

SIMULATION NUMÉRIQUE DU PROCESSUS DU FORMAGE PAR LASER D'UNE PLAQUE MINCE D'UN ACIER DOUX CR4

Toufik TAMSAOUT et El-Hachemi AMARA

Équipe Traitement des Matériaux par Laser, Division Milieux Ionisés, Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA), B.P. 17, Baba Hassen, 16303 Alger, Algérie

E-mail : ttamsaout@cdta.dz

RÉSUMÉ : Le formage par laser est une technique qui consiste en la conception et réalisation de pièces de formes complexes, difficiles à obtenir avec les techniques traditionnelles. Par l'utilisation du laser, le procédé est sans contact et n'exige aucune force extérieure, elle offre aussi plus de flexibilité à un coût réduit. Ce type de procédé intéresse les industries utilisant l'emboutissage et d'autres moyens coûteux pour des évaluations de prototype, comme par exemple les industries aérospatiales, automobiles, navales et microélectroniques. La modélisation analytique du processus du formage par laser est souvent complexe ou impossible à réaliser. Les dimensions et les propriétés variant dans le temps et dans l'espace, font que l'approche numérique est souvent plus pratique pour modéliser le formage par laser. L'étude se répartit en deux modèles. Le premier, purement thermique, permet de déterminer le champ de température produit par la passe laser. Le second traite le couplage thermomécanique. Le champ de température résultant de la première phase de l'étude est utilisé pour calculer le champ de contraintes, de déformations ainsi que l'angle de flexion de la plaque traitée. On détermine le champ de température résultant du passage du laser sur une plaque de dimensions 80x80x1,5 mm³ d'un acier doux. A cet effet, on utilise le logiciel de dynamique des fluides Fluent en calculant les pics de température pour un diamètre du faisceau laser de 3 mm. Par la suite, un modèle d'éléments finis a été développé avec une analyse thermique séquentielle couplée à une analyse élastique et plastique (analyse mécanique) incorporant des propriétés des matériaux dépendant de la température. On s'est limité dans ce deuxième modèle à étudier un seul diamètre du laser de 5,5 mm pour une vitesse de 30 mm/s. Afin de valider nos résultats de simulation, une comparaison a été faite avec les résultats expérimentaux trouvés dans la littérature.

MOTS CLÉS : formage par laser, champ de température, simulation

1. Introduction

Le formage par laser des plaques métalliques ne requiert aucun outillage ou de forces extérieures (processus sans contact mécanique) donc il est approprié pour des prototypages rapides. Cette technique a de grandes applications dans les industries aérospatiales, construction navale et automobile. Les mécanismes de l'utilisation du faisceau laser ont été étudiés par de nombreux chercheurs. Il a été démontré qu'à l'aide d'une puissance de laser appropriée et le contrôle de la vitesse et la position du faisceau laser, on peut atteindre divers champs de température et ainsi obtenir des formes concaves, convexes ou raccourcissement des formes [1,2].

Basé sur le champ de température généré par le balayage laser, Vollertsen propose trois mécanismes différents pour décrire comment la plaque de métal est formé au cours du processus du formage par laser [3] (mécanisme de gradient de température (TGM), flambage mécanisme (BM) et bouleversants mécanisme (MU)). Pour identifier le mécanisme d'un processus de formage spécifique, il faut connaître le champ de température. Cela se fait généralement à l'aide d'une analyse thermique en utilisant des codes de calculs basés sur les éléments finis méthodes (MEF) ou formules théoriques simplifiées [4,5]. Une fois le mécanisme de formage a été identifié, on peut effectuer l'analyse structurelle pour obtenir la forme déformée finale [6–13].

À l'instar d'autres techniques, la technique du formage par laser a également son inconvénient, qui est la limitation de la déformation plastique générée par un balayage unique (single scan). Afin d'accroître la déformation plastique, il faut répéter le processus plusieurs fois [14] ou utiliser l'analyse de plusieurs balayages simultanément (multiple-scan process) [15]. Une autre méthode alternative pour augmenter la déformation plastique consiste à ajouter des forces externes ou des moments de tension au cours du formage par laser. Guan et al. [16] a effectué une investigation numérique sur le formage par laser des plaques préalablement déformées à l'aide de la méthode d'analyse thermique elasto-plastique par éléments finis. Les résultats ont montré que si au moment où le pré-pliage est correctement appliqué l'angle final de flexion de la plaque peut être augmenté remarquablement.

