

EFFECT OF RESIDUAL STRESSES ON MODAL PARAMETERS OF WELDED STRUCTURES.

EFFET DES CONTRAINTES RESIDUELLES SUR LES PARAMETRES MODAUX DE STRUCTURES SOUDEES.

Thomas Marc, ing., Ph.D. and Champlaud Henri, ing., Ph.D.

*Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure,
1100, Notre-Dame Street West, Montreal, Quebec, H3C 1K3. CANADA.
marc.thomas@etsmtl.ca*

ABSTRACT

In the production of welded structure, residual thermo-elastic stresses are generated with peak level over 200 Mpa. The stress level and spatial distribution depends on growth speed, wall thickness, and temperature gradients present during growth. Hole drilling technique, contour method, X-ray diffraction has been used with some success for measuring residual stresses. As a result there exists a need for non-destructive in-line or off-line monitoring of residual stress. In this paper, we present a new experimental method based on modal parameters measurement to diagnose residual stress. The natural frequencies and modes are measured before and after the welding process and after the application of a relaxation technique. It is shown that vibration data correlates reasonably well with the stress data, accordingly with the considered modes shapes. The method has been applied in industry by measuring the first three natural frequencies of an hydraulic turbine during it's production before and after thermal treatment (600 C degrees). Residual stresses have been recorded during this process by using suitable welded strain gages.

RÉSUMÉ

Les méthodes non destructrices qui existent pour analyser les contraintes résiduelles de pièces mécaniques sont coûteuses, difficiles à utiliser et parfois imprécises. Une nouvelle méthode non destructrice simple et efficace de détection des contraintes internes, par analyse des modes vibratoires, est étudiée. Cette méthode est appliquée sur l'étude de plaques soudées. Des essais ont été faits en laboratoire. Les modes de deux plaques d'acier ANSI 1018 de dimensions 0,305 m x 0,152 m x 0,0635 m (12 po x 6 po x ¼ po) ont été mesurés avant et après le soudage, et aussi, après avoir appliqué une méthode de relaxation de contraintes. Les résultats ont démontré des écarts significatifs entre les fréquences selon les modes de vibration après soudage, démontrant que le principe de la méthode développée fonctionne. L'analyse modale subséquente, soit celle après traitement thermique de relâchement de contraintes internes, a démontré que le traitement thermique avait fonctionné en ramenant les fréquences modales à leurs valeurs d'origine. La répétabilité de la méthode a été vérifiée.

1. INTRODUCTION

Lorsque des pièces d'assemblage sont soudées ensemble, des contraintes internes apparaissent et affaiblissent le montage. Ces contraintes internes sont indésirables et doivent être analysées et relâchées. Il est possible d'utiliser des méthodes destructrices, qui altèrent la pièce pour mesurer les contraintes internes, ou bien des méthodes non destructrices [1], qui n'altèrent en rien la pièce. Ces dernières méthodes peuvent donc être employées avant la mise en service de la pièce. Dans cette recherche, nous avons étudié la faisabilité d'utiliser l'analyse modale [2, 3] pour vérifier l'efficacité de techniques de relaxation.

Les fréquences de résonances sur la pièce sont mesurées avant le soudage, après le soudage et après avoir appliqué une technique de relaxation. Des essais en laboratoire ont été réalisés sur 2 plaques identiques.

2. MÉTHODES NDT

Plusieurs méthodes existent pour mesurer les contraintes internes. Un survol de quelques-unes de ces méthodes est présenté ci-dessous.

2.1 Diffraction des rayons X (XRD)

Cette méthode existe depuis 1950 et s'est avérée comme étant la meilleure. Elle s'applique sur des matériaux polycristallins. Lorsque des contraintes internes sont présentes dans la pièce, l'espacement des plans atomiques change et cela fait diffracter les rayons X. Cette méthode n'est applicable que très près de la surface, soit 10µm. Par contre, elle est inadéquate dans plusieurs applications incluant le contrôle de procédé. Les résultats sont influencés par la texture de la pièce ainsi que par la grosseur des grains.

