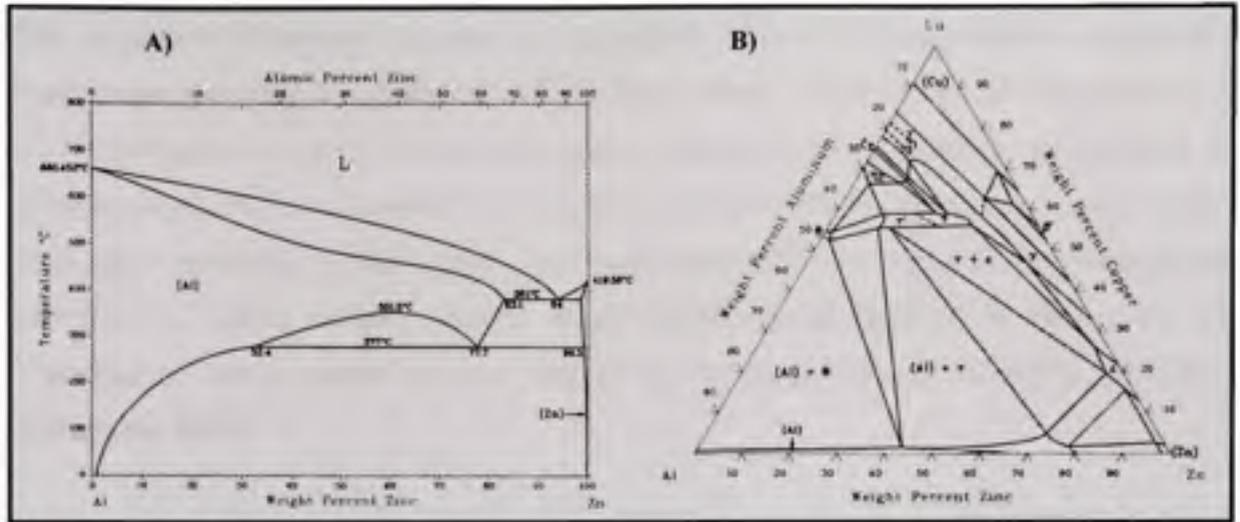
### 3.2.6.2 Efforts thermiques

Le problème relié aux efforts thermiques peut être s'expliquer à partir d'un modèle similaire à celui utilisé pour les efforts mécaniques (Totten et Mackenzie, 2003). Pour ce modèle, trois barres d'acier au carbone de longueurs et de sections égales sont reliées entres-elles par deux

blocs rigides aux extrémités. La barre du centre est chauffée à 593 °C (1100 °F) et refroidie à la température ambiante pendant que les barres extérieures sont conservées à la température ambiante. Lorsque la température de la barre du centre augmente, la compatibilité et le besoin d'équilibre requièrent qu'une contrainte de compression soit générée dans la barre du centre et une contrainte en tension dans les barres extérieures. La contrainte de chacune des deux barres extérieures est équivalente à la moitié de la contrainte de la barre du centre. Si la température de la barre du centre est suffisamment élevée pour que la contrainte dépasse la limite élastique du matériau mais que la contrainte dans les barres extérieures est en dessous de la limite élastique, des contraintes résiduelles vont se produire lors du refroidissement de la barre du milieu. De la même manière, si les trois barres dépassent la limite élastique mais à des niveaux différents, il y aura création de contraintes résiduelles lors du refroidissement de la barre centrale. Lors de l'usinage, il se produit une zone de déformation plastique entre l'outil de coupe et le matériau où les efforts et la température sont très élevés. La pièce subit donc une augmentation de température en surface et un refroidissement par la suite. Des contraintes peuvent donc être laissées dans le matériau par ces variations thermiques. Les contraintes induites thermiquement en surface lors de l'usinage sont généralement en tension.

### 3.2.6.3 Phases de transformation solide

Avec des procédés comme la trempe, le soudage ou le moulage, lors du refroidissement, plusieurs métaux passent par une ou plusieurs phases de transformation solide. Des diagrammes de phases sont utilisés afin d'illustrer les phases en fonction de la température (ASM International. Handbook Committee., 2002). La Figure 3.11 A) montre un diagramme de phases pour un alliage d'aluminium et de zinc. Ce cas est simple puisqu'il s'agit d'un alliage à deux métaux. C'est ce qu'on appelle un diagramme de phases binaire. Dans le cas d'un alliage composé de trois métaux, un diagramme tertiaire est alors utilisé. Les pourcentages des trois métaux y sont représentés pour différentes températures donc pour différents stades. Ce diagramme permet de connaître les phases en présence pour une température donnée. Ce type de diagramme est illustré à la Figure 3.11 B) pour un alliage Al-Cu-Zn. Les diagrammes binaire et tertiaire sont les plus connus.



**Figure 3.11 Diagrammes de phases A) Binaire B) Tertiaire.**  
(ASM International. Handbook Committee., 2002)

Source : Cette figure a été tirée de l'ASM Handbooks Online. Disponible à l'adresse Internet <http://products.asminternational.org/hbk/>.

Il existe cependant des diagrammes encore plus complexes pouvant représenter un alliage composé de plusieurs métaux. Par contre, ces types de diagrammes sont plus difficiles à trouver. Dans la présente étude, l'alliage utilisé qui est un alliage d'aluminium 7475-T7351 est composé d'une dizaine de métaux. Néanmoins la presque totalité du mélange est occupée par seulement quatre de ces métaux. Le tableau suivant donne la composition et les pourcentages de cet alliage. On retrouve également cet alliage sous le nom ISO AlZn5.5MgCu.

**Tableau 3.1**  
**Composition du 7475-T7351**  
(Automation Creations, 1996-2008)

| Al            | Cr            | Cu          | Fe         | Mg          | Mn         | Si        | Ti         | Zn          | Other, each | Other, total |
|---------------|---------------|-------------|------------|-------------|------------|-----------|------------|-------------|-------------|--------------|
| 88.5 – 91.5 % | 0.18 – 0.25 % | 1.2 – 1.9 % | Max 0.12 % | 1.9 – 2.6 % | Max 0.06 % | Max 0.1 % | Max 0.06 % | 5.2 – 6.2 % | Max 0.05 %  | Max 0.15 %   |

Lors du procédé d'usinage, il se peut que le matériau subisse des changements de phases si la température transmise à la pièce est suffisamment élevée. Dans ce cas, les changements de phases entraînent un grossissement des grains qui resteront emprisonnés à l'intérieur du matériau lors du refroidissement d'où l'apparition d'une zone de contrainte en compression. Pour une composante à paroi mince, ces contraintes peuvent engendrer une déformation géométrique. Selon certains auteurs, le phénomène de changement de phases est très important et dans certains cas peut être la source dominante de distorsion (Totten et Mackenzie, 2003).

### **3.3 Sommaire de la section**

Les contraintes résiduelles ont un impact dans le domaine aéronautique puisqu'elles engendrent des restrictions au niveau de la conception ainsi que des augmentations de poids et de coûts. Les contraintes résiduelles peuvent également engendrer la rupture prématurée de certaines composantes critiques. La distorsion engendrée par la distribution des contraintes résiduelles génère chaque année des millions de dollars de rebuts, de retouches et d'étapes d'assemblage additionnelles.

Les contraintes résiduelles proviennent en premier lieu des opérations de mise en forme et de traitement du matériau brut. Ces contraintes varient à travers toute l'épaisseur de la pièce brute. La seconde source de contraintes résiduelles provient de l'opération d'usinage. Ces contraintes se situent près de la surface et peuvent avoir une importance sur la distorsion lorsqu'il s'agit de composantes à parois minces. L'addition des deux types de contraintes (mise en forme et usinage) peut donner des résultats qui accentuent ou qui diminuent la distorsion. Cela dépend du signe, de la grandeur et de la distribution des contraintes.

## CHAPITRE 4

### MODÉLISATION ET PRÉDICTION DE LA DISTORSION

#### 4.1 Introduction

La modélisation et la prédiction de phénomènes à l'aide de la méthode des éléments finis est un outil de travail qui a subi une grande évolution au cours de la dernière décennie. Cet outil pourrait s'avérer intéressant afin de prédire les contraintes et la distorsion des pièces usinées sans avoir recours à des méthodes expérimentales longues, coûteuses et parfois destructives. Ce chapitre fait donc un survol du niveau d'avancement actuel de cette technologie, ainsi qu'une mise à l'épreuve du logiciel AdvantEdge<sup>TM</sup>, un logiciel de simulation appliqué aux processus d'usinage qui a été mis à l'essai dans le cadre de ce projet de recherche.

#### 4.2 Avancement actuel

À l'heure actuelle, aucun outil de simulation n'est en mesure de reproduire ou de prédire parfaitement la distribution des contraintes résiduelles au niveau des procédés de mise en forme, des traitements de surface, des traitements thermiques et de l'usinage. La plupart des logiciels développés ou des programmes existants s'appliquent à des cas particuliers et simplifiés. Dans un contexte de production et de variation des contraintes dans le matériau, aucun logiciel n'est en mesure d'offrir une solution intéressante au problème de la distorsion. Cependant, de nombreux projets sont actuellement en cours concernant les contraintes résiduelles.

### 4.3 Logiciel AdvantEdge™

Le logiciel AdvantEdge™ est un outil de simulation appliqué au processus d'usinage tel que le tournage et le fraisage. Son objectif est d'optimiser le processus de coupe du métal en augmentant le tût d'enlèvement de matière, la qualité de la pièce usinée et la performance des outils de coupe, tout en diminuant le nombre d'essais physiques. Le logiciel ThirdWave AdvantEdge TWS se trouve à l'adresse Internet suivante : <http://www.thirdwavesys.com>.

#### 4.3.1 Validation du logiciel

Afin de valider le logiciel de simulation AdvantEdge de la compagnie Third Wave Systems, des essais expérimentaux ont été effectués par M. Keith A. Young du Washington University. Ces essais s'inscrivent dans le cadre d'un projet de doctorat (Young, May 2005). Dans sa thèse, ce dernier présente un résumé des essais effectués, des méthodes d'évaluation employées, des résultats obtenus et des sources d'erreurs potentielles du logiciel.

Les essais ont été effectués sur différents cas d'usinage simples tels que le tournage ou le fraisage orthogonal. Les détails concernant les outils utilisés et les paramètres de coupe ne sont pas mentionnés.

Afin de valider expérimentalement le modèle proposé par le logiciel AdvantEdge, des mesures thermiques ont été effectuées. Pour ce faire, les chercheurs du NIST ont utilisé une méthode d'imagerie microscopique. Cette technique permet d'évaluer les champs de température à l'interface outil-copeau pendant l'usinage. Les détails concernant cette méthode se trouvent dans une publication intitulée : «*Calibrated thermal microscopy of the tool-chip interface in machining*» (Davies et al., 2003). Des mesures de contraintes par rayon-X, de forces ainsi que des mesures de distorsion ont également été effectuées.

Au niveau de la validation thermique, l'auteur affirme que les prédictions du logiciel AdvantEdge sont précises pour les régions macroscopiques. Pour la région entourant le

tranchant de l'outil de coupe («cutting edge»), où les gradients de température sont élevés, il est très difficile, voire impossible, de mesurer correctement le champ de température. La validation est donc impossible pour cette région.

Au niveau des efforts de coupe, les résultats mesurés correspondent aux prédictions de TWS avec une erreur moyenne d'environ 10% au niveau des forces tangentielles. Cependant, les forces radiales peuvent différer d'un ordre de grandeur (ex : 2000 N au lieu de 200 N). Cette différence est principalement attribuée au manque de connaissances ou à la caractérisation du tranchant de l'outil de coupe. Une seconde source d'erreur se situe au niveau de la résolution numérique. Le logiciel AdvantEdge produit, lors d'une simulation d'usinage, une force de sortie extrêmement bruitée. À cause de ce bruit numérique, les forces peuvent varier de  $\pm 100\%$  d'une étape de calcul à l'autre (incrément de temps). Ces forces sont ensuite filtrées pour éliminer le bruit (Figure 4.1). Le bruit numérique est dû principalement au contact et à l'adaptabilité du maillage.

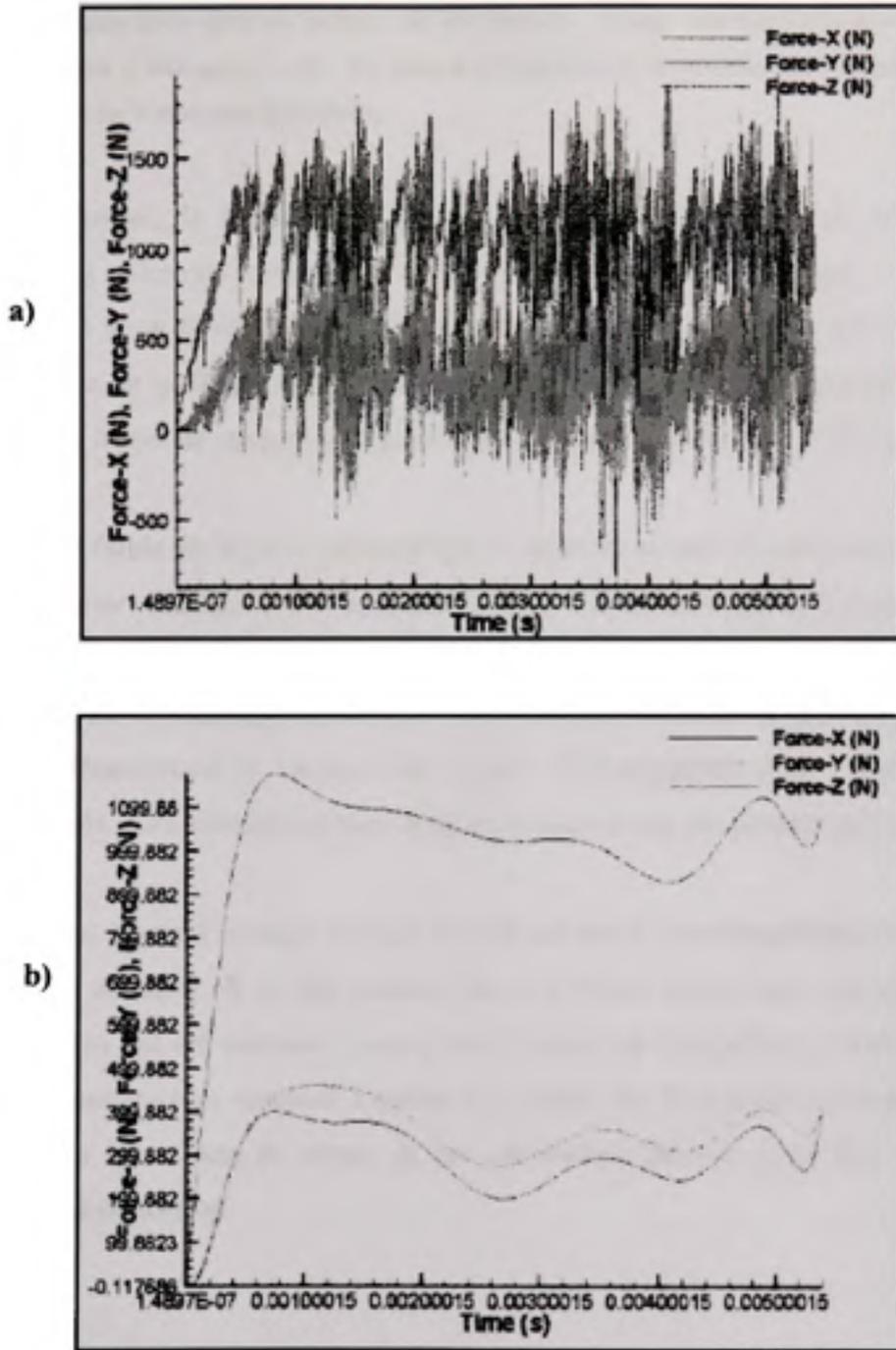


Figure 4.1 Forces numériquement bruitées obtenues à l'aide du logiciel AdvantEdge

a) Non-filtrées b) Filtrées.

(Young, May 2005)

Source : Cette figure a été tirée de la thèse de M. Keith A. Young, *Machine-induced residual stress and distortion of thin parts*, p. 47. La thèse a été présentée à Saint-Louis dans le cadre du Doctorat en Science du Washington University.

En d'autres termes, le bruit numérique est créé par le processus de remaillage. Par conséquent, les solutions obtenues pour les contraintes peuvent changer de 50% ou plus immédiatement après le remaillage. L'auteur affirme qu'il est possible que le problème soit relié au fait que le maillage ne soit pas assez fin pour résoudre adéquatement le problème mécanique des forces de coupe et des contraintes induites (Young, May 2005).

Un autre point faible du logiciel AdvantEdge se situe au niveau du temps de simulation. Le temps requis pour effectuer une simulation en trois dimensions peut être évalué en semaines et même en mois dépendant de la grosseur du maillage. Présentement, l'outil de coupe est défini pour avoir un maillage uniforme. Ce maillage nécessite d'être petit pour pouvoir représenter adéquatement le tranchant de l'outil. Cela augmente donc considérablement le temps de calculs. Les simulations sont donc restreintes à des cas simples pour le moment.

Finalement, des essais d'usinage simples ont été effectués expérimentalement. Des mesures de contraintes au rayon-X et des mesures de distorsions ont ensuite été effectuées. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux obtenus par simulation à l'aide du logiciel de TWS. Ces comparaisons amènent l'auteur à conclure que le logiciel AdvantEdge ne prédit pas assez bien les efforts de coupe et les contraintes induites pour être utilisé dans la prédiction de la distorsion.

### 4.3.2 Essai du logiciel AdvantEdge

Dans le cadre du projet, une version temporaire du logiciel AdvantEdge ainsi qu'une participation à une journée de formation ont été offertes par la compagnie Thirdwaves System. Plusieurs simulations échelonnées sur une période de deux mois ont donc été effectuées. Les simulations effectuées ainsi que le support technique offert par la compagnie Thirdwaves System confirment les observations faites par M. Keith A. Young (Young, May 2005). Concernant les contraintes résiduelles et la distorsion des pièces usinées tel qu'appliqué dans le contexte de ce projet de recherche, le logiciel ne s'avère pas un outil intéressant à ce jour.

Dans d'autres contextes tels que l'étude de la variation des contraintes en fonction des paramètres de coupe, l'influence des propriétés du lubrifiant utilisés, les propriétés du recouvrement des outils et biens d'autres d'applications, le logiciel peut s'avérer un outil très intéressant. Au niveau éducationnel, le logiciel peut également être un outil d'apprentissage intéressant. Il permet de comprendre les phénomènes reliés à l'usinage ainsi que les calculs théoriques s'y rattachant.

On se doit de mentionner que le logiciel AdvantEdge se situe en tête de file dans le domaine de la simulation appliquée au domaine de l'usinage. Beaucoup de recherches et de développement sont en cours et le logiciel ne cesse de s'améliorer. La constante évolution de la rapidité des ordinateurs est un facteur qui contribue aussi à l'amélioration des performances du logiciel. Il sera très intéressant de voir les progrès effectués dans quelques années.

## CHAPITRE 5

### PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Le présent chapitre présente dans son ensemble les multiples expérimentations effectuées dans ce projet afin d'étudier les contraintes résiduelles et la distorsion.

#### 5.1 Objectifs

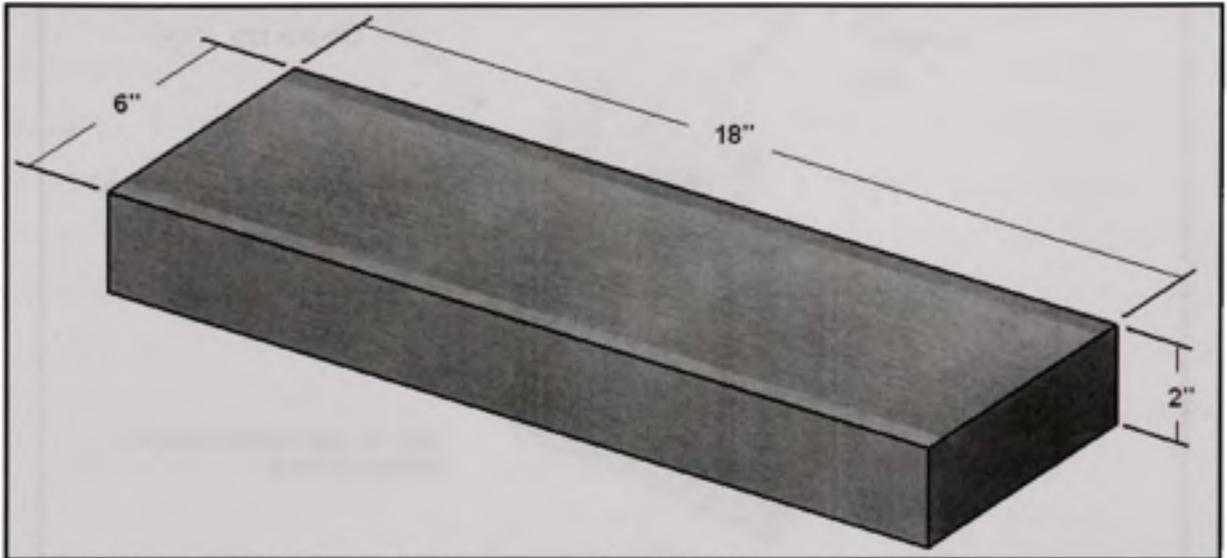
Plusieurs groupes tentent de prédire la distorsion en simulant les contraintes résiduelles produites lors de l'usinage par la méthode des éléments finis. Un des problèmes avec les modèles actuels est qu'ils ne tiennent pas compte des contraintes résiduelles initiales présentes dans le matériau brut. Ce type de contrainte a été expliqué dans le chapitre 3.2.5. Les contraintes du matériau brut peuvent influencer le phénomène de distorsion, mais à quel niveau? C'est ce qui doit être déterminé.

Le principal objectif de cette expérimentation est donc d'évaluer l'impact des contraintes résiduelles initiales du matériau brut sur la distorsion des pièces usinées. Pour ce faire, les contraintes résiduelles doivent être évaluées avant et après l'usinage et ce pour la même composante. C'est pourquoi une méthode non-destructive d'évaluation des contraintes résiduelles est nécessaire. Dans le cas présent, la méthode de diffraction par neutrons semble la plus appropriée. Sa précision et sa grande pénétration permettent de recueillir des données sur toutes les régions du matériau brut.

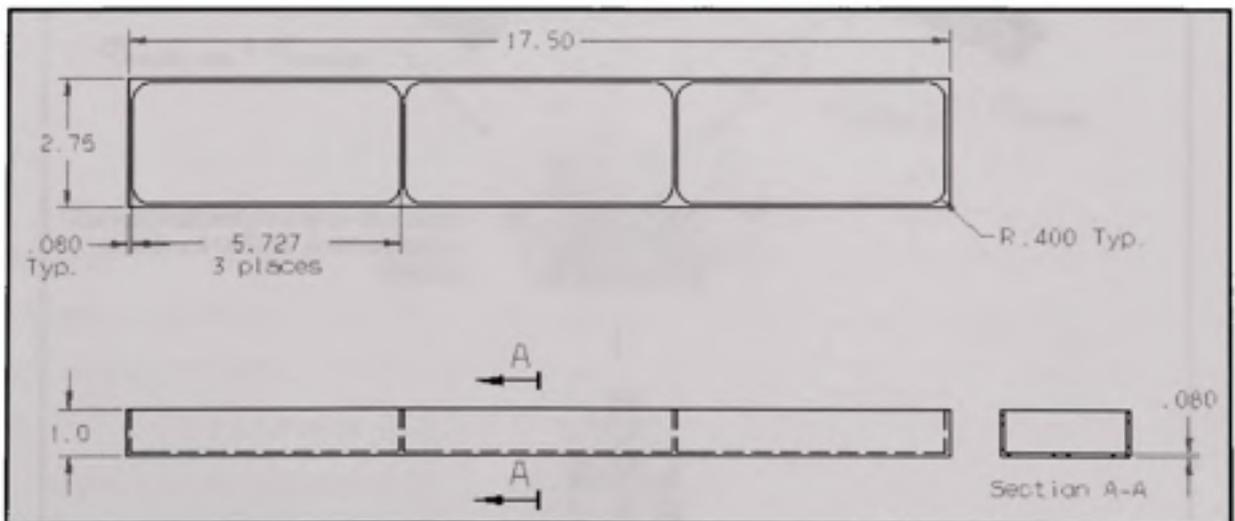
#### 5.2 Description des essais

Des blocs d'aluminium de 18"x 6"x 2" (Figure 5.1) possédant des distributions et des intensités de contraintes différentes ont été usinés par fraisage afin de produire la composante finie à parois minces illustrée à la Figure 5.2. Les paramètres d'usinage utilisés étaient les mêmes pour tous les échantillons. Des mesures de contraintes résiduelles par la méthode de diffraction par neutrons ont été effectuées avant et après l'étape d'usinage. Pour terminer, les

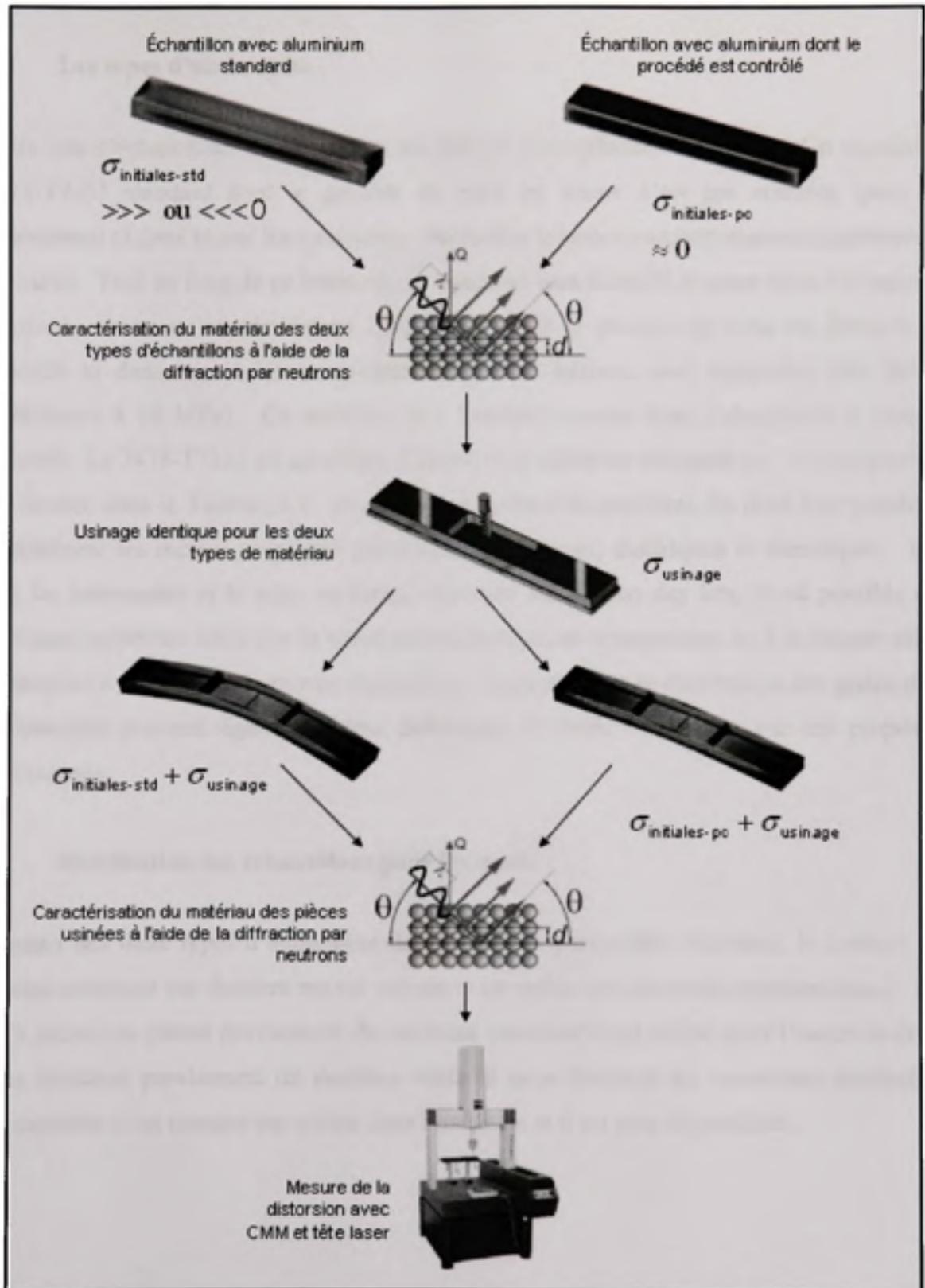
déformations dimensionnelles de chacune des pièces ont été mesurées à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) munie d'une tête laser. L'approche expérimentale utilisée est illustrée à la Figure 5.3.



**Figure 5.1 Dimensions du matériau brut utilisé.**



**Figure 5.2 Dimensions de la composante usinée.**



**Figure 5.3** Schéma des étapes effectuées lors des essais expérimentaux.

### 5.3 Les types d'aluminium

Deux lots d'échantillons de départ ont été utilisés pour effectuer les essais. Un aluminium 7475-T7351 standard dont le procédé de mise en forme n'est pas contrôlé (pour les contraintes) et dans lequel les contraintes résiduelles initiales sont importantes (supérieures à 18 MPa). Tout au long de ce mémoire, ce matériau sera identifié comme étant l'aluminium standard. Ainsi qu'un aluminium 7475-T7351 dont le procédé de mise en forme a été contrôlé et dans lequel les contraintes résiduelles initiales sont supposées être faibles (inférieures à 18 MPa). Ce matériau sera identifié comme étant l'aluminium à procédé contrôlé. Le 7475-T7351 est un alliage d'aluminium utilisé en aéronautique. Sa composition est donnée dans le Tableau 3.1. Outre la composition du matériau, les deux lots possèdent initialement les mêmes propriétés physiques, mécaniques, électriques et thermiques. Une fois les traitements et la mise en forme effectuée sur chacun des lots, il est possible que certaines propriétés telles que la résistance en tension, en compression ou à la fatigue soient différentes à cause des contraintes résiduelles. La grosseur et la distribution des grains dans le matériau peuvent également être différentes et avoir un impact sur les propriétés mécaniques.

### 5.4 Distribution des échantillons pour les essais

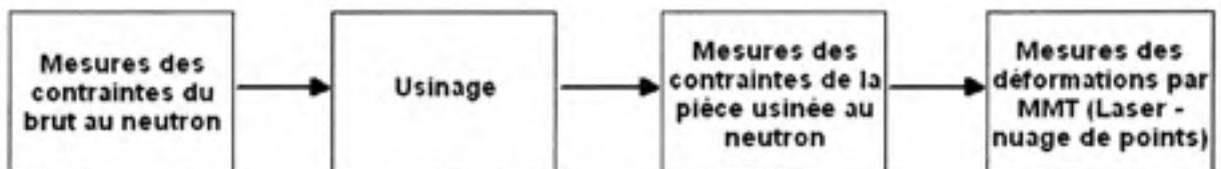
À partir des deux types d'aluminium décrits dans le paragraphe précédent, le Tableau 5.1 résume comment ces derniers ont été utilisés et identifiés lors des essais expérimentaux. Les trois premières pièces proviennent du matériau communément utilisé dans l'industrie et les trois dernières proviennent du matériau contrôlé pour diminuer les contraintes résiduelles. Ce matériau n'est presque pas utilisé dans l'industrie et il est plus dispendieux.

**Tableau 5.1**  
**Description des spécimens utilisés pour les essais**

| <b>Identification</b> | <b>Condition</b> | <b>Lot</b>                               |
|-----------------------|------------------|--|
| 1                     | Brut 18"x6"x2"   | Standard (avec contraintes non traitées) |
| 2                     | Brut 18"x6"x2"   | Standard (avec contraintes non traitées) |
| 3                     | Brut 18"x6"x2"   | Standard (avec contraintes non traitées) |
| 4                     | Brut 18"x6"x2"   | Contrôlé pour réduire les contraintes    |
| 5                     | Brut 18"x6"x2"   | Contrôlé pour réduire les contraintes    |
| 6                     | Brut 18"x6"x2"   | Contrôlé pour réduire les contraintes    |
| 1a                    | Pièce usinée     | A partir du spécimen 1                   |
| 4a                    | Pièce usinée     | A partir du spécimen 4                   |

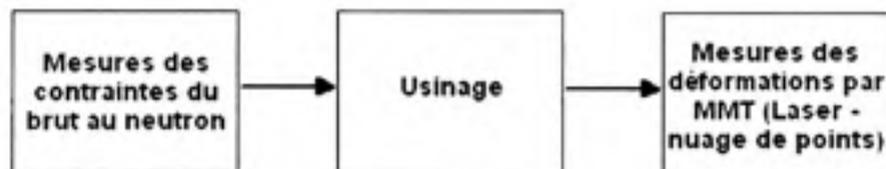
## 5.5 Résumé de la procédure expérimentale

Afin d'étudier l'impact des contraintes résiduelles présentes dans le matériau brut sur la distorsion des pièces usinées, un aluminium divisé en deux lots de matériaux brut possédant des contraintes résiduelles différentes ont été utilisés. Les trois premières pièces proviennent du lot avec des contraintes non contrôlées et les trois dernières du lot avec les contraintes contrôlées. Pour les pièces #1 et 4 les étapes résumées à la Figure 5.4 ont été effectuées.



**Figure 5.4** Résumé de la procédure expérimentale pour les pièces #1 et 4.

Pour les pièces #2, 3, 5 et 6, ce sont les étapes résumées à la Figure 5.5 qui ont été effectuées afin de respecter le temps de mesures aux neutrons qui était alloué.



**Figure 5.5** Résumé de la procédure expérimentale pour les pièces #2, 3, 5 et 6.

## **5.6 Évaluation des contraintes résiduelles avec la méthode de diffraction par neutrons**

### **5.6.1 Introduction**

Les contraintes résiduelles présentes dans les bruts d'aluminium et provenant des différents procédés de mise en forme ont été évalués à l'aide de la méthode de diffraction par neutrons. Les contraintes résiduelles présentes dans les pièces après l'usinage ont également été mesurées par la méthode de diffraction par neutrons. Les essais ont été effectués au Laboratoire de recherches du CNRC à Chalk River (Ontario, Canada, [http://neutron.nrc-cnrc.gc.ca/home\\_f.html](http://neutron.nrc-cnrc.gc.ca/home_f.html)). Ce chapitre vise à présenter cette méthode adaptée à la présente étude.

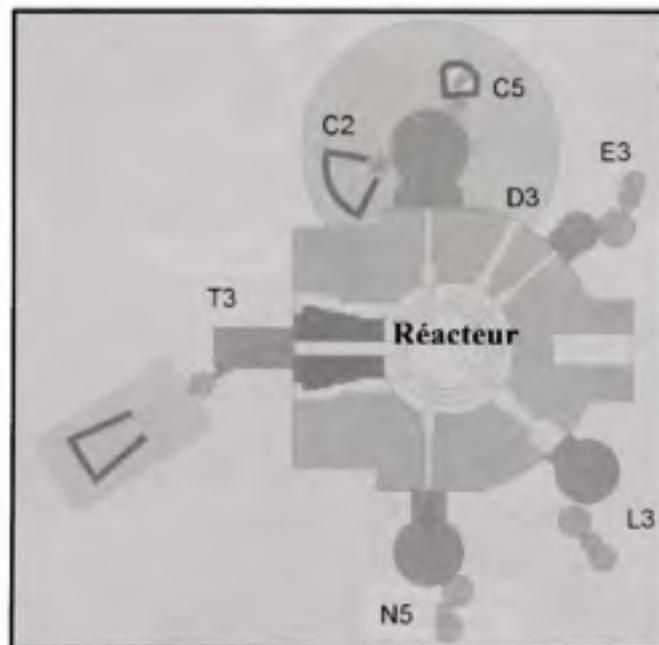
### **5.6.2 Installations et montage**

Les essais ont été effectués au Centre canadien de faisceaux de neutrons (CCFN) qui est exploité par le CNRC. Ce centre constitue une ressource pour les chercheurs universitaires, les industriels et les visiteurs provenant du CRNC et d'autres laboratoires gouvernementaux. Le centre est situé aux laboratoires de Chalk River en Ontario (Canada) sur le site du réacteur NRU géré par Énergie Atomique du Canada Limitée (EACL). L'accès aux cinq spectromètres neutroniques et à divers matériels auxiliaires est gratuit pour les utilisateurs dont les recherches sont destinées au domaine public (publications, conférences, thèses), par l'intermédiaire d'un système d'examen des projets. Chaque spectromètre est configuré pour des différents usages ou différentes sphères de recherches.

#### **5.6.2.1 Spectromètres**

Un spectromètre à diffusion de neutron est l'instrument installé à la sortie d'un orifice provenant du réacteur et qui permet de mesurer l'intensité des neutrons diffusés par un échantillon en fonction des variations de l'énergie et de la force d'impulsion des neutrons. De nombreuses conceptions de l'instrument ont été développées et optimisées pour fonctionner

dans différents modes. En général, les instruments utilisés pour les mesures de diffusion élastique, pour explorer la structure atomique moyenne temporelle d'un échantillon portent le nom de diffractomètres. Ceux qui sont utilisés dans des mesures de diffusion inélastique pour étudier le spectre d'excitation de la structure atomique sont appelés spectromètres (Conseil national de recherches du Canada, 2002). Dans le cas de l'étude des contraintes résiduelles, c'est le spectromètre L3 qui a été utilisé. Bien qu'il ait été conçu comme un instrument à trois axes, il est maintenant toujours utilisé en mode diffraction (2 axes) pour des applications à l'industrie de la diffraction des neutrons. Le balayage des contraintes en est un exemple. La Figure 5.6 montre la disposition du spectromètre L3 par rapport au réacteur.



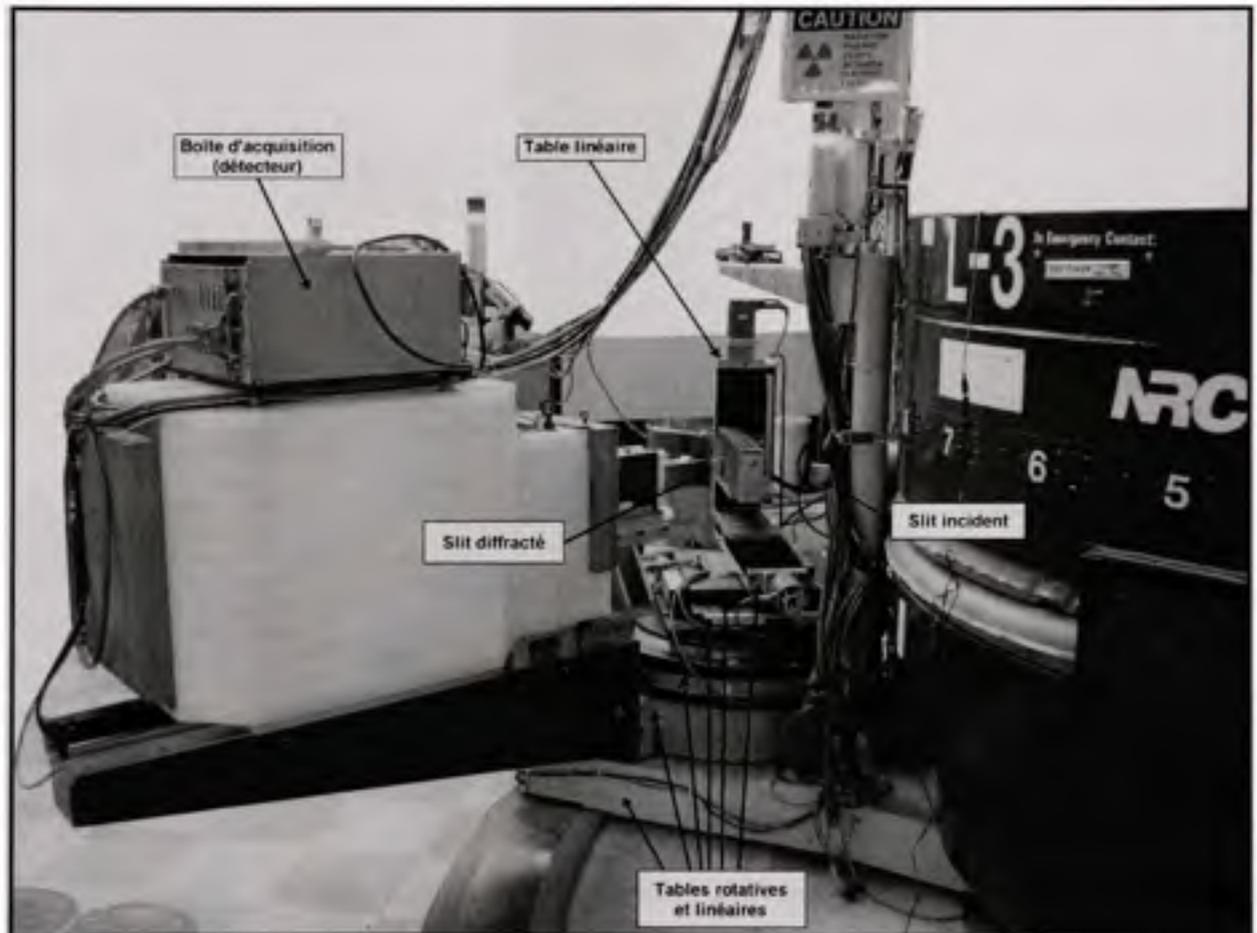
**Figure 5.6 Identification et disposition des spectromètres.**

(Conseil national de recherches du Canada, 2002)

Source : Cette figure a été tirée du site Internet du centre canadien de faisceaux de neutrons. Disponible à l'adresse <http://neutron.nrc-cnrc.gc.ca>.

### 5.6.2.2 Montage

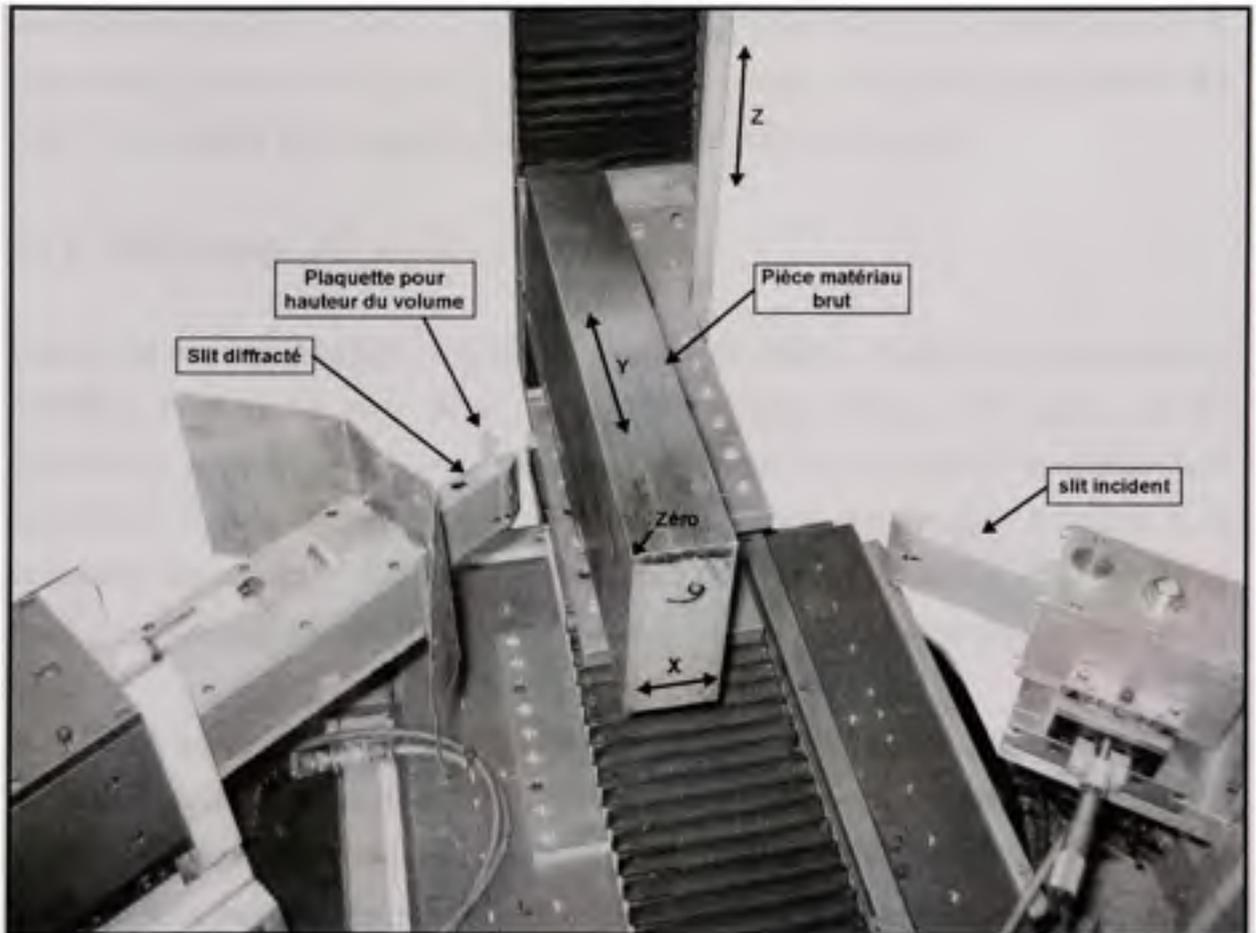
Plusieurs dispositifs auxiliaires tels que des tables rotatives, des tables linéaires et des éléments de fixations peuvent être utilisés sur le L3 afin de mesurer les contraintes. La Figure 5.7 illustre le montage utilisé dans le cas de cette thèse.