Dans cet article, nos investigations se porteront essentiellement, dans première étape, sur une étude thermique montrant le champ de température d'une plaque d'acier doux à l'aide du code de calcul Fluent. La seconde étape, une analyse structurelle est effectuée à l'aide d'un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis en se basant sur le champ de température préalablement établi.

2. simulations Numériques

La simulation numérique du formage par laser est un processus compliqué, elle implique un grand nombre de variables telles que le flux de chaleur du faisceau laser, distribution de la température dans les éléments de la plaque, les changements dans les propriétés du matériau et l'influence des contraintes thermiques sur les déformations de la plaque. Dans la présente étude, le code de calcul, Fluent est utilisé pour l'analyse thermique. Afin de simplifier l'analyse, l'étude du formage par laser est répartie en deux modèles distincts ; le modèle thermique et le modèle mécanique (structurelle). Ce qui signifie essentiellement la température et le champ des contraintes peuvent être résolus séparément [17], Bien que le champ de température doit être connu avant de déterminer le champ de contraintes.

L'étude est réalisée sur une plaque d'acier doux de dimension 80x80x1.5mm. La plaque est encadrée sur un côté et libre sur les trois autres côtés. La trajectoire (ligne de balayage) du faisceau laser est sur la surface supérieure de la plaque et est parallèle à la partie fixe (figure 1).

2.1. Analyse thermique

Le champ de température en régime transitoire peut être déterminé par résolution de l'équation de transfert de chaleur suivante :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (01)$$

Où ρ est la densité du matériau (kg/m^3), C est la chaleur spécifique (J/kg K), T est la température (K), t est le temps (s), k est la conductivité thermique (W/m K) et ∇ est l'opérateur gradient. Le flux de chaleur généré par le faisceau laser peut être considéré comme ayant une distribution gaussienne comme suit [18] :

$$I(x, y) = \frac{2AP}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) \quad (02)$$

Où $I(x, y)$ est la densité du flux thermique du faisceau laser en point (x, y) (W/m^2), A est le coefficient de l'absorption de la surface de la plaque, P est la puissance du laser (W), R est le rayon du faisceau laser (m) et r est la distance entre le point (x, y) et le centre du faisceau (m). Les conditions aux limites du transfert thermique sont supposées tel que le flux de chaleur généré par le faisceau laser est appliqué sur la face supérieure définie par l'équation (2) ; tandis que sur les autres faces le flux de chaleur est supposé être que le flux convectif exprimé par $q=h(T-T_0)$; ou $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ est le coefficient de la convection thermique et $T_0=293\text{K}$ est la température ambiante. La température initiale de la plaque est supposée T_0 . Le coefficient d'expansion

thermique, chaleur spécifique et le coefficient de conduction sont dépendant de la température [19]. Le maillage réalisé sur la plaque à étudiée est présenté sur la figure 2.

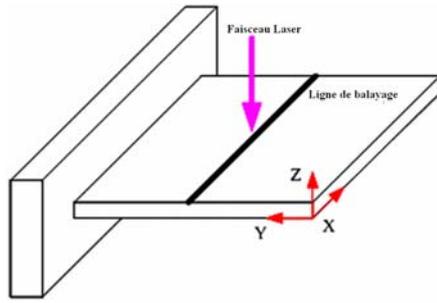


Figure 01 : Configuration du formage par laser d'une plaque

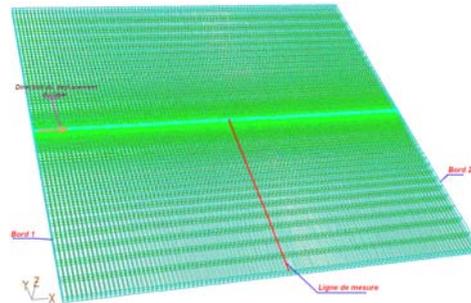


Figure 02 : maillage utilisé dans le calcul.