2.2 Diffraction des neutrons

Développée en 1995, cette méthode est puissante, mais non disponible commercialement, car le montage est dispendieux et comprend un réacteur nucléaire. Elle est limitée par les dimensions de la pièce et peut analyser les contraintes sur une profondeur importante de quelques centimètres.

2.3 Ultrasons

Cette méthode non destructrice a été développée en 1997. Basée sur les dépendances des vitesses ultrasoniques, elle permet la détection des contraintes internes absolues car elle ne nécessite pas de calibration sur un échantillon de référence. Elle est rapide et portable. Elle est indépendante de la texture du matériel mais dépend de sa microstructure et de sa dureté. Les contraintes sont déterminées simultanément avec les constantes élastiques. Des variations de vitesses très minimales nécessitent une grande précision des analyses.

2.4 Électromagnétique

Cette méthode non destructrice a été développée en 1992. Cette technique est basée sur le fait que les contraintes internes font varier la perméabilité magnétique, la magnétostriction, la force coercitive et font bouger les domaines magnétiques. Elle ne fonctionne que sur les matériaux magnétisables comme l'acier. Ainsi, les aciers inoxydables austénitiques ne peuvent être analysés avec cette technique. Elle permet d'analyser une fine couche de 0.1mm et elle est sensible aux défauts de surface, à la microstructure et à la composition du matériau.

3. MÉTHODOLOGIE

Deux plaques identiques de 0,304 m x 0,152 m x 0,0635 m (12 po x 6 po x ¼ po) en acier 1018 ($E = 2.05E11$ Pa ; $\nu =$; $\rho = 7870$ kg/m³) ont été soumises à l'essai.

La méthodologie d'essai a été la suivante :

1. Analyse modale sur les plaques initiales pour avoir une référence. Les plaques pour l'analyse modale étaient maintenues en conditions libre-libre et la technique de mesure par marteau d'impact a été utilisée (figure 1).



Figure 1 : analyse modale d'une plaque libre-libre par technique d'impact

2. Traitement thermique pour relâcher les possibles contraintes internes initiales et nouvelle analyse modale pour vérifier si les fréquences naturelles avaient changées.
3. Revenu dans un four à 500 °C durant une heure. Le refroidissement a été fait à l'air libre à 21°C.

- Simulation du soudage sans apport de métal pour créer les contraintes résiduelles par un apport de chaleur sur une structure bridée tout en ne modifiant pas les conditions aux frontières des plaques. Les plaques ont été encastrées sur deux côtés parallèles à la passe de soudage. Une plaque a été soumise à une intensité de courant de soudage de 100 A et l'autre à 200 A. La simulation du soudage a été réalisée avec une source TIG GTAW avec le gaz $\text{CO}_2\text{-Ar}$. La vitesse d'avance automatique a été établie à 4 mm/s. La plaque soudée est montrée à la figure 2 et la largeur de la zone fondue pour les différentes intensités de courant appliquées est montrée à la figure 3.