**Figure 5.7 Montage pour la mesure des contraintes avec la diffraction par neutrons.**

Le faisceau de neutrons incident sort d'une buse («slit» incident) pour ensuite frapper la pièce ou il subira une diffraction ou une réfraction dépendant de l'angle à laquelle la pièce se trouve. Le faisceau passe ensuite par une autre buse («slit» diffracté) ou il sera mesuré par un détecteur. Le comptage des neutrons se fait par un moniteur situé à l'orifice de sortie du réacteur. Les tables linéaires permettent de se déplacer pour positionner la pièce aux endroits

que l'on veut mesurer. Les tables rotatives permettent d'orienter la pièce pour mesurer dans la direction désirée. La Figure 5.8 est une vue agrandie de la Figure 5.7 qui permet de visualiser le montage de la pièce ainsi que l'orientation des axes.



**Figure 5.8 Détails du montage pour le mesurage.**

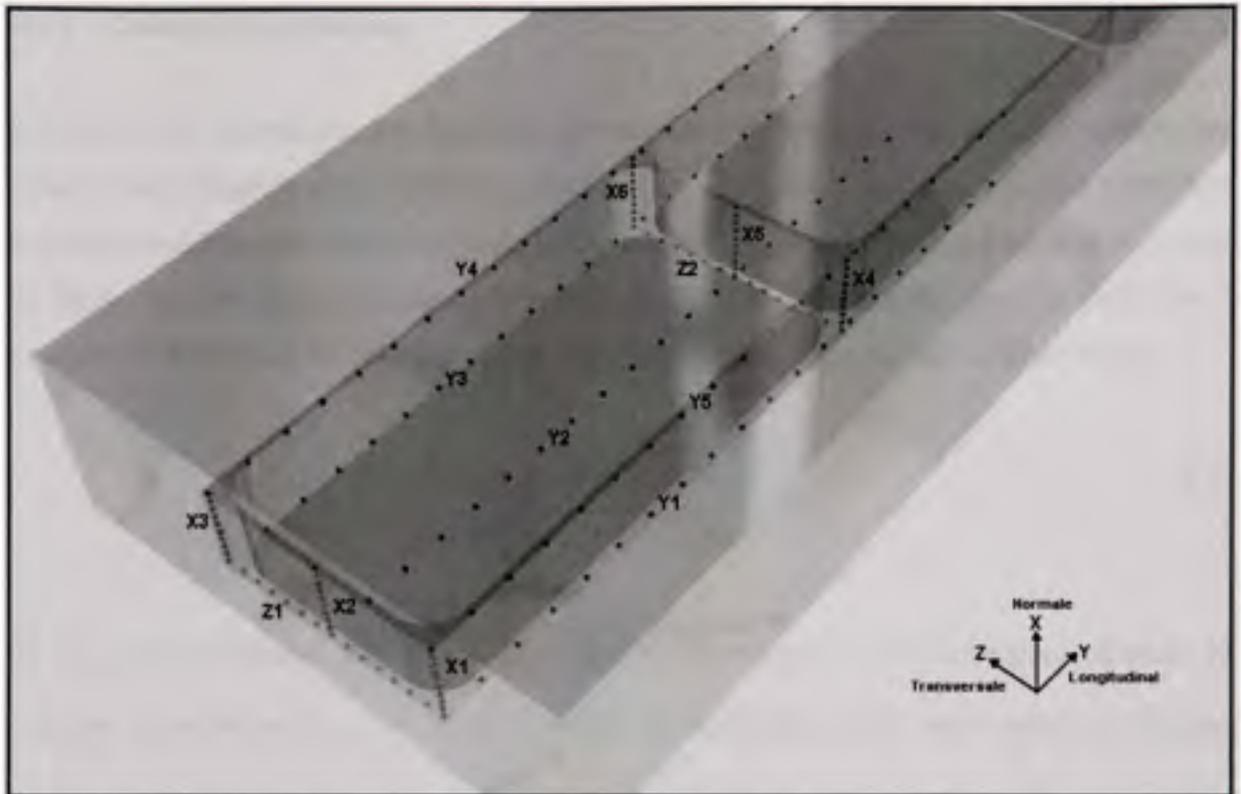
La pièce de matériau brut est simplement déposée sur la plaque de montage et maintenue en place par un ruban adhésif à doubles côtés. Les déplacements étant très lents, il n'y a pas de risque que la pièce bouge. Le zéro de la pièce est d'abord effectué à l'aide d'une lunette télescopique de précision. Par la suite, à l'aide du faisceau de neutrons, il est possible de trouver précisément le bord de la pièce. C'est ce qu'on appelle un «Wall Scan». C'est la mesure d'intensité mesurée qui permet de détecter l'endroit exact où le faisceau entre en contact avec le matériau. Plusieurs autres paramètres doivent être déterminés avant de

débuter la prise de mesure. Ces paramètres seront couverts dans la section 5.6.4 où il est question du calcul des contraintes. Les étapes de positionnement de la pièce doivent être faites pour chacune des pièces. Pour les pièces usinées, le montage demeure le même. Cependant comme les pièces usinées peuvent subir de la distorsion, plusieurs «Wall scans» sont effectués sur la surface afin de pouvoir tracer la courbure de la pièce selon l'axe des Y. Cela permet de trouver l'équation mathématique de la courbe et de compenser la position des X en fonction des Y pour toujours mesurer aux points ciblés dans le brut.

### 5.6.3 Méthodologie pour la prise des mesures

Une fois le montage complété, la prise de mesure peut débuter. Outre les six morceaux de matériaux bruts et les deux pièces usinées, des mesures doivent être prises sur des échantillons de références exempts de contraintes et sur un échantillon de nickel. Les échantillons de références servent aux calculs des contraintes et celui de nickel à la calibration des résultats. À ce sujet, plus de détails sont fournis dans les sections 5.6.4 et 5.6.5. Ces échantillons sont simplement déposés sur le dessus de la pièce brute au besoin.

Puisque les temps de mesure peuvent être assez élevés pour chaque point (entre 1 et 5 minutes) et qu'il y avait plusieurs pièces à mesurer, une méthode de travail a été utilisée afin d'optimiser le nombre de mesures et ainsi arriver à faire le travail dans le temps alloué qui était d'environ six semaines. Une première étape consistait donc à mesurer les contraintes à travers chaque échantillon selon X, Y et Z afin de vérifier s'il y avait symétrie dans la distribution des contraintes. Comme il y avait symétrie selon le plan central YZ pour chacune des pièces, seulement la moitié de chaque pièce a été inspectée dans cette direction. Cette méthode a donc permis de réduire de moitié le nombre de points et par conséquent le nombre de mesures. Dans un second temps, le nombre de points ainsi que leurs positions dans l'échantillon ont été déterminés en fonction de la position de la pièce usinée dans ce dernier. Les points mesurés dans le brut correspondent donc aux points mesurés dans la pièce usinée et peuvent être comparés.



**Figure 5.9 Points de mesures effectuées avec le faisceau de neutrons.**

Cette figure montre le brut de matière, la future pièce usinée ainsi que les points de mesure effectués dans le brut avec le faisceau de neutrons. Les points sont orientés selon différentes lignes identifiées X1 à X6, Y1 à Y5, Z1 et Z2. Ces différentes lignes vont être utilisées pour tracer des graphiques de contraintes en fonction de la position. Les directions des X, Y et Z correspondent respectivement aux directions normale, longitudinale et transversale du matériau. Les coordonnées de chacun des points mesurés se trouvent en ANNEXE II.

En fonction de cette méthodologie de mesure, certaines analyses pourront donc être faites mais d'autres non. Comme le nombre de points est insuffisant, une cartographie complète des contraintes résiduelles n'a pu être faite. Le premier objectif de ce projet étant de comparer différents matériaux bruts afin de connaître l'influence des contraintes résiduelles laissées dans ces derniers avant l'usinage sur la distorsion, il était primordial de mesurer un certain nombre de pièces.

### 5.6.4 Calcul des contraintes

L'analyse des contraintes par faisceaux de neutron est basée sur le mesurage précis des espaces inter planaires dans différentes directions de l'échantillon. Cette méthode s'applique seulement à des solides cristallins puisque ces derniers possèdent un réseau atomique arrangé de façon régulière et périodique. La détermination de la distance inter planaire s'effectue à l'aide de la diffraction du faisceau sur les plans cristallographiques et de la loi de Bragg :

$$d_{\{hkl\}} = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin(\theta_{\{hkl\}})} \quad (5.1)$$

où  $d_{\{hkl\}}$  est la distance entre deux plans cristallographiques,  $\lambda$  est la longueur d'onde du faisceau de neutron,  $\theta_{\{hkl\}}$  est le demi angle de déviation (demi angle entre le faisceau incident et la direction du détecteur) et  $\{hkl\}$  est l'indice de Miller. Les indices de Miller sont une manière d'identifier les plans dans un cristal.

La loi de Bragg est illustrée par la Figure 5.10. Sur cette figure,  $\underline{m}$  indique la direction de mesure de déformation.

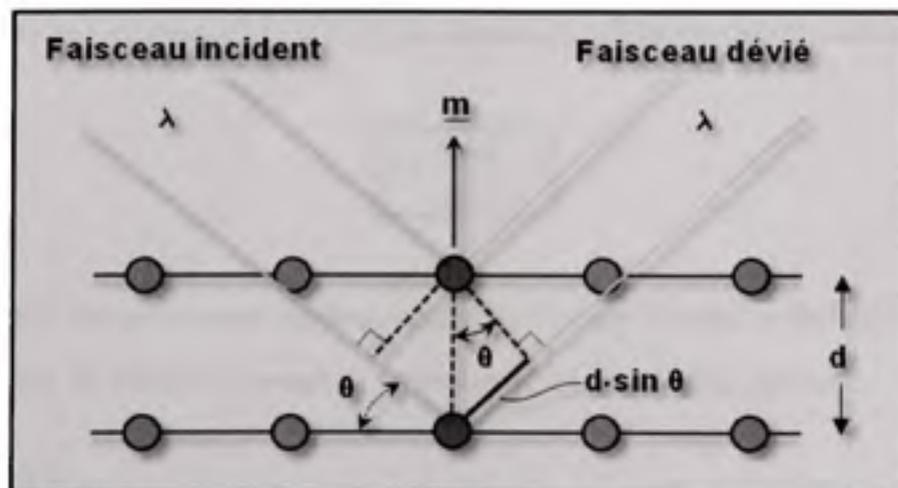


Figure 5.10 Illustration de la loi de Bragg.

Le choix d'un plan dépend de la structure cristallographique du matériau étudié et permet d'obtenir une intensité de mesure maximale. Dans le présent cas, l'aluminium est un matériau ayant une configuration atomique de type cubique à faces centrées (CFC) et le plan choisi était le  $\{311\}$ . Le choix du plan est basé sur une étude de l'intensité du faisceau de neutron en fonction des plans effectuée par les scientifiques du CNRC.

La longueur d'onde des neutrons ( $\lambda$ ) qui peut varier de  $0.5 \text{ \AA}$  à  $5 \text{ \AA}$  correspond aux distances inter atomiques typiques dans les systèmes à matière condensée. Pour les mesures effectuées dans le cadre de ce projet de recherche, la longueur d'onde correspondant à l'aluminium était de  $1.73 \text{ \AA}$ .

L'élongation  $\varepsilon$ , est une fraction représentant le changement entre la distance inter planaire mesurée  $d$  et la distance inter planaire de référence  $d_0$  mesurée sur un échantillon exempt de contrainte,

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (5.2)$$

En combinant les équations (5.1) et (5.2), la déformation peut être calculée comme suit :

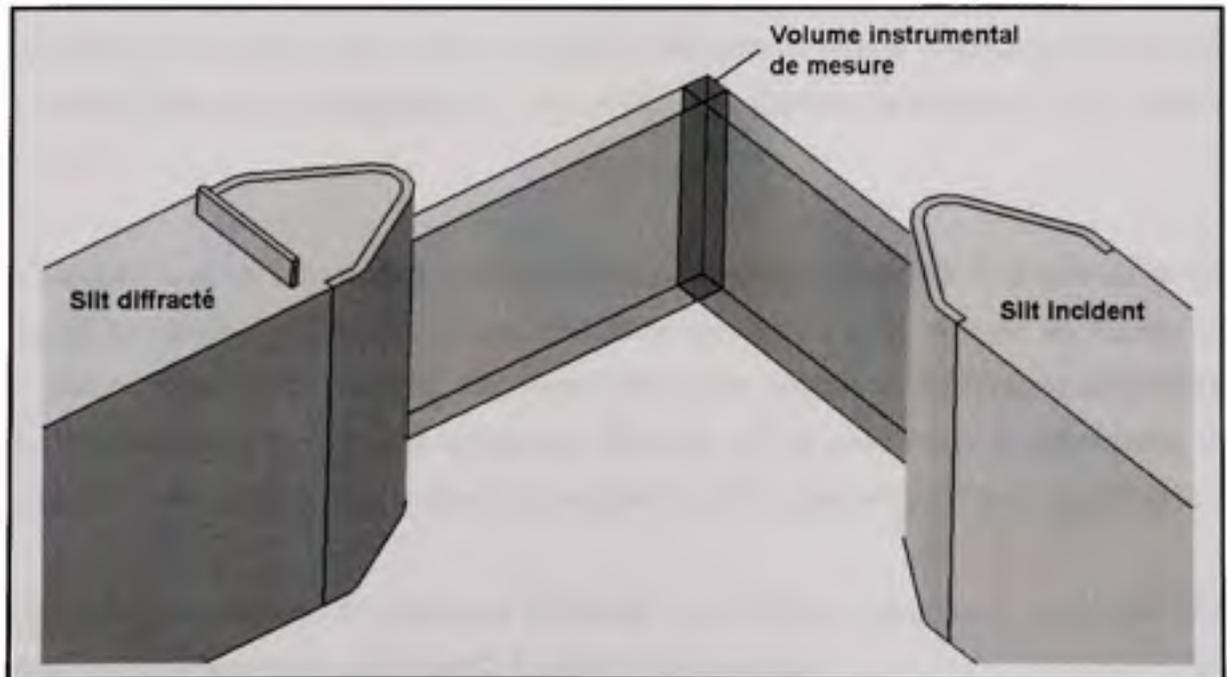
$$\varepsilon = \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} - 1 \quad (5.3)$$

où  $\theta$  et  $\theta_0$  sont respectivement les demi-angles du faisceau de neutron de la pièce mesurée et de l'échantillon de référence exempt de contraintes (voir le chapitre suivant).

Chaque mesure consiste en un comptage de neutrons versus le demi-angle correspondant et mesuré par un détecteur 32-canaux centré à un demi-angle nominal de  $90.24^\circ$  pour le plan

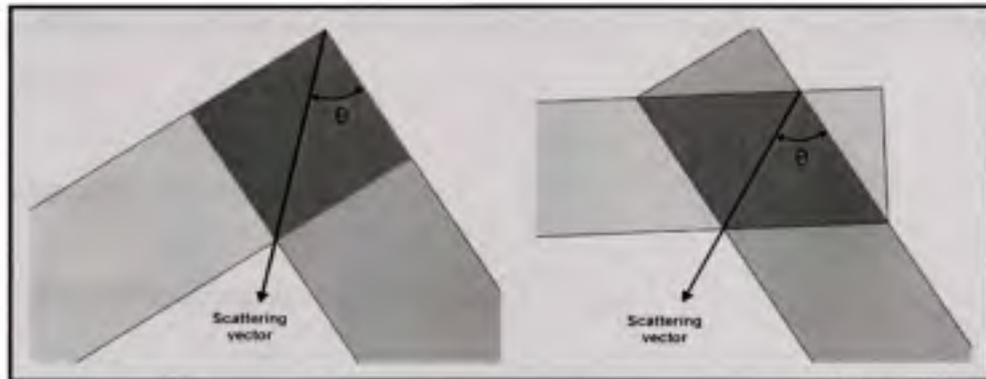
{311}. Chacun des pics de diffraction est ensuite modélisé selon une courbe de type gaussienne en utilisant la méthode des moindres carrés. Cela permet de ressortir les trois paramètres suivants : l'intégrale de l'intensité, la position du pic et la largeur à mi-hauteur. L'incertitude de chacun des paramètres peut alors être retracée de nouveau mais avec la qualité du paramètre  $\chi^2$  qui est le paramètre minimisé par la méthode d'ajustement. L'incertitude dans la mesure de déformation ( $\varepsilon$ ) est alors directement reliée à l'incertitude sur le paramètre de la position du pic.

Les faisceaux de neutrons incidents et diffractés sont formés par des ouvertures coupées dans des buses de cadmium («slits»). Le cadmium est un matériau qui absorbe les neutrons d'où son utilisation pour délimiter la forme du faisceau. Le volume délimité par l'intersection des sections rectangulaires des deux faisceaux et tel qu'illustré à la Figure 5.11 est ce qu'on appelle le volume instrumental de mesure.



**Figure 5.11** Illustration du volume instrumental de mesure.

La forme du volume instrumental de mesure est fonction du demi-angle  $\theta$ . La direction de mesure dépend également du demi-angle. La Figure 5.12 donne deux exemples de la forme du volume instrumental de mesure en vue de dessus pour deux demi angles différents.



**Figure 5.12** Forme du volume instrumental de mesure en fonction du demi angle  $\theta$ .

Le spécimen mesuré se déplace entre les buses à l'aide de tables rotatives et linéaires contrôlées informatiquement. Cela permet de positionner le volume instrumental de mesure à l'endroit désiré et à l'angle désiré. Le montage est illustré à la Figure 5.7 de la section 5.6.2.2.

L'élongation ( $\varepsilon$ ) est mesurée à l'intérieur de la pièce dans la direction de la bissectrice des rayons incidents et diffractés. Cette bissectrice est connue sous le nom de vecteur de dispersion (« scattering vector »). En réorientant la pièce à mesurer, différentes composantes de la déformation peuvent être mesurées. Dans le cas de cette étude, il est possible de mesurer les élongations dans la direction longitudinale (L), transversale (T) et normale (N).

Les trois composantes de contrainte résiduelle peuvent être calculées à partir des trois mesures de déformation en utilisant la Loi de Hooke générale,

$$\sigma_x = \frac{E}{1+\nu} \cdot \left[ \varepsilon_x + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot (\varepsilon_L + \varepsilon_T + \varepsilon_N) \right] \quad \text{où } x = [L, T, N] \quad (5.4)$$

où  $E$  correspond au module de Young de l'aluminium 7475-T7351 (71.7 GPa) et  $\nu$  est le coefficient de poisson de l'aluminium 7475-T7351 (0.33). Les hypothèses d'isotropie du matériau et d'élasticité ont été posées.

Plusieurs chiffriers Excel ont été créés afin d'effectuer les calculs et de tenir compte de tous les paramètres.

### **5.6.5 Échantillons de références**

#### **5.6.5.1 Échantillons exempts de contraintes**

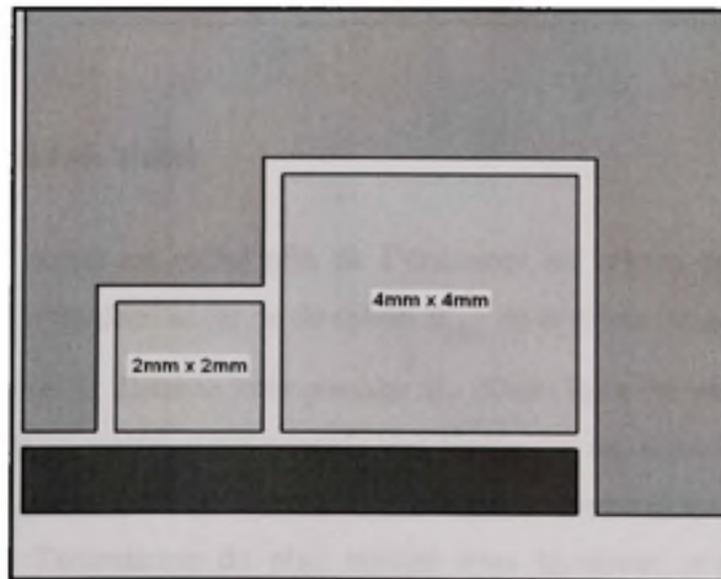
Les échantillons de références doivent être exempts de contraintes. Pour se faire, des échantillons ont été découpés dans le matériau brut à l'aide de la coupe au fil. Ce procédé n'induit pas de contraintes lors de la coupe et permet ainsi de relâcher les contraintes à l'intérieur du matériau brut. Ces échantillons servent lors du calcul des contraintes. Ils permettent d'obtenir la distance inter planaire de référence  $d_0$  de chacune des pièces et de faire le calcul de déformation (Équation 5.2) pour le volume de mesure choisi.

Le centre de coupe utilisé dans le cadre de ce projet de recherche est une machine de marque Charmilles Robofil 2030SI illustré à la Figure 5.13. Cette machine se trouve au département de fabrication de l'École Polytechnique de Montréal.



**Figure 5.13 Machine Charmilles Robofil 2030SI.**

Les échantillons ont été découpés à des dimensions de 2 mm x 2 mm x 50,8 mm et de 4 mm x 4 mm x 50,8 mm. Le choix des dimensions correspond aux volumes de mesure utilisés avec la méthode du neutron. La Figure 5.14 illustre les coupes effectuées.



**Figure 5.14 Coupes au fil effectuées.**

Un total de huit échantillons a été nécessaire afin de couvrir les différentes directions de mesures qui sont «Rolling», «Transverse» et «Normal», et ce, pour les deux différents aluminiums (7475-T7351 standard et 7475-T7351 avec contrôle du procédé). Les caractéristiques de chacun des échantillons sont données dans le Tableau 5.2.

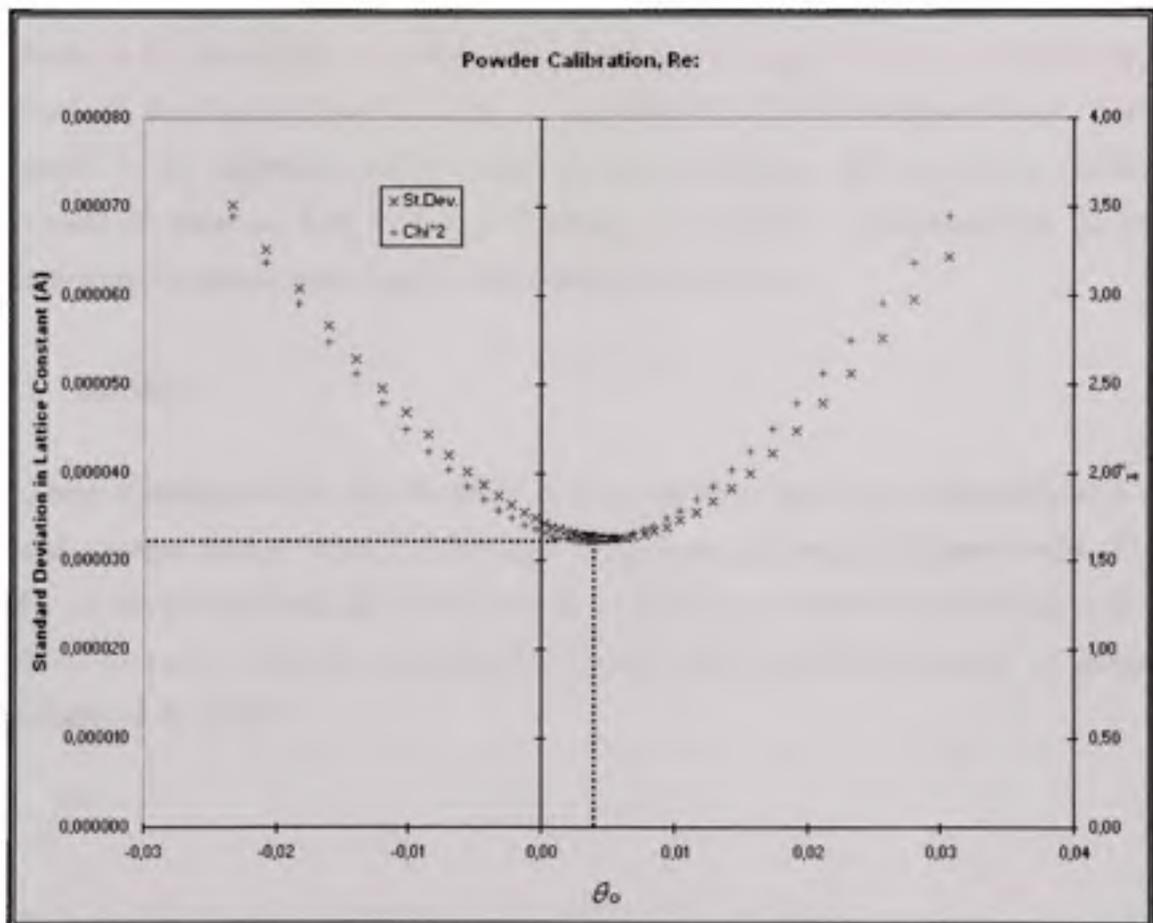
**Tableau 5.2**  
**Caractéristiques des différents échantillons de référence**

| Échantillon | Matériau<br>AL7475-T7351 | Dimensions  | Directions mesurables avec<br>le neutron |
|-------------|--------------------------|-------------|--|
| 1           | Standard                 | 2 mm x 2 mm | Rolling, Transverse                      |
| 2           | Standard                 | 4 mm x 4 mm | Rolling, Transverse                      |
| 3           | Standard                 | 2 mm x 2 mm | Normal, Transverse                       |
| 4           | Standard                 | 4 mm x 4 mm | Normal, Transverse                       |
| 5           | Procédé contrôlé         | 2 mm x 2 mm | Rolling, Transverse                      |
| 6           | Procédé contrôlé         | 4 mm x 4 mm | Rolling, Transverse                      |
| 7           | Procédé contrôlé         | 2 mm x 2 mm | Normal, Transverse                       |
| 8           | Procédé contrôlé         | 4 mm x 4 mm | Normal, Transverse                       |

#### 5.6.5.2 Échantillon de nickel

Un échantillon de nickel est utilisé afin de d'étalonner les valeurs des paramètres de la longueur d'onde  $\lambda$  et du demi-angle de déviation  $\theta_{(hkl)}$  de la loi de Bragg (Équation 5.1) qui permettent de mesurer la distance inter planaire  $d$ . Cette loi a été expliquée à la section 5.6.4. Le nickel est un matériau qui possède une répétitivité quasi parfaite au niveau de la distance entre deux nœuds («lattice constant»). Cette distance permet de calculer la valeur de  $d$  en fonction de l'orientation du plan mesuré dans le réseau cristallin du matériau. Connaissant très bien cette distance, il est possible de valider si les paramètres de la longueur d'onde et du demi-angle choisis théoriquement correspondent bien à ceux obtenus

expérimentalement avec le faisceau de neutrons et d'étalonner au besoin. Pour faciliter les calculs, les scientifiques du CNRC ont conçu un logiciel nommé Powder qui permet de calculer la déviation du demi angle en fonction de la déviation sur le paramètre de la distance entre deux nœuds selon la loi du Chi carré ( $\chi^2$ ). La Figure 5.15 montre graphiquement un résultat de calcul obtenu avec cette méthode.



**Figure 5.15** Graphique de la calibration du paramètre  $\theta$ .

Les paramètres optimaux sont ceux correspondant au bas de la courbe des  $\chi^2$ . C'est l'endroit où la déviation est la plus faible. Par la suite, le paramètre de la longueur d'onde est recalculé avec la nouvelle valeur de  $\theta$ . Connaissant maintenant les déviations sur les paramètres  $\lambda$  et  $\theta$ , il est possible de compenser les valeurs de  $\lambda$  et  $\theta$  sur les échantillons d'aluminium et également d'évaluer l'erreur sur chacune des mesures.

## **5.7 Usinage des composantes**

### **5.7.1 Introduction**

Le design de la composante usinée est un modèle réduit et simplifié inspiré de plusieurs composantes aéronautiques ayant des problèmes de distorsion. Une étude a été effectuée au sein de la compagnie Bombardier Aéronautique afin de déterminer les dimensions, la méthode et les paramètres d'usinage qui ont été utilisés lors des essais. Un prototype a d'abord été usiné afin de confirmer que le phénomène de distorsion était présent. Comme l'objectif de ce mémoire est d'étudier l'influence de la variation des contraintes résiduelles provenant du matériau brut et non de l'usinage, la méthode et les paramètres de coupe demeureront les mêmes pour chacune des composantes usinées.

### **5.7.2 Machine**

Le centre d'usinage utilisé dans le cadre de ce projet de recherche est une machine à trois axes de marque Mazak NEXUS 410A avec contrôleur numérique Mazatrol 640M (Figure 5.16). La vitesse maximale de la broche est de 12 000 rpm. L'avance maximale de la broche selon les axes (x, y, z) est de 36 m/min (1417 po./min) @ 0.5G d'accélération. La puissance maximale est de 25 HP.



**Figure 5.16 Mazak NEXUS 410A.**

Cette machine se trouve au Laboratoire institutionnel de fabrication de l'ÉTS.

### **5.7.3 Les outils de coupe**

Lors des essais d'usinage, les deux principaux outils qui ont été utilisés sont une fraise en bout de 3/4 de pouce de diamètre et une fraise en bout de 3/8 de pouce de diamètre. Les caractéristiques de ces outils sont données dans le Tableau 5.3. La fraise en bout de 3/4 de pouce de diamètre a effectué du dégrossissage et de la finition tandis que l'outil de 3/8 de pouce de diamètre a effectué de la finition seulement.



**Figure 5.17 Outils de coupe utilisés.**

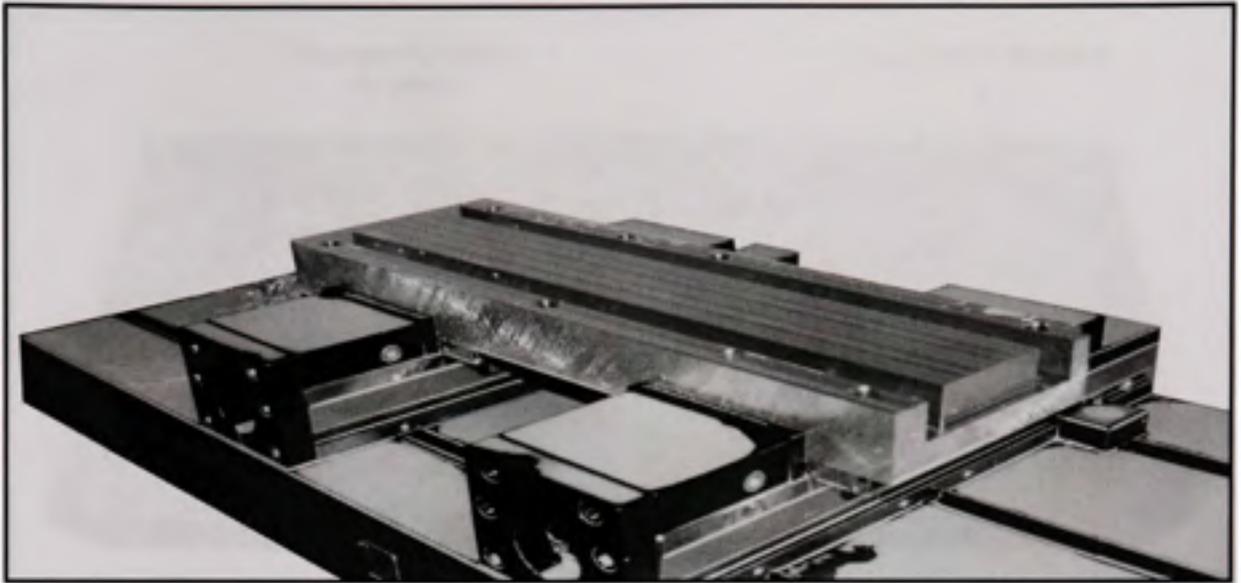
**Tableau 5.3**  
**Caractéristiques des outils de coupe**

|                   | Fraise 3/4 po.     | Fraise 3/8 po.          |
|-------------------|--------------------|-------------------------|
| Fournisseur       | Clortech Tools Inc | S.B. Simpson Group Inc. |
| Matériau          | Carbure            | Carbure                 |
| Diamètre          | 0.750 po.          | 0.375 po.               |
| Rayon de nez      | 0.063 po.          | 0.010 po.               |
| Nombre de flûtes  | 2                  | 3                       |
| Longueur de flûte | 1.625 po.          | 2.000 po.               |
| Longueur totale   | 4.375 po.          | 3.750 po.               |

#### 5.7.4 Méthode d'usinage

##### 5.7.4.1 Stage 1

La composante a été usinée en deux stages. Le premier stage consiste à surfacer le dessous de la pièce, à fraiser le contour extérieur (dégrossissage et finition) et à percer les trous qui ont servi à fixer et à localiser la pièce lors du second stage. Le montage de ce premier stage a été effectué à l'aide de deux étaux de marque CHICKS. La Figure 5.18 illustre le montage et l'usinage effectué lors de ce stage.

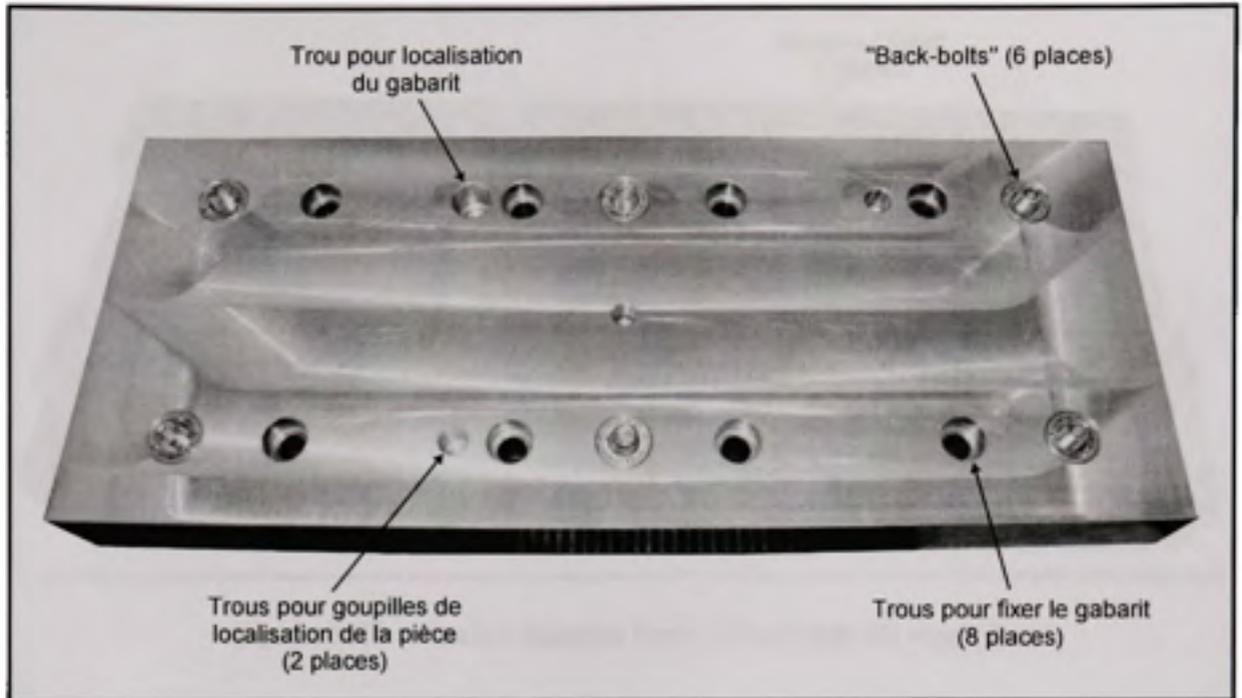


**Figure 5.18 Montage du premier stage d'usinage.**

Des résumés illustrant les paramètres de coupe ainsi que des trajets d'outils utilisés pour les stages 1 et 2 sont présentés en ANNEXE I.

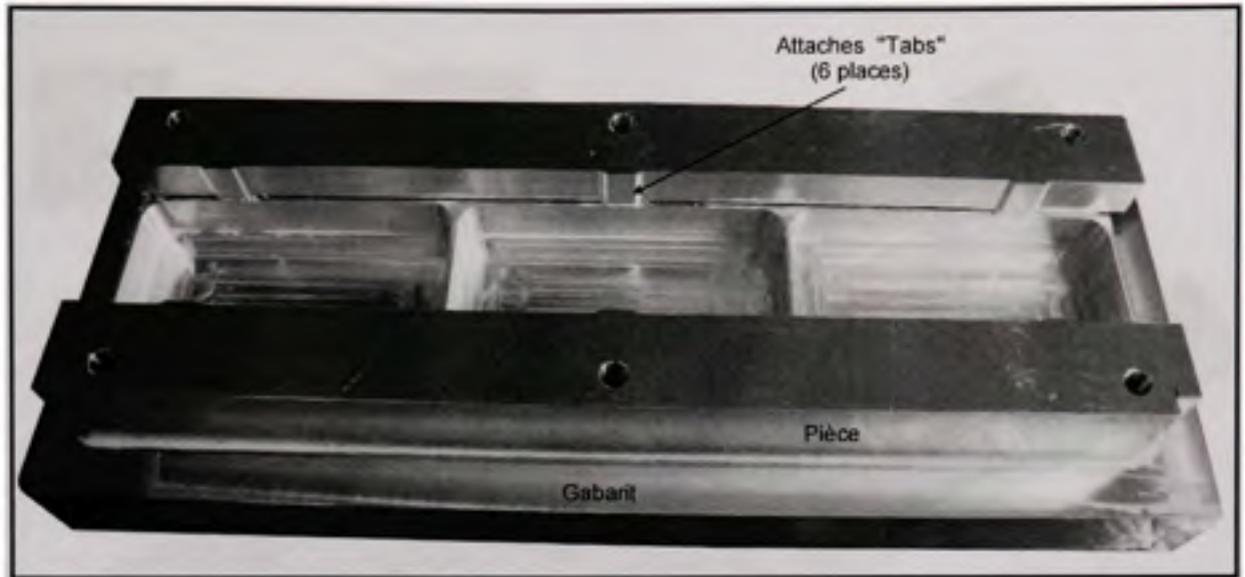
#### **5.7.4.2 Stage 2**

Le second stage comporte les étapes de dégrossissage du dessus, du dégrossissage des poches, de la finition des poches et de la finition du dessus. La pièce est soutenue par une plaque de montage en acier (Figure 5.19). Le positionnement se fait à l'aide de deux goupilles de 0.5000 pouce de diamètre et la composante est retenue par 6 vis de type «back-bolt».



**Figure 5.19** Plaque de montage pour le stage 2.

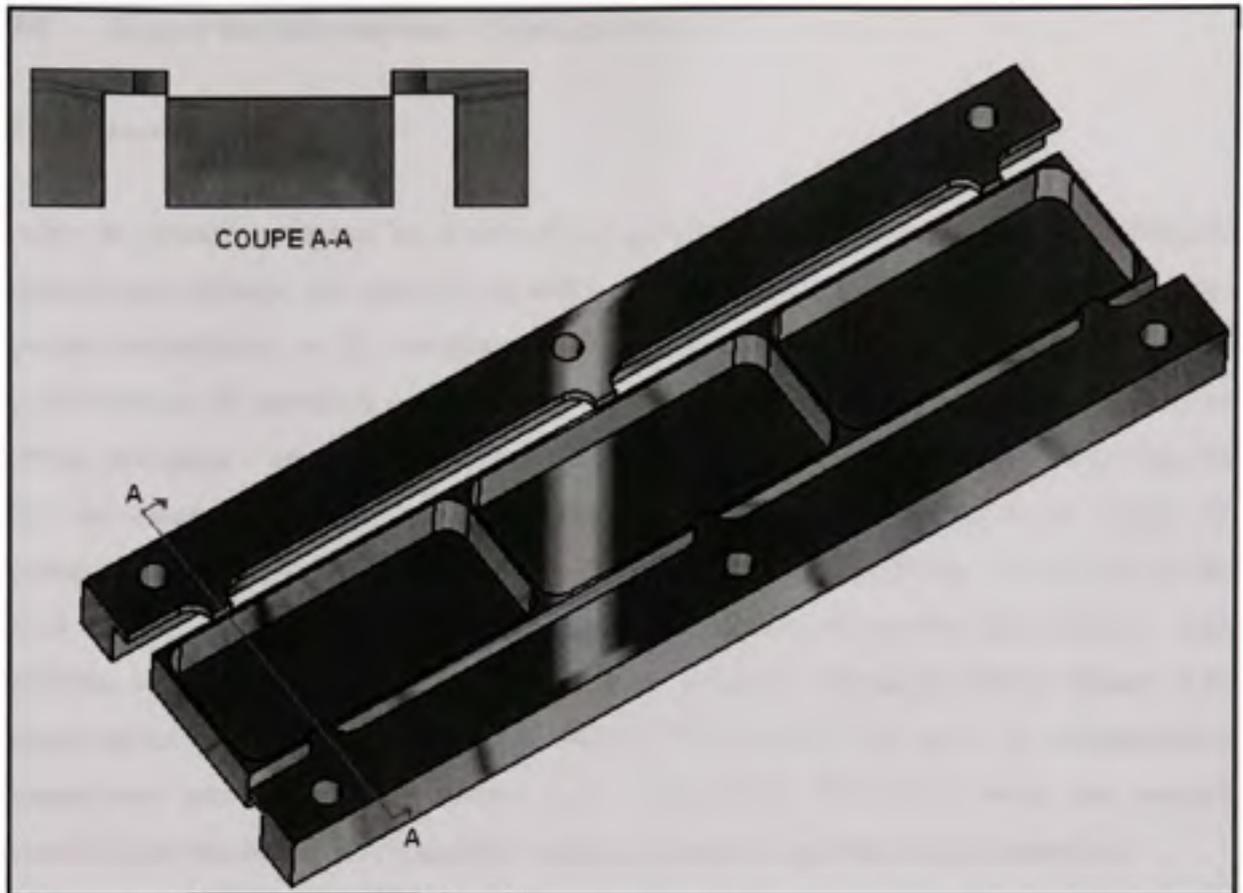
Lors de ce stage d'usinage, six attaches («tabs») sont laissées pour maintenir la pièce en place. Une fois la pièce terminée, il faut couper manuellement les six attaches pour séparer le cadre de la pièce finie. Cette méthode appelée «picture frame removal» est expliquée dans le paragraphe suivant. La Figure 5.20 montre la composante usinée suite au stage 2 ainsi que les attaches laissées pour maintenir la pièce sur le gabarit.



**Figure 5.20** Attaches laissées suite à l'usinage du stage 2.

#### 5.7.4.3 Méthode du «picture frame removal»

Cette méthode est très utilisée dans le domaine de l'aéronautique pour usiner des composantes à parois minces. Elle permet de maintenir la composante usinée en place pour terminer l'usinage sans avoir à utiliser de montage supplémentaire où un serrage serait dommageable voir impossible. La méthode consiste à utiliser un brut de matière plus grand et à laisser des attaches lors de l'usinage. Ces attaches servent à maintenir la pièce usinée en place et sont coupées par la suite pour libérer la pièce finie. La Figure 5.21 représente les attaches laissées sur la composante usinée lors des essais expérimentaux. Ces petites attaches ont une largeur de 0,500 pouce et elle chevauche la pièce avec une dimension de 0,020 pouce.



**Figure 5.21 Méthode du "Picture Frame Removal".**

Au niveau des contraintes, cette méthode a la particularité de permettre un relâchement de ces dernières lors de l'usinage. Ce qui peut donc être bénéfique si la déformation se produit lors de l'étape de dégrossissage et que l'étape de finition vient reprendre les défauts. Le relâchement dépend de la rigidité du montage et par conséquent du nombre d'attaches.

Les aspects négatifs de cette méthode sont qu'elle engendre une plus grande quantité de rebuts, elle nécessite un temps de programmation plus long et elle ajoute des étapes d'usinage comme le perçage des trous et la coupe des attaches.

## **5.8 Mesure des déformations : Balayage laser**

### **5.8.1 Introduction**

Afin de pouvoir comparer les déformations dimensionnelles qu'ont subies les différentes composantes usinées, des mesures par balayage laser ont été effectuées. Le balayage laser permet de digitaliser en 3D une composante et de la comparer au dessin de référence qui a préalablement été modélisé par ordinateur (CAO). Cette méthode d'inspection qui est en pleine croissance n'est pas encore très répandue au Canada. Pour chacune des pièces usinées lors des essais expérimentaux, des données ont été recueillies sous forme de nuages de points. Ces points ont été ensuite traités à l'aide du logiciel PolyWorks. Ce logiciel est un outil spécialisé dans le traitement des nuages de points et il s'est avéré très efficace. Les résultats obtenus montrent bien la différence entre les deux types de matériaux utilisés. Les composantes usinées avec l'aluminium 7475-T7351 standard ont subi des déformations importantes tandis que celles usinées avec l'aluminium 7475-T7351 ayant un procédé contrôlé pour minimiser les contraintes initiales ont subi de très faibles déformations.