Figure 2 : Montage de la plaque pour le soudage

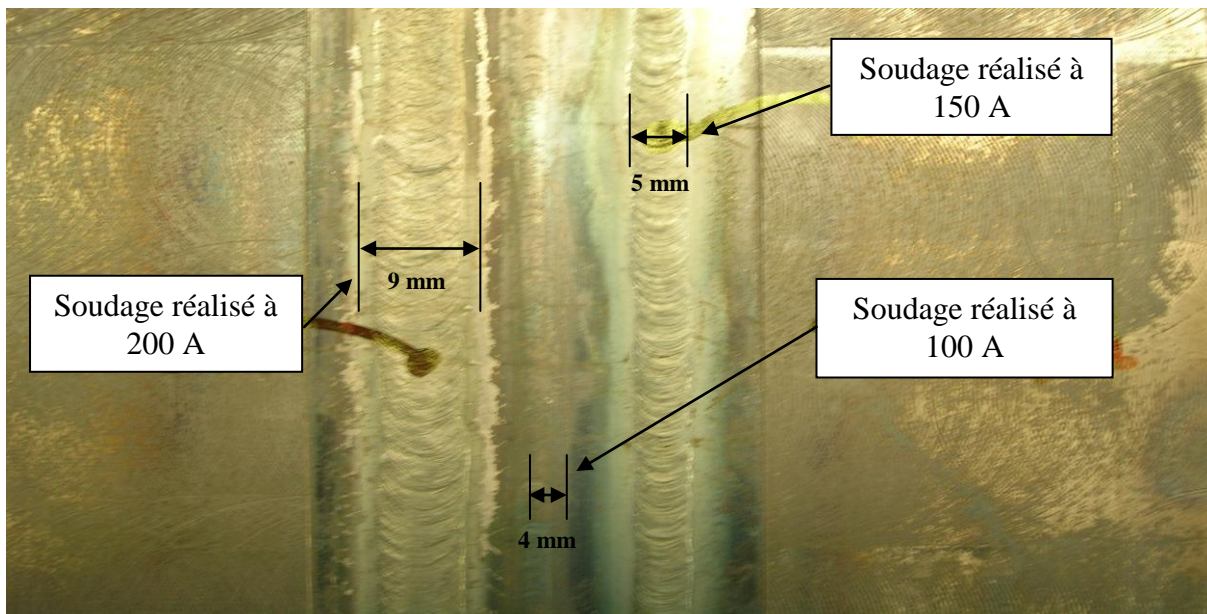


Figure 3 : Plaque de tests de soudage

- Après avoir créé les contraintes résiduelles par un apport de chaleur sur une structure bridée, les plaques ont été refroidies par convection naturelle et une analyse modale a été réalisée sur chacune en condition libre-libre (figure 1).
- Enfin, un traitement thermique a à nouveau été appliqué afin de relâcher les contraintes générées par l'apport de chaleur combiné au bridage. Une analyse modale en condition libre-libre a de nouveau été réalisée pour voir l'effet des contraintes sur les paramètres modaux.

4. RÉSULTATS

La figure 4 montre la fonction de transfert de la plaque chauffée avec une intensité de 100 A. Sur une gamme de fréquence de 0 à 2000 Hz, il est possible de distinguer nettement 8 fréquences de résonance.

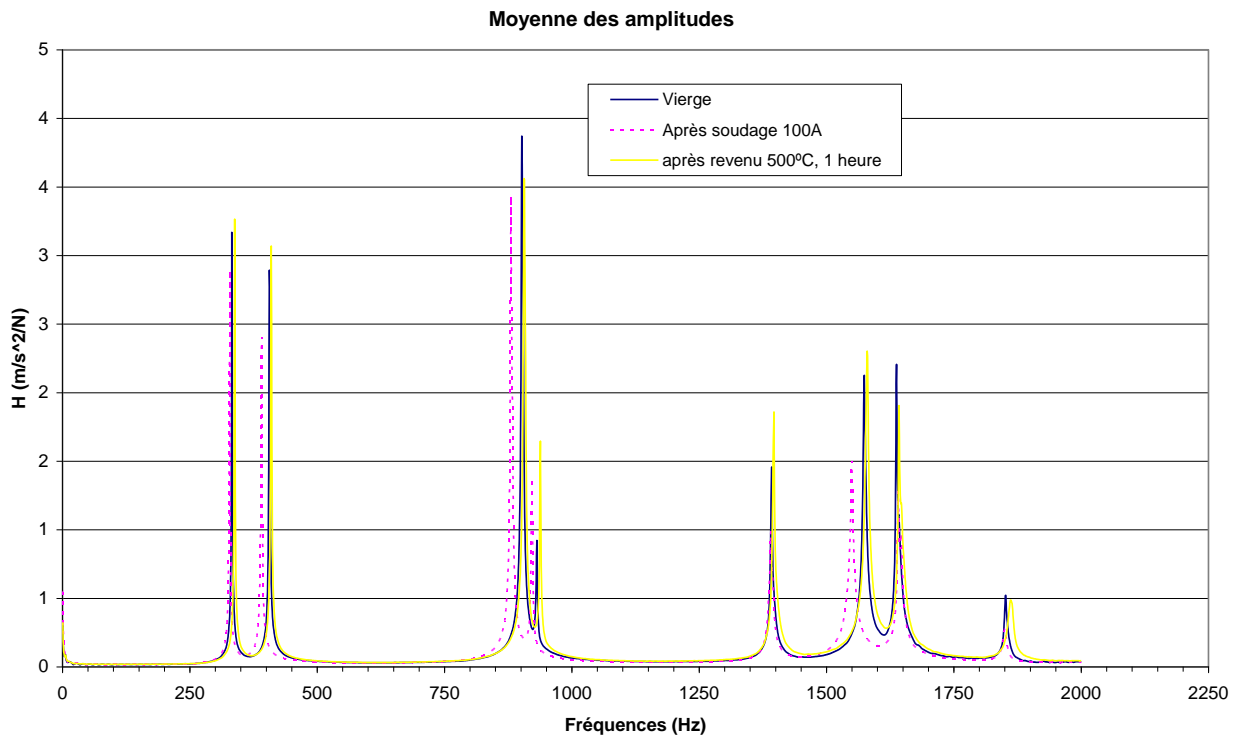


Figure 4 : Résonances d'une plaque chauffée avec 100 A

Il est clair que la génération de contraintes résiduelles a provoqué une baisse significative des fréquences principalement au mode 2, mais aussi aux modes 3, 4 et 6, alors que les modes 1, 5, 7 et 8 n'ont pas été significativement affectés. Une baisse d'amplitude est également constatée, ce qui indique un accroissement de l'amortissement aux modes affectés. Après le traitement thermique, les fréquences reprennent leurs valeurs d'origine, ce qui prouve bien que la variation des fréquences était due aux contraintes résiduelles induites.

La fonction de transfert (FRF) de la plaque chauffée avec une intensité de 200 A est montrée à la figure 5. Le premier traitement thermique appliqué sur la plaque initiale montre que cela a pour effet d'augmenter l'amplitude de la FRF et donc de diminuer l'amortissement hystérétique des matériaux. Le fait d'avoir augmenté le niveau de contraintes résiduelles en appliquant une source de chaleur plus élevée a eu pour effet d'accroître la variation des fréquences notamment en ce qui concerne le 2^e mode, mais aussi pour les modes 1, 3, 4, 6, 8. Les modes 5 et 7 n'ont pas été affectés. Après le 2^e traitement thermique, les fréquences tendent à reprendre leur valeur initiale, mais pas complètement, ce qui suggère que les contraintes résiduelles n'ont pas été complètement relâchées. Par conséquent, la contrainte résiduelle a eu pour effet de faire baisser les fréquences de résonances, ce qui suggère que la rigidité de la pièce a légèrement baissé localement. Également, les contraintes résiduelles ont pour effet de faire varier l'amplitude de la FRF, ce qui suggère que l'amortissement se trouve aussi affecté.