### **5.8.2 Acquisition des données**

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une MMC (machine à mesurer par coordonnées) de type Mitutoyo Bright-Strato 7106 munie d'une tête laser Metris LC50 (digitalisation 3D par balayage laser), illustrée à la Figure 5.22. Les données recueillies forment un nuage de points représentant les surfaces de la composante inspectée. Les points recueillis sont ensuite sauvegardés dans un fichier texte sous trois colonnes contenant les coordonnées x, y et z de chacun d'eux.



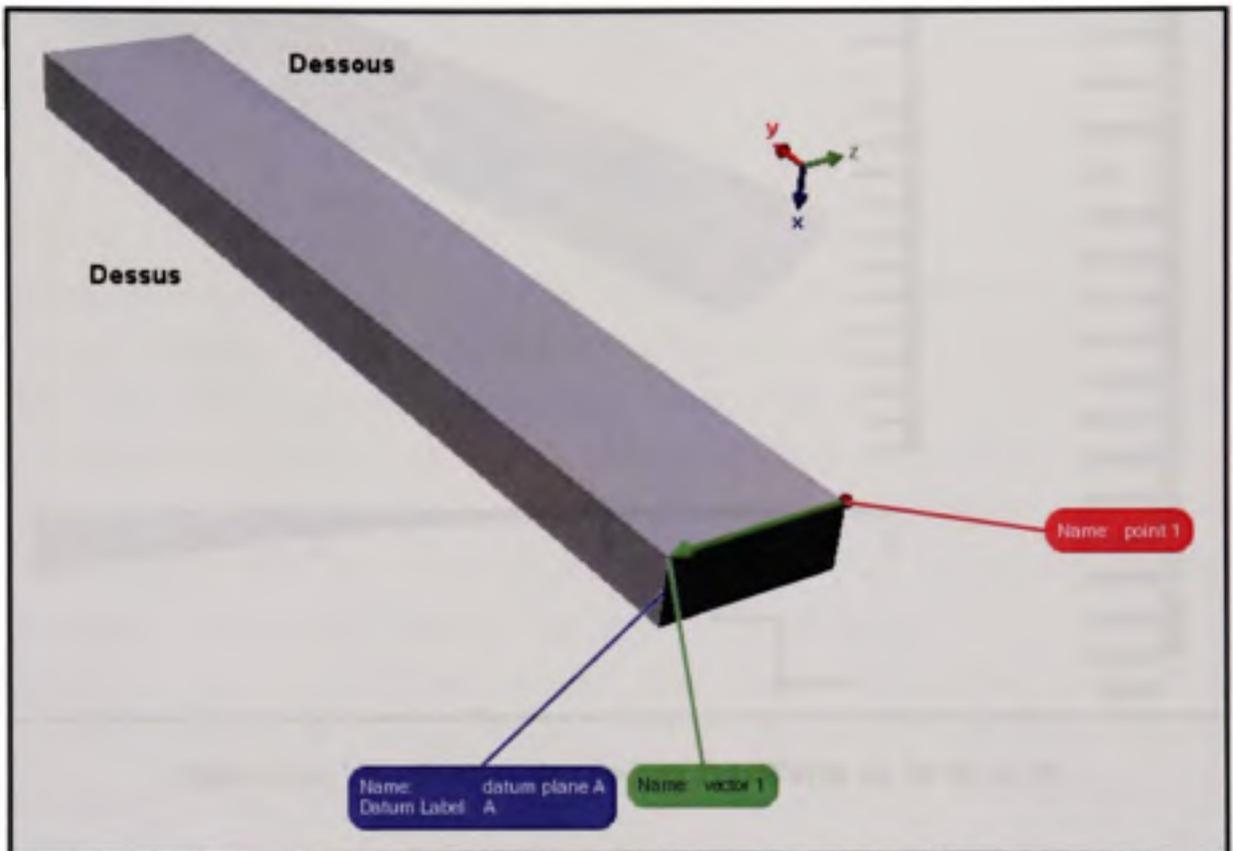
**Figure 5.22** MMC Mitutoyo Bright-Strato 7106 munie d'une tête laser Metris LC50.

Cette machine se trouve au Laboratoire institutionnel de fabrication de l'ÉTS.

### **5.8.3 Traitement et analyse des données**

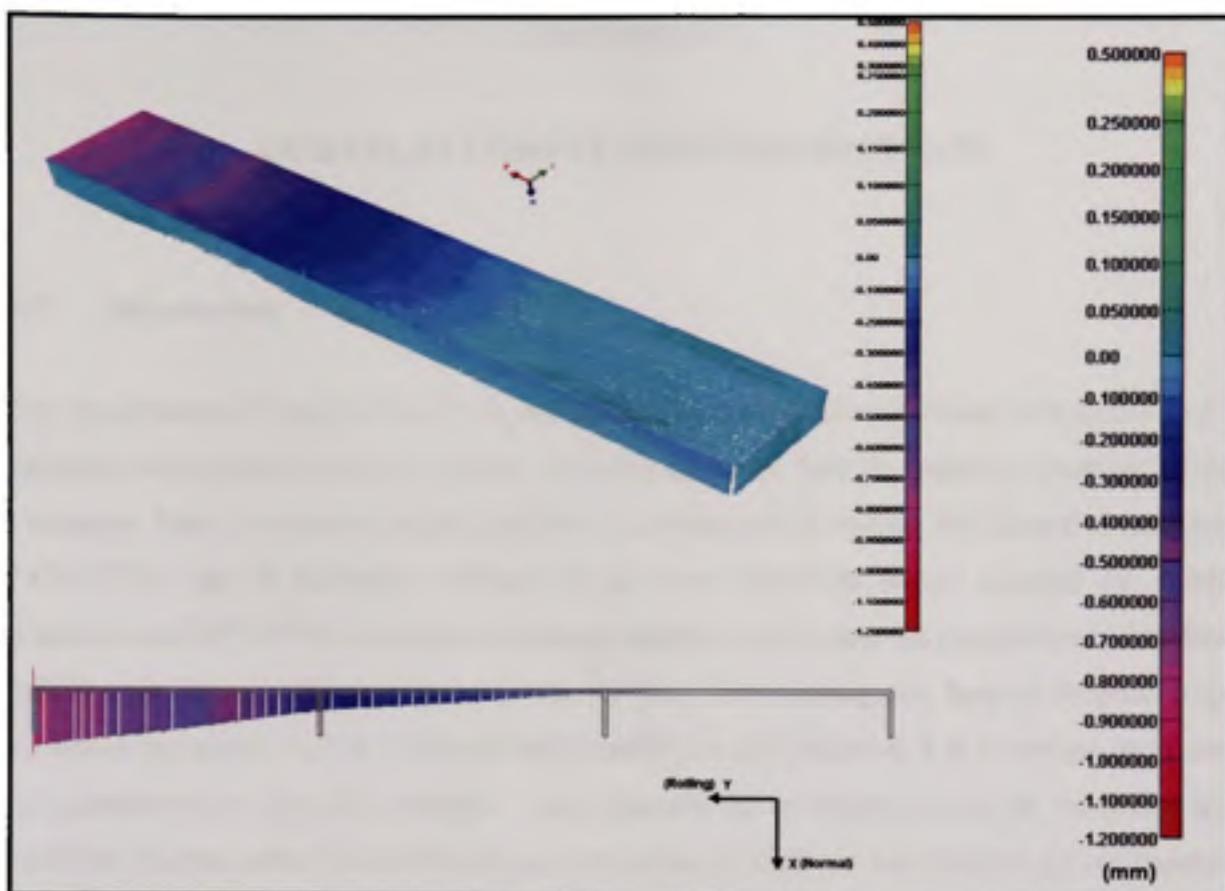
Le logiciel PolyWorks v10.0 de la compagnie Innovmetric a été utilisé afin de traiter les données recueillies avec le laser. Le logiciel permet d'importer le modèle CAO de la composante inspectée ainsi que les fichiers de type texte contenant les coordonnées des points mesurés. Par la suite, le logiciel permet de superposer le modèle CAO et les points mesurés selon les spécifications de l'utilisateur. Le logiciel demande une combinaison plan-vecteur-point afin de contraindre les 6 degrés de liberté de la composante à inspecter et de respecter les références demandées. Pour la présente étude, les références ont été déterminées selon la déformation anticipée. Comme une déformation dans le sens de la longueur était attendue, un plan, un vecteur et un point de référence ont été fixés à l'un des

bouts de la pièce. Comme pour une poutre encastree. La Figure 5.23 illustre les références qui ont été créées dans le logiciel PolyWorks.



**Figure 5.23 Références pour la superposition des mesures et du CAD dans le logiciel PolyWorks.**

L'étape suivante consiste à concevoir une échelle de couleurs afin de visualiser rapidement les écarts entre le modèle de références et les pièces mesurées. La Figure 5.24 présente un exemple de résultat d'analyse de mesure effectuée à l'aide de PolyWorks. Il est également possible de visualiser les déformations géométriques avec des sections en 2D. Cette méthode est très efficace puisqu'elle permet de valider les tolérances dimensionnelles et géométriques à la fois. Elle permet de visualiser le sens des déformations.



**Figure 5.24** Visualisation de résultats PolyWorks en 3D et en 2D.

La figure ci-dessus montre une image 3D provenant directement du logiciel et sa vue de section dans le sens de la longueur. La vue de section utilise des isobares en plus des couleurs pour donner le sens et la grandeur de la déformation. Les unités utilisées sont des mm.

La dernière étape consiste à générer un rapport d'inspection. Ce rapport peut comporter plusieurs données dont les écarts maximums observés et leurs positions respectives. Les rapports peuvent être importés en format html ou en fichier Excel.

## CHAPITRE 6

### ANALYSE ET COMPARAISON DES RÉSULTATS

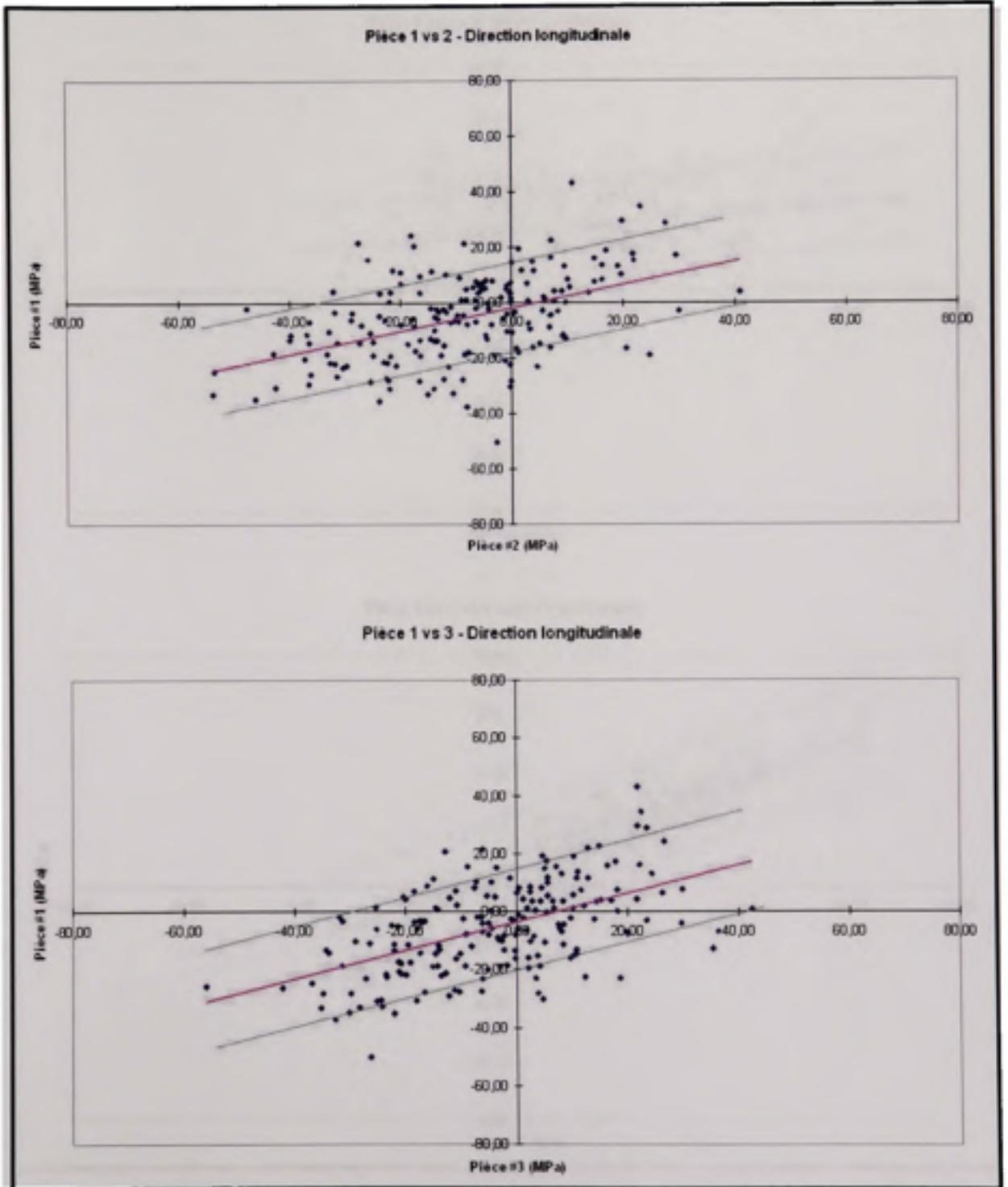
#### 6.1 Introduction

Tel que présenté à la section 5.6.3, six échantillons ont été mesurés à l'aide de la méthode du faisceau de neutrons afin de connaître les contraintes du brut de matériau avant et après l'usinage. Dans ce lot de matériaux, les trois premières pièces avaient été faites d'aluminium 7475-T7351 par la méthode standard et les trois dernières pièces avaient été faites d'aluminium 7475-T7351 par une méthode qui permet de diminuer les contraintes résiduelles induites par les procédés de mise en forme du brut. Par conséquent, dans ce chapitre nous parlerons des pièces 1, 2 et 3 comme étant standard et des pièces 4, 5 et 6 comme étant des composantes avec procédé contrôlé. Les objectifs de ce chapitre sont de comparer les résultats obtenus pour l'ensemble des composantes, d'analyser les résultats de contraintes mesurées avant et après l'usinage, d'analyser les déformations obtenues, et finalement de comparer les deux types de matériaux au niveau des contraintes et des déformations associées.

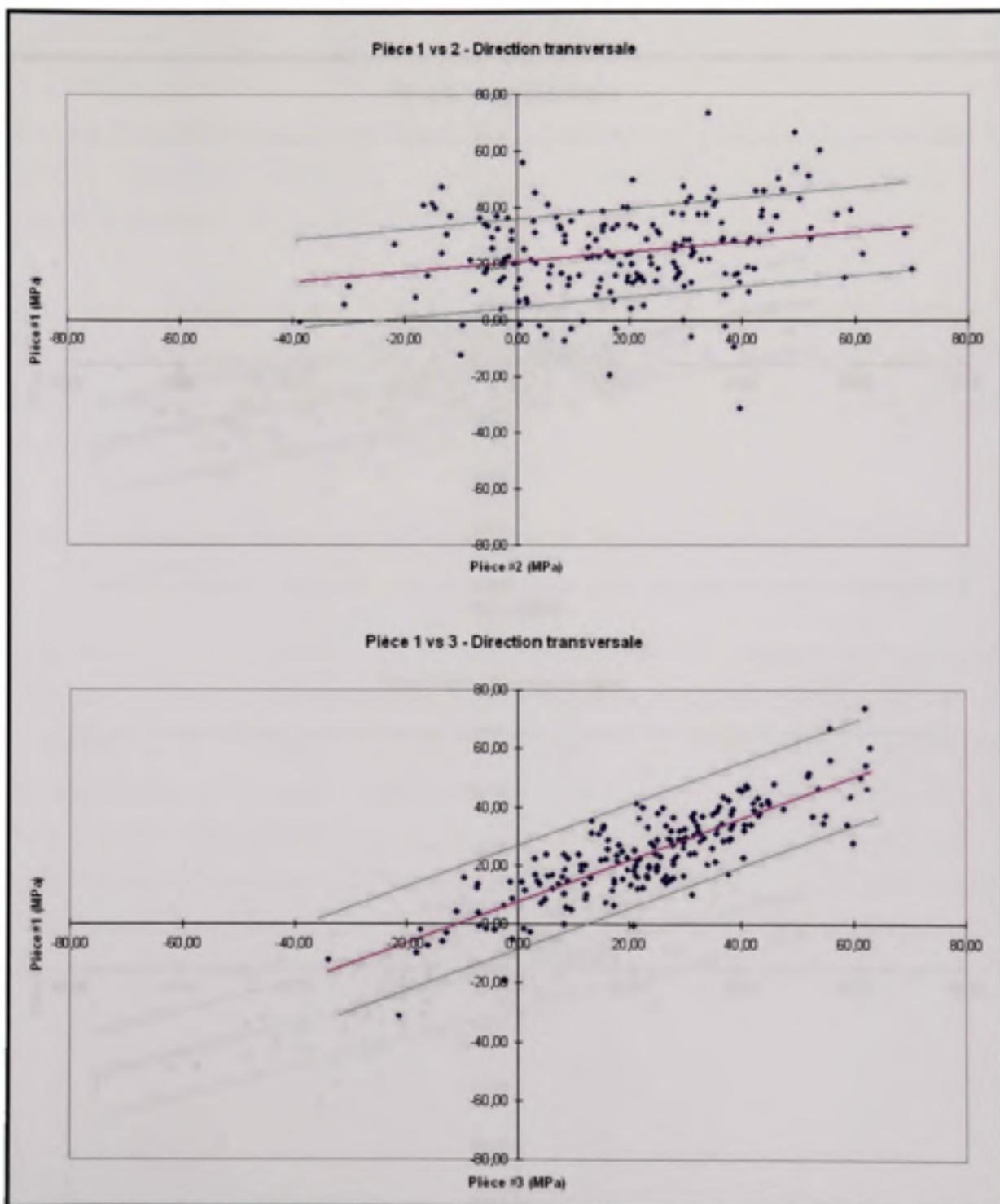
#### 6.2 Comparaison des résultats obtenus pour les six composantes

##### 6.2.1 Comparaison des contraintes pour les échantillons de matériau standard

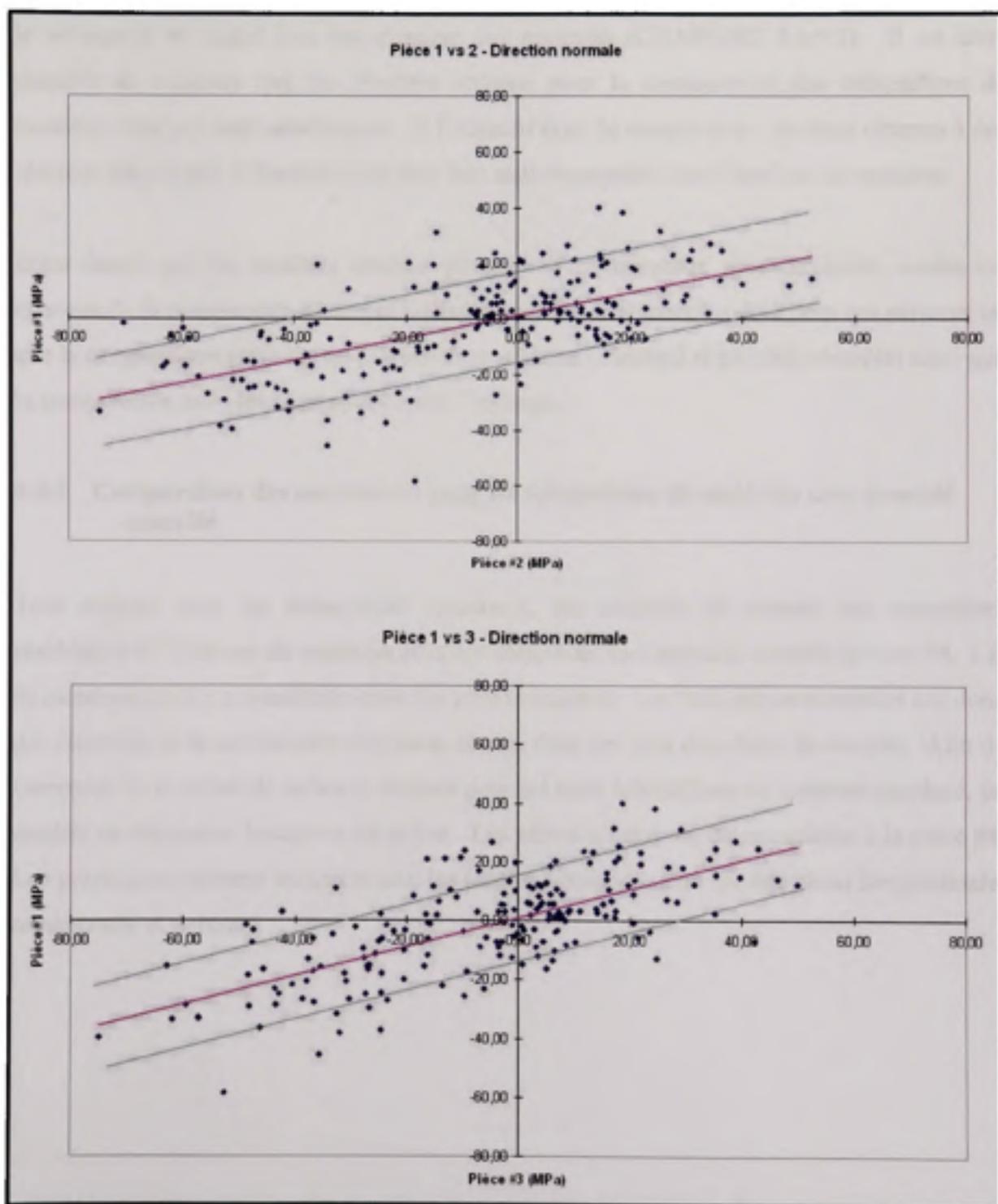
Les résultats de mesures des contraintes résiduelles à l'intérieur du matériau pour les composantes standard (pièces #1, 2 et 3) montrent qu'il y a similitude entre les trois morceaux. Les trois pièces mesurées ont donc des répartitions de contraintes similaires, et cela dans les trois directions de mesure. Afin de comparer les résultats de mesures obtenus pour les trois échantillons de matériau standard, un modèle de régression linéaire a été utilisé. Les pièces #2 et 3 ont été comparées à la pièce #1. Les graphiques suivants montrent tous les résultats obtenus selon les directions longitudinale, transversale et normale.



**Figure 6.1** Comparaison des mesures de contraintes longitudinales des pièces 2 et 3 par rapport à la pièce 1.



**Figure 6.2** Comparaison des mesures de contraintes transversales des pièces 2 et 3 par rapport à la pièce 1.



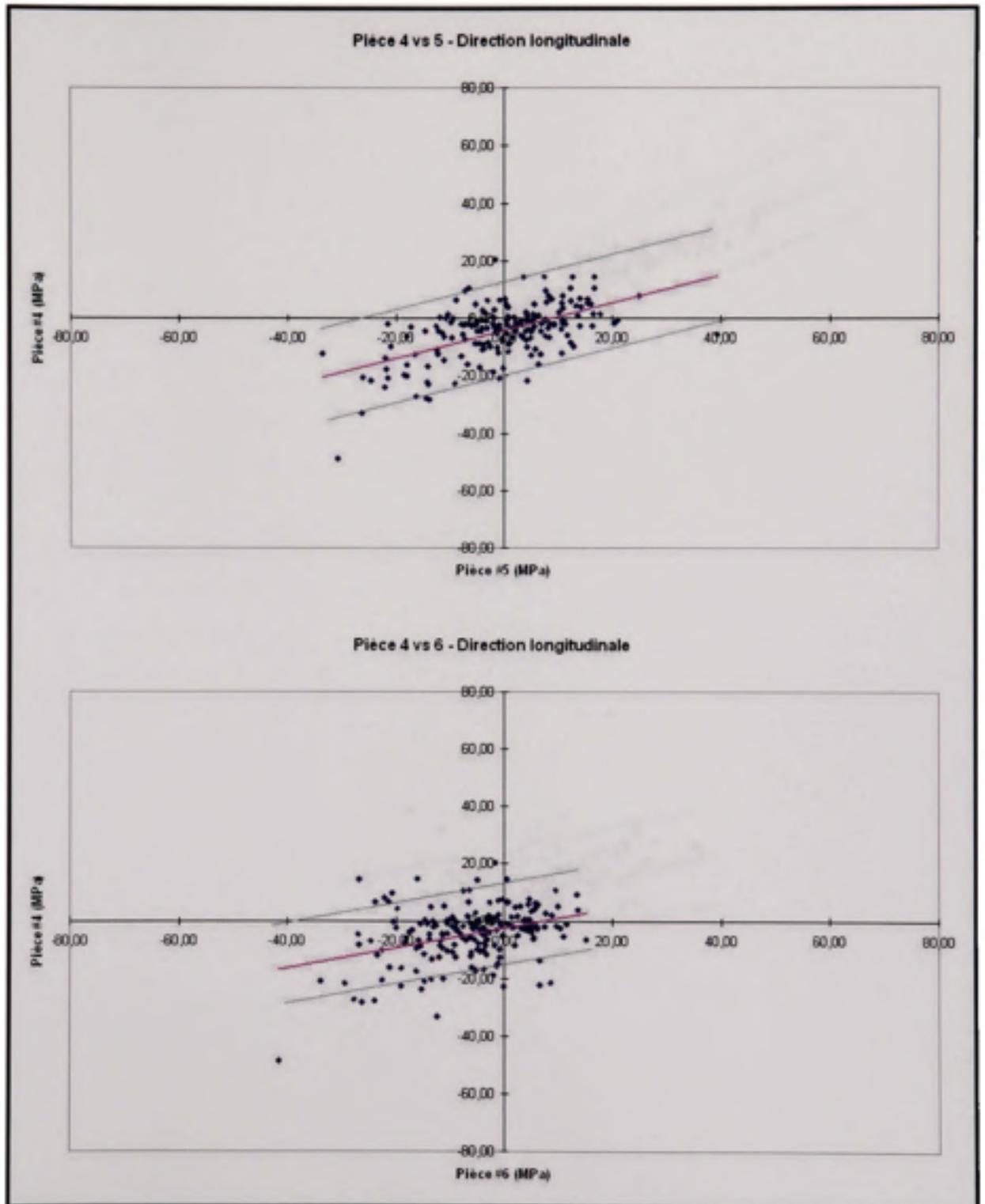
**Figure 6.3** Comparaison des mesures de contraintes normales des pièces 2 et 3 par rapport à la pièce 1.

Sur les graphiques, outre les droites de régression linéaire, l'erreur moyenne de mesures évaluées  $\pm 14$  MPa a été représentée. L'erreur est évaluée à partir des mesures effectuées sur le référentiel de nickel lors des mesures aux neutrons (CHAPITRE 5.6.5.2). Il est alors possible de conclure que les résultats obtenus pour la comparaison des échantillons de matériau standard sont satisfaisants. Si l'objectif était de comparer les résultats obtenus à des résultats théoriques, il faudrait aller plus loin statistiquement dans l'analyse des mesures.

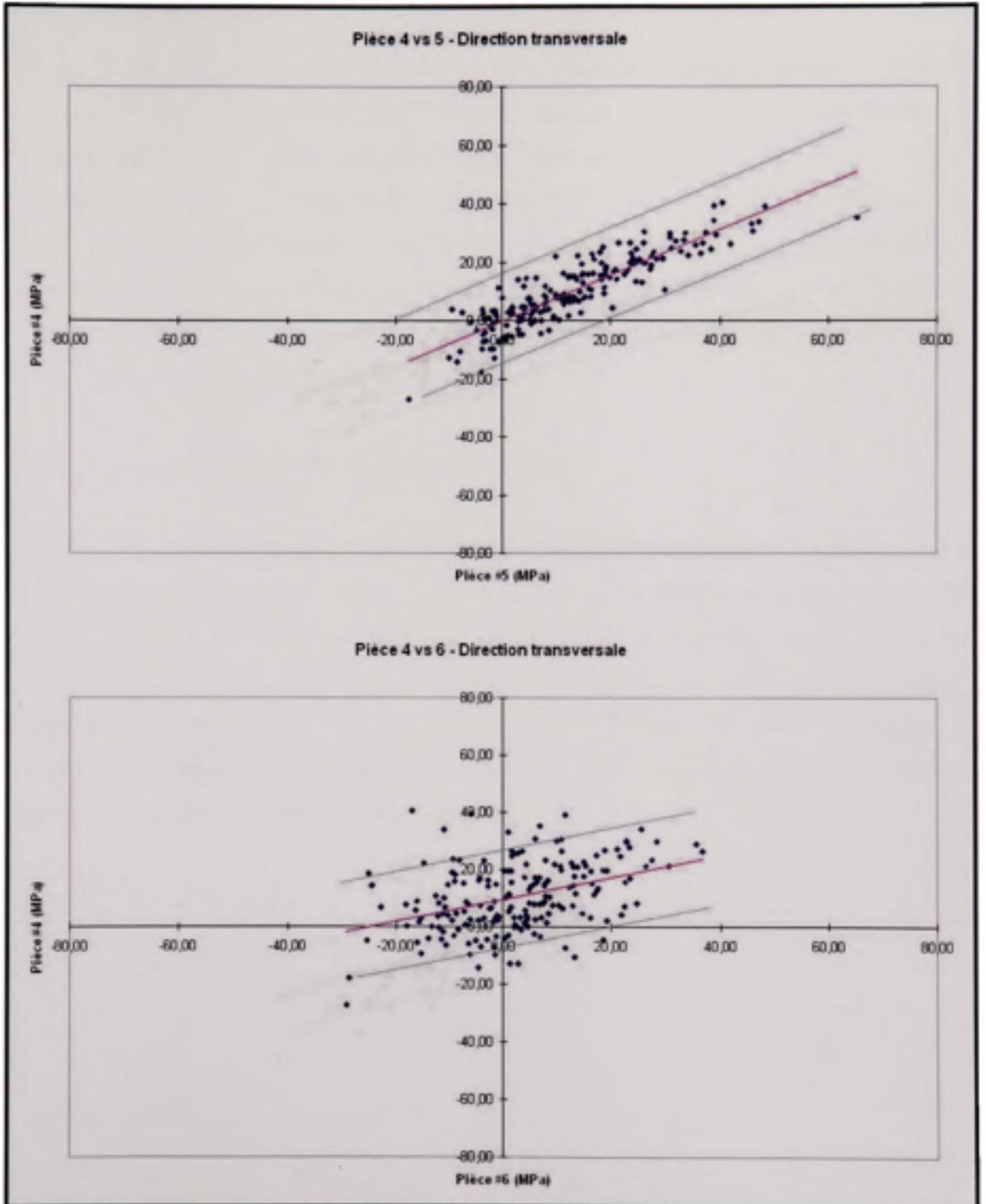
Étant donné que les résultats obtenus pour les trois morceaux sont similaires, seules les mesures de la composante #1 seront utilisées pour les analyses plus détaillées qui suivront tel que la comparaison entre les deux types de matériaux (standard et procédé contrôlé) ainsi que la comparaison avec les contraintes après l'usinage.

### **6.2.2 Comparaison des contraintes pour les échantillons de matériau avec procédé contrôlé**

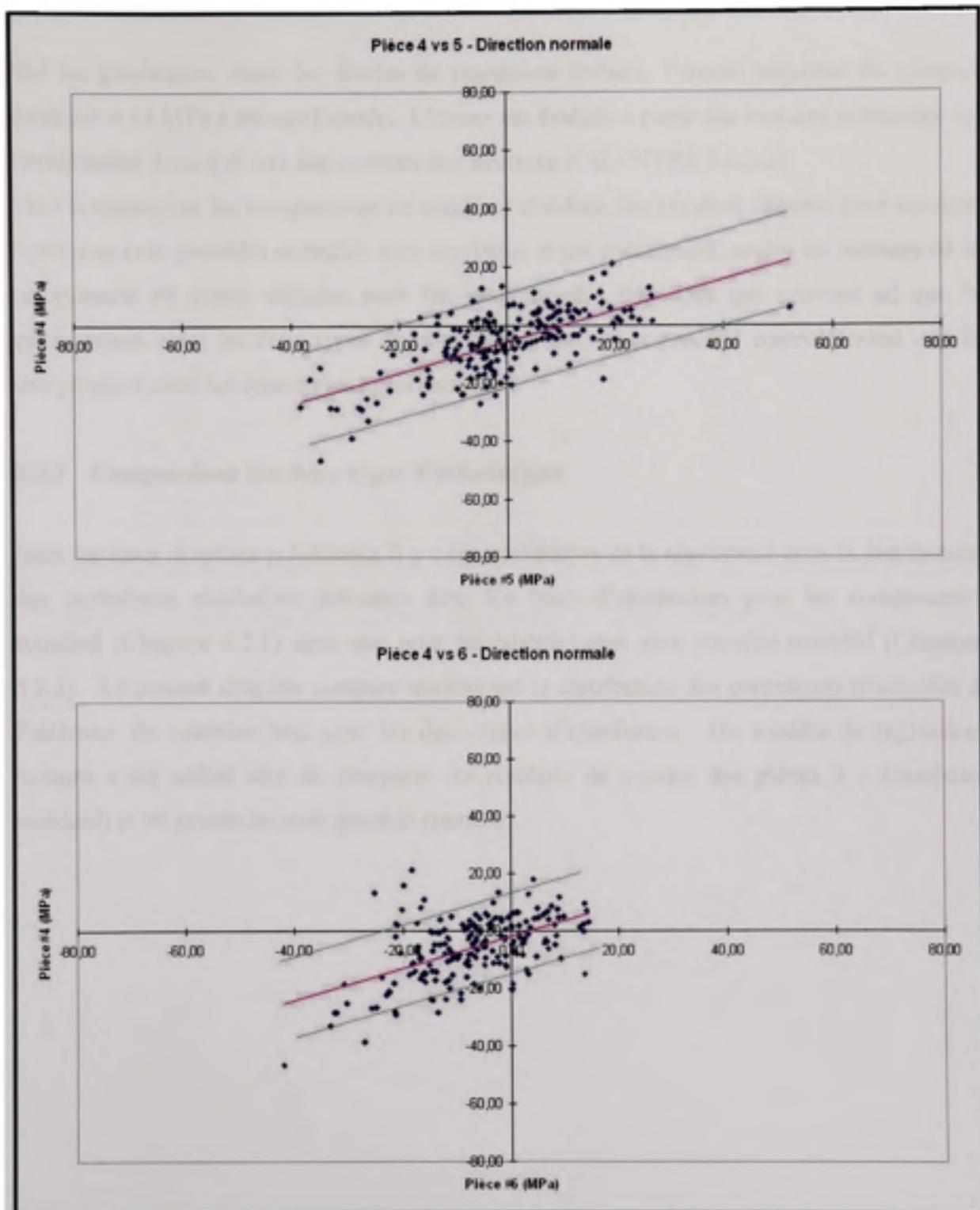
Tout comme pour les échantillons standards, les résultats de mesure des contraintes résiduelles à l'intérieur du matériau pour les composantes à procédé contrôlé (pièces #4, 5 et 6) montrent qu'il y a similitude entre les trois morceaux. Les trois pièces mesurées ont donc des répartitions de contraintes similaires, et cela dans les trois directions de mesure. Afin de comparer les résultats de mesures obtenus pour les trois échantillons de matériau standard, un modèle de régression linéaire a été utilisé. Les pièces #5 et 6 ont été comparées à la pièce #4. Les graphiques suivants montrent tous les résultats obtenus selon les directions longitudinale, transversale et normale.



**Figure 6.4** Comparaison des mesures de contraintes longitudinales des pièces 5 et 6 par rapport à la pièce 4.



**Figure 6.5** Comparaison des mesures de contraintes transversales des pièces 5 et 6 par rapport à la pièce 4.



**Figure 6.6** Comparaison des mesures de contraintes normales des pièces 5 et 6 par rapport à la pièce 4.

Sur les graphiques, outre les droites de régression linéaire, l'erreur moyenne de mesures évaluées  $\pm 14$  MPa a été représentée. L'erreur est évaluée à partir des mesures effectuées sur le référentiel de nickel lors des mesures aux neutrons (CHAPITRE 5.6.5.2).

Tout comme pour les composantes de matériau standard, les résultats obtenus pour les trois morceaux avec procédés contrôlés sont similaires et par conséquent, seules les mesures de la composante #4 seront utilisées pour les analyses plus détaillées qui suivront tel que la comparaison entre les deux types de matériaux (standard et procédé contrôlé) ainsi que la comparaison avec les contraintes après usinage.

### **6.2.3 Comparaison des deux types d'échantillons**

Dans les deux chapitres précédents, il y a eu constatation de la répétitivité dans la distribution des contraintes résiduelles présentes dans les bruts d'aluminium pour les composantes standard (Chapitre 6.2.1) ainsi que pour les composantes avec procédé contrôlé (Chapitre 6.2.2). Le présent chapitre compare maintenant la distribution des contraintes résiduelles à l'intérieur du matériau brut pour les deux types d'aluminium. Un modèle de régression linéaire a été utilisé afin de comparer les résultats de mesure des pièces # 1 (matériau standard) et #4 (matériau avec procédé contrôlé).

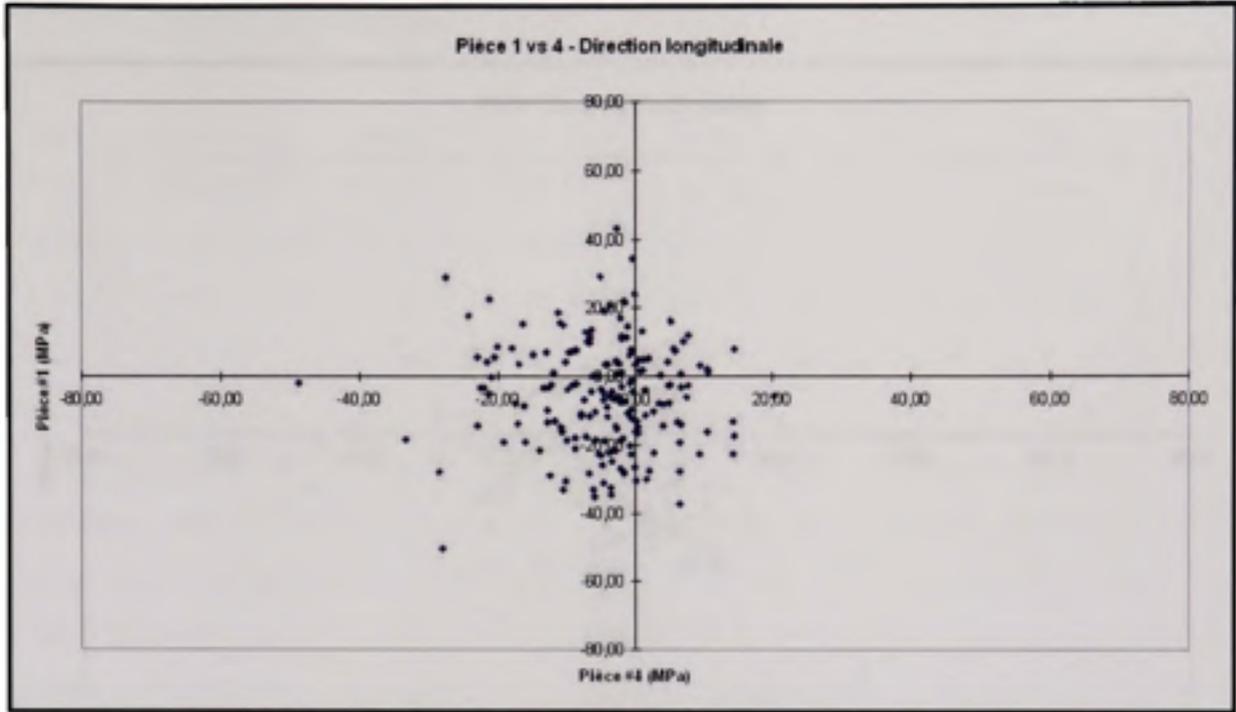


Figure 6.7 Comparaison des mesures de contraintes longitudinales des pièces #1 et 4.

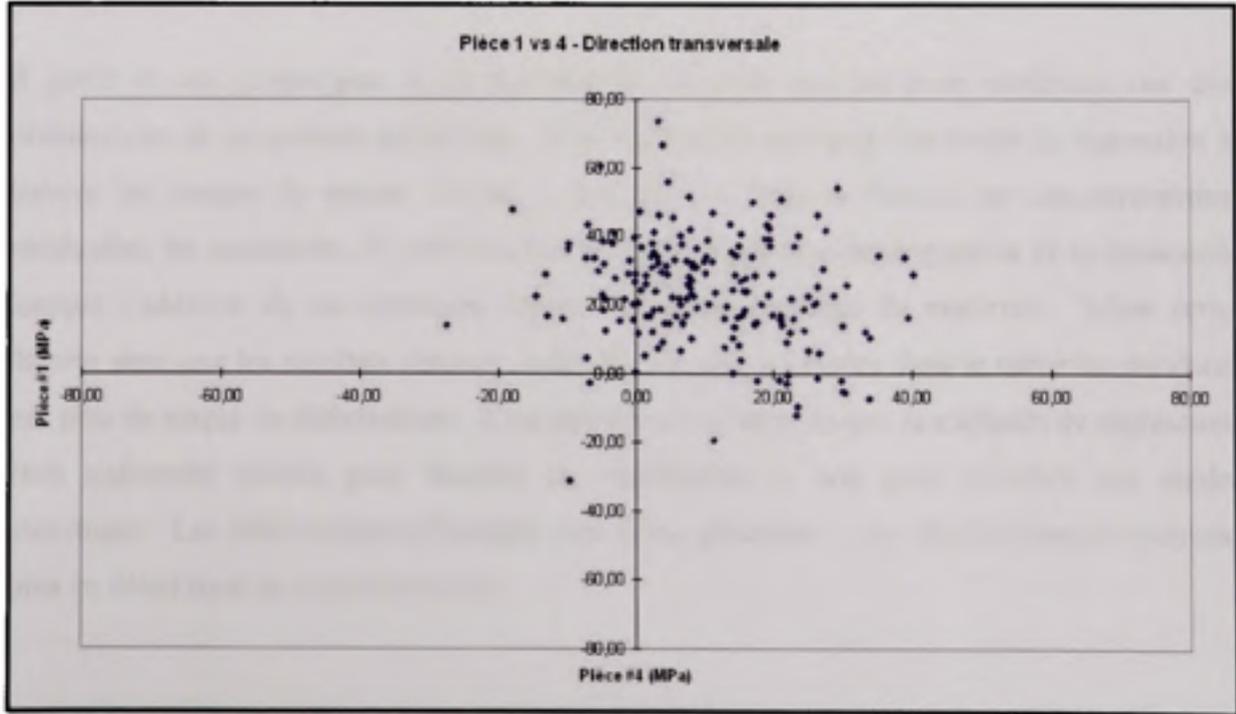
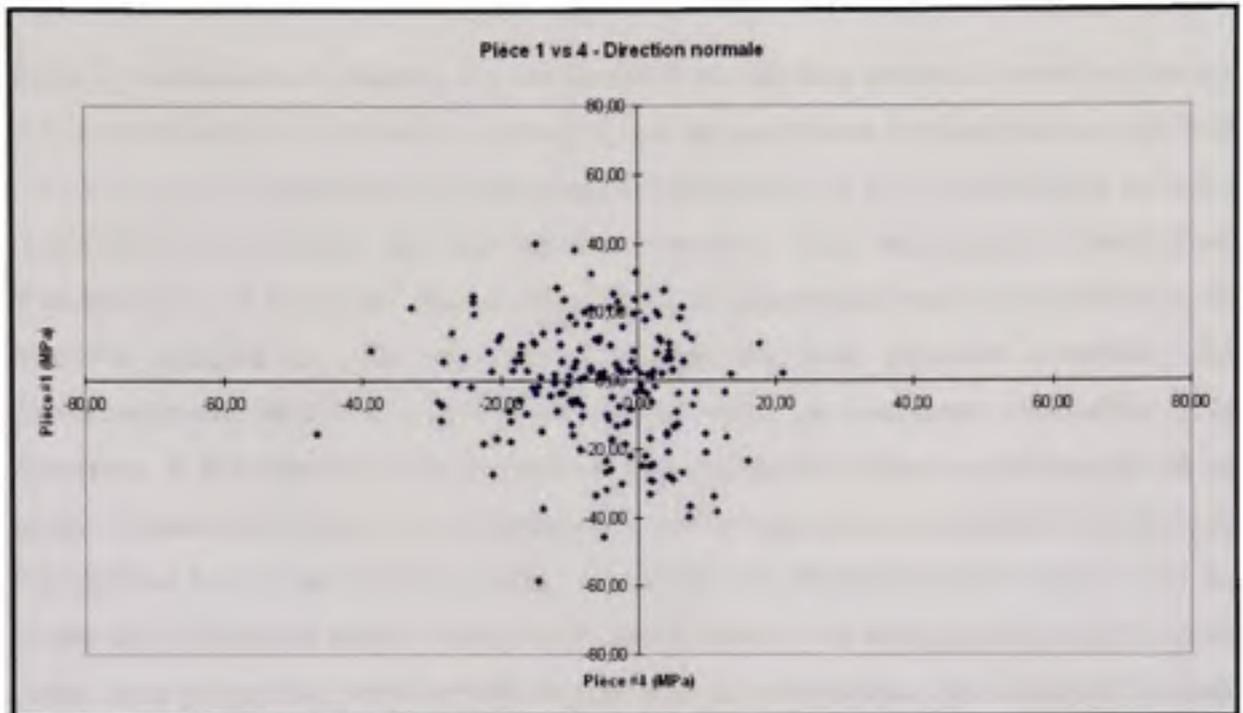


Figure 6.8 Comparaison des mesures de contraintes transversales des pièces #1 et 4.