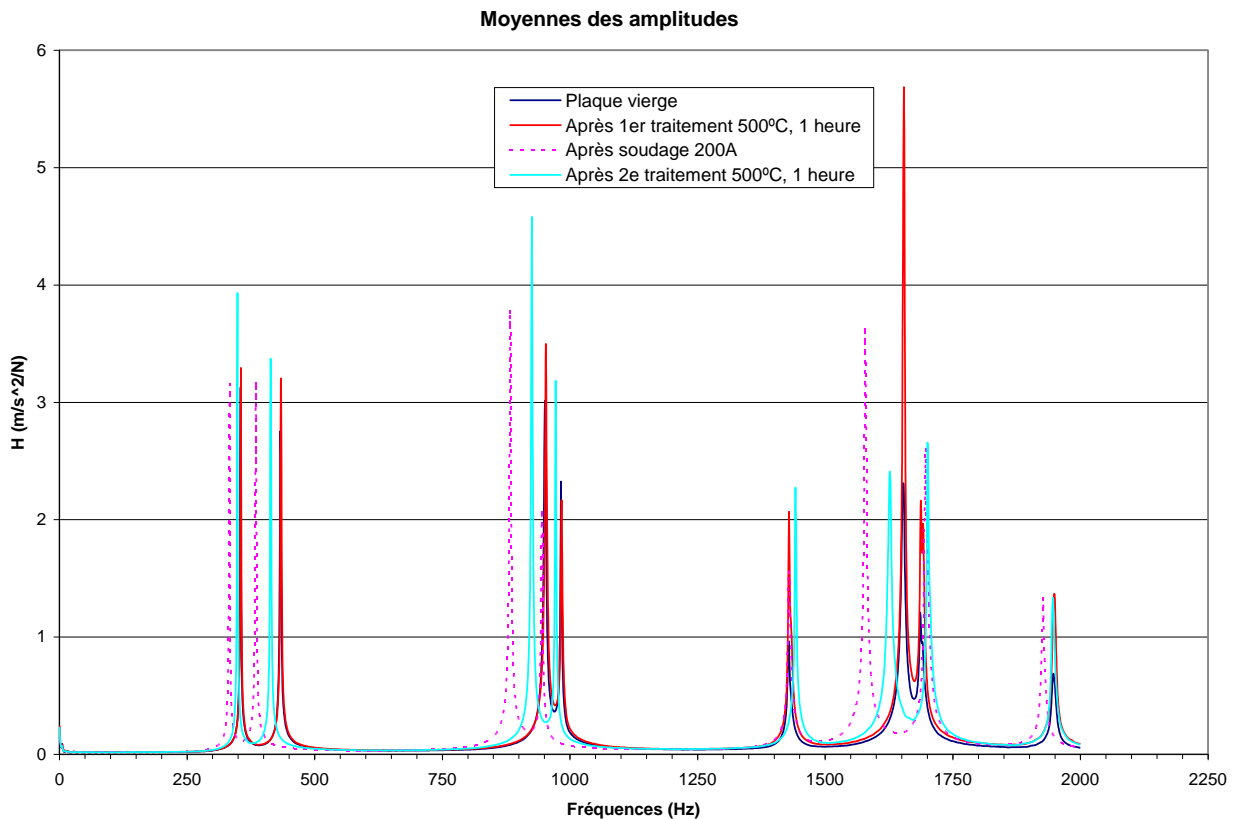


Figure 5 Résonances d'une plaque chauffée avec 200 A

La figure 6 montre à quels modes, la variation de fréquence se fait le plus sentir en fonction du flux de chaleur. Il apparaît clairement que les 3 premiers modes sont les plus sensibles aux contraintes résiduelles.

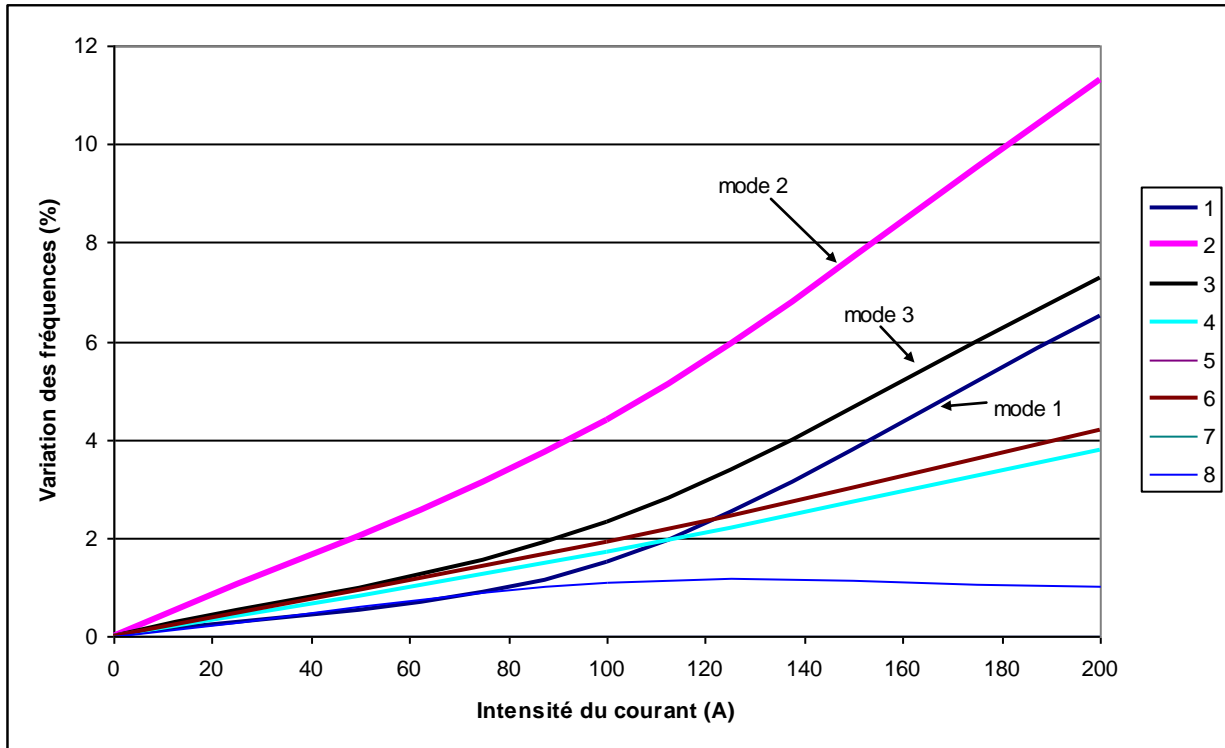


Figure 6 Variation des fréquences en fonction des modes affectés

En fait, l'analyse des déformées modales a montré que les modes en flexion dont la courbure était perpendiculaire au joint de soudure étaient moins affectés (figure 7) que les modes qui comprenaient de la torsion (figure 8).