**Figure 6.9** Comparaison des mesures de contraintes normales des pièces #1 et 4.

À partir de ces graphiques, il est possible de constater que les deux matériaux ont des distributions de contraintes différentes. Il est impossible de tracer une droite de régression à travers les nuages de points obtenus. Tel que vu dans la théorie sur les contraintes résiduelles, les contraintes du matériau brut et de l'usinage peuvent engendrer de la distorsion lorsque l'addition de ces dernières dépasse la limite élastique du matériau. Selon cette théorie ainsi que les résultats obtenus ci-dessus, les pièces usinées dans le matériau standard ont plus de risque de déformation. Il est important de rappeler que la méthode de régression était seulement utilisée pour faciliter la visualisation et non pour effectuer une étude statistique. Les observations effectuées sont donc générales. Les résultats seront analysés plus en détail dans le chapitre suivant.

### **6.3 Analyse des contraintes sur les échantillons de matériau**

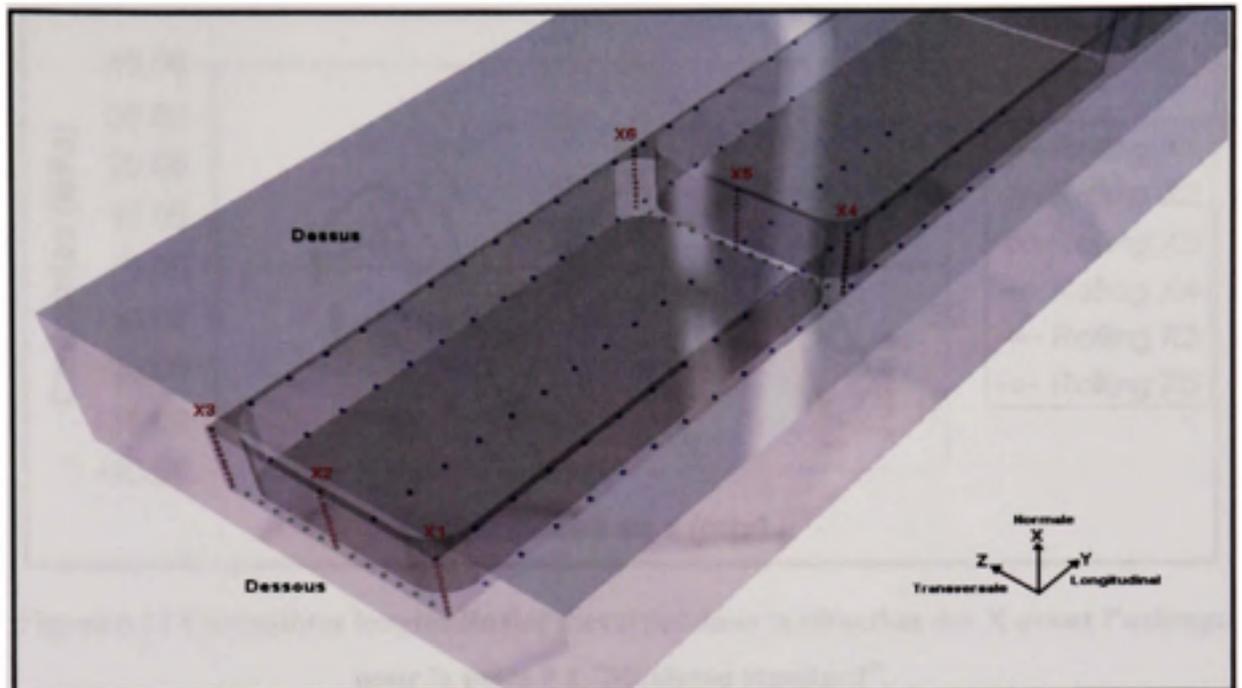
Jusqu'à présent dans ce chapitre, il a été démontré que les trois pièces de matériau standard ont des distributions de contraintes similaires, que les trois pièces de matériau avec procédés contrôlés ont des distributions de contraintes similaires et qu'il y a une différence entre les distributions de contraintes des deux types de matériaux. Dans cette section, l'objectif est d'analyser plus en détails les résultats de mesures de contraintes obtenus pour une pièce de matériau standard et pour une pièce de matériau avec procédés contrôlés afin d'éventuellement vérifier s'il existe une relation entre les contraintes résiduelles et la distorsion. Il faut rappeler que seulement certains endroits de la pièce ont été mesurés dû au temps de mesure très long et que les points mesurés correspondent aux endroits communs de l'échantillon brut et de la pièce usinée. De ce fait, les observations qui seront faites au niveau de l'échantillon avant l'usinage sont plus limitées. Une cartographie complète de la composante permettrait probablement de tirer plus de conclusions. Par exemple, il serait possible d'analyser le meilleur endroit où positionner la composante usinée pour limiter les déformations.

#### **6.3.1 Analyse des contraintes sur une pièce de matériau standard**

Tel que vu dans le Chapitre 5.6.3, des mesures de contraintes ont été effectuées selon différentes directions identifiées X1 à X6, Y1 à Y5, Z1 et Z2. Cela dans le but d'expliquer les déformations de la pièce une fois usinée.

##### **6.3.1.1 Mesures dans la direction des X**

Les mesures effectuées dans la direction des X, c'est-à-dire selon l'épaisseur de la composante se situent au bord de la future pièce usinée (X1, X2 et X3) et au centre du premier mur (X4, X5 et X6) selon Y. La figure qui suit montre la position des points de mesures utilisés à l'intérieur du matériau brut selon la direction des X.



**Figure 6.10 Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des X pour les pièces #1, 2, 3.**

Les résultats obtenus pour l'échantillon # 1 selon les trois directions (longitudinale, transversale et normale) sont présentés dans les graphiques suivants.

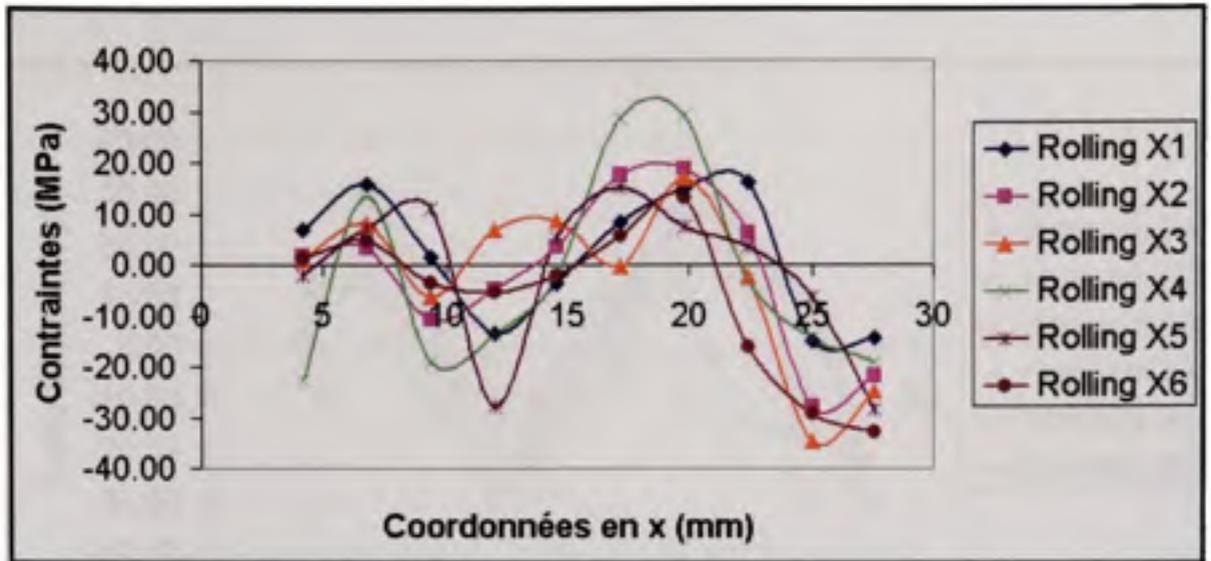


Figure 6.11 Contraintes longitudinales mesurées dans la direction des X avant l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard".

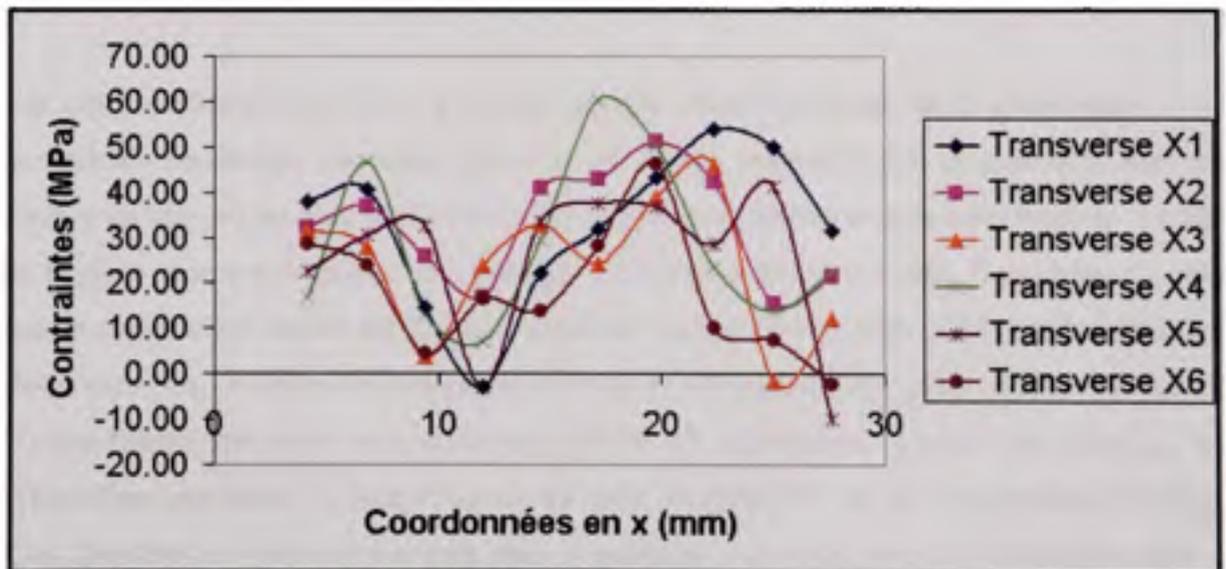
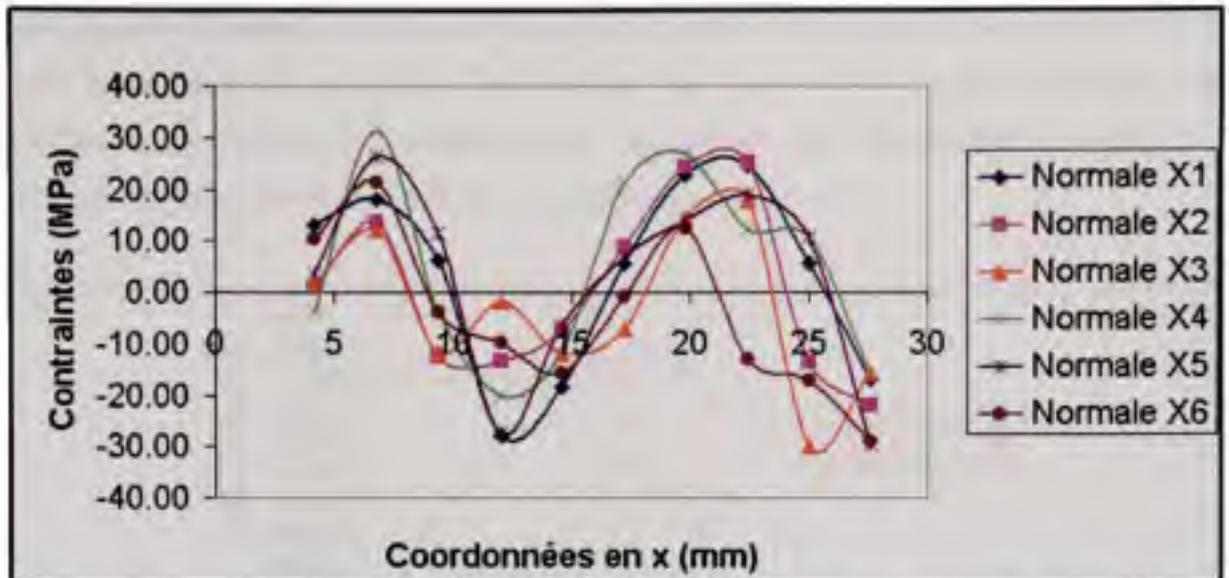


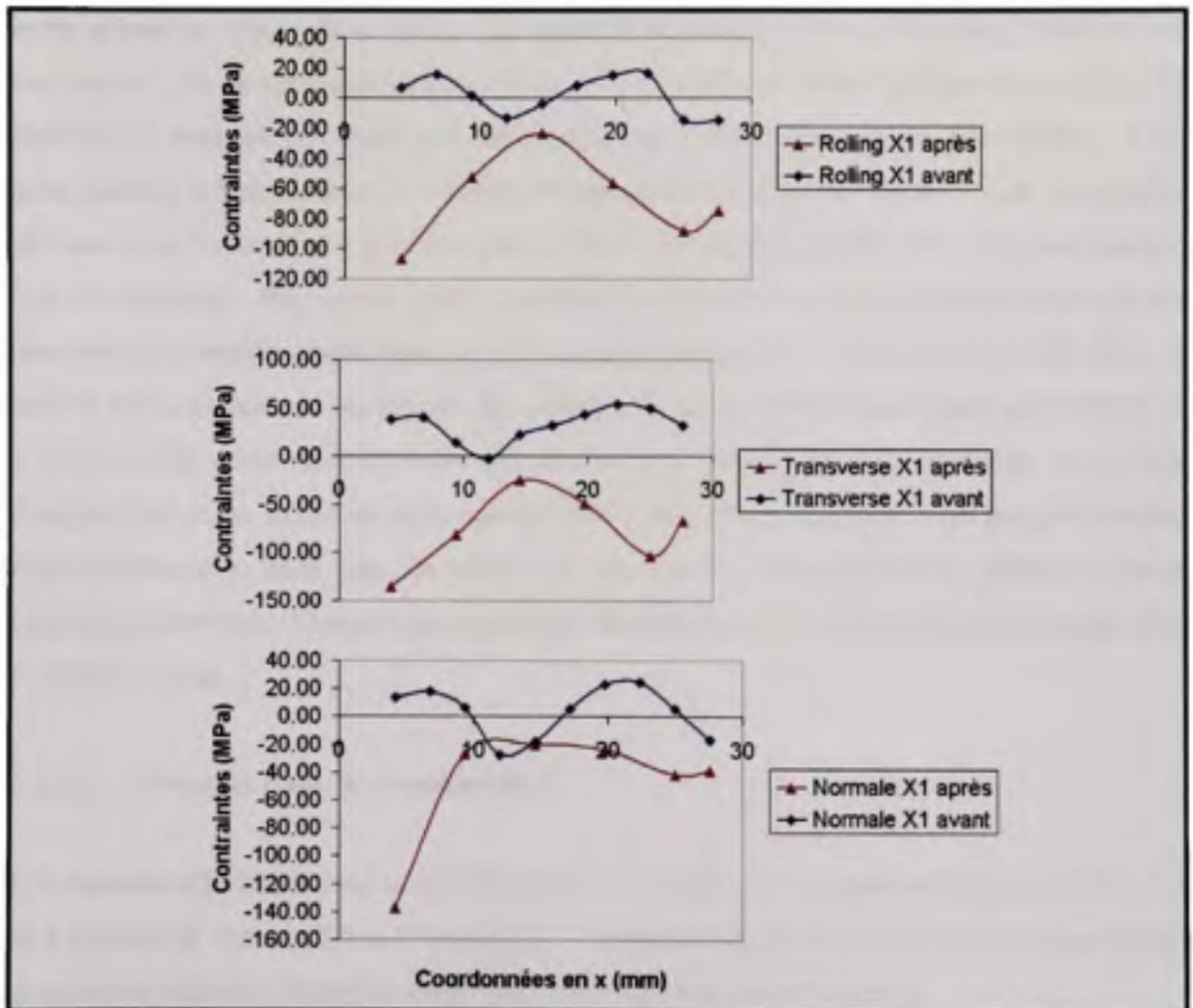
Figure 6.12 Contraintes transversales mesurées dans la direction des X avant l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard".



**Figure 6.13 Contraintes normales mesurées dans la direction des X avant l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard".**

Les courbes montrent qu'il n'y a pas de symétrie selon l'épaisseur de la composante. Les contraintes résiduelles mesurées dans les directions longitudinales et normales sont en tension en dessous du bloc tandis que celles mesurées au dessus sont en compression. Le bas de la pièce se trouve à gauche du graphique et le haut se trouve à droite. Il est donc possible que la composante usinée subisse une distorsion autour de l'axe des Z lors du balancement des contraintes. Pour les trois directions de mesures (longitudinale, transversale et normale), les contraintes mesurées sont similaires pour les six trajectoires. Ce qui veut dire que les échantillons possèdent de bonnes symétries selon les plans XY et XZ aux abords de la pièce. Ces symétries ne veulent pas dire que la pièce ne peut pas subir de distorsion suite à l'usinage. Cela peut dépendre de la symétrie de la composante usinée, de sa position dans l'échantillon et des contraintes induites par l'usinage. Dans le cas de la composante usinée utilisée pour les expérimentations, il y a symétrie selon les plans XY et XZ et cette dernière a été positionnée au centre du bloc de matériau brut selon ces mêmes plans. L'usinage possède les mêmes conditions pour chacun des côtés. On peut donc s'attendre à ne pas avoir de distorsion autour de l'axe des X et autour de l'axe des Y.

Des mesures de contraintes ont aussi été effectuées suite à l'usinage aux mêmes endroits que dans l'échantillon de matériau. Ces mesures vont permettre d'analyser l'évolution des contraintes en fonction de la déformation. Les mesures obtenues toujours à l'aide de la méthode du neutron sont illustrées par les graphiques qui suivent.



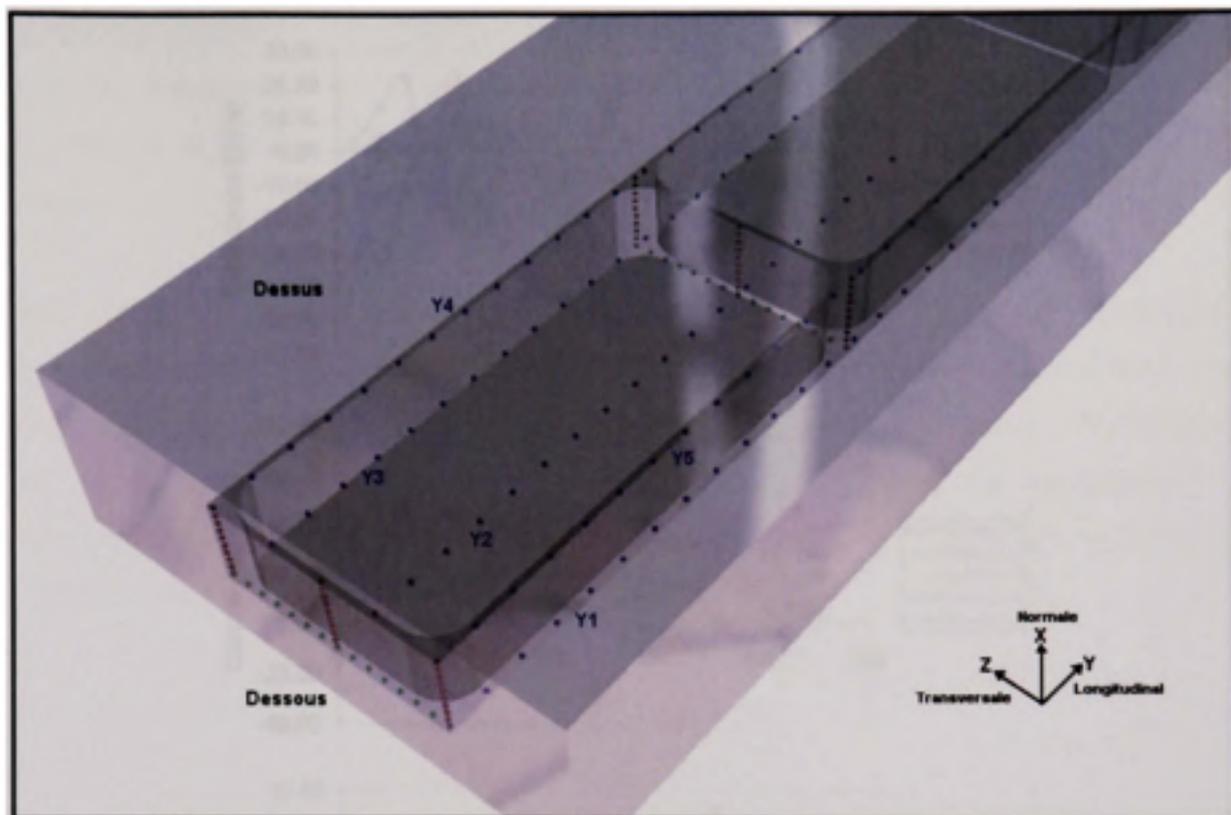
**Figure 6.14** Contraintes mesurées dans la direction des X avant et après l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard".

Les graphiques ci-dessus permettent de visualiser l'impact des contraintes induites après l'usinage. Des contraintes en compression ont été induites en surface par le procédé

d'usinage. Les graphiques montrent que les contraintes induites sont plus importantes aux extrémités de la courbe. Cela est dû en parti au fait que ces points de mesures se situent sur le dessus et sur le dessous de la pièce usinée. Ils tiennent donc compte des contraintes induites par l'usinage en bout et l'usinage de côté. Les extrémités tiennent également compte du relâchement des contraintes. Dans le cas de la base (gauche du graphique) le relâchement est limité puisqu'il est retenu par la base. C'est une explication possible de la différence entre la base et le haut de la pièce. La seconde explication est au niveau de l'addition des contraintes. On observe que les endroits du matériau brut où les contraintes résiduelles sont faibles sont ceux où les contraintes résiduelles après l'usinage sont les plus faibles. Cela nous ramène à l'explication des efforts mécaniques du chapitre 3.2.6.1. Les contraintes initiales étant faibles, il est possible que la limite élastique du matériau ne soit pas dépassée lors de l'usinage. Par contre, cette hypothèse ne peut être confirmée étant donné que les mesures de contraintes effectuées après l'usinage se situent à 1mm du bord de la pièce et qu'elle est la moyenne d'un volume de contrôle. Il faudrait faire des mesures plus détaillées à l'aide d'une autre méthode telle que le rayon X puisse que cette méthode donne une meilleure précision au niveau de la mesure près de la surface. De plus, il est possible que les efforts thermiques ainsi que les efforts causés par les changements de phases puissent également intervenir. Comme aucune mesure thermique n'a été effectuée, aucune conclusion ne peut-être tirée.

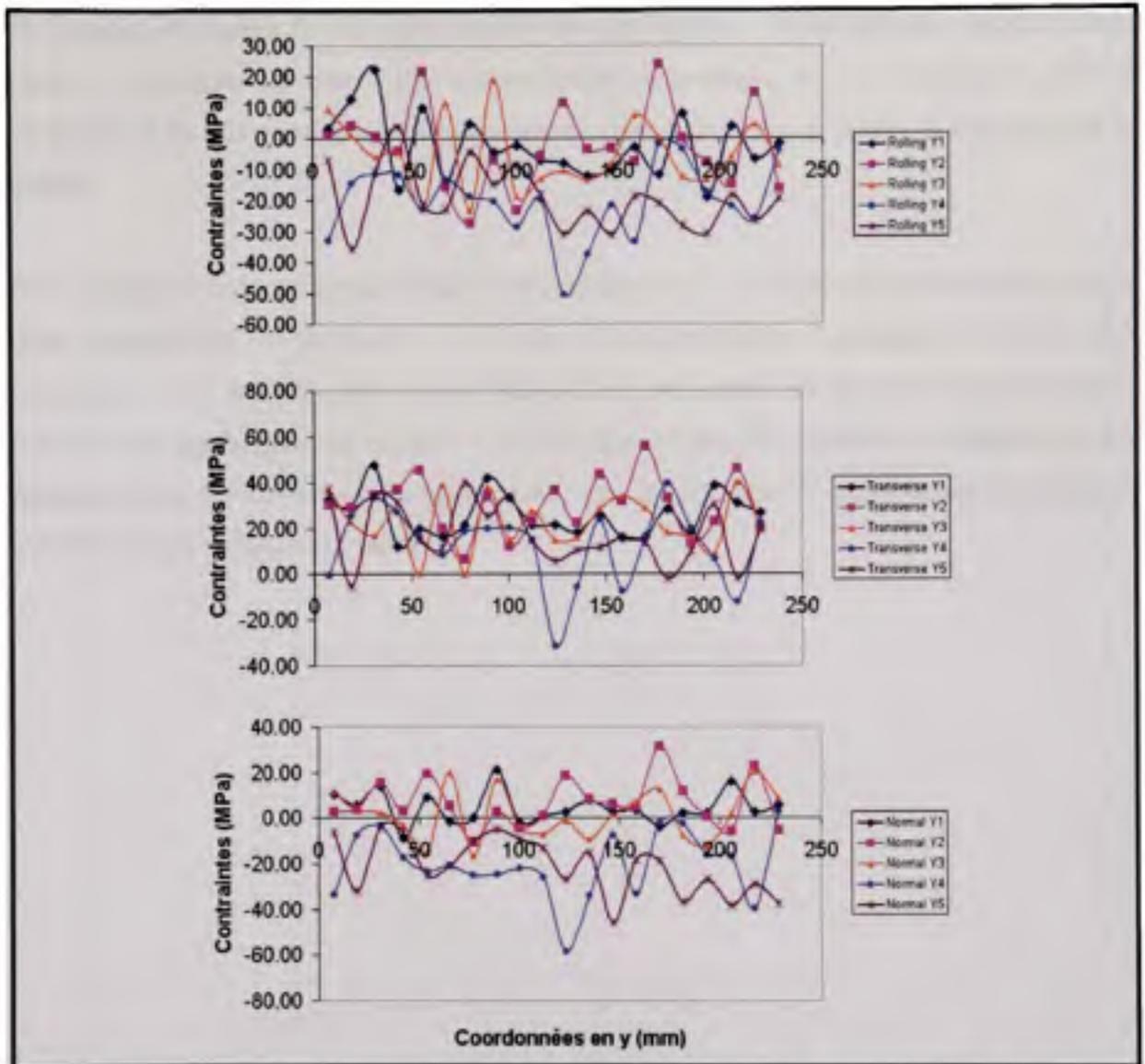
### **6.3.1.2 Mesures dans la direction des Y**

Les mesures effectuées dans la direction des Y se situent sur le dessous de la pièce (Y1, Y2 et Y3) et sur le dessus (Y4 et Y5) selon X. La figure qui suit montre la position des points de mesures utilisés à l'intérieur du matériau brut selon la direction des Y.



**Figure 6.15 Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des Y pour les pièces #1, 2 et 3 "Matériau standard".**

Les résultats obtenus sont présentés dans les graphiques suivants.

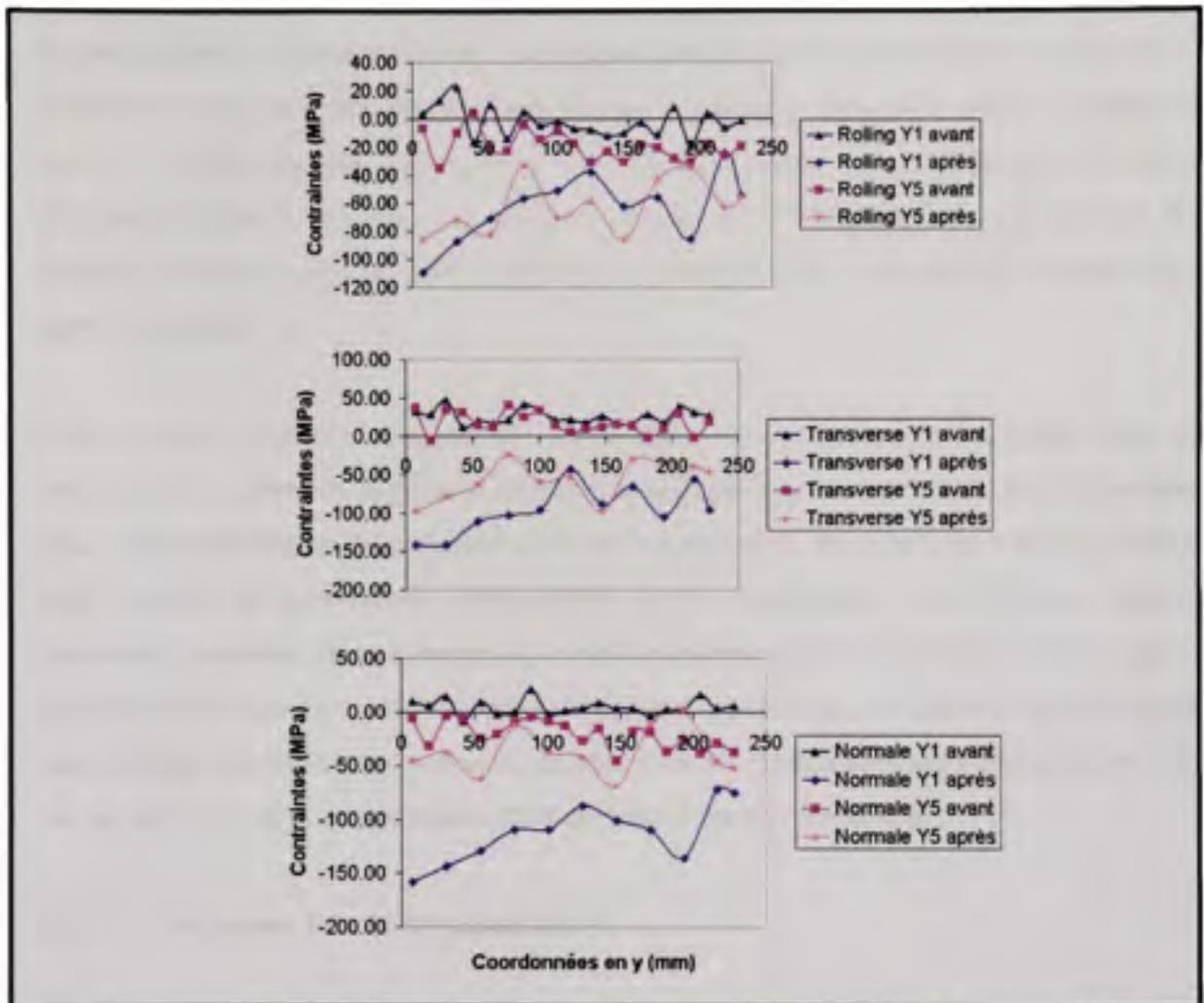


**Figure 6.16 Contraintes mesurées dans la direction Y avant l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard".**

Les contraintes mesurées selon les Y varient beaucoup mais se situent presque toujours dans une échelle de plus ou moins 20 MPa. Cette valeur pourrait être plus importante si l'on tient compte de l'erreur de mesure. Cependant, comme l'erreur de mesure est pratiquement la même pour tous les points et que l'étude faite ici est comparative, ce chiffre n'a pas une grande importance. La constatation intéressante se situe au niveau de la différence entre les contraintes situées en dessous de la pièce et celles situées au dessus. Les contraintes situées

en dessous de la pièce sont plus importantes en compression. Cette différence est observable pour les directions de contraintes longitudinales et normales et par conséquent pourrait contribuer à la déformation de la pièce usinée autour de l'axe Z (selon la longueur de la pièce).

Des mesures de contraintes ont aussi été effectuées suite à l'usinage aux mêmes endroits que dans l'échantillon de matériau. Ces mesures vont permettre d'analyser l'évolution des contraintes. Les mesures obtenues toujours à l'aide de la méthode du neutron sont illustrées par les trois graphiques qui suivent. Sur ces graphiques, les courbes Y1 représentent les mesures faites dans le bas de la pièce tandis que les courbes Y5 représentent les mesures effectuées dans le haut de la pièce.



**Figure 6.17 Contraintes mesurées dans la direction des Y avant et après l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard".**

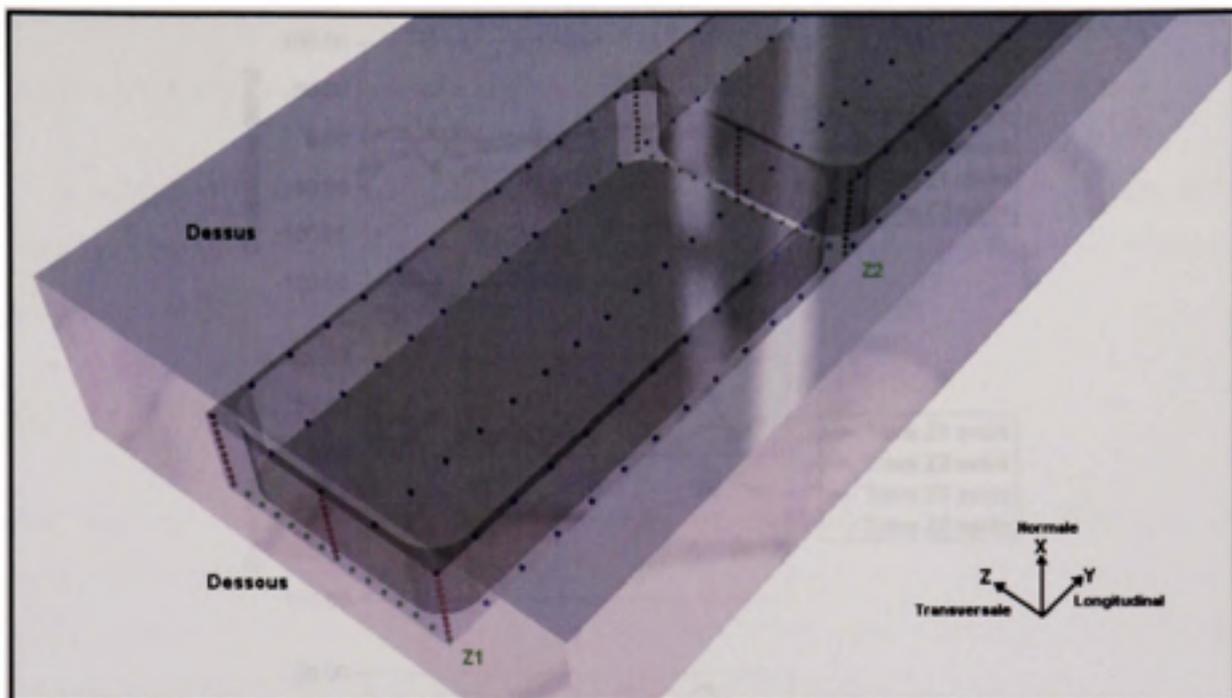
Pour les contraintes longitudinales après l'usinage, il est possible de constater que les contraintes en compression sont plus importantes au début de la pièce et diminuent en allant vers le centre. Cette distribution de contraintes due au balancement des contraintes suite à l'usinage peut refléter la déformation géométrique de la composante. Étant donné que seule la pièce #1 a été mesurée suite à l'usinage, il n'est pas possible de conclure sur une relation entre les contraintes et la déformation. Il est également possible de voir que selon la direction longitudinale, les contraintes du bas de la pièce et celles du haut suivent les mêmes tendances.

Le graphique des contraintes transversales étant fonction de la direction des Y, les contraintes mesurées ne sont dans une direction qui permet de pas de poser des hypothèses intéressantes quant à l'influence des contraintes. En d'autres mots, les contraintes transversales n'influencent pas la distorsion qui est dans le sens des Y (longitudinal). Cependant, il est possible d'observer que les contraintes qui se suivaient avant l'usinage se suivent toujours après l'usinage.

Tout comme pour les contraintes longitudinales, les contraintes normales sont plus importantes au début de la pièce et diminuent en allant vers le centre mais seulement dans le bas. Cette distribution de contraintes due au balancement des contraintes suite à l'usinage peut refléter la déformation géométrique de la composante. La différence entre les contraintes mesurées dans le bas (Y1) et celles mesurées dans le haut (Y5) peut s'expliquer par le fait que la composante est fermée seulement dans le bas. De ce fait, suite à l'usinage dans le haut, les contraintes normales peuvent subir un relâchement sans être retenues. Dans ce cas, la forme de la composante usinée devient un facteur important.

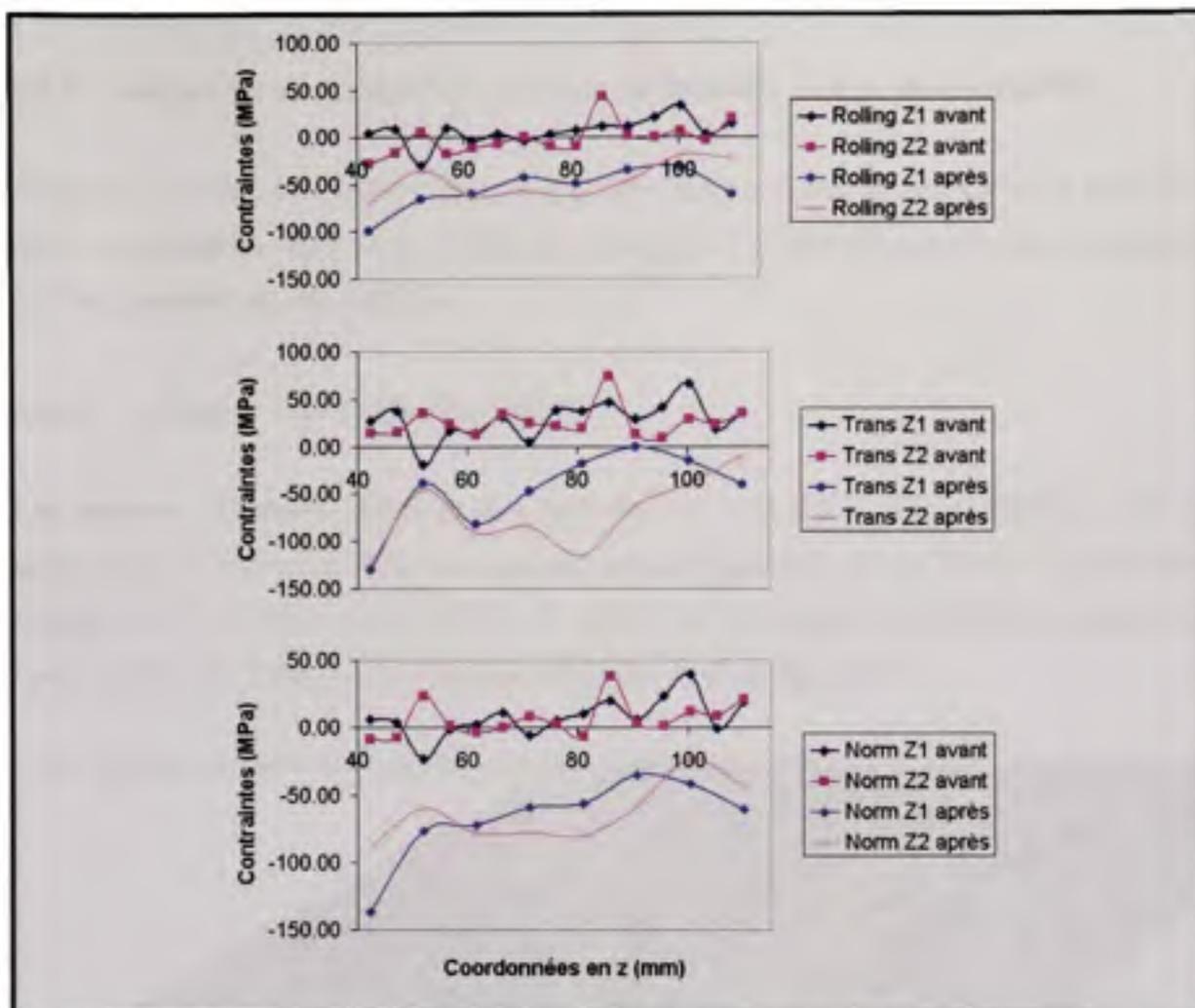
### **6.3.1.3 Mesures dans la direction des Z**

Les mesures effectuées dans la direction des Z se situent dans le bas de la pièce à l'avant et au niveau du premier mur intérieur selon la direction des Y. Elles sont respectivement identifiées par Z1 et Z2. La figure qui suit montre la position des points de mesures utilisés à l'intérieur du matériau brut selon la direction des Z.



**Figure 6.18 Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des Z pour les pièces #1, 2 et 3 "Matériau standard".**

Les résultats obtenus sont présentés par les graphiques suivants.



**Figure 6.19** Contraintes mesurées dans la direction des Z avant et après l'usinage pour la pièce # 1 "Matériau standard".

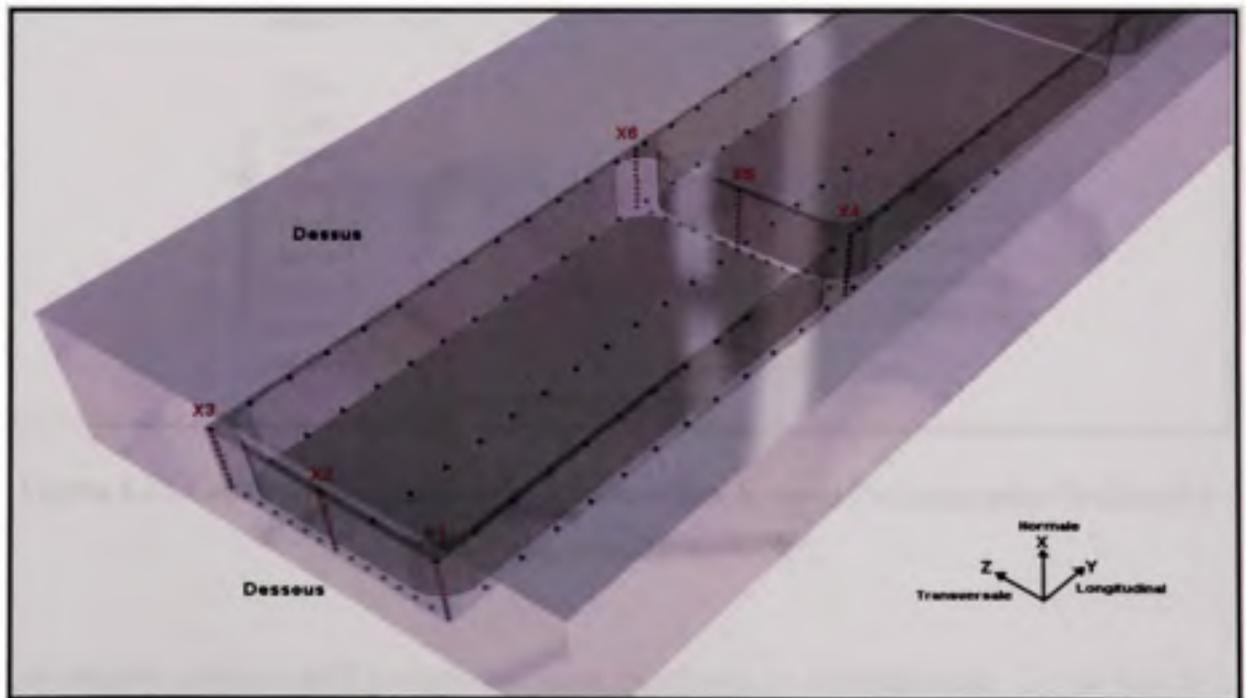
Les courbes de mesures obtenues dans la direction des Z avant l'usinage ne permettent pas de conclure quant à la symétrie dans cette direction. Quoique les variations de contraintes ne soient pas très importantes, il est toutefois possible d'observer des zones de contraintes plus élevées qui peuvent provenir du procédé de mise en forme. Il faut alors regarder les contraintes mesurées suite à l'usinage pour voir si des observations ou des hypothèses peuvent être faites. Pour les trois directions de contraintes, les courbes tracées à l'aide des mesures faites après l'usinage montrent qu'il y a une assez bonne symétrie dans la distribution des contraintes.

### 6.3.2 Analyse des contraintes sur une pièce de matériau avec procédé contrôlé

Dans cette section, une analyse identique à celle effectuée pour la section 6.3.1 sera faite mais en utilisant les résultats de contraintes obtenus pour l'échantillon provenant du matériau dont les procédés ont été contrôlés.

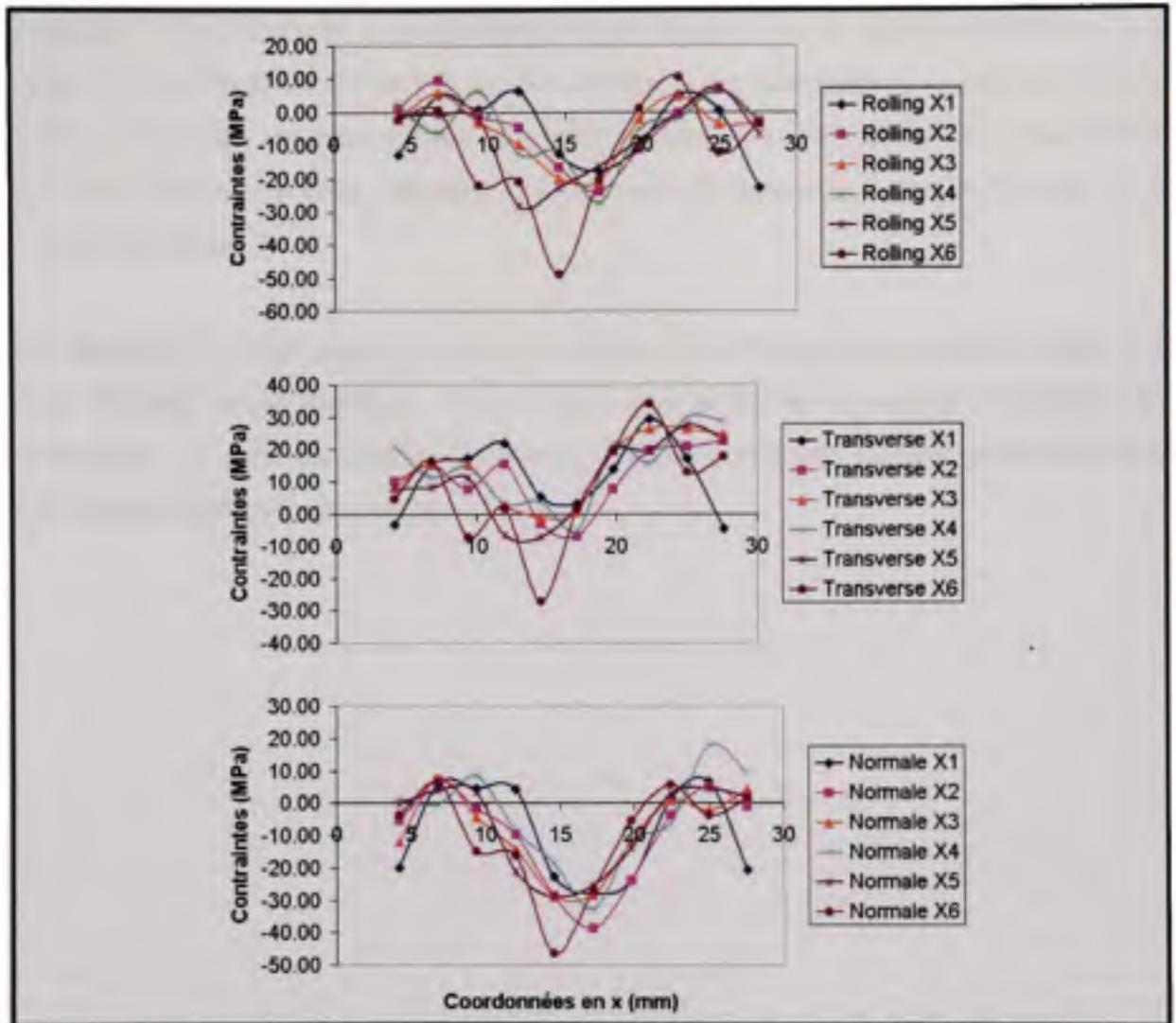
#### 6.3.2.1 Mesures dans la direction des X

Les mesures effectuées dans la direction des X, c'est-à-dire selon l'épaisseur de la composante se situent au bord de la future pièce usinée (X1, X2 et X3) et au centre du premier mur (X4, X5 et X6) selon Y. La figure qui suit montre la position des points de mesures utilisés à l'intérieur du matériau brut selon la direction des X.



**Figure 6.20** Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des X pour les pièces #4, 5 et 6 "Matériau procédé contrôlé".

Les résultats obtenus pour l'échantillon # 4 sont présentés dans les graphiques suivants.

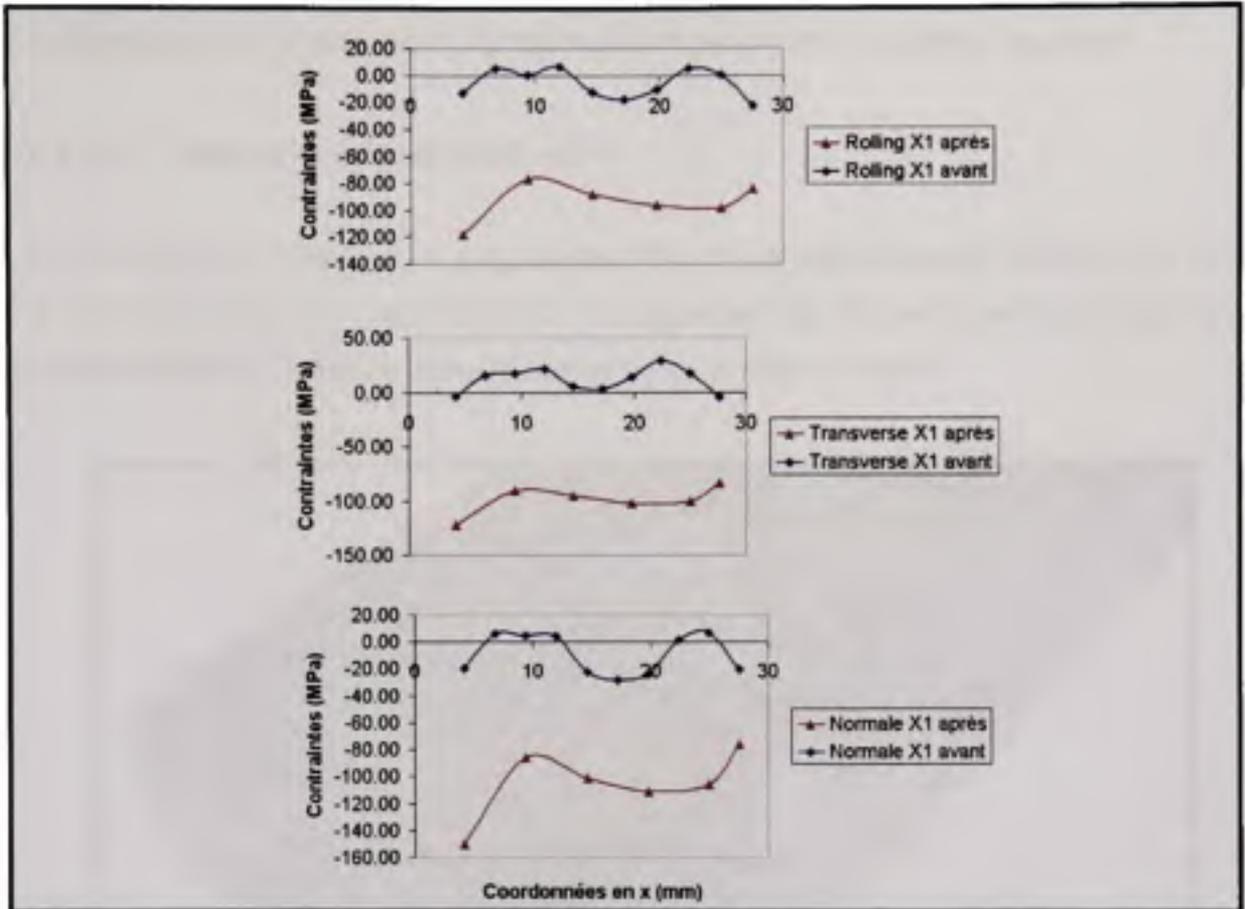


**Figure 6.21 Contraintes mesurées dans la direction X avant l'usinage pour la pièce # 4 "Matériau procédé contrôlé".**

Les courbes montrent qu'il y a symétrie selon l'épaisseur de la composante. Ce qui veut dire qu'il ne devrait pas y avoir de distorsion autour de l'axe des Z. Pour les trois directions de mesures (longitudinale, transversale et normale), les contraintes mesurées sont similaires pour les six trajectoires. Ce qui veut dire que les échantillons possèdent de bonnes symétries selon les plans XY et XZ aux abords de la pièce. Ces symétries ne veulent pas dire que la

pièce ne peut pas subir de distorsion suite à l'usinage. Cela peut dépendre de la symétrie de la composante usinée, de sa position dans l'échantillon et des contraintes induites par l'usinage. Dans le cas de la composante usinée utilisée pour les expérimentations, il y a symétrie selon les plans XY et XZ et cette dernière a été positionnée au centre du bloc de matériau brut selon ces mêmes plans. L'usinage possède les mêmes conditions pour chacun des côtés. On pouvait donc s'attendre à ne pas avoir de distorsion autour de l'axe des X et autour de l'axe des Y.

Des mesures de contraintes ont aussi été effectuées suite à l'usinage aux mêmes endroits que dans l'échantillon de matériau. Ces mesures vont permettre d'analyser l'évolution des contraintes. Les mesures obtenues toujours à l'aide de la méthode du neutron sont illustrées par les trois graphiques qui suivent.



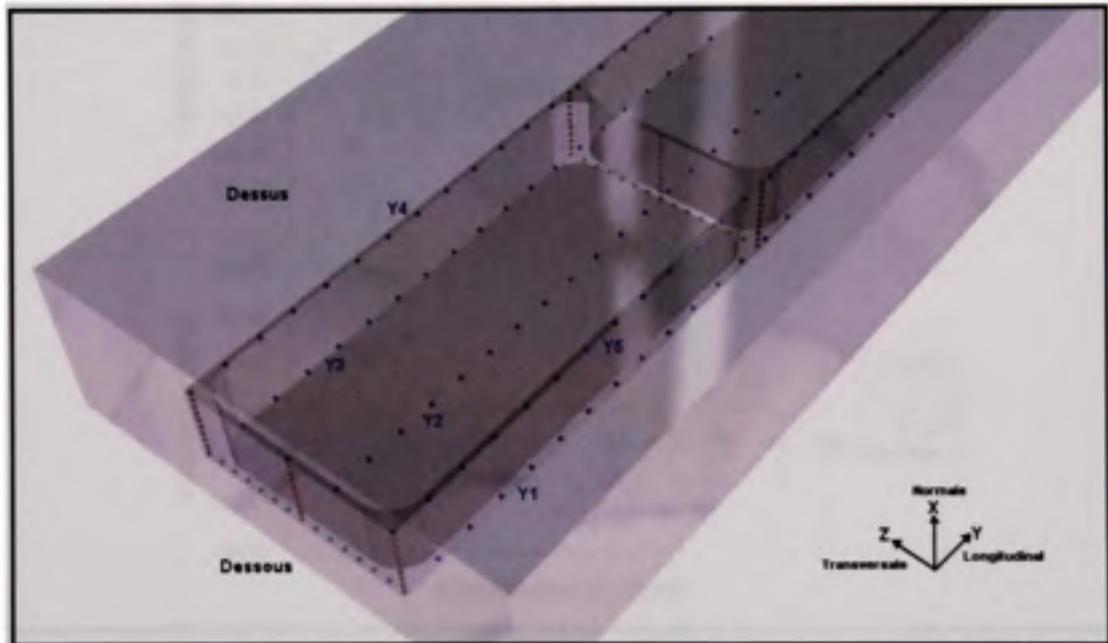
**Figure 6.22 Contraintes mesurées dans la direction des X avant et après l'usinage pour la pièce # 4 "Matériau procédé contrôlé".**

Les graphiques ci-dessus permettent de visualiser l'impact de l'ajout des contraintes d'usinage. Des contraintes en compression ont été induites lors du procédé d'usinage. Les graphiques montrent que les contraintes induites sont plus importantes à l'extrémité gauche de la courbe qui correspond au bas de pièce et moins importantes à l'extrémité droite qui correspond au haut de la pièce. Cela est dû au fait que ces points de mesures se situent sur le dessus et sur le dessous de la pièce usinée. Ils tiennent donc compte des contraintes induites par l'usinage en bout et l'usinage de côté. Par contre pour le haut de la pièce, la forme de la composante permet un relâchement plus important. Ce qui explique pourquoi la contrainte

en compression est moins grande du côté droit de la courbe. Ces résultats obtenus sont semblables à ceux obtenus pour la composante #1 usinée dans le matériau standard.

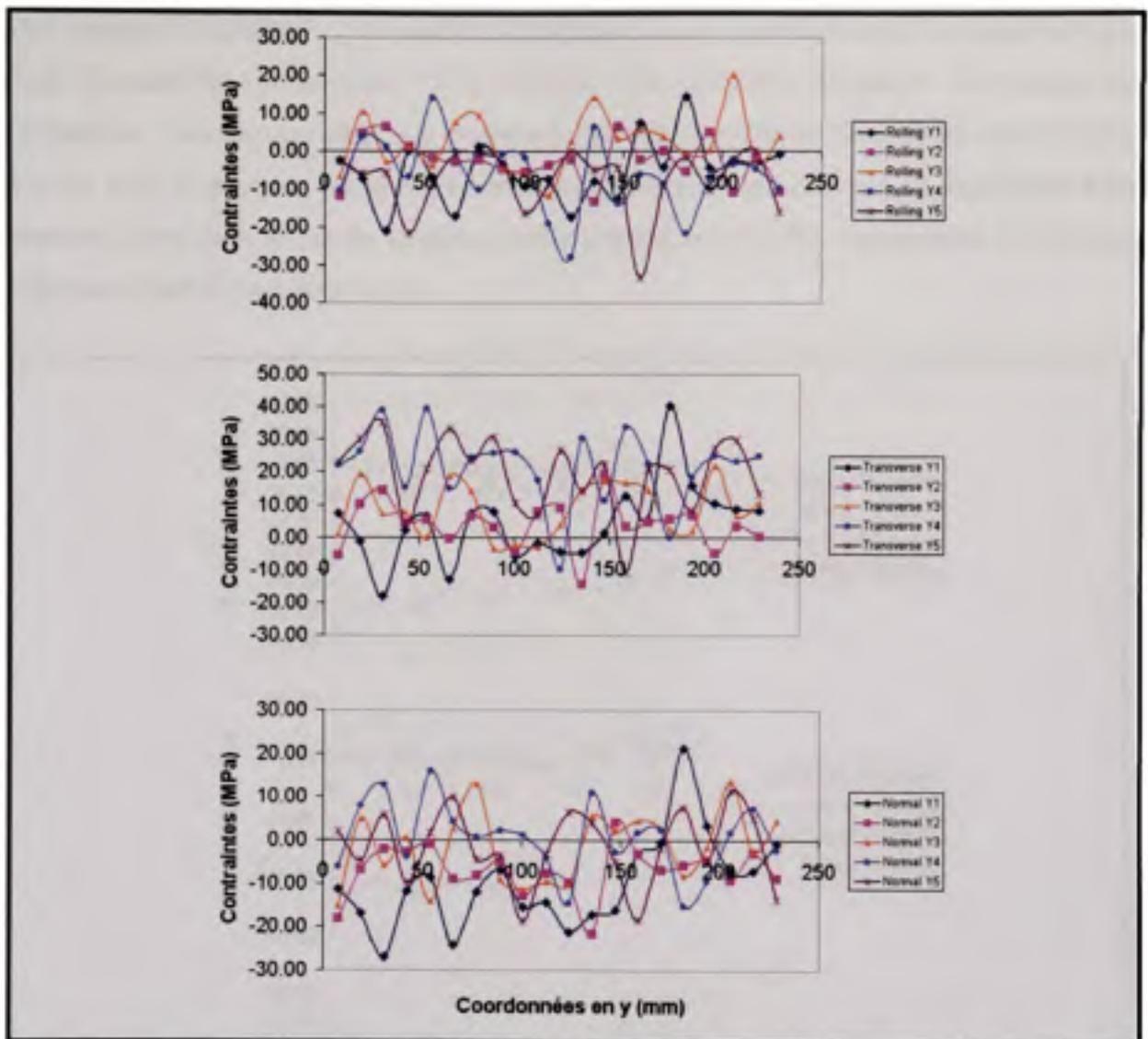
### 6.3.2.2 Mesures dans la direction des Y

Les mesures effectuées dans la direction des Y se situent dans le bas de la pièce (Y1, Y2 et Y3) et dans le haut (Y4 et Y5) selon X. La figure qui suit montre la position des points de mesures utilisés à l'intérieur du matériau brut selon la direction des Y.



**Figure 6.23** Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des Y pour les pièces #4, 5 et 6 "Matériau procédé contrôlé".

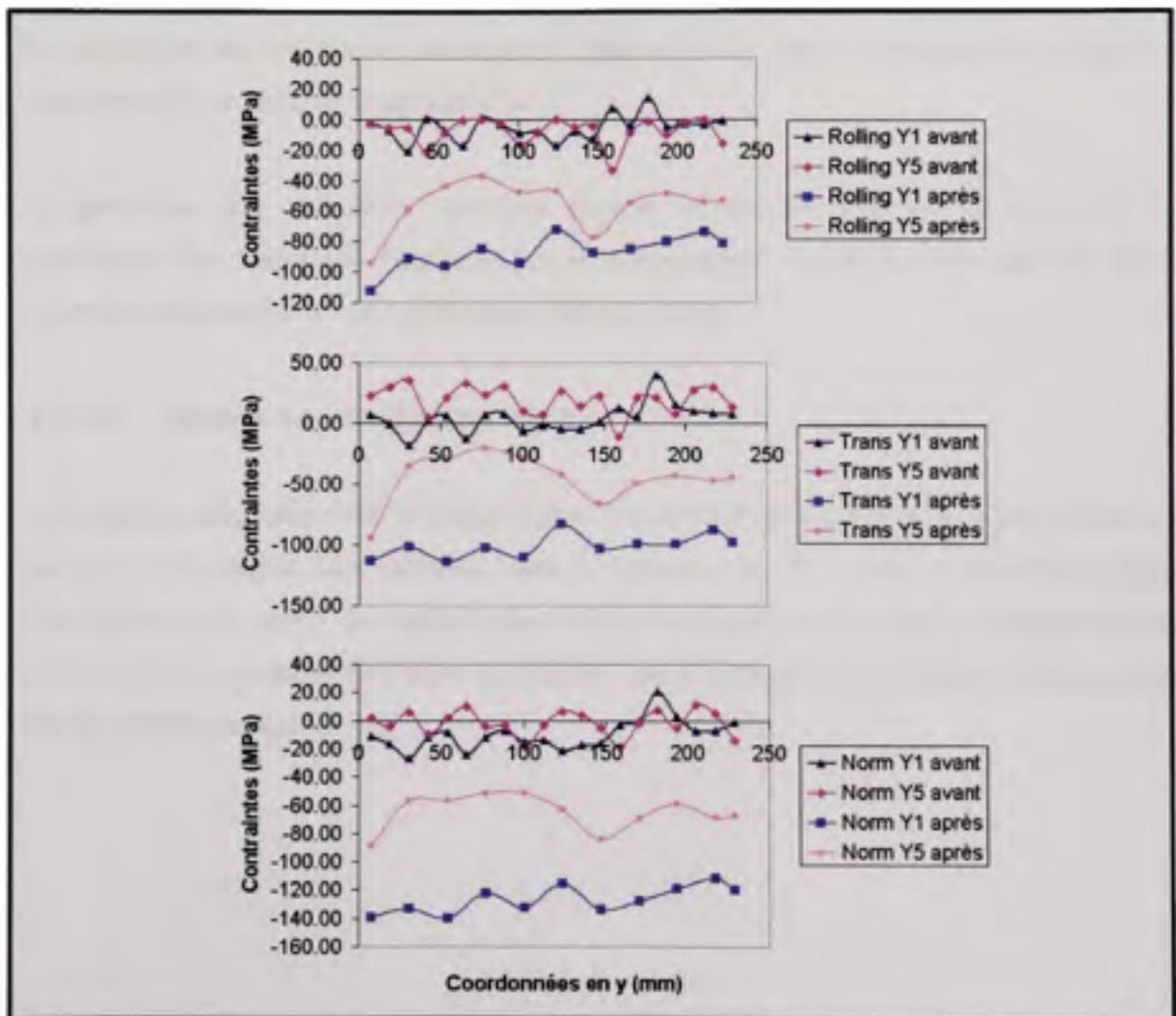
Les résultats obtenus sont présentés dans les graphiques suivants.



**Figure 6.24 Contraintes mesurées dans la direction Y avant l'usinage pour la pièce # 4 "Matériau procédé contrôlé".**

Les contraintes mesurées selon les Y varient beaucoup mais se situent presque toujours dans une échelle de plus ou moins 20 MPa. De façon générale, on ne note pas une différence marquée entre les contraintes du haut de la pièce et celles du bas comme pour le matériau standard. On peut même observer que les contraintes normales du bas (Y1 et Y2) sont légèrement plus en compression.

Des mesures de contraintes ont aussi été effectuées suite à l'usinage aux mêmes endroits que dans l'échantillon de matériau. Ces mesures vont permettre d'analyser l'évolution des contraintes. Les mesures obtenues toujours à l'aide de la méthode du neutron sont illustrées par les trois graphiques qui suivent. Sur ces graphiques, les courbes Y1 représentent les mesures faites dans le bas de la pièce tandis que les courbes Y5 représentent les mesures effectuées dans le haut de la pièce.



**Figure 6.25** Contraintes mesurées dans la direction des Y avant et après l'usinage pour la pièce # 4 "Matériau procédé contrôlé".

Sur le graphique des contraintes longitudinales, il est possible de constater que les contraintes dans le bas de la pièce (Y1) sont demeurées constantes suite à l'usinage. C'est-à-dire que les variations de contraintes ne sont pas importantes. Pour le haut de la pièce (Y5) on note une plus grande variation à l'extrémité droite de la courbe. Ce qui correspond au début de pièce. Une autre observation notoire est la différence entre les courbes de contraintes Y1 et Y5 après usinage.

Le graphique des contraintes transversales démontre les mêmes observations que pour le graphique des contraintes longitudinales.

Le graphique des contraintes normales apporte les mêmes observations que pour les graphiques des contraintes longitudinales et transversales. La seule différence est que la variation de la courbe Y5 est moins importante au début.

### **6.3.2.3 Mesures dans la direction des Z**

Les mesures effectuées dans la direction des Z se situent dans le bas de la pièce à l'avant et au niveau du premier mur intérieur selon la direction des Y. Elles sont respectivement identifiées par Z1 et Z2. La figure suivante montre la position des points de mesures utilisés à l'intérieur du matériau brut selon la direction des Z et les résultats obtenus sont présentés par les graphiques qui suivent.

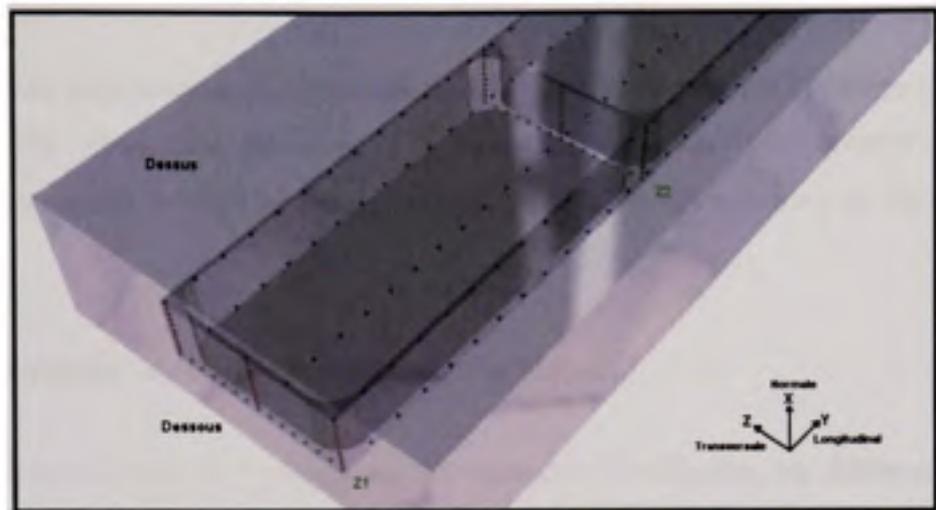


Figure 6.26 Points de mesures utilisées pour l'analyse des contraintes selon la direction des Z pour les pièces #4, 5 et 6 "Matériau procédé contrôlé".

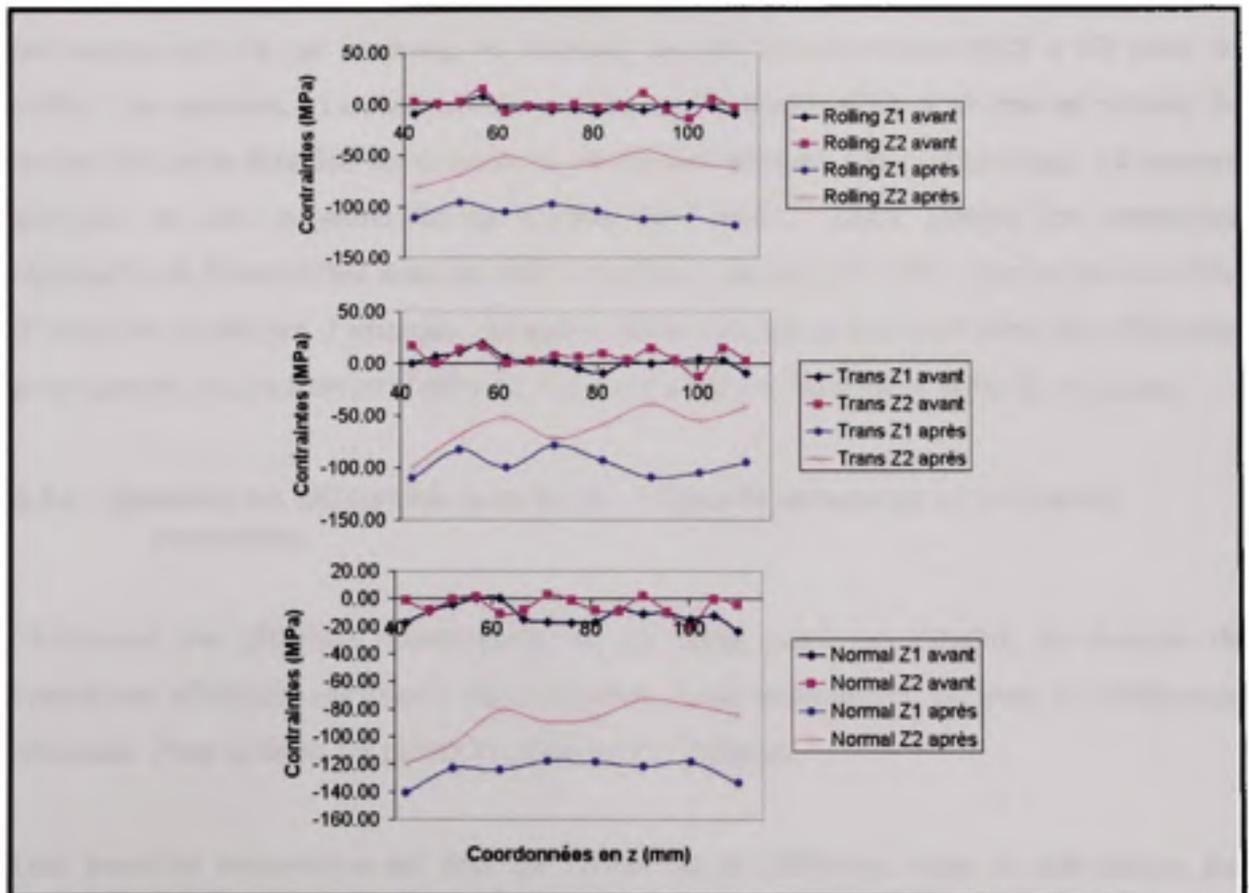


Figure 6.27 Contraintes mesurées dans la direction des Z avant et après l'usinage pour la pièce # 4 "Matériau procédé contrôlé".

Les courbes de mesure obtenues dans la direction des Z avant et après l'usinage montrent une bonne symétrie dans cette direction. Les zones de contraintes plus élevées qui peuvent provenir du procédé de mise en forme sont moins importantes que dans le cas du matériau standard.

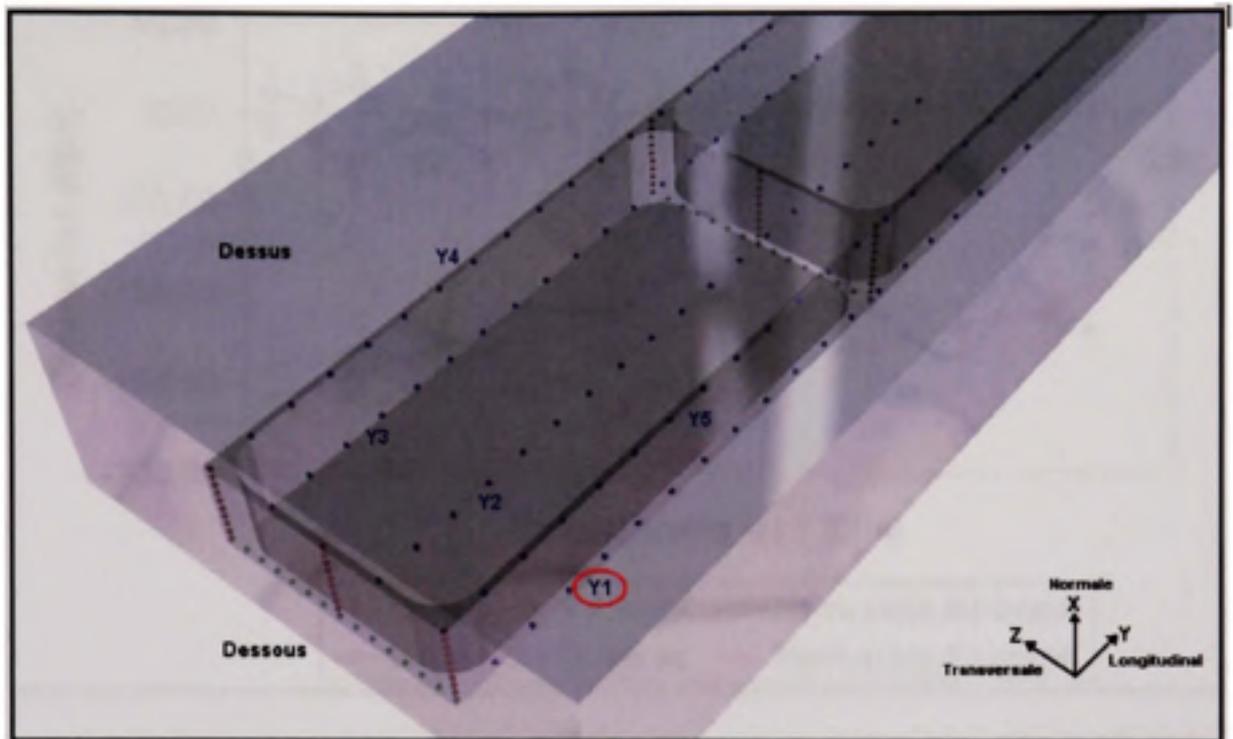
### **6.3.3 Contraintes résiduelles induites par l'usinage**

Afin de valider l'impact de l'usinage sur les contraintes résiduelles, les différences entre les mesures de contraintes avant et après l'usinage ont été calculées. Cependant, il faut être prudent quant à l'analyse de ces contraintes calculées puisqu'elles tiennent compte des contraintes d'usinage mais également des balancements de contraintes que la pièce a pu subir suite à l'enlèvement de matière. De plus, tel que vu dans le chapitre 3, les contraintes résiduelles induites par l'usinage se trouvent sur une couche mince (0.05 à 0.2 mm) en surface du matériau. La méthode de mesure aux neutrons n'est donc pas en mesure de donner de façon détaillée les contraintes résiduelles induites lors de l'usinage. La mesure effectuée est une moyenne sur un volume de 2 mm<sup>3</sup>. Aussi, comme les contraintes résiduelles de l'échantillon avec procédés contrôlés n'étaient pas nulles, il n'est pas possible d'isoler les contraintes d'usinages. D'autres expérimentations devraient donc être effectuées pour mesurer les contraintes d'usinage. Ce qui n'a pas été fait dans le cadre de ce projet.

### **6.3.4 Synthèse des différences entre les deux types de matériaux au niveau des contraintes**

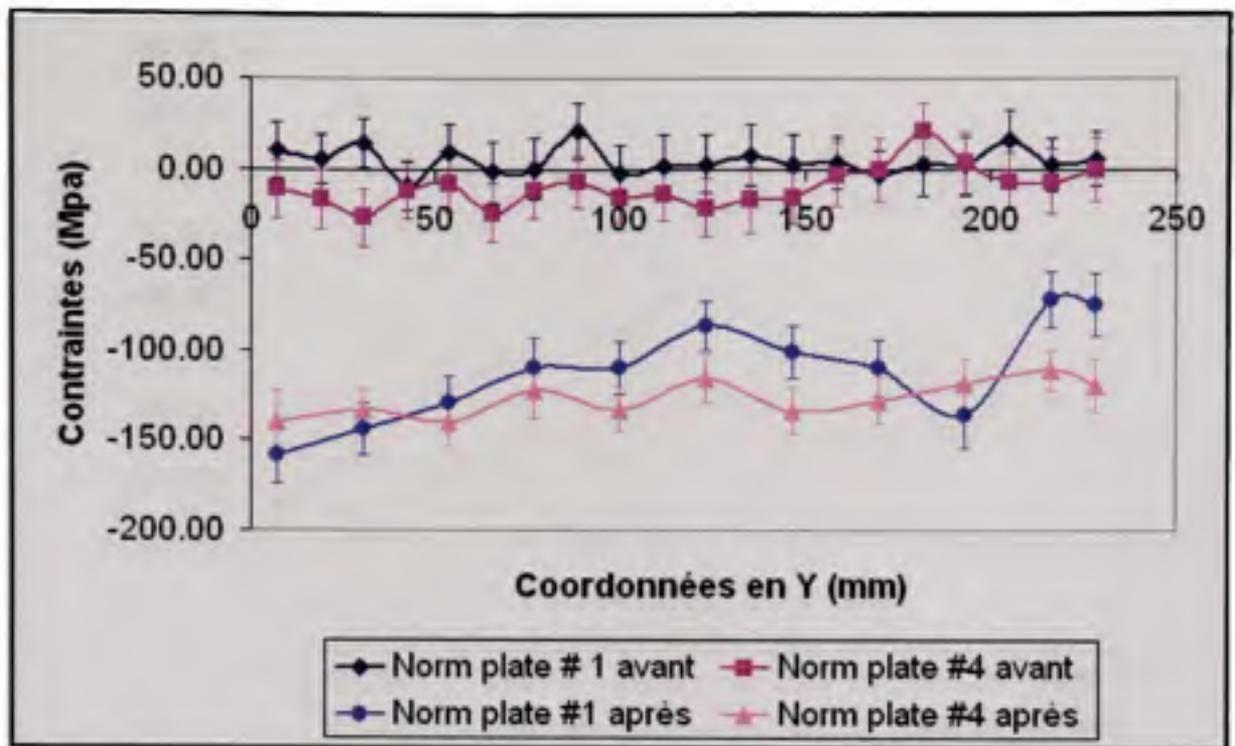
Maintenant que plusieurs observations ont été faites quant aux résultats de mesures de contraintes effectuées sur chacun des matériaux, il est intéressant d'analyser les différences obtenues. Pour ce faire, les pièces #1 et #4 ont été utilisées.

Une première observation est faite au niveau de la différence entre la distribution des contraintes des deux types de matériaux pour le dessous de la pièce dans la direction des Y. La figure suivante montre les points de mesures qui ont été utilisés.



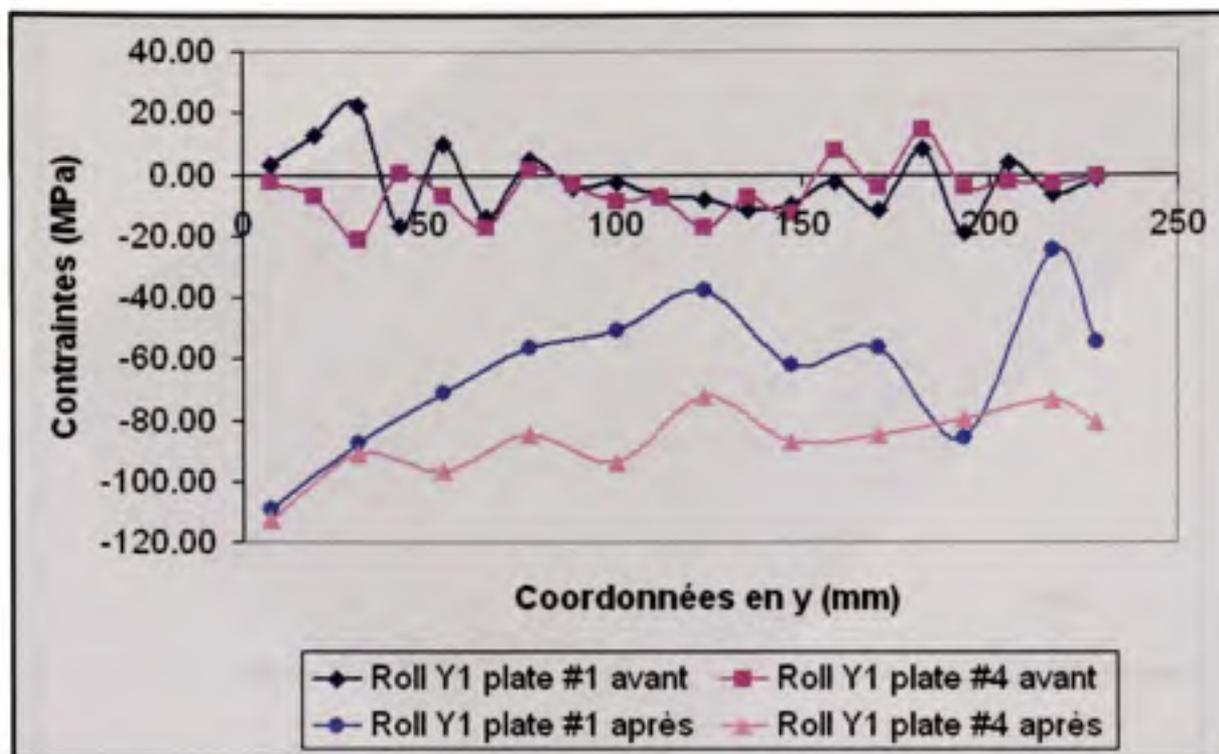
**Figure 6.28 Points de mesures utilisées pour la comparaison des contraintes selon la direction des Y pour les pièces #1 et 4.**

Les points de mesures selon Y1 se trouvent au dessous de la pièce et selon la direction de l'axe Y correspondant à la longueur. Le graphique suivant donne un exemple de comparaison des résultats de contraintes normales obtenues pour les pièces #1 (matériau standard) et #4 (matériau avec procédé contrôlé).



**Figure 6.29 Exemple de comparaison de la distribution des contraintes dans la direction des Y pour les deux types de matériaux.**

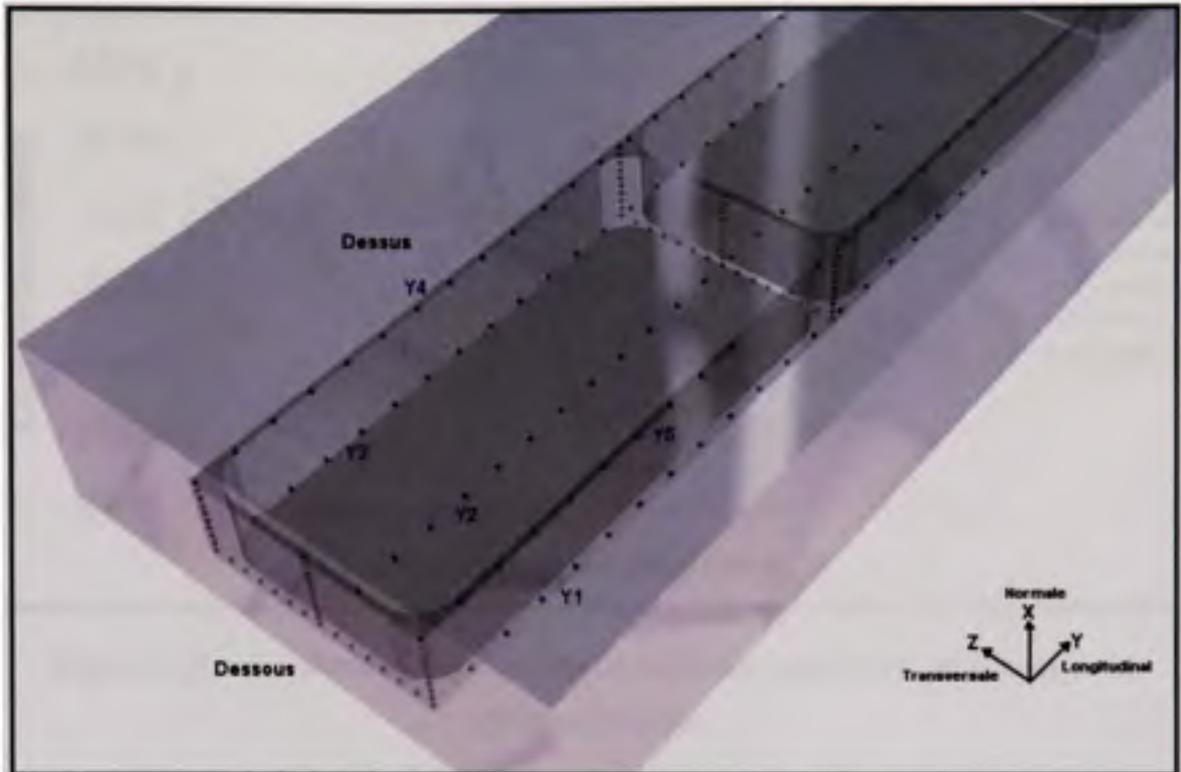
Sur le graphique ci-dessus, on peut observer que les contraintes avant l'usinage pour la plaque #1 ainsi que pour la plaque #4 selon la direction des Y sont assez similaires et près de zéro. C'est le cas pour toutes les courbes de contraintes longitudinales, transversales et normales tracées pour comparer les deux matériaux selon la direction des Y au niveau du dessus de la pièce. Suite à l'usinage, on remarque que la courbe des contraintes de la pièce #4 est plus lisse (variations faibles) que celle obtenue pour les contraintes de la pièce #1. Par contre, les contraintes après l'usinage sont parfois plus importantes dans la pièce #4 que dans la pièce #1 comme en témoigne le graphique suivant. Ce graphique a été tracé à partir des mêmes points de mesures que pour le graphique précédent, mais pour les contraintes longitudinales.



**Figure 6.30 Exemple de comparaison de l'intensité des contraintes pour les deux types de matériaux.**

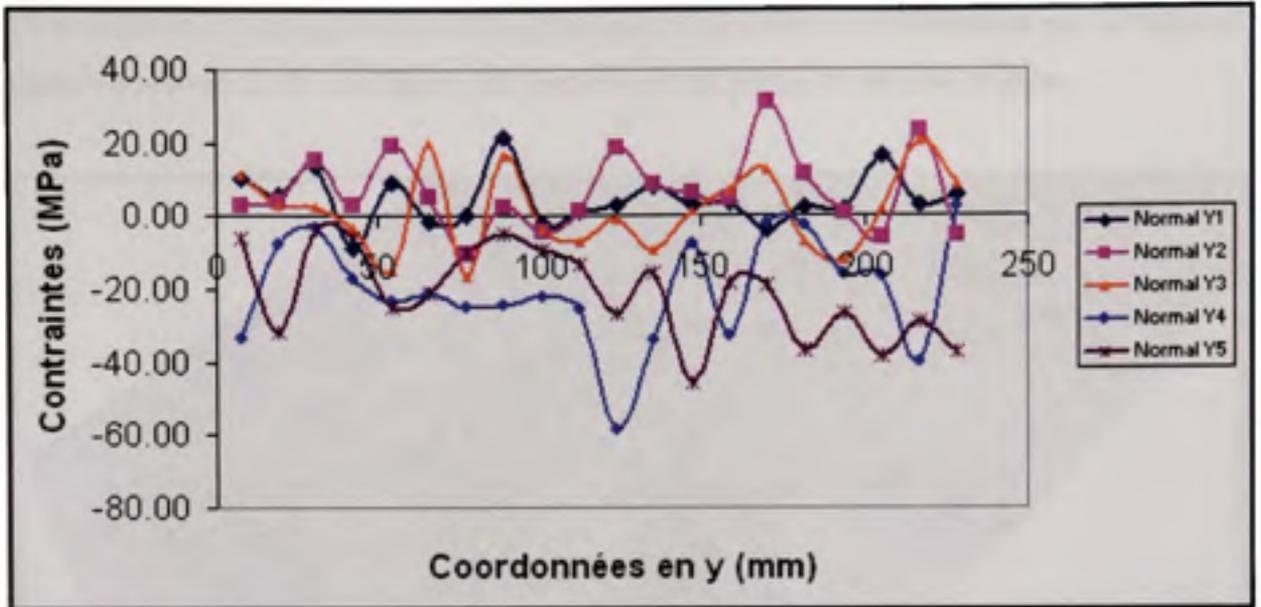
Les courbes du graphique pour les mesures après l'usinage montrent que les contraintes en compression sont plus importantes pour la pièce #4. La distribution est toutefois plus uniforme. L'hypothèse selon laquelle une distribution non-uniforme des contraintes influence le phénomène de distorsion peut alors être posée et pourra être validée suite aux mesures de déformations effectuées dans la section suivante.