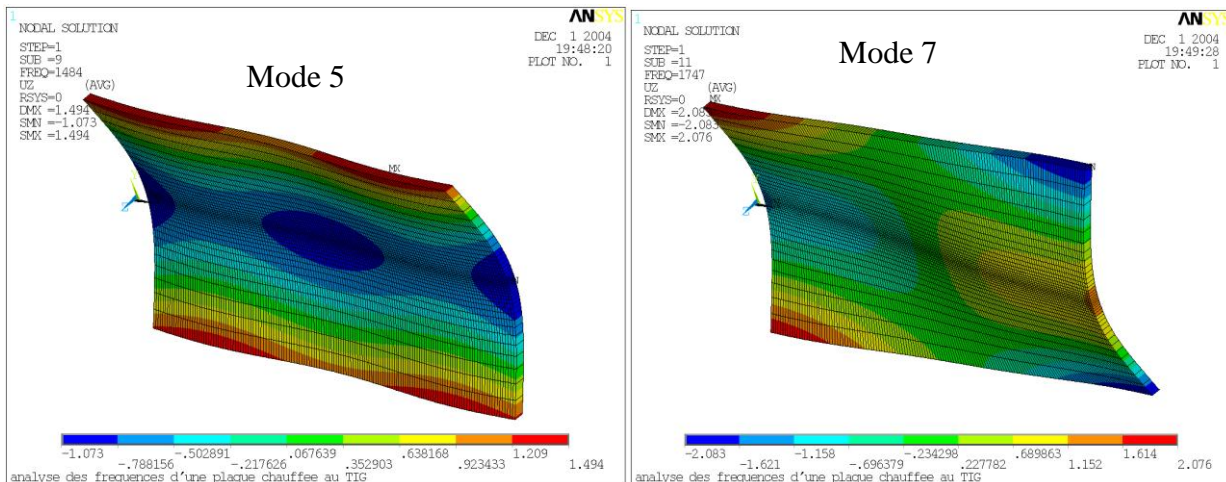


Figure 7 modes les moins sensibles aux contraintes résiduelles

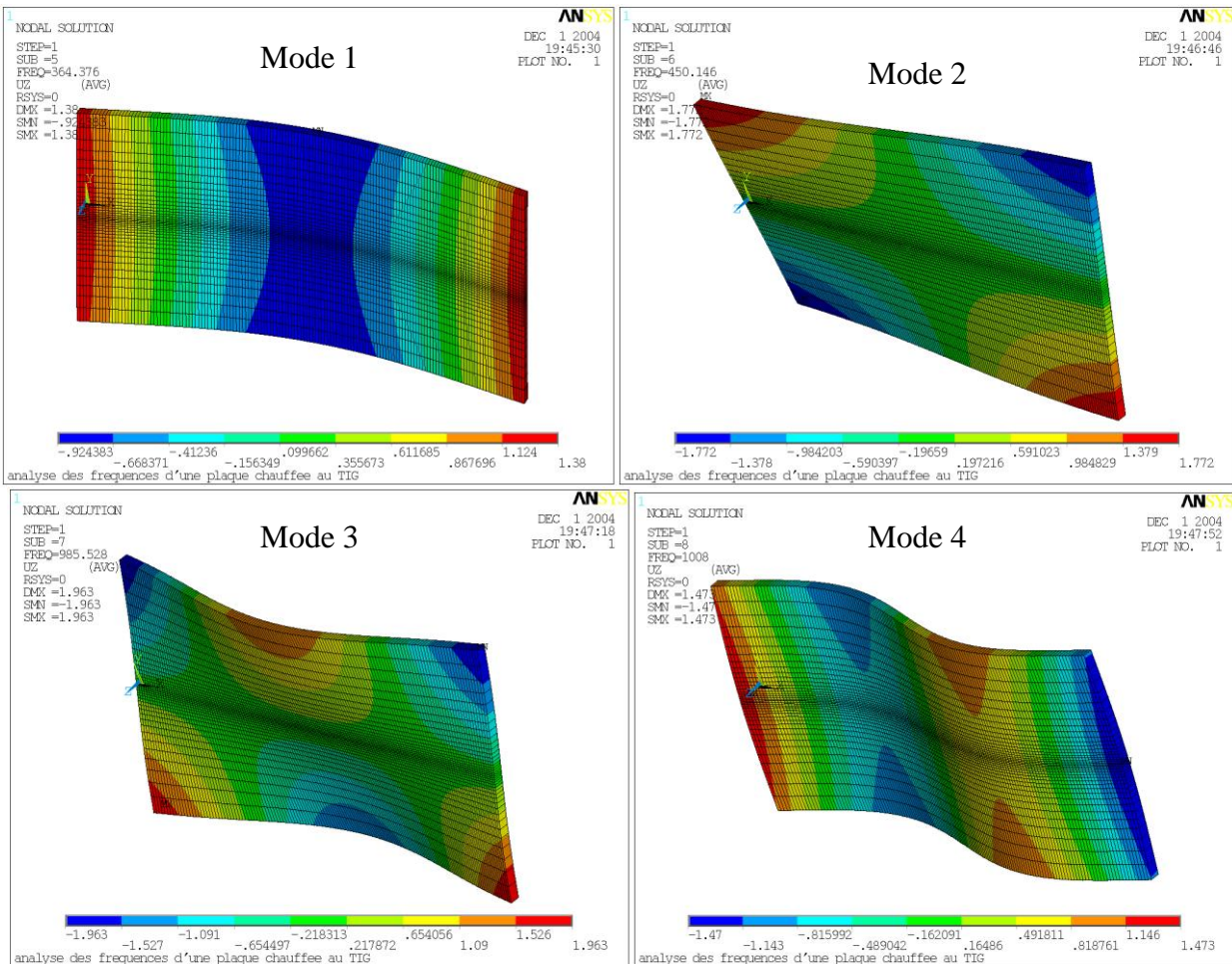


Figure 8 Modes les plus sensibles aux contraintes résiduelles

5. CONCLUSION

Suite à la création de contraintes résiduelles grâce à une simulation du soudage par un apport de flux de chaleur sans apport de métal, la variation des fréquences de résonance de structures a été mesurée. Les analyses modales démontrent clairement que les contraintes résiduelles générées par le chauffage de structures bridées affectent les fréquences de résonance et les amortissements.

Les variations de fréquences varient selon le mode en fonction de l'intensité de la contrainte résiduelle et une variation maximale de l'ordre de 11 % a été constatée pour le 2^e mode. Les modes de torsion apparaissent plus sensibles aux contraintes résiduelles. On remarque que les modes présentant une flexion selon l'axe de la soudure ne sont pas ou peu influencés par la soudure. On a constaté avec surprise que les fréquences après chauffage diminuent, ce qui voudrait dire que la rigidité diminue, car ni la masse ni le moment d'inertie ne

changeaient compte tenu qu'aucun apport de matière n'a été fait durant la simulation du soudage. Ce phénomène peut être expliqué du fait que les structures ont été plastifiées localement sous l'effet du flux de chaleur. Après le traitement thermique, les fréquences de la plaque soumise à une intensité de courant de 100 A reviennent aux valeurs de la plaque initiale et pour la plaque soumise à une intensité de courant de 200 A, les fréquences s'en rapprochent mais pas complètement, indiquant que le traitement thermique de relâchement de contraintes n'a sûrement pas été assez long pour des contraintes résiduelles plus intenses. La mesure des résonances avant et après un traitement de relaxation des contraintes s'avère donc être une méthode rapide, peu coûteuse et performante pour en évaluer l'efficacité.