Une seconde comparaison importante se situe au niveau de la différence entre les contraintes situées en dessous de l'échantillon et au dessus (côté des poches). Les mesures du dessous sont représentées par les courbes Y1, Y2 et Y3 tandis que celles du dessus par les courbes Y4 et Y5, tels qu'illustrés par la figure qui suit.

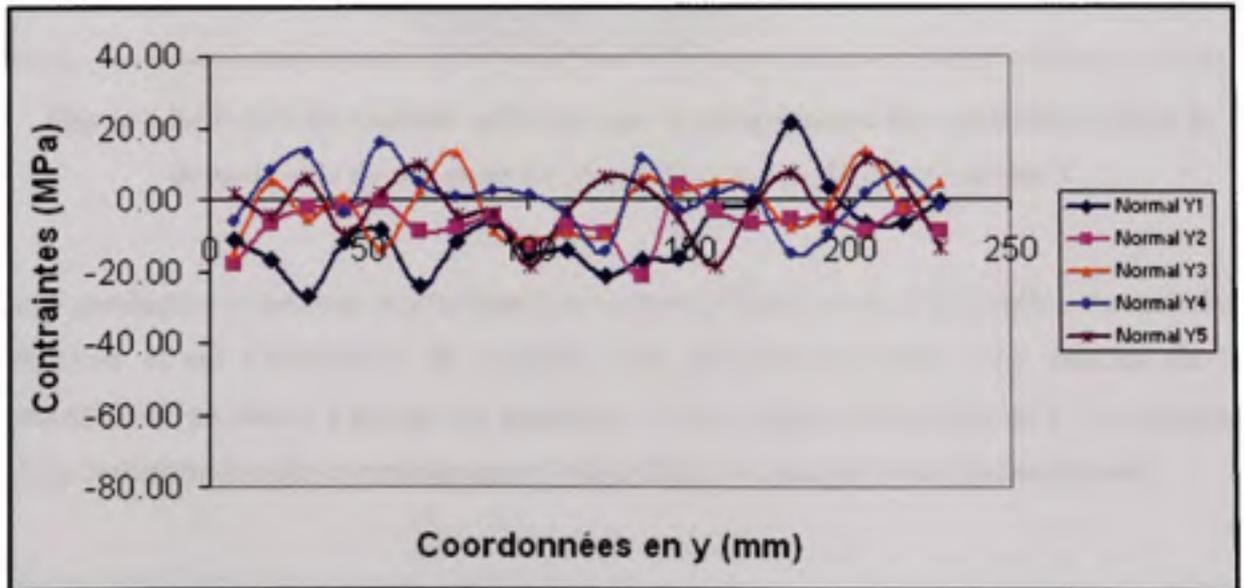


**Figure 6.31 Points de mesures utilisées pour la comparaison des contraintes entre le dessous et le dessus pour les pièces #1 et 4 dans la direction des Y.**

Les deux graphiques suivants ont été tracés à partir de ces points de mesures. Pour l'échantillon d'aluminium standard, on peut observer une différence importante entre le dessous et le dessus pour les contraintes dans les directions longitudinale et normales. Cette différence n'est pas présente dans le matériau avec procédés contrôlés. Pour la pièce #1, on constate que les courbes Y4 et Y5 ont des valeurs de compressions plus importantes. Ce qui veut dire que le haut de la pièce est dans une zone de contraintes en compression pendant que le bas est dans une zone de contraintes proches de zéro et même pour la majeure partie en tension. Pour la pièce #4, cette différence n'est pas présente. Les contraintes dans le haut sont équivalentes aux contraintes dans le bas. Les contraintes mesurées sont presque toutes en compression et plus petites que 20 MPa.

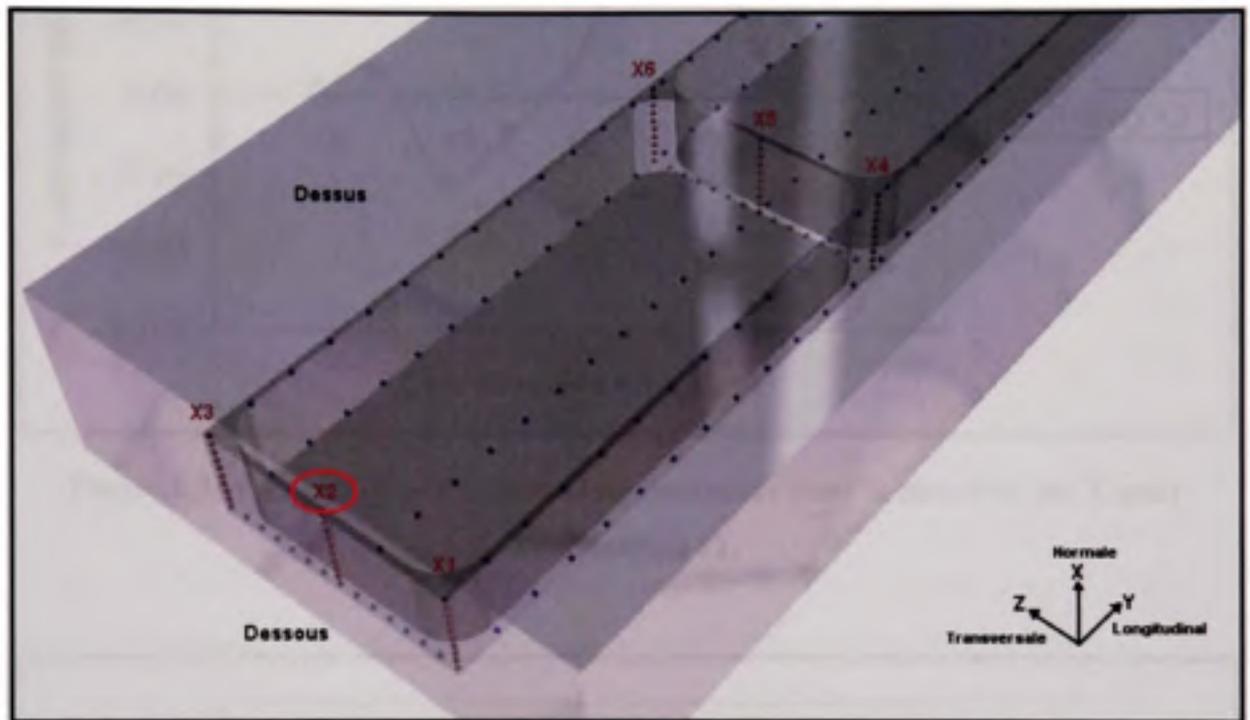


**Figure 6.32** Comparaison des contraintes mesurées dans le bas et le haut pour l'échantillon #1.



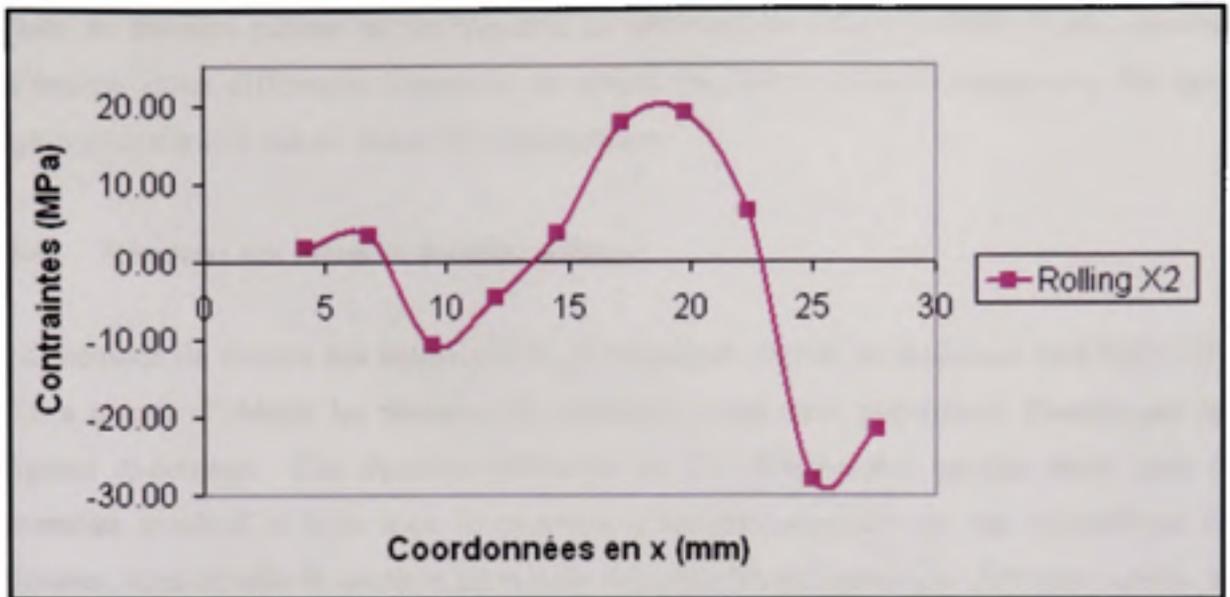
**Figure 6.33** Comparaison des contraintes mesurées dans le bas et le haut pour l'échantillon #4.

Cette différence peut également s'observer selon l'épaisseur de l'échantillon par conséquent dans la direction des X. La figure suivante montre les points de mesures utilisés.

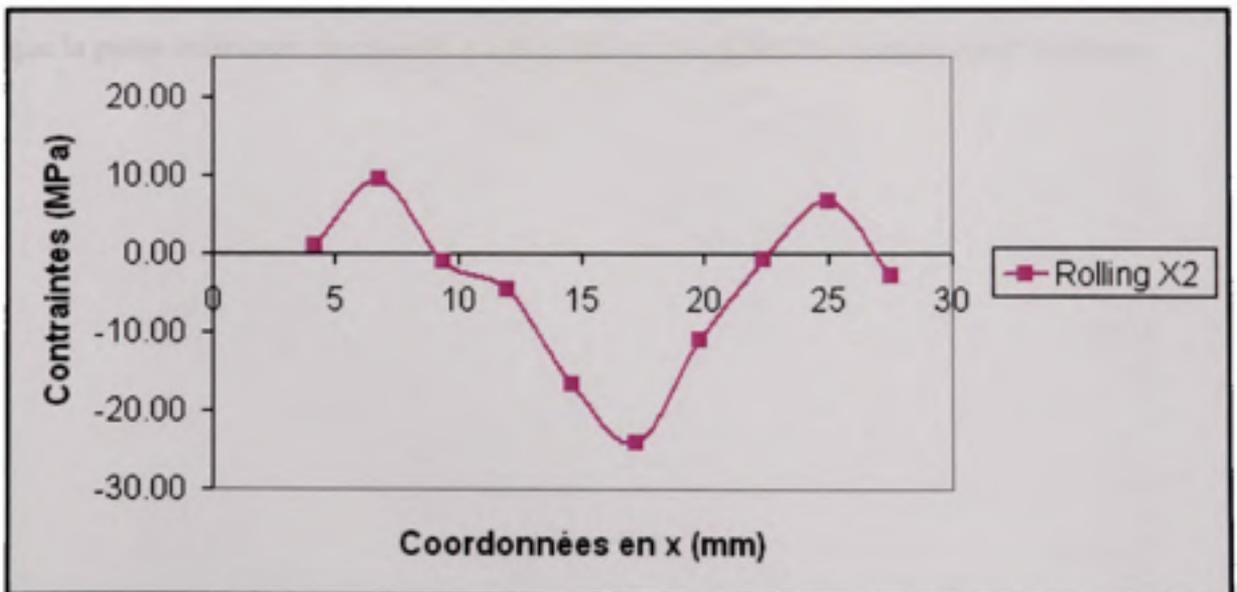


**Figure 6.34 Points de mesures utilisées pour la comparaison des contraintes entre le dessous et le dessus pour les pièces #1 et 4 dans la direction des X.**

Les graphiques ci-dessous représentent les mesures effectuées sur l'échantillon de matériau standard et sur l'échantillon de matériau avec procédés contrôlés. Le dessous de la composante se trouve à gauche du graphique. Cette figure montre bien qu'il y a symétrie dans la distribution des contraintes pour l'échantillon #4 mais pas pour l'échantillon #1.



**Figure 6.35** Comparaison des contraintes mesurées dans la direction des X pour l'échantillon #1.



**Figure 6.36** Comparaison des contraintes mesurées dans la direction des X pour l'échantillon #4.

Suite au chapitre suivant où les résultats de déformations sont présentés, il sera possible d'évaluer si les différences observées au niveau des distributions de contraintes des deux types de matériaux ont un impact sur la distorsion.

#### **6.4 Résultats des mesures de déformations**

La méthode de mesure des déformations géométriques utilisée et expliquée au CHAPITRE 5.8 a permis d'obtenir les résultats de déformations en trois dimensions illustrés par les figures ci-dessous. Ces dernières montrent les six composantes usinées (trois avec le matériau standard et trois avec le matériau à procédé contrôlé) en vue isométrique du dessous. Une échelle de couleurs permet de visualiser les déformations. Sur cette échelle, la couleur turquoise correspond à une déformation nulle. Les teintes de bleu, rose et rouge représentent une déformation négative variant entre 0 et -1.2 mm, tandis que les teintes de vert, jaune et orangé représentent une déformation positive variant entre 0 et +0.5 mm. La partie supérieure des dessins correspond à la base de la pièce usinée appelée le dessous tandis que la partie inférieure correspond au côté des poches identifiée comme étant le dessus.

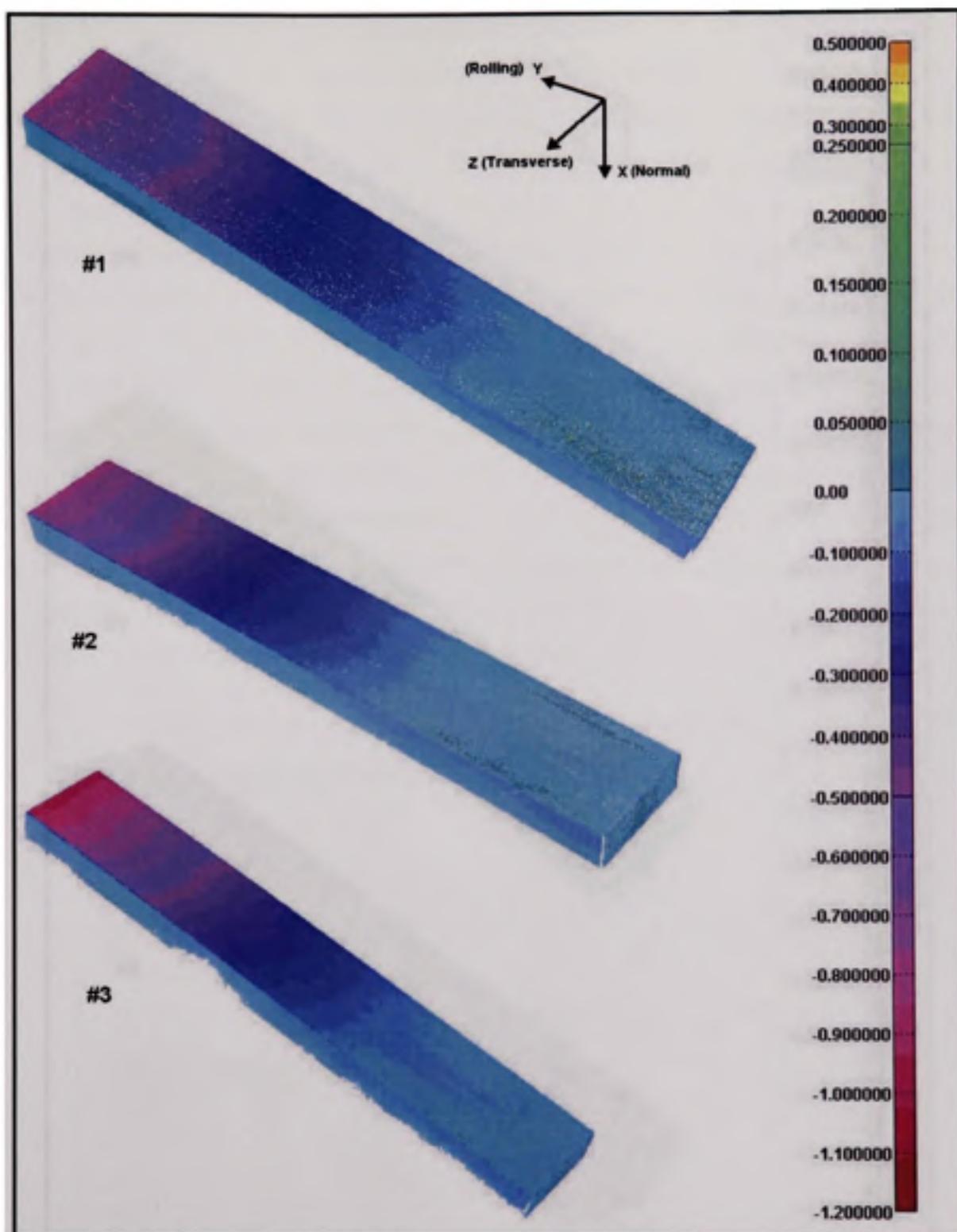


Figure 6.37 Déformations pièces en matériau standard #1, #2, #3.

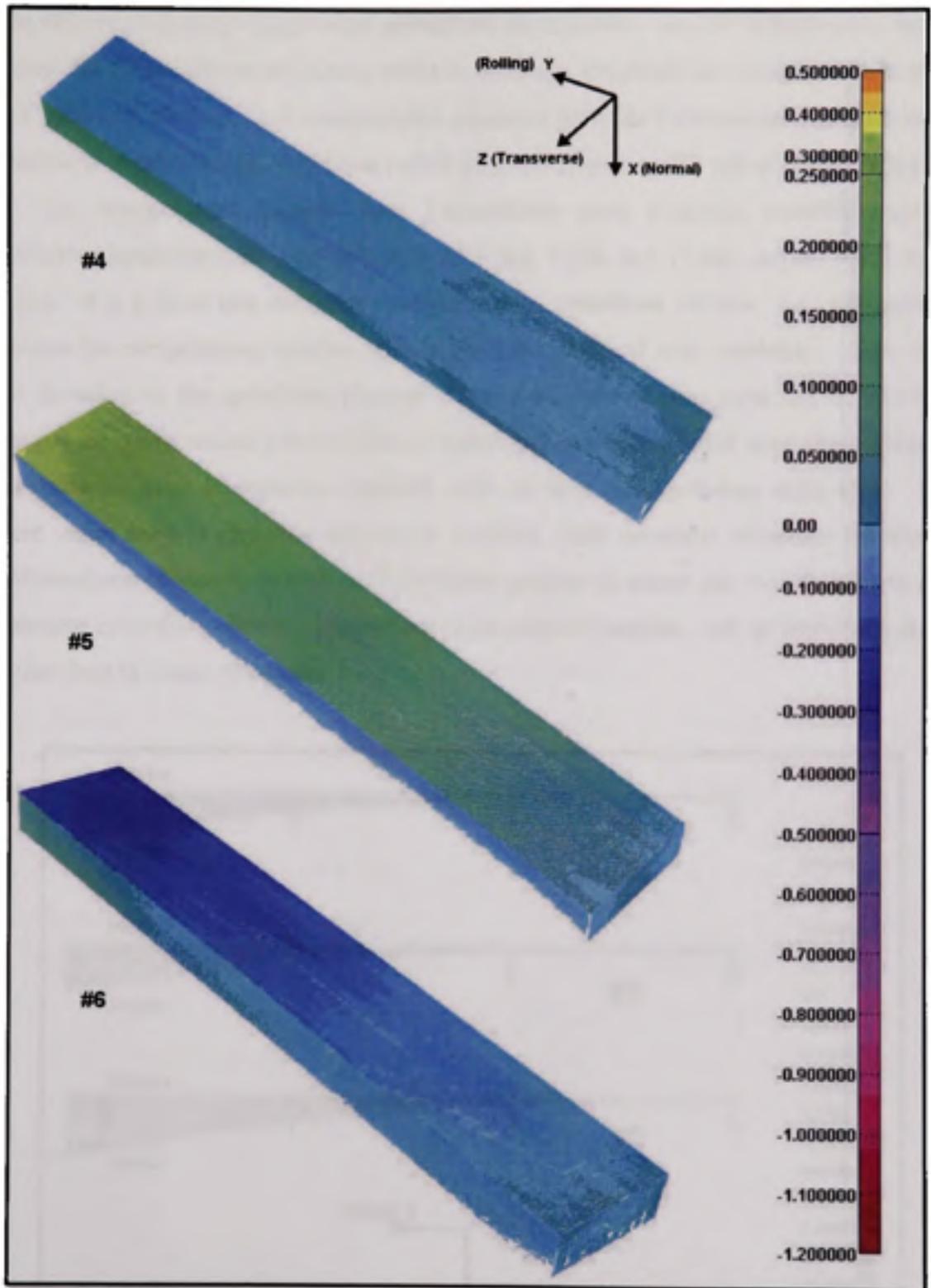


Figure 6.38 Déformations pièces en matériau avec procédé contrôlé # 4, #5, #6.

Ces représentations graphiques nous permettent de constater que les composantes usinées subissent des déformations seulement selon la direction longitudinale (longueur de la pièce) et ce à différents niveaux. Les composantes usinées à partir de l'aluminium standard ont des déformations maximales de  $-0,806\text{mm}$  ( $-,032\text{ po}$ ),  $-0,827\text{ mm}$  ( $-,033\text{ po}$ ) et  $-1,010\text{ mm}$  ( $-,040\text{ po}$ ). Les composantes usinées dans l'aluminium avec procédés contrôlés ont des déformations respectives de  $+0,134\text{ mm}$  ( $+,005\text{ po}$ ),  $+0,306\text{ mm}$  ( $+,012\text{ po}$ ) et  $-0,311\text{ mm}$  ( $-,012\text{ po}$ ). Il y a donc une différence entre les deux matériaux utilisés. Les déformations subies par les composantes usinées dans le matériau standard sont similaires. Elles ont la même direction et des grandeurs presque identiques. Pour leurs parts, les déformations subies par les composantes usinées dans le matériau à procédé contrôlé sont plus faibles que celles obtenues avec le matériau standard mais ne sont pas similaires entre elles. Elles peuvent varier entre la direction négative et positive. Afin de mieux visualiser les résultats de déformations obtenues, le logiciel PolyWorks permet de tracer une vue de section de la composante avec des isobares. Les isobares sont proportionnelles aux déformations et sont orientées dans la bonne direction.

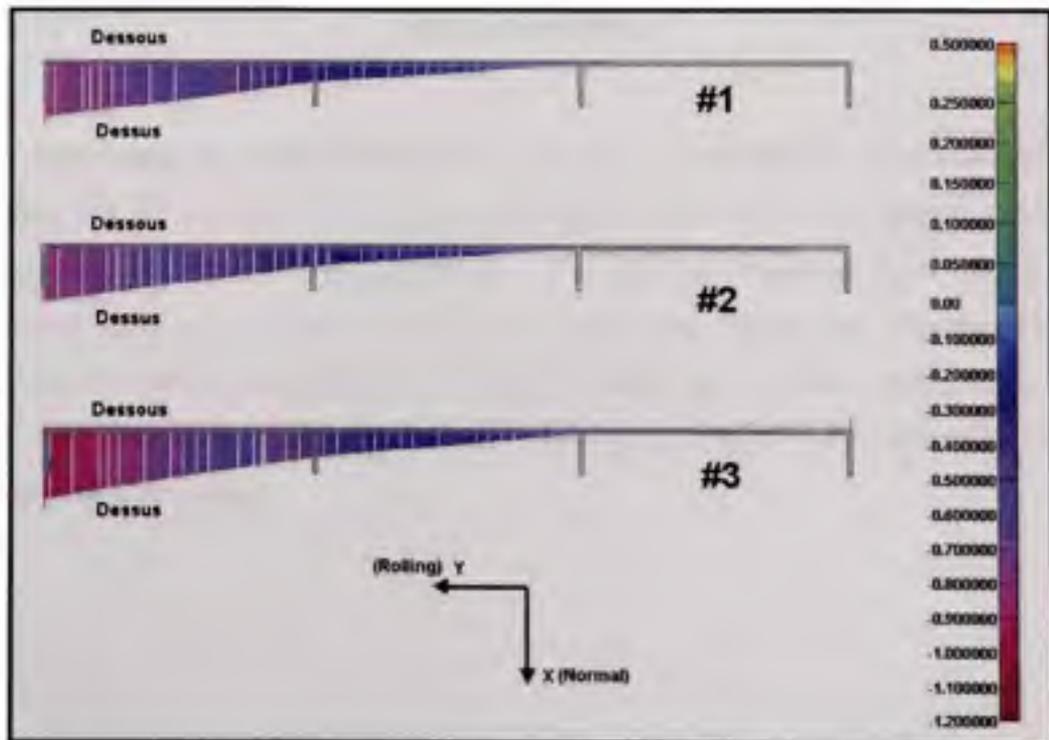
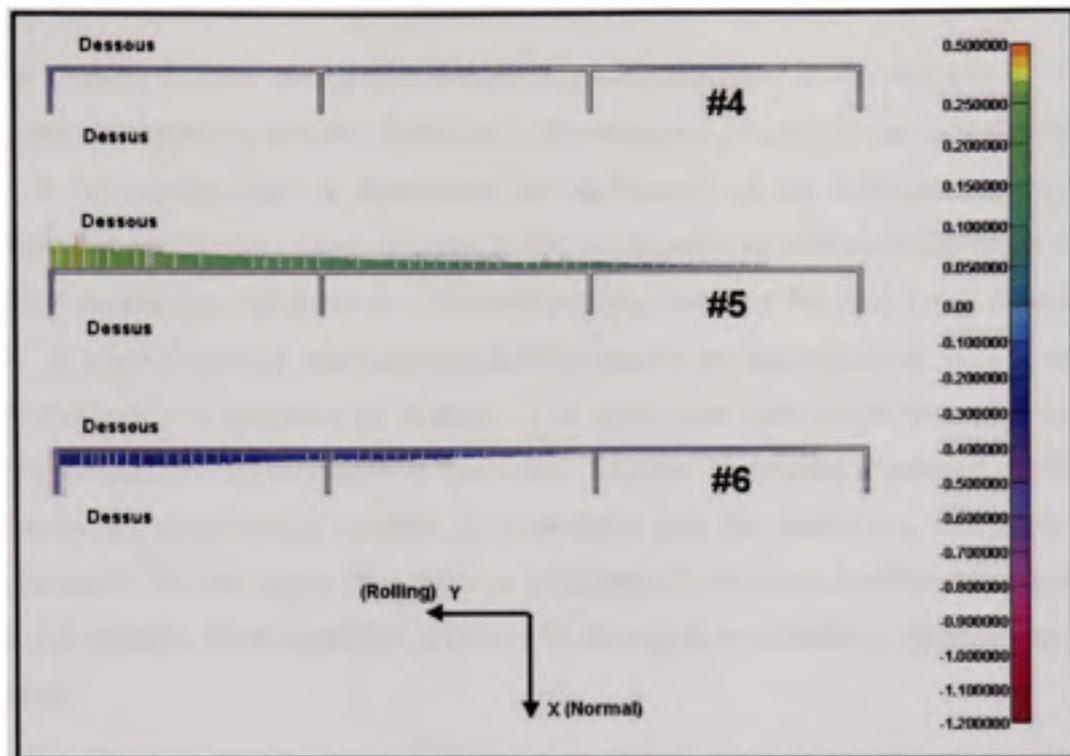


Figure 6.39 Vue de section XY déformations des pièces #1, #2, #3 en matériau standard.



**Figure 6.40** Vue de section XY déformations des pièces #4, #5, #6 en matériau avec procédé contrôlé.

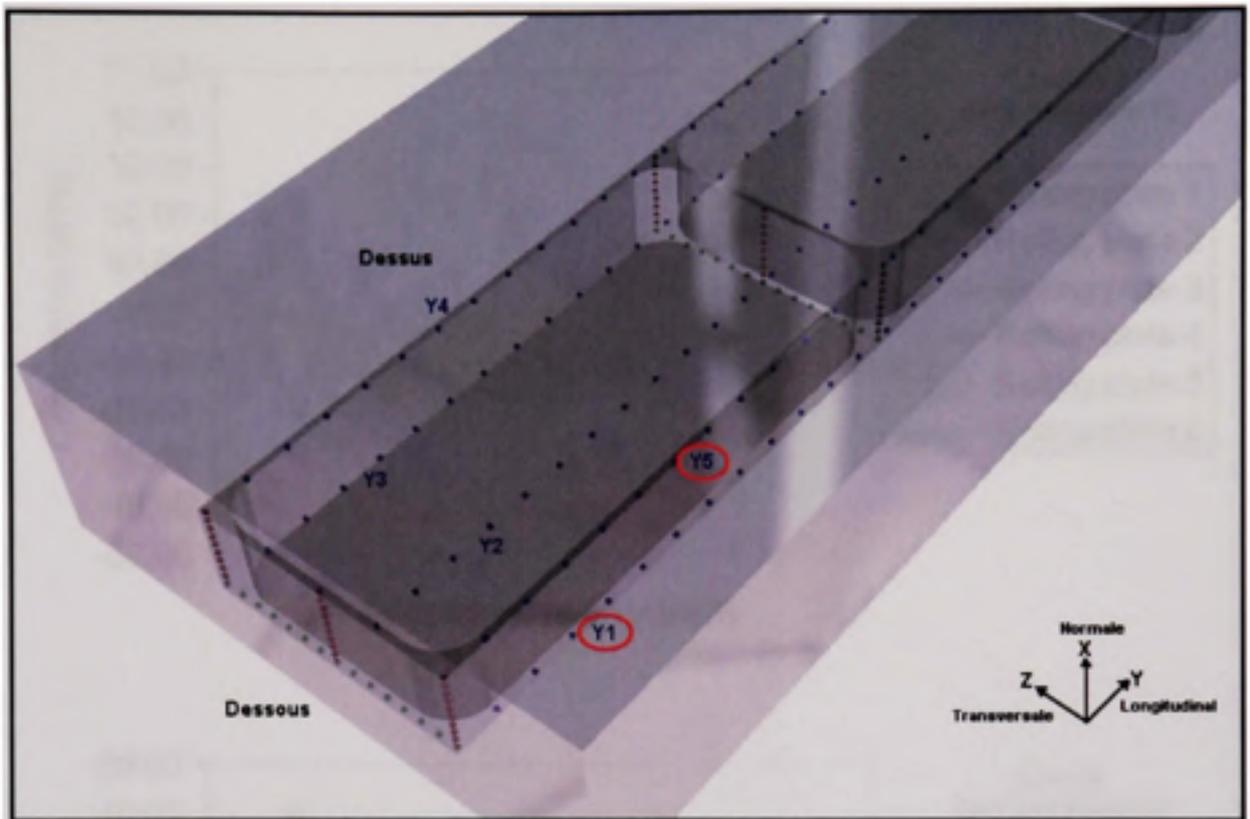
Il s'agit d'une coupe de section effectuée selon le plan XY au centre de la composante selon la direction des Z. La base de la composante usinée se trouve du côté supérieur tandis que les poches se trouvent du côté inférieur. Les isobares montrent bien que les trois composantes usinées à partir du matériau standard ont subies des déformations assez importantes du côté des poches (dessus de la pièce) tandis que les trois composantes usinées dans le matériau avec procédé contrôlé ont subies de très légères déformations et ce même dans la direction de la base.

## **6.5 Analyse de la distorsion en fonction des contraintes**

Dans le chapitre 6.3, les contraintes mesurées ont été analysées et des différences entre les deux types de matériaux ont été identifiées. On retrouvait principalement une différence au niveau de la symétrie dans la distribution des contraintes et une différence au niveau de l'intensité des contraintes. Dans le chapitre 6.4, les mesures de déformations montrent qu'il y a effectivement une différence au niveau de la distorsion pour les deux types de matériaux utilisés. Il a également été montré que la déformation se produit seulement dans la direction Y correspondant à la longueur de la pièce. Les contraintes influençant cette direction sont donc les contraintes longitudinales et normales. Comme le procédé d'usinage est le même pour toutes les composantes usinées, la supposition que les contraintes d'usinage étaient identiques pour les deux types de matériaux a été faite. Il est alors possible de comparer les contraintes initiales des échantillons utilisés afin de voir si ces dernières ont un impact sur la distorsion.

### **6.5.1 Impact de la distribution des contraintes**

Lorsque l'on regarde la composante selon son épaisseur (direction des X), il a été observé qu'il y avait symétrie au niveau de l'échantillon avec le matériau dont le procédé est contrôlé et qu'il n'y avait pas de symétrie pour l'échantillon avec le matériau standard. La Figure 6.35 et la Figure 6.36 montrent ces deux distributions. Cette non symétrie fait en sorte que les contraintes du dessous de la pièce sont différentes des contraintes du dessus et ce pour les directions longitudinale et normale. Lorsque l'on analyse cette différence pour chacune des six pièces, il est possible d'observer une relation avec la déformation. Les points de mesures observés se situant dans en dessous correspondent à Y1 et ceux du dessus correspondent à Y5. La figure suivante illustre ces points.



**Figure 6.41 Points de mesures utilisées pour la comparaison des contraintes entre le dessous et le dessus pour les pièces 1 à 6 dans la direction des Y.**

Les résultats de mesures des contraintes longitudinales et normales obtenus en dessous et au dessus pour les six échantillons sont présentés dans les graphiques suivants.

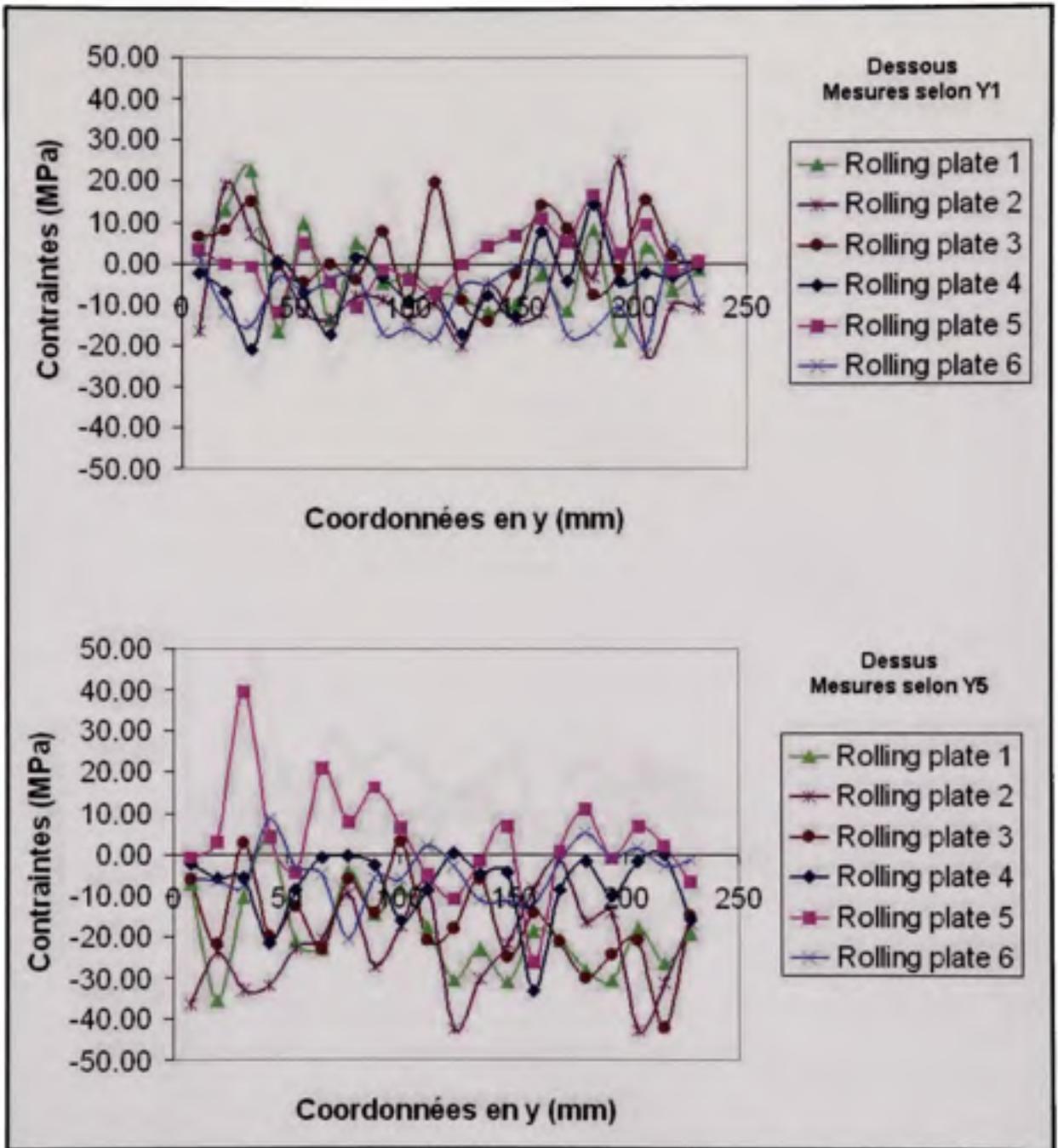


Figure 6.42 Comparaison des contraintes longitudinales entre le dessous et le dessus.

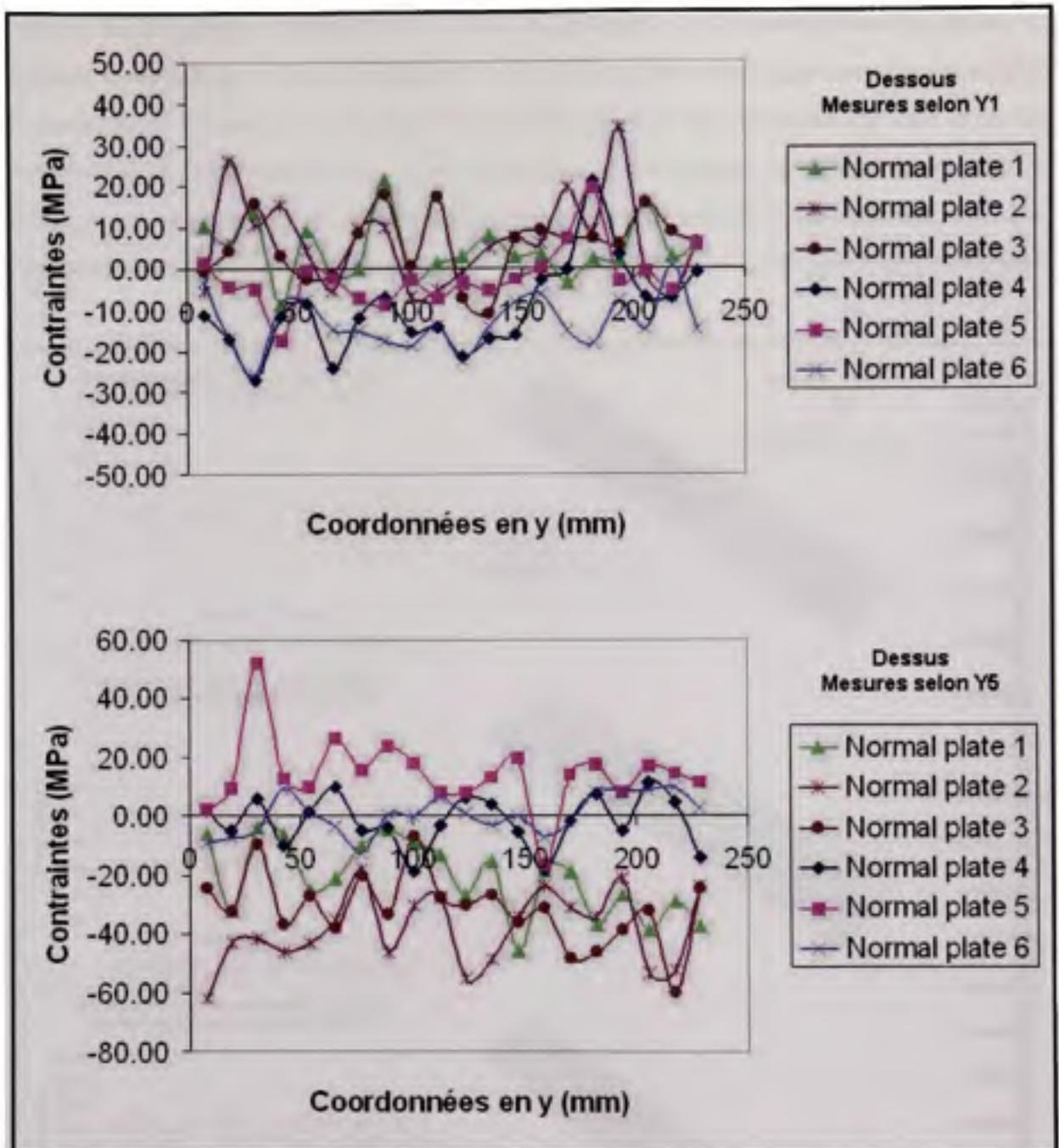
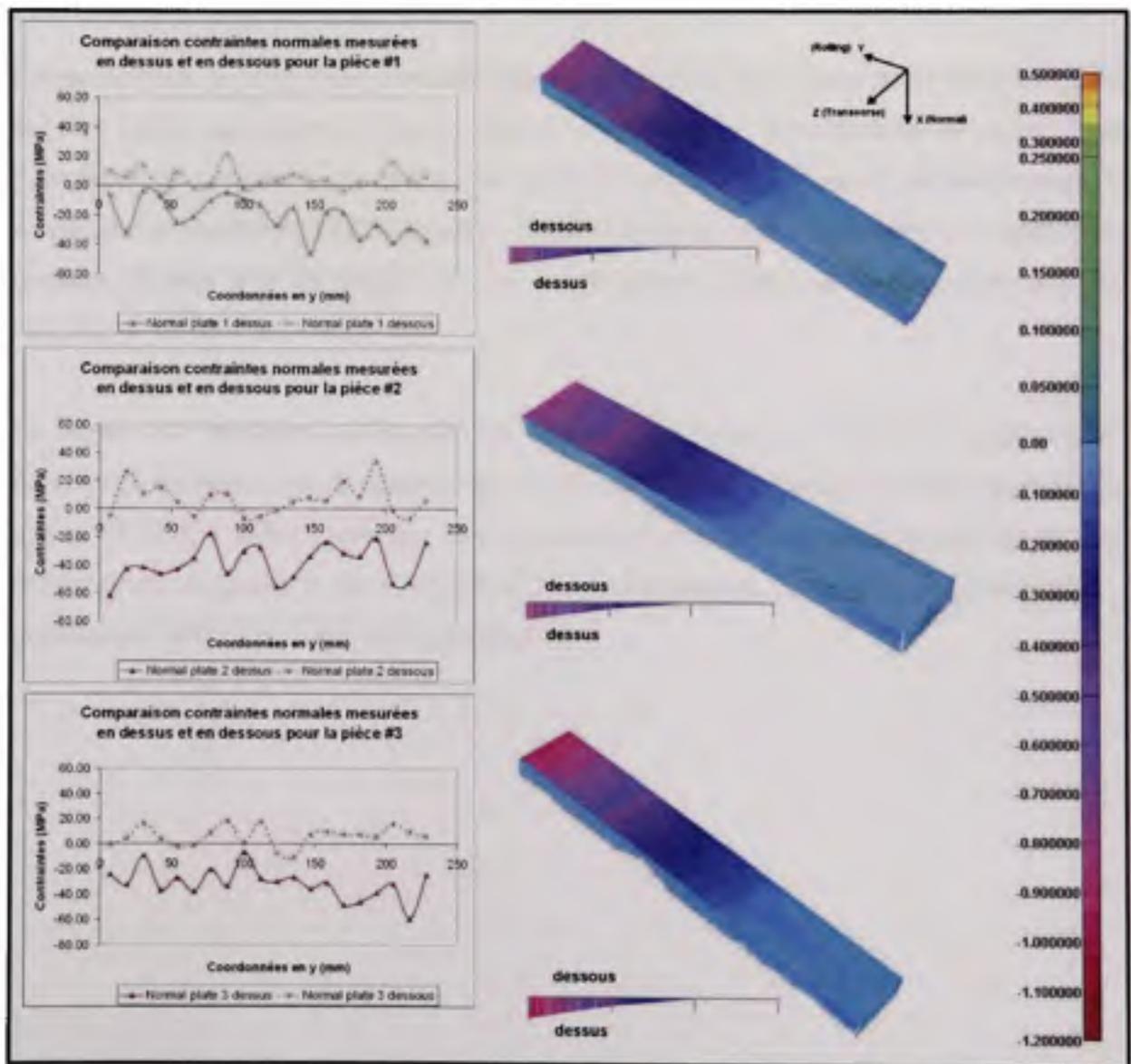


Figure 6.43 Comparaison des contraintes normales entre le dessous et le dessus.

Les graphiques du haut représentent les contraintes longitudinales et normales mesurées en dessous de la pièce tandis que les graphiques du bas représentent celles mesurées sur le dessus de la pièce. Pour les contraintes du dessous, les courbes montrent qu'elles se situent

presque toujours entre -20 MPa et +20 MPa. Cependant pour les contraintes du dessus, les courbes montrent pour les échantillons #1, 2 et 3 que les contraintes mesurées sont plus importantes en compression. Pour les échantillons #4 et 6, les contraintes du haut et du bas sont similaires. Finalement, les contraintes du haut pour l'échantillon #5 sont en tension. À partir de ces observations, il est possible de faire des relations avec les déformations. Les images qui suivent illustrent bien les liens entre les contraintes et les déformations mesurées.

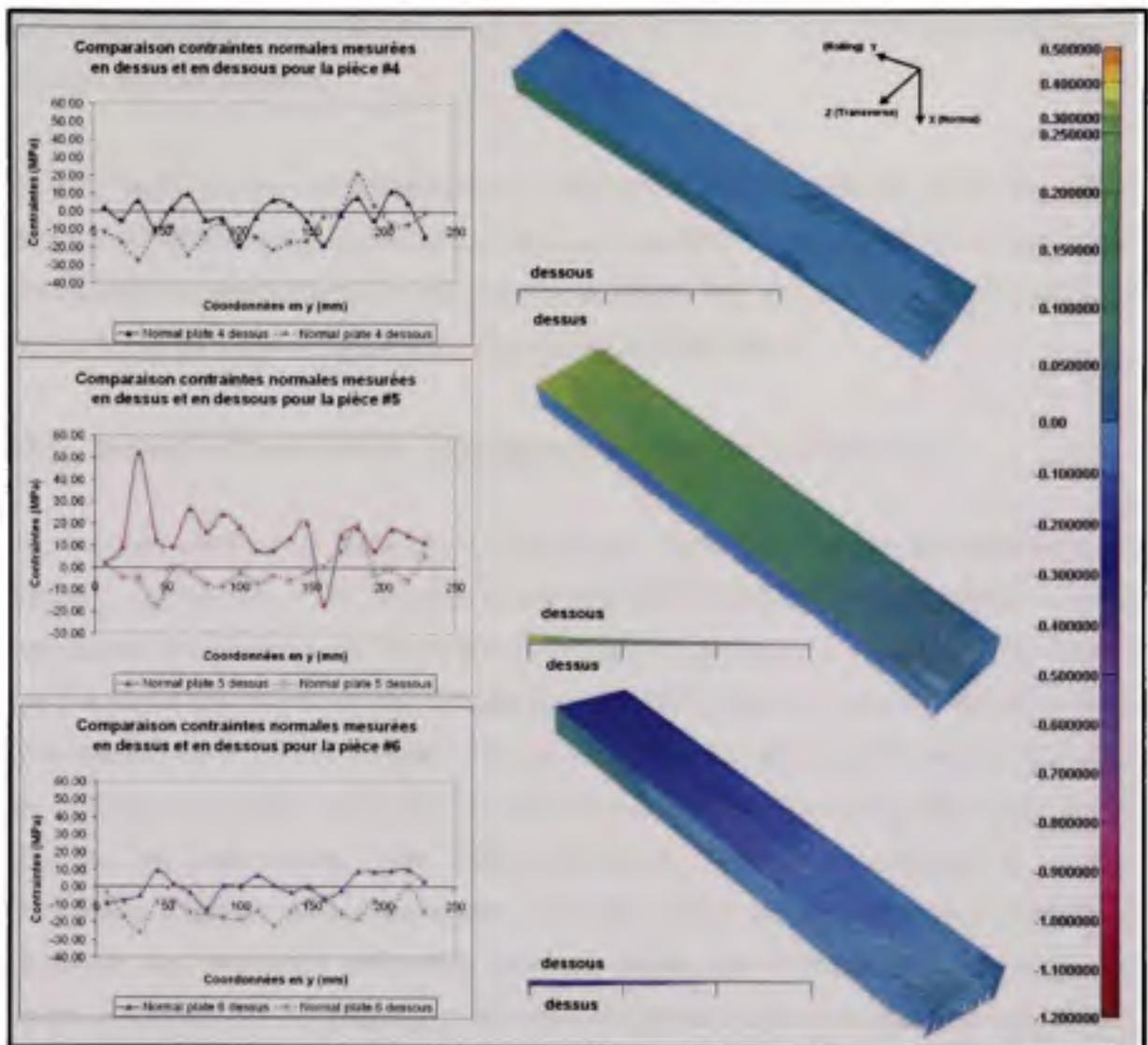


**Figure 6.44** Comparaison des contraintes et des déformations mesurées pour les pièces #1, 2 et 3.

La Figure 6.44 présente les mesures de contraintes obtenues à l'aide de la méthode du faisceau de neutrons selon la direction des Y pour le dessous (lignes pointillées sur les graphiques) et le dessus (lignes pleines sur les graphiques) des pièces #1, 2 et 3 avant l'usinage. On peut également y voir les résultats graphiques des déformations mesurées après l'usinage à l'aide des nuages de points. Ces trois pièces proviennent du matériau standard.

Les graphiques de contraintes montrent que les contraintes du dessous de la pièce sont près du zéro tandis que celles du dessus sont en compression. Les résultats de déformation permettent de constater qu'il existe une relation entre cette différence de distribution de contraintes et la déformation de la pièce. Cette relation se confirme lorsque l'on regarde les résultats obtenus pour les pièces #4, 5 et 6 fabriquées à partir du matériau avec procédé contrôlé.

La Figure 6.45 présente les mesures de contraintes obtenues à l'aide de la méthode du faisceau de neutrons selon la direction des Y pour le dessous (base) et le dessus (poches) des pièces #4, 5 et 6 avant l'usinage. On peut également y voir les résultats graphiques des déformations mesurées après l'usinage à l'aide des nuages de points. Ces trois pièces proviennent du matériau avec procédé contrôlé.



**Figure 6.45** Comparaison des contraintes et des déformations mesurées pour les pièces #4, 5 et 6.

Pour la composante #4, les contraintes du dessus (lignes pleines sur les graphiques) et du dessous (lignes pointillées sur les graphiques) de l'échantillon sont pratiquement identiques et sont toujours comprises entre  $\pm 20$  MPa. La pièce usinée dans cet échantillon subit une déformation maximale de 0,005 po. Pour la composante #5, les contraintes situées dans le haut de l'échantillon sont en tension. Suite à l'usinage, la pièce usinée enregistre une déformation maximale de 0,012 po dans la direction de la base. Cette déformation est à l'inverse de celles observées pour les autres pièces. Pour la composante #6, les contraintes

du bas sont légèrement supérieures en compression à celles du haut. Une légère déformation de 0,012 po a été mesurée.

Suite à l'analyse entre les distributions de contraintes des échantillons et des résultats de mesures de déformations des pièces usinées, il est possible de croire qu'il existe une relation directe entre la distribution des contraintes et la distorsion. De plus le sens des contraintes (compression ou tension) semble dicter le sens de la déformation.

### **6.5.2 Impact de l'intensité des contraintes résiduelles du matériau brut**

Une seconde observation intéressante a été faite à partir des mesures des contraintes des différents échantillons et des résultats de mesures de déformation correspondants. Lorsque l'on regarde les graphiques de la Figure 6.44 et de la Figure 6.45, il est possible de constater que l'intensité (ou grandeur) des contraintes résiduelles présentes dans le matériau pourrait avoir une influence sur la déformation lorsqu'elles dépassent une certaine valeur. À partir de des contraintes mesurées sur la pièce #4 qui n'a pas subi de déformation, des limites de  $\pm 20$  MPa ont été déterminées. Ces limites servent à comparer les résultats et renforcer l'hypothèse proposée dans cette section. Le but n'était pas de déterminer la limite de l'intensité des contraintes résiduelles ayant un impact sur la déformation. Lorsque l'on reporte ces limites sur les graphiques de toutes les pièces et que l'on regarde les résultats de déformation obtenus, on note effectivement une certaine cohérence. La figure suivante présente les mêmes résultats de contraintes que pour la Figure 6.44 et la Figure 6.45 mais avec les limites supérieures et inférieures établies. Sur cette figure, ce ne sont pas les différences entre le dessus et le dessous qui nous intéresse, mais plutôt les contraintes par rapport aux limites.

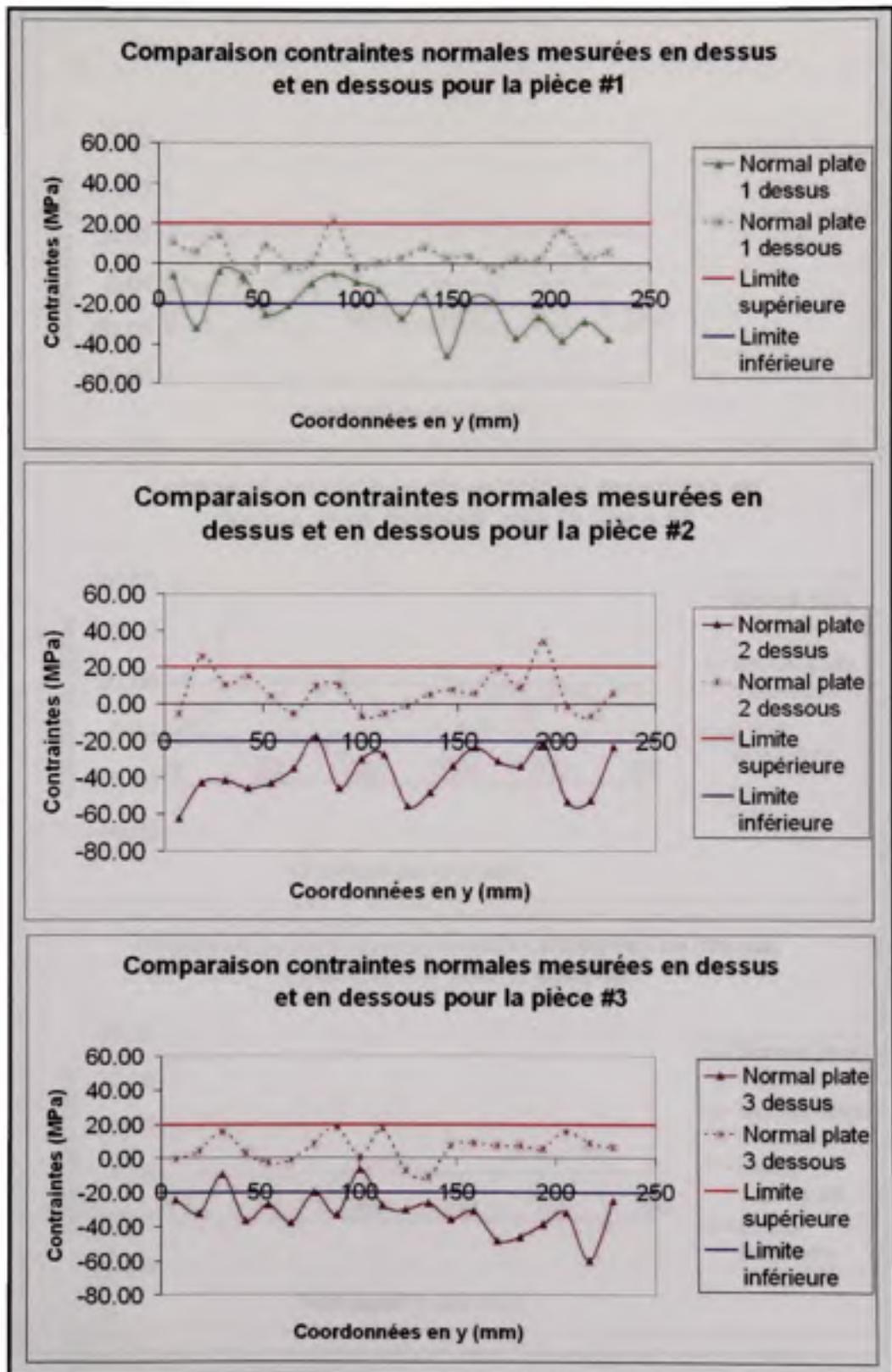


Figure 6.46 Analyse contraintes résiduelles vs limites établies pour les pièces #1, 2 et 3.

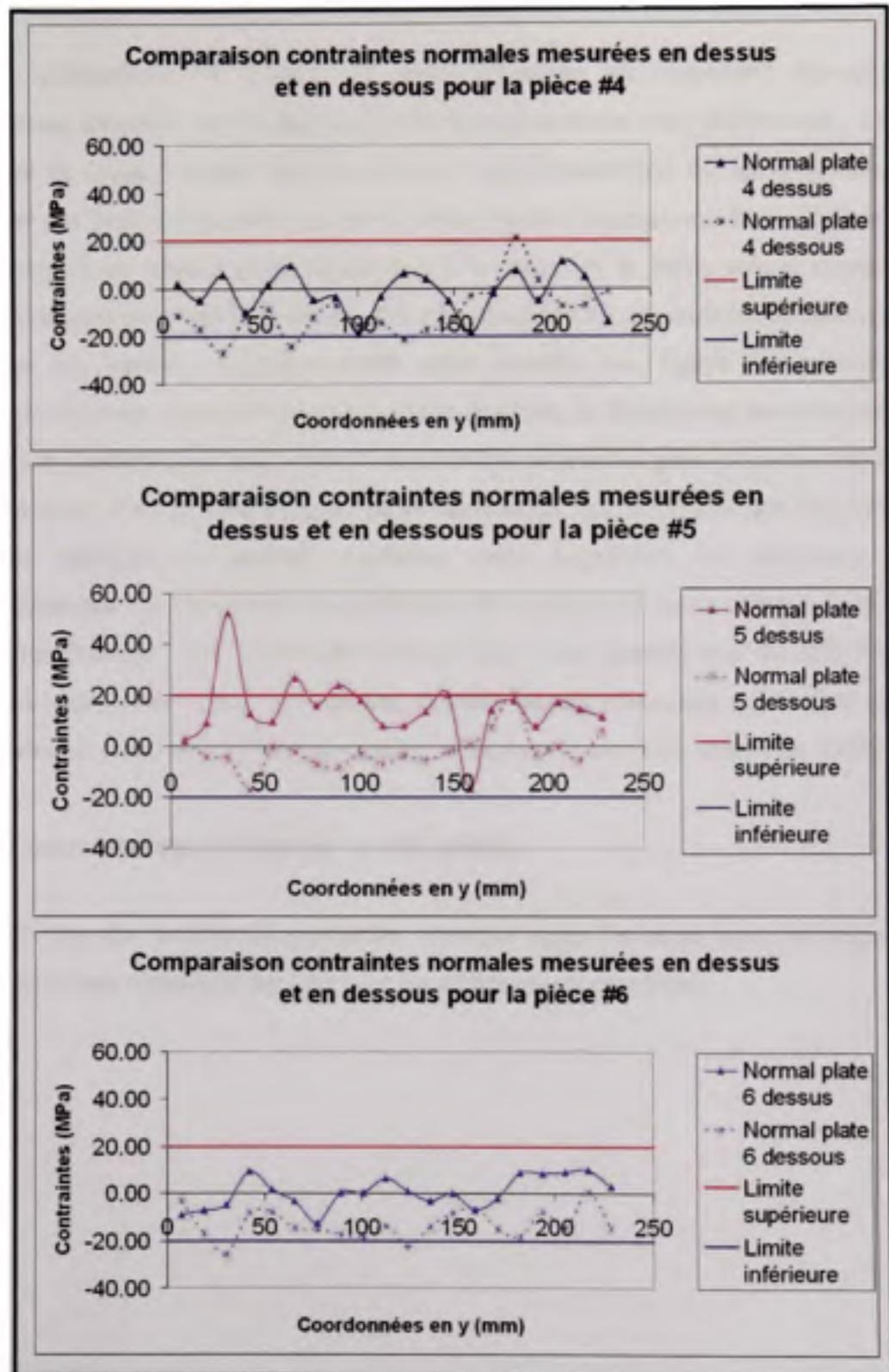
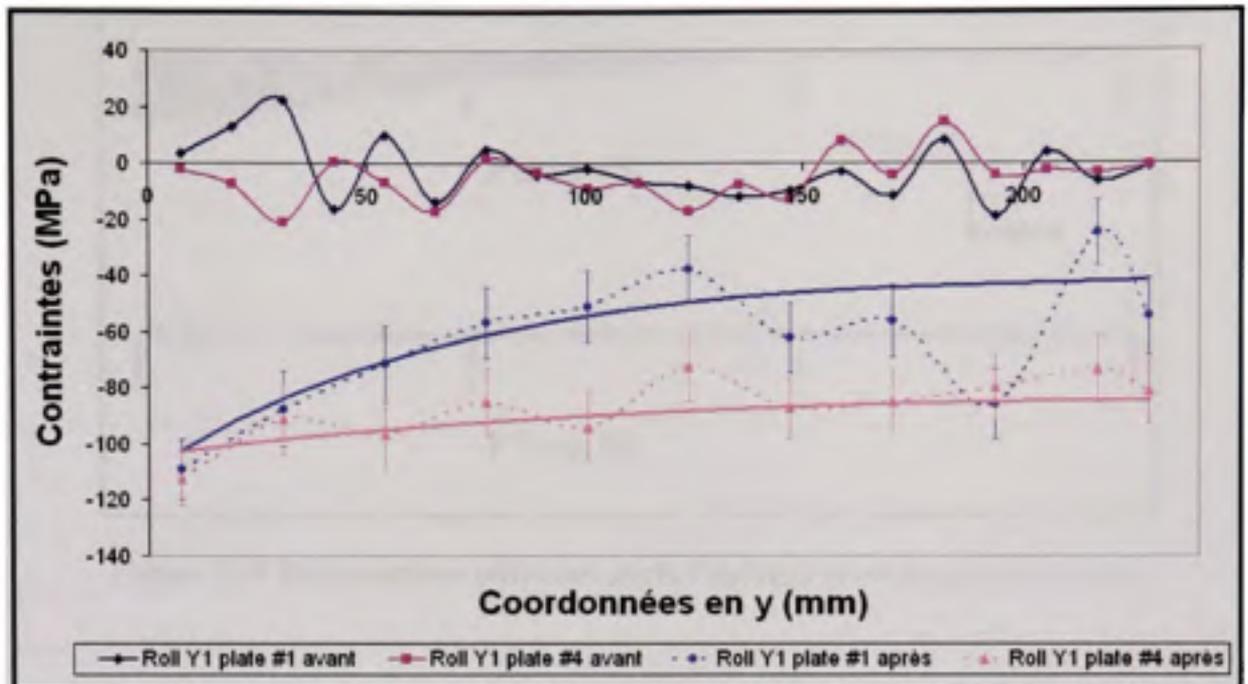


Figure 6.47 Analyse contraintes résiduelles vs limites établies pour les pièces #4, 5 et 6.

Pour les échantillons #1, 2 et 3, la limite inférieure est clairement dépassée et les déformations mesurées sur les pièces usinées correspondantes sont importantes. Les pièces déforment de façon concave (vers le dessus). Pour l'échantillon #4, les contraintes sont à l'intérieur des limites et la pièce usinée ne subit pas de déformation. Pour l'échantillon #5, les contraintes en tension sont supérieures à la limite et la pièce usinée enregistre une déformation convexe (vers le dessous). Pour l'échantillon #6, les contraintes mesurées sont à l'intérieur des limites. La pièce usinée subit toutefois une légère déformation. Cette déformation provient probablement de la différence dans la distribution des contraintes. Ces observations laissent donc croire que l'intensité des contraintes peut avoir une influence sur la déformation mais comme l'impact de la distribution des contraintes est toujours présent dans les résultats, il faudrait confirmer cette hypothèse en effectuant d'autres expérimentations dans lesquelles la distribution des contraintes serait uniforme mais au-delà des limites établies. Les contraintes seraient donc plus grandes que 20 MPa mais sans variations importantes. Dans la littérature, certains auteurs prétendent qu'il existe une limite qui s'évalue en fonction de l'énergie emmagasinée dans le matériau (Heymès, 1997).

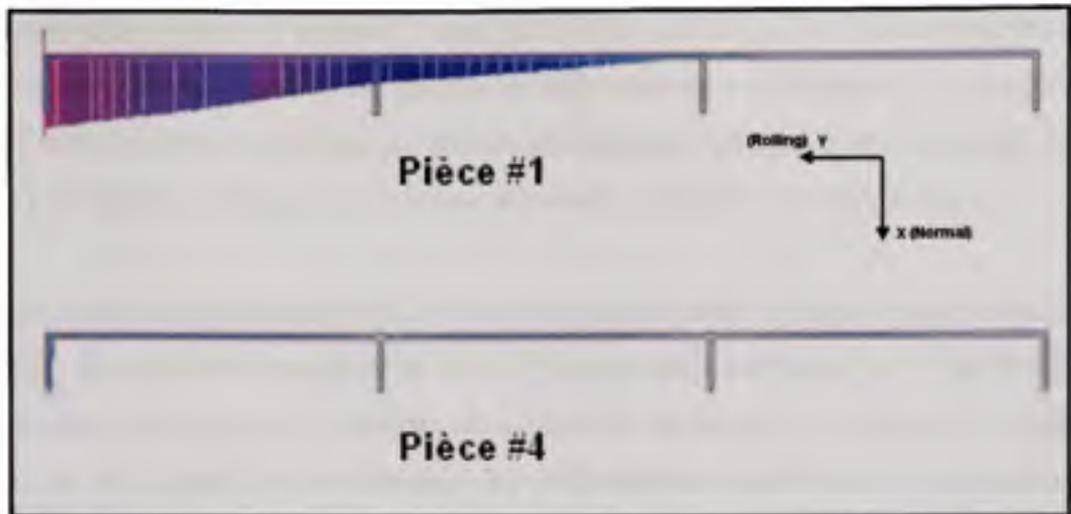
### **6.5.3 Contraintes après l'usinage vs déformation**

La distribution des contraintes résiduelles mesurées après l'usinage selon la longueur de la pièce montre une certaine similitude avec les déformations mesurées.



**Figure 6.48 Distribution des contraintes résiduelles avant et après l'usinage pour les pièces #1 et #4.**

La figure ci-dessus montre un graphique des mesures de contraintes mesurées avant et après l'usinage pour les pièces #1 et #4. Sur le graphique, deux courbes ont été tracées à l'intérieur des tolérances dont les limites sont déterminées par l'incertitude de mesure. La plupart des points de mesure se trouvent donc sur la courbe tracée. De façon générale, il est alors possible de constater que la distribution des contraintes pour la pièce usinée dans le matériau standard et dans le matériau avec procédé contrôlé sont représentatives des déformations obtenues.



**Figure 6.49 Déformations obtenues après l'usinage pour les pièces #1 et #4.**

La figure ci-dessus montre une vue 2D des déformations mesurées à l'aide du laser pour les pièces #1 et #4 et permet donc de comparer les résultats avec ceux de la Figure 6.48.

Une seconde observation peut être faite au niveau de l'intensité des contraintes après l'usinage. Les contraintes dans le matériau standard montrent une plus grande variation que pour dans le matériau avec procédé contrôlé, mais leurs intensités sont toutefois inférieures (en compression). Pour bien comprendre, il est important de rappeler que les contraintes mesurées suite à l'usinage tiennent compte des contraintes d'usinage mais également des contraintes dues à la relaxation du matériau. Comme la pièce en matériau standard subit une plus grande déformation géométrique, il est possible que cette dernière ait permis un relâchement des contraintes en compression à l'intérieur du matériau. Hypothèse qui ne peut pas être vérifiée par la présente étude.

## 6.6 Synthèse de l'analyse

Suite aux résultats de mesures de déformations, il est possible de conclure qu'il existe une différence sur la distorsion des pièces usinées entre les deux types de matériaux utilisés. Cette observation est concluante. Toutes les pièces usinées dans le matériau standard ont

subies des déformations d'environ 1 mm (0.030 po) tandis que les pièces usinées dans le matériau avec procédé contrôlé ont subies des déformations variant entre 0.13 mm (0.005 po) et 0.3 mm (0.012 po) et cela pour les mêmes conditions d'usinage et de montages. La pièce #5 est la seule composante qui a subie une déformation dans la direction inverse.

Au niveau des causes possibles, il a été identifié que la distribution des contraintes ainsi que l'intensité des ces dernières peuvent être à l'origine des déformations. Ces observations proviennent de l'analyse des mesures de contraintes effectuées à l'aide de la méthode du neutron sur les échantillons en fonction des déformations mesurées sur les pièces usinées. Cependant, étant donné le petit nombre de mesures effectuées dans chacune des pièces, ainsi que la taille des échantillons, une certaine réserve doit être faite quant aux conclusions. Une cartographie complète en 3D faciliterait l'analyse et pourrait potentiellement confirmer ces conclusions.

Par rapport aux contraintes résiduelles mesurées pour la pièce usinée, les distributions des contraintes semblent refléter les déformations obtenues. Cependant, les résultats de mesures étant une moyenne sur un volume et le nombre de mesures étant insuffisant, aucune conclusion précise ne peut être tirée. Une autre méthode comme celle du rayon X serait recommandée.

## CONCLUSION

En majeure partie responsable du phénomène de la distorsion des pièces usinées, les contraintes résiduelles engendrent plusieurs problèmes dans le domaine aéronautique au niveau de l'assemblage et des caractéristiques structurales des composantes. Bien que les avancées scientifiques des dernières décennies aient permis d'atteindre un certain niveau de compréhension dans ce domaine, les impacts des différentes sources de contraintes résiduelles sur la distorsion des pièces usinées demeurent incompris. Plusieurs chercheurs s'entendent pour dire que les contraintes déjà présentes dans le matériau avant l'usinage ont un impact majeur sur la distorsion de la pièce après l'usinage.

La revue de littérature a couvert le sujet selon divers aspects. Dans le premier chapitre, les théories de base concernant la provenance, les types, ainsi que les effets des contraintes résiduelles sur les performances d'une composante ont permis d'avoir une meilleure compréhension du phénomène avant d'attaquer les spécificités reliées à la distorsion. Le second aspect a traité des multiples méthodes d'évaluation des contraintes résiduelles. Cette revue sert de guide dans le choix d'une technique de mesure des contraintes en fonction du procédé ou du défaut à mesurer. Dans certains cas, il faut utiliser plus d'une méthode si l'on désire mesurer avec efficacité et précision. Le temps et le budget peuvent également être des facteurs décisifs.

Le troisième chapitre nous a plongé dans le vif du sujet de ce mémoire : l'impact des contraintes résiduelles sur la distorsion des pièces usinées. Une analyse des intérêts des contraintes résiduelles pour le domaine de l'aéronautique a été faite. Il en résulte que les contraintes résiduelles ont un impact important dans le domaine de l'aéronautique puisqu'elles engendrent des restrictions au niveau de la conception ainsi que des augmentations de poids et de coûts. Les contraintes résiduelles peuvent également engendrer la rupture prématurée de certaines composantes critiques. La distorsion engendrée par la distribution des contraintes résiduelles génère chaque année des millions de dollars de rebuts, de retouches et d'étapes d'assemblage additionnelles. Les contraintes résiduelles

proviennent en premier lieu des opérations de mise en forme et de traitement du matériau brut. Ces contraintes varient à travers toute l'épaisseur de la pièce brute. La seconde source de contraintes résiduelles provient de l'opération d'usinage. Ces contraintes se situent près de la surface et peuvent avoir une importance sur la distorsion lorsqu'il s'agit de composantes à parois minces. Selon la littérature, l'addition des deux types de contraintes (mise en forme et usinage) peut donner des résultats qui accentuent ou qui diminuent la distorsion. Cela dépend du signe, de la grandeur et de la distribution des contraintes. C'est une hypothèse qui a été validée à la suite des essais expérimentaux.

Le dernier aspect inclut dans la revue de littérature portait sur la modélisation et la prédiction de la distorsion par la méthode des éléments finis. Outre les développements réalisés dans ce domaine par d'autres chercheurs, des essais de validation d'un logiciel ont aussi été effectués. Concernant les contraintes résiduelles et la distorsion des pièces usinées tel qu'appliqué dans le contexte de ce projet de recherche ou dans un contexte industriel, il en résulte que le logiciel ne s'avère pas un outil intéressant.

Le deuxième volet de ce mémoire lié aux essais expérimentaux, portait sur la procédure expérimentale utilisée afin d'évaluer l'impact des contraintes du matériau brut sur la distorsion des composantes usinées. Pour ce faire, un aluminium divisé en deux lots de matériaux brut possédant des contraintes résiduelles différentes a été utilisé. Les trois premiers échantillons provenaient d'un lot avec des contraintes non contrôlées et les trois derniers d'un lot avec des contraintes contrôlées afin de diminuer leur grandeur. La méthode d'évaluation des contraintes résiduelles à l'aide de la diffraction par faisceaux de neutrons, l'usinage des composantes et la méthode de mesure des déformations géométriques par balayage laser ont été définies. Outre le fait de présenter les paramètres qui ont été utilisés, ces chapitres ont permis de se familiariser avec la méthode de diffraction par faisceaux de neutrons et avec la méthode du balayage laser. Deux méthodes récentes qui ne sont pas encore très répandues sur le marché.

Finalement, les résultats obtenus pour la mesure des déformations géométriques montrent une différence entre les deux types de matériaux utilisés et amènent à la conclusion que les contraintes résiduelles ont une influence sur la distorsion. Cette observation est très concluante puisque toutes les pièces usinées dans le matériau standard ont subi des déformations tandis que les pièces usinées dans le matériau avec procédé contrôlé ont subi très peu de déformations.

Au niveau des causes possibles, il a été observé que la distribution des contraintes, leurs signes, ainsi que leurs intensités peuvent être à l'origine des déformations. Ces observations proviennent de l'analyse des mesures de contraintes effectuées à l'aide de la méthode du neutron sur les échantillons en fonction des déformations mesurées sur les pièces usinées. Cependant, étant donné le petit nombre de mesures effectuées dans chacun des échantillons, une certaine réserve doit être faite quant aux conclusions. L'hypothèse qui veut qu'il y ait distorsion lorsque l'addition des contraintes initiales et des contraintes d'usinage dépasse la limite élastique du matériau ne peut pas être validée avec les expérimentations effectuées. Les contraintes d'usinage se doivent d'être mesurées avec une autre méthode permettant la mesure en surface.

Par rapport aux contraintes résiduelles mesurées sur la pièce usinée, les distributions des contraintes semblent refléter les déformations obtenues. Cependant, les résultats de mesures étant une moyenne sur un volume et le nombre de mesures étant insuffisant, aucune conclusion précise ne peut être tirée. Une autre méthode comme celle du rayon X serait recommandée.

Globalement, l'ensemble du travail réalisé a su répondre à l'objectif général du projet, soit d'évaluer l'impact des contraintes initiales du matériau brut sur la distorsion des pièces usinées. Les expérimentations effectuées ont permis d'exploiter deux différentes techniques de mesures qui ne sont pas très répandues sur le marché, ainsi qu'un logiciel d'analyse par éléments finis.

La mesure des contraintes à l'aide de la diffraction par faisceaux de neutrons s'avère un outil non-destructif très intéressant. Cependant, le nombre de mesures à effectuer fut un facteur critique étant donné le temps de mesure élevé. L'épaisseur de la composante à mesurer fut également une limite lors de l'exécution de cette méthode. Un second outil utilisé cette fois-ci dans le domaine de l'inspection dimensionnelle et que l'on appelle mesurage par balayage laser a été mis à contribution dans ce projet. Cette méthode s'est avérée très efficace. La visualisation rapide des résultats fut un atout très intéressant lors de la comparaison des résultats. Enfin, le logiciel de simulation par éléments finis mis à l'épreuve montre que cette technologie n'est pas encore assez mature pour répondre au problème de la distorsion mais qu'elle présente un grand potentiel pour le futur.

## RECOMMANDATIONS

Lors de ce projet, les essais effectués ont permis de faire certaines observations importantes qui donnent lieu à des améliorations futures et qui pourraient mener à des études complémentaires.

Une première recommandation serait de refaire des mesures par la méthode de faisceaux de neutrons sur une composante avec le matériau standard et sur une composante avec le matériau au procédé contrôlé, mais en effectuant une cartographie complète des échantillons. Cela permettrait d'effectuer une modélisation complète en trois dimensions et faciliterait l'analyse. L'impact de la direction et de la grandeur des contraintes serait plus facilement visualisable. Aussi, il serait ultérieurement possible de reproduire les contraintes du matériau à l'aide de la méthode des éléments finis. Cependant, au niveau de la mesure des contraintes après l'usinage, une seconde méthode de mesure comme celle du rayon X devrait être utilisée afin d'obtenir des valeurs plus précises et plus détaillées en surface.

Dans ce projet, deux types d'échantillons avec des distributions de contraintes différentes ont été analysés. Il a été observé que des distributions de contraintes différentes menaient à des déformations géométriques différentes. La direction et la grandeur des contraintes semblent être un facteur important dans le phénomène de distorsion. À partir de ces observations, il serait intéressant de faire des essais où l'on déplacerait la composante à usiner à l'intérieur du matériau brut afin d'analyser la grandeur de la déformation en fonction de la distribution des contraintes. Il faut bien entendu utiliser un matériau standard où les variations de contraintes sont importantes et connues.

Au niveau du matériau avec procédé contrôlé, les trois composantes usinées ont montré que ce matériau était en mesure de réduire et même d'éliminer le problème de la distorsion. Comme ce matériau est plus dispendieux, dans un contexte industriel, il faudrait effectuer un projet pilote où les lots seraient plus gros et composés de différentes composantes. Les pièces choisies doivent être celles qui montrent le plus de problèmes de distorsion, où le taux

de rebut est élevé ou qui nécessitent des étapes de redressage. Ainsi, il serait possible de valider et de justifier l'utilisation de ce matériau. Et cela autant au niveau de la distorsion qu'au niveau financier.

Lors des mesures par faisceaux de neutrons, une différence importante a été observée au niveau des grains des deux échantillons. Une intensité de faisceau plus élevée était requise afin de mesurer à l'intérieur du matériau avec procédé contrôlé. Cette différence s'explique par le fait que l'aluminium 7475-T7351 standard possède de gros et long grains tandis que l'aluminium 7475-T7351 dont le procédé est contrôlé possède une structure granulaire beaucoup plus raffinée. Cette différence pourrait être un facteur important au niveau des contraintes résiduelles, et encore plus pour les composantes à parois minces. Est-ce que le nombre de grains à l'intérieur d'une paroi mince peut avoir un impact sur la distorsion des pièces usinées? Est-ce que le fait de couper entre des grains ou de couper dans le corps des grains peut avoir une influence sur l'intensité des contraintes résiduelles et sur la redistribution? Il serait intéressant de démarrer une étude en rapport avec ces questions.

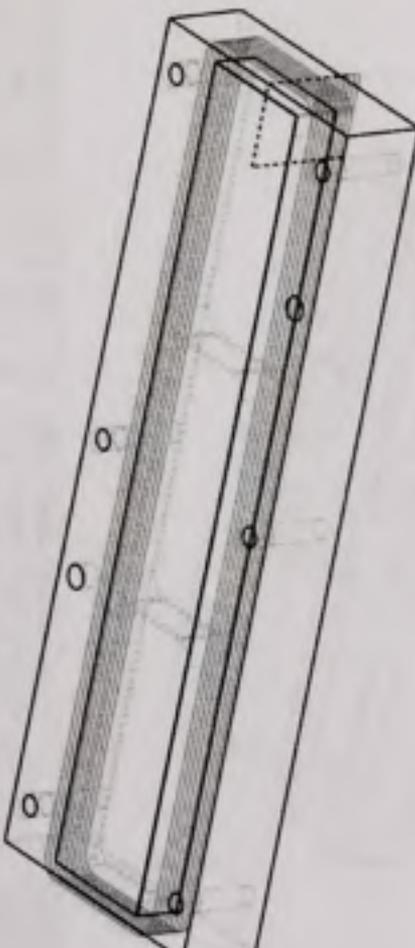
Finalement, afin de valider l'hypothèse qui dit qu'il y a distorsion lorsque l'ajout des contraintes résiduelles du matériau brut et de l'usinage dépassent la limite élastique du matériau, il faudrait ajouter un mini centre d'usinage sur le montage du spectromètre et tenter de mesurer les contraintes par faisceaux de neutrons pendant l'usinage en un point donné. Ainsi, il serait possible de suivre l'évolution des contraintes.

## ANNEXE I

### RÉSUMÉS DES PARAMÈTRES DE COUPE ET DES SÉQUENCES D'USINAGE

| # | Seq Name           | Tool               | RPM      | Feed    | Cut Com | Ramp | ZStep | Step Over | Rough Stock | Prof Stock | Bottom Stock | Rough Option | Peck |
|---|--------------------|--------------------|----------|---------|---------|------|-------|-----------|-------------|------------|--------------|--------------|------|
| 1 | FACING_BOTTOM      | EMILL_0_750_HSS_3F | 8000.000 | 80.000  |         |      | 0.150 | 0.800     |             |            | 0.000        |              |      |
| 2 | ROUGH_CONTOUR_0085 | EMILL_0_750_HSS_3F | 8000.000 | 140.000 | OFF     |      | 0.125 |           |             | 0.025      |              |              |      |
| 3 | FINITION_CONTOUR   | EMILL_0_750_HSS_3F | 8000.000 | 80.000  | OFF     |      | 0.000 |           |             | 0.000      |              |              |      |



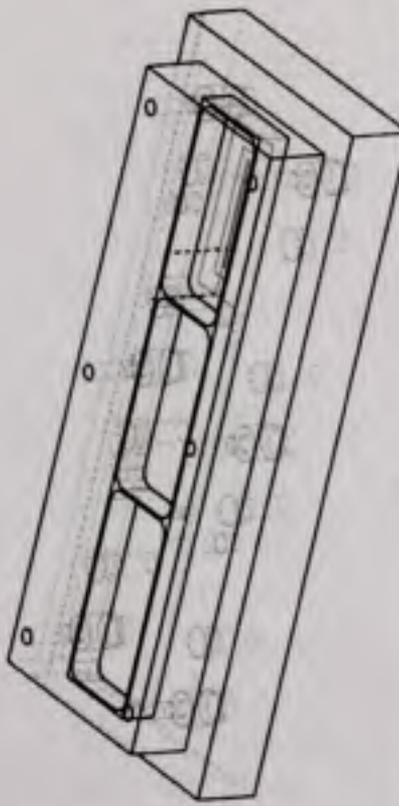
|  |  |
|--|--|
| Sheet 1 of 1   |  |
| <br>Université du Québec<br>École de technologie supérieure<br>Département de génie mécanique | Projet Rmec0197<br>Operation 197-01<br>Workcell VS50_5A<br>Model RMEC0197-COMPOSANTE-MBSEM<br>Drawing RMEC0197-SETUP1<br>13 March 2007<br>QTY 1<br>MTL Aluminium<br>Programmeur Hugo Landry<br>Scale 0.375 |

|        |                           |              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------|---------------------------|--------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 2      | EMILL_0_750_HSS_3FINITION |              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1      | EMILL_0_750_HSS_3F        |              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 18     | T0018_EMILL_2000          |              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 14     | T0014_EMILL_0080          |              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 13     | T0013_EMILL_0650          |              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 15     | T0015_EMILL_1000          |              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 17     | T0017_C16M_45             |              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Pocket | Tool ID                   | Tool Comment |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Figure I-1 Résumé des conditions de coupe et des séquences d'usinage pour le stage 1

| #  | Seq Name            | Tool                      | RPM      | Feed    | Cut Com | Ramp   | ZStep | Step Over | Rough Stock | Prof Stock | Bottom Stock | Rough Option | Peck |
|----|---------------------|---------------------------|----------|---------|---------|--------|-------|-----------|-------------|------------|--------------|--------------|------|
| 1  | ROUGH_POCKET_TOP    | EMILL_0_750_H85_3F        | 8000.000 | 140.000 | OFF     | 90.000 | 0.125 | 0.563     | 0.000       | 0.000      | 0.010        | ROUGH_ONLY   |      |
| 2  | ROUGH_POCKET_B1     | EMILL_0_750_H85_3F        | 8000.000 | 140.000 | OFF     | 5.000  | 0.125 | 0.563     | 0.025       | 0.025      | 0.010        | ROUGH_ONLY   |      |
| 3  | ROUGH_POCKET_B2     | EMILL_0_750_H85_3F        | 8000.000 | 140.000 | OFF     | 5.000  | 0.125 | 0.563     | 0.025       | 0.025      | 0.010        | ROUGH_ONLY   |      |
| 4  | ROUGH_POCKET_B3     | EMILL_0_750_H85_3F        | 8000.000 | 140.000 | OFF     | 5.000  | 0.125 | 0.563     | 0.025       | 0.025      | 0.010        | ROUGH_ONLY   |      |
| 5  | FINITION_BOT_01     | EMILL_0_750_H85_3FINITION | 8000.000 | 80.000  | OFF     | 5.000  | 2.000 | 0.563     | 0.080       | 0.080      | 0.000        | ROUGH_ONLY   |      |
| 6  | FINITION_BOT_02     | EMILL_0_750_H85_3FINITION | 8000.000 | 80.000  | OFF     | 5.000  | 2.000 | 0.563     | 0.080       | 0.080      | 0.000        | ROUGH_ONLY   |      |
| 7  | FINITION_BOT_03     | EMILL_0_750_H85_3FINITION | 8000.000 | 80.000  | OFF     | 5.000  | 2.000 | 0.563     | 0.080       | 0.080      | 0.000        | ROUGH_ONLY   |      |
| 8  | FINITION_PROFILE_01 | EMILL_0_750_H85_3FINITION | 8000.000 | 80.000  | OFF     | 5.000  | 0.125 | 0.563     | 0.000       | 0.000      | 0.000        | PROOF_ONLY   |      |
| 9  | FINITION_PROFILE_02 | EMILL_0_750_H85_3FINITION | 8000.000 | 80.000  | OFF     | 5.000  | 0.125 | 0.563     | 0.000       | 0.000      | 0.000        | PROOF_ONLY   |      |
| 10 | FINITION_PROFILE_03 | EMILL_0_750_H85_3FINITION | 8000.000 | 80.000  | OFF     | 5.000  | 0.125 | 0.563     | 0.000       | 0.000      | 0.000        | PROOF_ONLY   |      |

|    |                           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----|---------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 2  | EMILL_0_750_H85_3FINITION |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1  | EMILL_0_750_H85_3F        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 13 | TO013_EMILL_0000          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 14 | TO014_EMILL_0000          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 15 | TO015_EMILL_1000          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 17 | TO017_CHAM_45             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

|               |                            |
|---------------|----------------------------|
| Projet        | Rmec0197                   |
| Operation     | 197-02                     |
| Workcell      | VSS0_5A                    |
| Model         | RMEC0197-COMPOSANTE_MBSSEM |
| Drawing       | RMEC0197-SETUP2            |
| 13 March 2007 | Programmeur                |
| QTY           | 1                          |
| MTL           | Aluminium                  |
| Scale         | Hugo Landry                |
|               | 0.258                      |

|   |              |
|---|--------------|
| Sheet 1 of 1  |              |
|  Université du Québec<br>École de technologie supérieure<br>Département de génie mécanique   |              |
| L'information présentée sur cette page est confidentielle et demeure la propriété de l'école de technologie supérieure.<br>No part may be reprinted or used in any form without the authorization of l'école de technologie supérieure. |              |
| Pocket  | Tool Comment |

Figure I-2 Résumé des conditions de coupe et des séquences d'usinage pour le stage 2