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Mathieu Lamontagne pour son aide précieuse dans la récolte des données. Les auteurs remercient le programme de subvention CRSNG-RDC ainsi que ses partenaires GE Hydro et l'institut de recherche d'Hydro Québec pour leur support financier et matériel.

7. REFERENCES

1. Yolken H.T. and Amatzkanin G., Nondestructive Evaluation (NDE) of Residual Stress in Metals, Austin USA, Defense Technical Information Center (DTIC), 54 pages.
2. Yang Y. P., Jung G., Yancey R. N., May 2005, Finite Element Modeling of Vibratory Stress Relief during and after Welding, 7th international conference on trends in welding research, Pine mountain, Georgia, USA.
3. Best S.R., Hess D.P., Belyaev A., Ostapenko S. and Kalejs J.P., 2004, Manufacturing issues of mechanical quality control using vibration diagnostics of thermo-elastic residual stress in silicon wafers. University of South Florida, Tampa, USA, p. 1-8.

8. BIOGRAPHY

Marc Thomas is professor in mechanical engineering at the École de technologie supérieure (Montreal) since 13 years. He has a Ph.D. in mechanical engineering from Sherbrooke University. His research interests are in vibration analysis and predictive maintenance. He is the leader of a research group in structural dynamics (Dynamo) at ÉTS and an active member of the ACVM (Chapter Quebec). He is the author of the book: Fiabilité, maintenance prédictive et vibrations de machines. He has acquired a large industrial experience as the group leader at the Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) for 11 years.

Henri Champlaud is professor in mechanical engineering at the École de technologie supérieure (Montreal) since 5 years. He has a Ph.D. in mechanical engineering from ÉTS University. His research interests are in stress analysis, finite elements, experimental analysis, non linear behaviour of structures and mechanisms. He is an active member of a research group in structural dynamics (Dynamo) at ÉTS.