## ANNEXE II

### COORDONNÉES DES POINTS DE MESURES

| <i>LIGNES</i> | <i>POINTS</i> | <i>POSITIONS</i> |          |          |
|---------------|---------------|------------------|----------|----------|
|               |               | <i>X</i>         | <i>Y</i> | <i>Z</i> |
| <b>Y1</b>     | 1             | 4.19             | 7.366    | 42.29    |
|               | 2             | 4.19             | 19.006   | 42.29    |
|               | 3             | 4.19             | 30.646   | 42.29    |
|               | 4             | 4.19             | 42.286   | 42.29    |
|               | 5             | 4.19             | 53.926   | 42.29    |
|               | 6             | 4.19             | 65.566   | 42.29    |
|               | 7             | 4.19             | 77.206   | 42.29    |
|               | 8             | 4.19             | 88.846   | 42.29    |
|               | 9             | 4.19             | 100.486  | 42.29    |
|               | 10            | 4.19             | 112.126  | 42.29    |
|               | 11            | 4.19             | 123.766  | 42.29    |
|               | 12            | 4.19             | 135.406  | 42.29    |
|               | 13            | 4.19             | 147.09   | 42.29    |
|               | 14            | 4.19             | 158.73   | 42.29    |
|               | 15            | 4.19             | 170.37   | 42.29    |
|               | 16            | 4.19             | 182.01   | 42.29    |
|               | 17            | 4.19             | 193.65   | 42.29    |
|               | 18            | 4.19             | 205.29   | 42.29    |
|               | 19            | 4.19             | 216.93   | 42.29    |
|               | 20            | 4.19             | 228.57   | 42.29    |
| <b>Y2</b>     | 21            | 4.19             | 7.366    | 76.2     |
|               | 22            | 4.19             | 19.006   | 76.2     |
|               | 23            | 4.19             | 30.646   | 76.2     |
|               | 24            | 4.19             | 42.286   | 76.2     |
|               | 25            | 4.19             | 53.926   | 76.2     |
|               | 26            | 4.19             | 65.566   | 76.2     |
|               | 27            | 4.19             | 77.206   | 76.2     |
|               | 28            | 4.19             | 88.846   | 76.2     |

|    |      |        |         |        |
|----|------|--------|---------|--------|
|    | 29   | 4.19   | 100.486 | 76.2   |
|    | 30   | 4.19   | 112.126 | 76.2   |
|    | 31   | 4.19   | 123.766 | 76.2   |
|    | 32   | 4.19   | 135.406 | 76.2   |
|    | 33   | 4.19   | 147.09  | 76.2   |
|    | 34   | 4.19   | 158.73  | 76.2   |
|    | 35   | 4.19   | 170.37  | 76.2   |
|    | 36   | 4.19   | 182.01  | 76.2   |
|    | 37   | 4.19   | 193.65  | 76.2   |
|    | 38   | 4.19   | 205.29  | 76.2   |
|    | 39   | 4.19   | 216.93  | 76.2   |
|    | 40   | 4.19   | 228.57  | 76.2   |
| Y3 | 41   | 4.19   | 7.366   | 110.11 |
|    | 42   | 4.19   | 19.006  | 110.11 |
|    | 43   | 4.19   | 30.646  | 110.11 |
|    | 44   | 4.19   | 42.286  | 110.11 |
|    | 45   | 4.19   | 53.926  | 110.11 |
|    | 46   | 4.19   | 65.566  | 110.11 |
|    | 47   | 4.19   | 77.206  | 110.11 |
|    | 48   | 4.19   | 88.846  | 110.11 |
|    | 49   | 4.19   | 100.486 | 110.11 |
|    | 50   | 4.19   | 112.126 | 110.11 |
|    | 51   | 4.19   | 123.766 | 110.11 |
|    | 52   | 4.19   | 135.406 | 110.11 |
|    | 53   | 4.19   | 147.09  | 110.11 |
|    | 54   | 4.19   | 158.73  | 110.11 |
|    | 55   | 4.19   | 170.37  | 110.11 |
|    | 56   | 4.19   | 182.01  | 110.11 |
|    | 57   | 4.19   | 193.65  | 110.11 |
| 58 | 4.19 | 205.29 | 110.11  |        |
| 59 | 4.19 | 216.93 | 110.11  |        |
| 60 | 4.19 | 228.57 | 110.11  |        |
| Y4 | 61   | 27.59  | 7.366   | 110.11 |
|    | 62   | 27.59  | 19.006  | 110.11 |
|    | 63   | 27.59  | 30.646  | 110.11 |
|    | 64   | 27.59  | 42.286  | 110.11 |

|     |       |         |        |
|-----|-------|---------|--------|
| 65  | 27.59 | 53.926  | 110.11 |
| 66  | 27.59 | 65.566  | 110.11 |
| 67  | 27.59 | 77.206  | 110.11 |
| 68  | 27.59 | 88.846  | 110.11 |
| 69  | 27.59 | 100.486 | 110.11 |
| 70  | 27.59 | 112.126 | 110.11 |
| 71  | 27.59 | 123.766 | 110.11 |
| 72  | 27.59 | 135.406 | 110.11 |
| 73  | 27.59 | 147.09  | 110.11 |
| 74  | 27.59 | 158.73  | 110.11 |
| 75  | 27.59 | 170.37  | 110.11 |
| 76  | 27.59 | 182.01  | 110.11 |
| 77  | 27.59 | 193.65  | 110.11 |
| 78  | 27.59 | 205.29  | 110.11 |
| 79  | 27.59 | 216.93  | 110.11 |
| 80  | 27.59 | 228.57  | 110.11 |
| 81  | 27.59 | 7.366   | 42.29  |
| 82  | 27.59 | 19.006  | 42.29  |
| 83  | 27.59 | 30.646  | 42.29  |
| 84  | 27.59 | 42.286  | 42.29  |
| 85  | 27.59 | 53.926  | 42.29  |
| 86  | 27.59 | 65.566  | 42.29  |
| 87  | 27.59 | 77.206  | 42.29  |
| 88  | 27.59 | 88.846  | 42.29  |
| 89  | 27.59 | 100.486 | 42.29  |
| 90  | 27.59 | 112.126 | 42.29  |
| 91  | 27.59 | 123.766 | 42.29  |
| 92  | 27.59 | 135.406 | 42.29  |
| 93  | 27.59 | 147.09  | 42.29  |
| 94  | 27.59 | 158.73  | 42.29  |
| 95  | 27.59 | 170.37  | 42.29  |
| 96  | 27.59 | 182.01  | 42.29  |
| 97  | 27.59 | 193.65  | 42.29  |
| 98  | 27.59 | 205.29  | 42.29  |
| 99  | 27.59 | 216.93  | 42.29  |
| 100 | 27.59 | 228.57  | 42.29  |

Y5

|           |     |       |         |         |
|-----------|-----|-------|---------|---------|
|           | 101 | 4.19  | 7.366   | 42.291  |
|           | 102 | 6.79  | 7.366   | 42.291  |
|           | 103 | 9.39  | 7.366   | 42.291  |
|           | 104 | 11.99 | 7.366   | 42.291  |
| <b>X1</b> | 105 | 14.59 | 7.366   | 42.291  |
|           | 106 | 17.19 | 7.366   | 42.291  |
|           | 107 | 19.79 | 7.366   | 42.291  |
|           | 108 | 22.39 | 7.366   | 42.291  |
|           | 109 | 24.99 | 7.366   | 42.291  |
|           | 110 | 27.59 | 7.366   | 42.291  |
|           | 111 | 4.19  | 7.366   | 76.2    |
|           | 112 | 6.79  | 7.366   | 76.2    |
|           | 113 | 9.39  | 7.366   | 76.2    |
|           | 114 | 11.99 | 7.366   | 76.2    |
| <b>X2</b> | 115 | 14.59 | 7.366   | 76.2    |
|           | 116 | 17.19 | 7.366   | 76.2    |
|           | 117 | 19.79 | 7.366   | 76.2    |
|           | 118 | 22.39 | 7.366   | 76.2    |
|           | 119 | 24.99 | 7.366   | 76.2    |
|           | 120 | 27.59 | 7.366   | 76.2    |
|           | 121 | 4.19  | 7.366   | 110.109 |
|           | 122 | 6.79  | 7.366   | 110.109 |
|           | 123 | 9.39  | 7.366   | 110.109 |
|           | 124 | 11.99 | 7.366   | 110.109 |
|           | 125 | 14.59 | 7.366   | 110.109 |
| <b>X3</b> | 126 | 17.19 | 7.366   | 110.109 |
|           | 127 | 19.79 | 7.366   | 110.109 |
|           | 128 | 22.39 | 7.366   | 110.109 |
|           | 129 | 24.99 | 7.366   | 110.109 |
|           | 130 | 27.59 | 7.366   | 110.109 |
| <b>X4</b> | 131 | 4.19  | 154.851 | 42.291  |
|           | 132 | 6.79  | 154.851 | 42.291  |
|           | 133 | 9.39  | 154.851 | 42.291  |
|           | 134 | 11.99 | 154.851 | 42.291  |
|           | 135 | 14.59 | 154.851 | 42.291  |
|           | 136 | 17.19 | 154.851 | 42.291  |

|           |     |       |         |         |
|-----------|-----|-------|---------|---------|
|           | 137 | 19.79 | 154.851 | 42.291  |
|           | 138 | 22.39 | 154.851 | 42.291  |
|           | 139 | 24.99 | 154.851 | 42.291  |
|           | 140 | 27.59 | 154.851 | 42.291  |
|           | 141 | 4.19  | 154.851 | 76.2    |
|           | 142 | 6.79  | 154.851 | 76.2    |
|           | 143 | 9.39  | 154.851 | 76.2    |
|           | 144 | 11.99 | 154.851 | 76.2    |
| <b>X5</b> | 145 | 14.59 | 154.851 | 76.2    |
|           | 146 | 17.19 | 154.851 | 76.2    |
|           | 147 | 19.79 | 154.851 | 76.2    |
|           | 148 | 22.39 | 154.851 | 76.2    |
|           | 149 | 24.99 | 154.851 | 76.2    |
|           | 150 | 27.59 | 154.851 | 76.2    |
|           | 151 | 4.19  | 154.851 | 110.109 |
|           | 152 | 6.79  | 154.851 | 110.109 |
|           | 153 | 9.39  | 154.851 | 110.109 |
|           | 154 | 11.99 | 154.851 | 110.109 |
| <b>X6</b> | 155 | 14.59 | 154.851 | 110.109 |
|           | 156 | 17.19 | 154.851 | 110.109 |
|           | 157 | 19.79 | 154.851 | 110.109 |
|           | 158 | 22.39 | 154.851 | 110.109 |
|           | 159 | 24.99 | 154.851 | 110.109 |
|           | 160 | 27.59 | 154.851 | 110.109 |
| <b>Z1</b> | 161 | 4.19  | 7.366   | 42.291  |
|           | 162 | 4.19  | 7.366   | 47.131  |
|           | 163 | 4.19  | 7.366   | 51.971  |
|           | 164 | 4.19  | 7.366   | 56.811  |
|           | 165 | 4.19  | 7.366   | 61.651  |
|           | 166 | 4.19  | 7.366   | 66.491  |
|           | 167 | 4.19  | 7.366   | 71.331  |
|           | 168 | 4.19  | 7.366   | 76.171  |
|           | 169 | 4.19  | 7.366   | 81.011  |
|           | 170 | 4.19  | 7.366   | 85.851  |
|           | 171 | 4.19  | 7.366   | 90.691  |
|           | 172 | 4.19  | 7.366   | 95.531  |

|           |     |      |         |         |
|-----------|-----|------|---------|---------|
|           | 173 | 4.19 | 7.366   | 100.371 |
|           | 174 | 4.19 | 7.366   | 105.211 |
|           | 175 | 4.19 | 7.366   | 110.051 |
|           | 176 | 4.19 | 154.851 | 42.291  |
|           | 177 | 4.19 | 154.851 | 47.131  |
|           | 178 | 4.19 | 154.851 | 51.971  |
|           | 179 | 4.19 | 154.851 | 56.811  |
|           | 180 | 4.19 | 154.851 | 61.651  |
|           | 181 | 4.19 | 154.851 | 66.491  |
|           | 182 | 4.19 | 154.851 | 71.331  |
| <b>Z2</b> | 183 | 4.19 | 154.851 | 76.171  |
|           | 184 | 4.19 | 154.851 | 81.011  |
|           | 185 | 4.19 | 154.851 | 85.851  |
|           | 186 | 4.19 | 154.851 | 90.691  |
|           | 187 | 4.19 | 154.851 | 95.531  |
|           | 188 | 4.19 | 154.851 | 100.371 |
|           | 189 | 4.19 | 154.851 | 105.211 |
|           | 190 | 4.19 | 154.851 | 110.051 |

## APPENDICE A

### EXPÉRIMENTAL REPORT CNBC-710

# Effect of Residual Stresses on the Distortion of Components after Machining

J-F. Lalonde<sup>1</sup>, M. Gharghoury<sup>2</sup>, J-F., Chatelain<sup>1</sup>

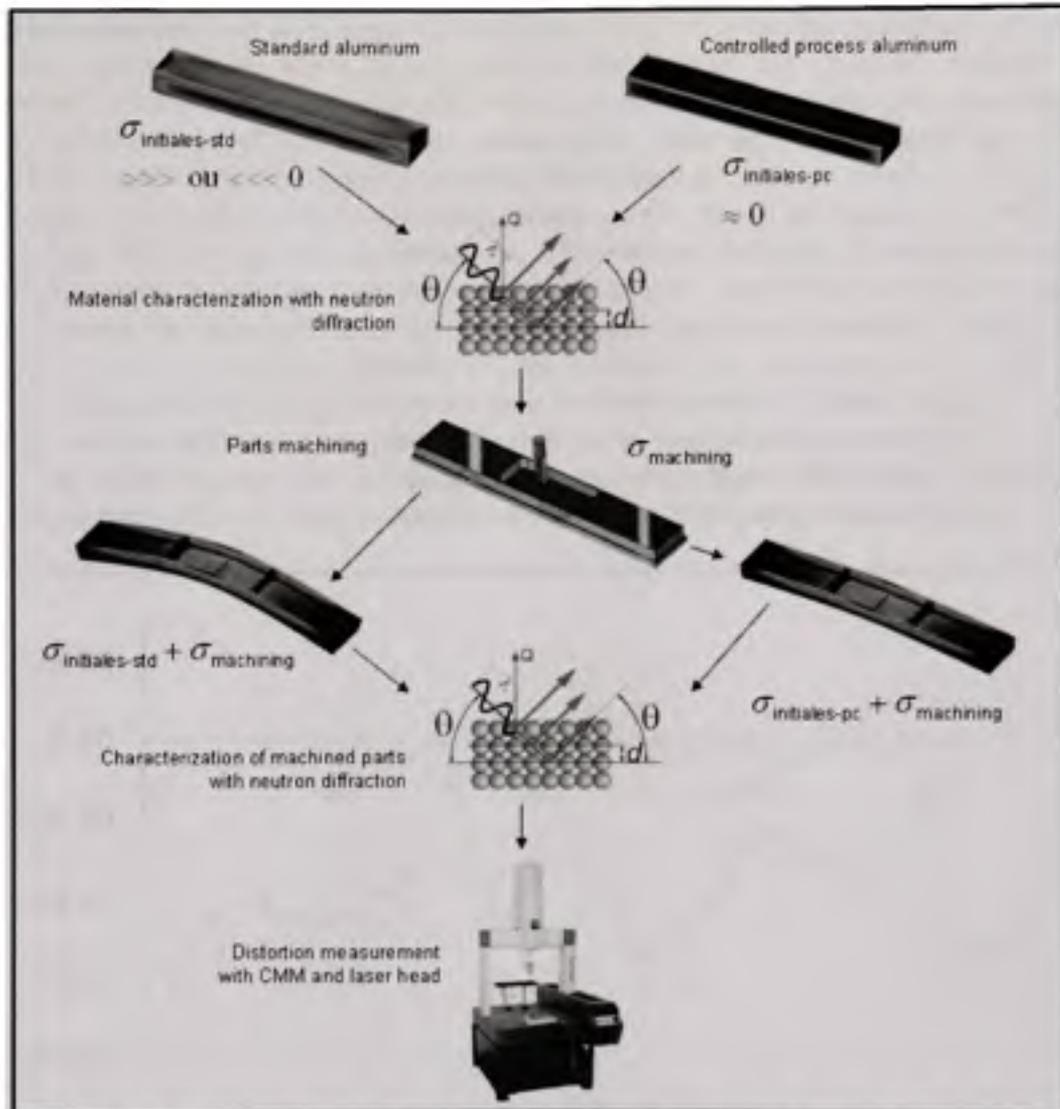
<sup>1</sup> Université du Québec, École de technologie supérieure, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

<sup>2</sup> NRC, Canadian Neutron Beam Centre, Chalk River, Ontario, Canada K0J 1J0

The distribution of residual stresses induced by machining can affect the ability of a component to withstand severe loading conditions in service and may cause dimensional instability (distortion) during machining [1], [2], [3], (Physique & Industrie, 2006). It is critical to be able to predict and thus control the residual stresses due to machining in order to enhance component performance. This is particularly important when critical structural components are machined, especially those used in the aerospace sector where productivity improvement and consistent part dimensionality are important [1].

Several groups have attempted to develop finite element approaches to predict residual stresses due to machining. The problem with the current models is that they do not take into account the initial residual stresses present in the raw material due to prior thermo-mechanical processing. To evaluate the initial stresses created by manufacturing and thermal processes, a non destructive method is preferred, such that the parts can subsequently be used in machining tests [5]. Neutron diffraction is the best non destructive method in this case because of its precision and of the high penetration depth of neutrons, which allows data to be collected from all regions of a bulk specimen.

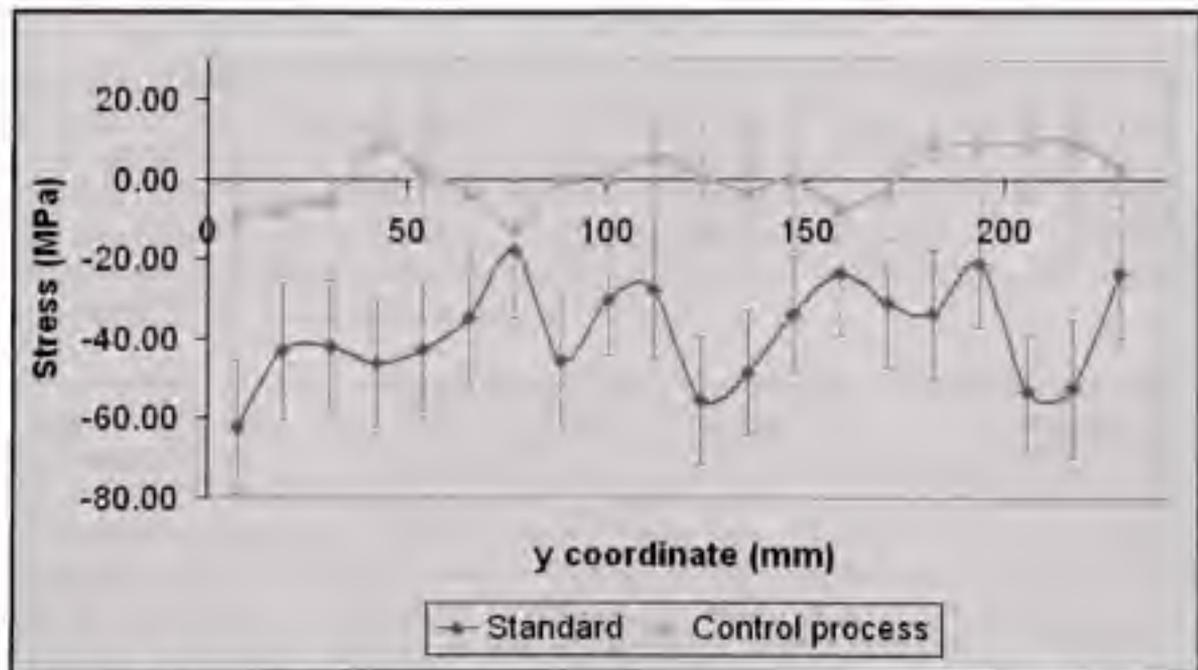
The objective of this research was to evaluate the impact of the initial residual stresses and machining stresses on the distortion of machined parts. Aluminum for which process of working is controlled to minimize the residual stresses is now available on the market. This type of material thus made it possible to carry out a comparative study on the influence of the constraints present before and after machining for different residual stresses distributions. Therefore, we evaluate the residual stresses before and after the machining of a component for standard and for controlled process aluminums. The plan of experimentations is presented at the Figure 1.



**Figure 1: Methodology utilized to compare the distortion of parts for both types of aluminum**

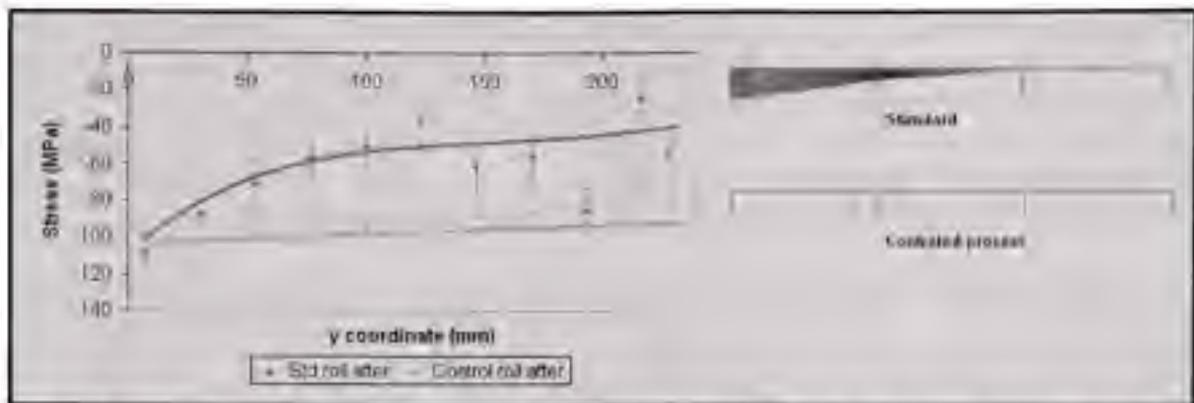
Measurements were taken on six components before machining: three on the standard material and three on the controlled process material with low residual stresses. Because of the measurements time and the component number to be measured, it was not possible to make a complete billet mapping. For each part, measurements were taken on 190 points corresponding to critical places where the component will be machined. Thus it was possible to compare the constraints before and after machining. Volumes of measurements of 4mm and 2mm were respectively used before and after machining. Measurements were taken according to the plan  $\{311\}$  with a correspondent nominal half angle of  $90.24^\circ$  and a wavelength of  $1.73 \text{ \AA}$ . These parameters choices were based on intensity studies carried out by the scientists of the CNBC.

The results obtained lead to several observations. Initially, taken measurements showed that there was symmetry in the residual stresses distribution for standard material in the longitudinal direction only. For material with controlled process, there was symmetry in the three directions: longitudinal, transverse and normal. Secondly, it was possible to note that the three standard components had practically identical distributions. It was in the same way for the three components with controlled process. On the other hand, the two types of material had different stresses distributions. The curves obtained for aluminum with the controlled process had weak variations and were always very close to the zero while the curves obtained for standard aluminum showed more important variations (figure 2). The directions of the constraints (tension or compression) are not the same ones for the corresponding positions of measurements used on both materials. These variations can be at the origin of the deformations generated following the addition of the residual stresses induced by machining and the re-balancing. Some researchers claim indeed that distortion can be generated when the stresses addition exceeds the yield point of material [6].



**Figure 2: Example of results for the raw material normal residual stresses in the Y direction for the standard and the controlled process aluminum.**

About the characterization of material after machining, the neutron diffraction measurement method does not make it possible to measure the distribution of machining residual stresses through an entire thin wall of 0.080" [2 mm]. However, it was possible to obtain the average stress in a point located at the center of the wall. The positioning of the points was critical because of the 2 mm measurement volume. Since the machined components were not straight, several wall scan were carried out in order to evaluate the curves of the parts and to compensate the positions. The results obtained made it possible to note that the distribution of stress for the machined part with standard material and with controlled process material are representative of the geometrical deformations.



**Figure 3: Residual stresses measured after machining in the rolling direction for the standard and the controlled process materials. The right side of the figure shows a 2D representation of the parts deformation measured with a 3D laser scanning technique.**

The results obtained show that the material whose process is controlled to minimize initial constraints is able to solve the problem of the distortion. This is a proof that the residual stresses present in rough material are partly responsible for the distortion. All the parts machined in standard material underwent deformations while the parts machined in material with controlled process underwent very few deformations (see figure 3). The neutron diffraction method allowed observing that the distribution of the constraints, their signs, and their intensities can be at the origin of the deformations.

However, if we want to go a step further, it would be interesting to remake measurements on a standard billet and a controlled process billet by carrying out a complete mapping of the component. The results obtained would then be easier to analyze and they could possibly be used to solve the problem with the finite elements method. Also, during measurements, a difference in the intensity of the neutrons beam was observed for the two types of aluminums. This observation supposes a difference in the granular structure coming from the forming processes. According to the theory, the grains of standard aluminum have a lengthened form in the rolling direction while those of controlled process aluminum are smaller and more uniform [7]. The size and the orientation of the grain could possibly have an influence on the distribution and the amplitude of the residual stresses. A study about the inter-granular evolution of the strains according to the various directions was already carried out at the Chalk River laboratory [8]. This study could allow evaluate the impact of the grains on the deformation and determine which direction is most critical.

#### **References:**

- [1] Young, Keith. A. May 2005. « Machining-induced residual stress and distortion of thin parts ». Doctor of Science, Saint-Louis, Missouri, Washington University, 150 p.
- [2] Prime, M. B., Hill, M. R. 2002a. « Residual Stress, Stress Relief, and Inhomogeneity in Aluminium Plate ». Scripta Materialia. Vol. 46, No. 1, p. 77-82. <<http://www.lanl.gov/residual/alumsm.pdf>>.

- [3] National Physical Laboratory. 2006. « The UK's National Laboratory Internet site ». In. <<http://www.npl.co.uk/materials/residualstress/index.html>>. Consulté le 13 mai 2006.
- [4] Physique & Industrie. 2006. « Physique & Industrie Internet site ». In. <[http://www.physiqueindustrie.com/residual\\_stress.php](http://www.physiqueindustrie.com/residual_stress.php)>. Consulté le 28 avril 2006.
- [5] Kandil, F.A., Lord, J.D., Fry, A.T., Grant, P.V. 2001. « A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection ». In. <<http://www.npl.co.uk/materials/residualstress/publications.html>>. Consulté le 28 avril 2006.
- [6] Totten, George E., et D. Scott Mackenzie. 2003. *Handbook of aluminum*. New York ; Basel: Marcel Dekker Inc., 2 v. p.
- [7] Sitdikov, O. Sh, A. N. Goloborod'ko, R. O. Kaibyshev, H. Miura et T. Sakai. 2005. « Effect of strain rate on the formation of fine-grained microstructure in a cast aluminum alloy 7475 upon high-temperature upsetting ». *Physics of Metals and Metallography*, vol. 99, no 1, p. 106-117.
- [8] Pang, J. W. L., Holden, T. M., Mason T. E. 1998. « In situ generation of intergranular strains in an AL7050 alloy ». *Acta mater.*. Vol. 46, No. 5, pp. 1503-1518.

## LISTE DE RÉFÉRENCES

- Abo-Elkhier, Mahmoud, et Mahmoud S. Soliman. 2006. « Superplastic characteristics of fine-grained 7475 aluminum alloy ». *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 15, no 1, p. 76-80.
- Akiyama, M., et T. Kuboki. 2002. « Optimisation of method for reducing residual stresses after cold bar drawing ». *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 29, no 2, p. 101-106.
- Albertini, Gianni, Giovanni Bruno, Adele Carrado, Fabrizio Fiori, Massimo Rogante et Franco Rustichelli. 1999. « Determination of residual stresses in materials and industrial components by neutron diffraction ». *Measurement Science & Technology*, vol. 10, no 3, p. 56-73.
- ASM International. Handbook Committee. 2002. *ASM handbooks online*, 4. Coll. « ASM materials information ». Materials Park, OH: ASM International. <<http://products.asminternational.org/hbk/>>.
- Automation Creations, inc. 1996-2008. « Online Materials Information Resource - Matweb ». In. <<http://www.matweb.com/>>. Consulté le 13 mai 2006.
- Bhat, Ramaraja, B.R. Sridhar, G. Devananda et K. Ramachandra. 2003. « Effect of machining parameters and heat treatment on the residual stress distribution in titanium alloy IMI-834 ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 139, no 1-3 SPEC, p. 628-634.
- Bowden, D.M. & Halley, J.E. 2001. *Aluminium reliability improvement program - final report*. 60606. Chicago, IL, USA: The Boeing Company.
- Brand, P.C., et H.J. Prask. 1994. « New methods for the alignment of instrumentation for residual-stress measurements by means of neutron diffraction ». *Journal of Applied Crystallography*, vol. 27, no pt 2, p. 164-176.
- Capello, Edoardo. 2005. « Residual stresses in turning: Part I: Influence of process parameters ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 160, no 2, p. 221-228.
- Capello, Edoardo. 2006. « Residual stresses in turning: Part II. Influence of the machined material ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 172, no 3, p. 319-326.
- Chen, L., T.I. El-Wardany et W.C. Harris. 2004. « Modelling the effects of flank wear land and chip formation on residual stresses ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53, no 1, p. 95-98.

- Conseil national de recherches du Canada. 2002. « Site internet du centre canadien de faisceaux de neutrons ». In <http://neutron.nrc-cnrc.gc.ca/>. Consulté le 29 janvier 2008.
- Dahlman, Patrik, Fredrik Gunnberg et Michael Jacobson. 2004. « The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 147, no 2, p. 181-184.
- Davies, M.A., H. Yoon, T.L. Schmitz, T.J. Burns et M.D. Kennedy. 2003. « Calibrated thermal microscopy of the tool-chip interface in machining ». *Machining Science and Technology*, vol. 7, no 2, p. 167-190.
- Dolan, G.P., et J.S. Robinson. 2004. « Residual stress reduction in 7175-T73, 6061-T6 and 2017A-T4 aluminium alloys using quench factor analysis ». *Proceedings of the International Conference in Advances Journal of Materials Processing Technology*, vol. 153-154, no 1-3, p. 346-351.
- Dorlot, Jean-Marie, Jean-Paul Bailon et Jacques Masounave. 1986. *Des matériaux*, 2e. Montréal, Québec: Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, xii, 467 p.
- Dupas, P., P. Todeschini, B. Yrieix et F. Waeckel. 1998. « Evaluation of residual stress measurement techniques and finite element simulations on friction welded pipes ». In *Proceedings of the 1998 ASME/JSME Joint Pressure Vessels and Piping Conference, Jul 26-30 1998*, (San Diego, CA, USA, p. 439-446. 373. ASME, Fairfield, NJ, USA.
- Ekmekçi, B., Ekmekçi, N., Tekkaya, A.E., Erden, A. 2004. « Residual Stress Measurement with Layer Removal Method ». In *Proceedings Of the First Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium*. (Cappadocia, Turkey, July 14-16 2004).
- Frick, R. P. 1999. « Aerospace On A Diet ». In <http://www.mmsonline.com/articles/1199bp3.html>. Consulté le 7 juillet 2006.
- Hauk, V., et H. Behnken. 1997. *Structural and residual stress analysis by nondestructive methods : evaluation, application, assessment*. Amsterdam: Elsevier, xiv, 640 p.
- Heymès, F., Commet, B., Dubost, B., Lassince, P., Lequeu, P., Raynaud, GM. 1997. « Development of New Al Alloys For Distortion Free Machined Aluminum Aircraft Components ». In *1st International Non-Ferrous Processing & Technology Conference*. (St-Louis, Missouri, March 10-12 1997).
- Hua, Jiang, Rajiv Shivpuri, Xiaomin Cheng, Vikram Bedekar, Yoichi Matsumoto, Fukuo Hashimoto et Thomas R. Watkins. 2005. « Effect of feed rate, workpiece hardness and cutting edge on subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel using chamfer + hone cutting edge geometry ». *Materials Science and Engineering A*, vol. 394, no 1-2, p. 238-248.

- Iwata, M., et J. Ogawa. 1997. « Advanced techniques of residual stress measurement [Part 1] ». *Welding Research Abroad*, vol. 43, no 4, p. 39-43.
- Kandil, F.A., Lord, J.D., Fry, A.T., Grant, P.V. 2001. « A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection ». In. <<http://www.npl.co.uk/materials/residualstress/publications.html>>. Consulté le 28 avril 2006.
- Kishida, Michiya, Kazuaki Sasaki et Tuyoshi Itoh. 1990. « Accuracy of residual stress measurement by the hole drilling method. (1st Report, influence of locations of strain gauges) ». *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu. A Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part A*, vol. 56, no 525, p. 1248-1253.
- Koc, Muammer, John Culp et Taylan Altan. 2006. « Prediction of residual stresses in quenched aluminum blocks and their reduction through cold working processes ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 174, no 1-3, p. 342-354.
- Leggatt, R.H., D.J. Smith, S.D. Smith et F. Faure. 1996. « Development and experimental validation of the deep hole method for residual stress measurement ». *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 31, no 3, p. 177-186.
- Li, H., L.Z. Sun, J.B. Li et Z.G. Wang. 1996. « X-ray stress measurement and FEM analysis of residual stress distribution near interface in bonded ceramic/metal compounds ». *Scripta Materialia*, vol. 34, no 9, p. 1503-1508.
- Lin, Zong-Ching, Wun-Ling Lai, H.Y. Lin et C.R. Liu. 2000. « Study of ultra-precision machining and residual stress for NiP alloy with different cutting speeds and depth of cut ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 97, no 1-3, p. 200-210.
- Liu, X.L., F.G. Yan, Y.F. Li, Y.J. Wang et H.M. Pen. 2004. « Effect of cutting parameters on integrality of machined surface in hard cutting ». In *11th International Manufacturing Conference - Advances in Materials Manufacturing Science and Technology*. (Jinan, China, Sep 18-20 2004), p. 307-311. 471-472. Trans Tech Publications Ltd, Zurich-Ueticon, CH-8707, Switzerland.
- Los Alamos National Laboratory. 2006. « The Slitting Method for Residual Stress Measurement ». In. <<http://www.lanl.gov/residual/>>. Consulté le 13 mai 2006.
- Lu, Jian, et Society for Experimental Mechanics. 1996. *Handbook of measurement of residual stresses*. Lilburn, Géorgie, Upper Saddle River, N.J.: Fairmont Press ; Distributed by Prentice Hall PTR, xv, 238 p.

- Mahidhara, R. K. 1995. « Effect of grain size on the superplastic behavior of a 7475 aluminum alloy ». *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 4, no 6, p. 674-678.
- McIvor, A. 2003. « Cartographie des contraintes près de la surface ». In. <<http://neutron.nrc-cnrc.gc.ca/>>. Consulté le 20 mai 2006.
- Milan, M.T., Tarpani, J.R., Bose Filho, W.W. 2005. « Slot Machining Effets on Residual Stress Measurements using the Crack Compliance Method ». In *18th International Congress of Mechanical Engineering*. (Ouro Preto, MG, November 6-11 2005).
- National Physical Laboratory. 2006. « The UK's National Laboratory Internet site ». In. <<http://www.npl.co.uk/materials/residualstress/index.html>>. Consulté le 13 mai 2006.
- Nowag, L., J. Solter, A. Walter et E. Brinksmeier. 2006. « Effect of machining parameters and clamping technique on residual stresses and distortion of bearing rings ». *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 37, no 1, p. 45-51.
- Oettel, R. 2000, Issue 1. « The Determination of Uncertainties in Residual Stress Measurement (Using the hole drilling technique), Project UNCERT, EU Contract SMT4-CT97-2165, Standards Measurement & Testing Programme ». In. <[http://www.npl.co.uk/materials/residualstress/pdf\\_files/cop15.pdf](http://www.npl.co.uk/materials/residualstress/pdf_files/cop15.pdf)>. Consulté le 27 mai 2006.
- Outeiro, J.C., A.M. Dias, J.L. Lebrun et V.P. Astakhov. 2002. « Machining residual stresses in AISI 316L steel and their correlation with the cutting parameters ». *Machining Science and Technology*, vol. 6, no 2, p. 251-270.
- Outeiro, J.C., D. Umbrello et R. M'Saoubi. 2006. « Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no 14, p. 1786-1794.
- Petrucci, G., et B. Zuccarello. 1996. « Effect of plasticity on the residual stress measurement using the groove method ». *Strain*, vol. 32, no 3, p. 97-103.
- Physique & Industrie. 2006. « Physique & Industrie Internet site ». In. <[http://www.physiqueindustrie.com/residual\\_stress.php](http://www.physiqueindustrie.com/residual_stress.php)>. Consulté le 28 avril 2006.
- Prime, M. B. 2001. « Cross-Sectional Mapping of Residual Stresses by Measuring the Surface Contour After a Cut ». *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. Vol. 123, p. pp. 162-168.
- Prime, M. B. 1999a. « Residual stress measurement by successive extension of slot : The crack compliance method ». *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 52, No. 2, p. 75-96. <<http://www.lanl.gov/residual/crackcmp.pdf>>.

- Prime, M. B. 2003a. « Experimental Procedure for Crack Compliance (Slitting) Measurements of Residual Stress ». In. <http://www.lanl.gov/residual/testing.pdf>. Consulté le 13 mai 2006.
- Prime, M. B., Hill, M. R. 2002a. « Residual Stress, Stress Relief, and Inhomogeneity in Aluminium Plate ». *Scripta Materialia*. Vol. 46, No. 1, p. 77-82. <http://www.lanl.gov/residual/alumsm.pdf>.
- Prime, M. B., Hill, M. R. 2006. « Uncertainty, Model Error, and Order Selection for Series-Expanded, Residual-Stress Inverse Solutions ». *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. Vol. 128, No. 2, p. pp. 175-185.
- Prime, M.B. 2005. « Residual Stresses Measured in Quenched HSLA-100 Steel Plate ». In *2005 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*. (Portland, OR, USA, June 7-9 2005). paper number 52 (CD-ROM proceedings).
- Prime, M.B., Hill, M.R., DeWald A.T., Sebring R.J., Dave V.R., Cola M.J. 2002b. « Residual Stress Mapping in Welds Using the Contour Method ». In *Trends in Welding Research, Proceedings of the 6th International Conference*. (Pine Mountain, Georgia, USA, April 15-19 2002), p. 891-896.
- Prime, M.B., Jacobsen, L., & Pacheco, M. 1999b. « Residual stresses measured before and after stress relief in rolled aluminium plate ». In *ASME Mechanics and Materials Conference*. (Blacksburg, VA, USA, June 27-30 1999), p. 241-242.
- Prime, M.B., Martineau, R.L. 2002c. « Mapping Residual Stresses After Foreign Object Damage Using The Contour Method ». In *6th European Conferences on Residual Stresses*. (Coimbra, Portugal, July 10-13 2002), p. 521-526. Vols. 404-407. Materials Science Forum.
- Prime, M.B., Newborn, M.A., Balog, J.A. 2003b. « Quenching and Cold-Work Residual Stresses in Aluminium Hand Forgings: Contour Method Measurement and FEM Prediction ». In *THERMEC'2003: Processing & Manufacturing of Advanced Materials*. (Leganés, Madrid, Spain, July 7-11 2003), p. 435-440. Vols. 426-432. Materials Science Forum.
- Prime, M.B., Sebring, R.J., Edwards, J.M., Baumann, J.A., Lederich, R.J. 2004. « Contour-Method Determination of Parent-Part Residual Stresses Using a Partially Relaxed FSW Test Specimen ». In *Proceedings of the 2004 SEM X International Congress & Exposition on Experimental and Applied Mechanics*. (Costa Mesa, California USA, June 7-10 2004). paper number 144 (CD-ROM proceedings).

- Rao, B., et Y.C. Shin. 2001. « Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no 12, p. 1763-1781.
- Sai, W. Bouzid, N. Ben Salah et J.L. Lebrun. 2001. « Influence of machining by finishing milling on surface characteristics », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no 3, p. 443-450.
- Salio, M., T. Berruti et G. De Poli. 2006. « Prediction of residual stress distribution after turning in turbine disks », *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 48, no 9, p. 976-984.
- Sasaki, K., M. Kishida et T. Itoh. 1997. « Accuracy of residual stress measurement by the hole-drilling method », *Experimental Mechanics*, vol. 37, no 3, p. 250-257.
- Schindler, Hans-Jakob. 2000. « Residual stress measurement in cracked components: Capabilities and limitations of the cut compliance method », *Proceedings of the 5th European Conference on Residual Stresses, 1999 Sept 28-30, Materials Science Forum*, vol. 347, p. 150-155.
- Schindler, Hans-Jakob, Peter Bertschinger et Boris Semenov. 2002. « Near-surface stress measurement in 2D and 3D by the cut compliance technique ». In *Proceedings of the 6th European Conference on Residual Stresses. (Coimbra, Portugal, Jul 10-12 2002)*, p. 515-520. Trans Tech Publications Ltd.
- Sitdikov, O. Sh, A. N. Goloborod'ko, R. O. Kaibyshev, H. Miura et T. Sakai. 2005. « Effect of strain rate on the formation of fine-grained microstructure in a cast aluminum alloy 7475 upon high-temperature upsetting », *Physics of Metals and Metallography*, vol. 99, no 1, p. 106-117.
- Tanaka, Hiroki, Hiroki Esaki, Tadashi Minoda, Kazuhisa Shibue et Hideo Yoshida. 2002. « Effect of roll temperature on formation of refined grains of warm-rolled 7475 based aluminum alloy sheets », *Keikinzoku/Journal of Japan Institute of Light Metals*, vol. 52, no 5, p. 231-235.
- Tanner, D. A., J. S. Robinson et S. D. Whelan. 1998. « Heat Transfer and Distortion in 7010 Forgings », (Cincinnati, OH, United States, p. 151-155. ASM International.
- Tanner, D.A. 2003. « Residual stress measurement and prediction in aluminium alloy forgings ». In. <[http://www.ul.ie/%7Emst/jeremy/research/dt\\_rs1.html](http://www.ul.ie/%7Emst/jeremy/research/dt_rs1.html)>. Consulté le 10 juin 2006.
- Tanner, D.A., et J.S. Robinson. 2003. « Modelling stress reduction techniques of cold compression and stretching in wrought aluminium alloy products ». *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 39, no 5-6, p. 369-386.

- Tanner, D.A., et J.S. Robinson. 2004. « Effect of precipitation during quenching on the mechanical properties of the aluminium alloy 7010 in the W-temper ». *Proceedings of the International Conference in Advances Journal of Materials Processing Technology*, vol. 153-154, no 1-3, p. 998-1004.
- Tanner, David A., Jeremy S. Robinson et Richard L. Cudd. 2000. « Cold compression residual stress reduction in aluminum alloy 7010 ». *Proceedings of the 5th European Conference on Residual Stresses, Sep 28-Sep 30 1999*, vol. 347, no Materials Science Forum, p. 235-240.
- Tennessee Tech University. 2006. « Tennessee Tech University Internet site ». In. <[http://www.tntech.edu/me/labs/Exp\\_Analysis.html](http://www.tntech.edu/me/labs/Exp_Analysis.html)>. Consulté le 27 juin 2006.
- Totten, George E., Maurice A. H. Howes et Tatsuo Inoue. 2002. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park, Ohio: ASM International, vii, 499 p.
- Totten, George E., et D. Scott Mackenzie. 2003. *Handbook of aluminum*. New York ; Basel: Marcel Dekker Inc., 2 v. p.
- Vishay. 2006. « Vishay Company Internet site ». In. <<http://www.vishay.com/>>. Consulté le 13 mai 2006.
- Walker, Donna M., et Richard Y. Hom. 2002. « Residual stress analysis of aircraft aluminum forgings ». *Advanced Materials and Processes*, vol. 160, no 6, p. 57-60.
- Wang, Q.C., X.D. Hu, W. Li et J.L. Yuan. 2006. « Numerical simulation of machining distortion of residually stressed aircraft aluminum components ». *Key Engineering Materials*, vol. 315-316, p. 235-238.
- Wang, Zhao-Jun, Wu-Yi Chen, Yi-Du Zhang, Zhi-Tong Chen et Qiang Liu. 2005. « Study on the machining distortion of thin-walled part caused by redistribution of residual stress ». *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 18, no 2, p. 175-179.
- Wang, Zhaojun, Wuyi Chen, Yidu Zhang, Zhitong Chen et Qiang Liu. 2004. « Study on the residual stress of aluminum alloy by using distortion measurement ». In *Progress of Machining Technology - Proceedings of the Seventh International Conference on Progress Machining Technology, ICPMT'2004*. (Suzhou, China, Dec 8-11 2004), p. 705-709. Aviation Industry Press, Anwai, Beijing, 100029, China.
- Withers, P.J., Bhadeshia, H.K.D.H. 2001a. « Residual stress - Part1 : Measurement techniques ». *Materials Science and Technology*, vol. 17, (April 2001).
- Withers, P.J., Bhadeshia, H.K.D.H. 2001b. « Residual stress - Part2 : Nature and origins ». *Materials Science and Technology*, vol. 17, (April 2001).

- Young, Keith. A. May 2005. « Machining-induced residual stress and distortion of thin parts ». Doctor of Science, Saint-Louis, Missouri, Washington University, 150 p.
- Zhang, Yi-Liang, Hui-Ru Huang et Xiang Li. 2006. « Research on distribution of turning residual stress ». *Beijing Gongye Daxue Xuebao / Journal of Beijing University of Technology*, vol. 32, no 7, p. 582-586.
- Zhao, Lili, et Yidu Zhang. 2004. « Computer simulation of residual stress of cold rolling pre-stretch board ». In *WCICA 2004 - Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, Conference Proceedings*. (Hangzhou, China, Jun 15-19 2004), p. 3511-3513. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, United States.
- Zhou, H., et M.D. Rao. 1993. « On the error analysis of residual stress measurements by the hole-drilling method ». *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 28, no 4, p. 273-276.