2.2. Analyse structurelle

Comme indiqué ci-dessus, l'analyse des contraintes s'effectue séparément. Toutefois, en raison de la variation des températures nodales avec le temps, les contraintes mécaniques et les déformations varient également avec le temps. Cela indique que l'analyse structurelle est dépendante du temps, bien que l'inertie et les forces de l'amortissement ne doivent pas être inclus, C'est ce que l'on appelle analyse quasi-statiques. Le matériau de la plaque est isotrope. Au cours du processus de formage par laser, la plaque subit un cycle complet de chauffage et de refroidissement, ce qui amène la plaque à avoir une période de chargement (chauffage) et une période de déchargement (refroidissement). Le déplacement $\Delta u(x, y, z, t)$ en un point quelconque peut être exprimé en termes de la déplacement nodal comme suit :

$$\{\Delta u(x, y, z, t)\} = [N(x, y, z)]^T \{\Delta u_e(t)\} \quad (03)$$

Où $[N(x, y, z)]$ est la matrice des fonctions de forme ou fonction d'interpolation élémentaire et $\{\Delta u_e(t)\}$ est le vecteur pas de déplacement élémentaire (nodal). Le pas des déformations totale peuvent être calculés à partir des pas de déplacement $\Delta u(x, y, z, t)$ à l'aide des équations non linéaires reliant les déformations et les déplacements, comme suit :

$$\{\Delta \varepsilon\} = [B] \{\Delta u(x, y, z, t)\} = [B] [N(x, y, z)]^T \{\Delta u_e(t)\} \quad (04)$$

Où $\{\Delta \varepsilon\}$ est le vecteur pas de déformation totale, $[B]$ est la matrice décrivant la relation entre les pas de déformations et les déplacements. D'une autre manière, les pas de déformation totale peuvent être divisés en trois parties comme suit :

$$\{\Delta \varepsilon\} = \{\Delta \varepsilon^e\} + \{\Delta \varepsilon^p\} + \{\Delta \varepsilon^T\} \quad (05)$$

Où $\{\Delta \varepsilon^e\}$ est le pas des déformations élastiques, $\{\Delta \varepsilon^p\}$ est le pas des déformations plastique et $\{\Delta \varepsilon^T\}$ est le pas des déformations thermiques. Le pas des déformations élastiques et plastiques peuvent être exprimés en termes de pas des contraintes comme suit :

$$\{\Delta \varepsilon^e\} = [D_e]^{-1} \{\Delta \sigma\} \quad (6a)$$

$$\{\Delta \varepsilon^p\} = [D_{ep}]^{-1} \{\Delta \sigma\} - [D_e]^{-1} \{\Delta \sigma\} \quad (6b)$$

$$\{\Delta \varepsilon^T\} = \alpha \Delta T \quad (6c)$$

Où $\{\Delta \sigma\}$ est le pas des contraintes, $[D_e]$ est la matrice élastique, $[D_{ep}]$ est la matrice elasto-plastique, ΔT est le pas de température et α est le coefficient de dilatation thermique. L'équation d'équilibre s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$[K] \{\Delta u\} = \{\Delta R\} \quad (07)$$

Où

$$[K] = \sum [K_e] = \sum \int_{\Omega} ([B][N])^T [D_{ep}] [B][N] d\Omega$$

$$\{\Delta R\} = \sum \{\Delta R_e\} = \sum (\{\Delta F_T\} + \{\Delta F_M\})$$

$[K]$ est la matrice de raideur globale, $[K_e]$ est la matrice de raideur élémentaire, Ω est le domaine de l'élément, $\{\Delta R\}$ est le vecteur de pas de force globale, $\{\Delta R_e\}$ est le vecteur pas de la force élémentaire, $\{\Delta F_T\}$ est le vecteur thermique et $\{\Delta F_M\}$ est le vecteur du chargement mécanique.

3. Résultats et discussions :

3.1. Analyse thermique :

Afin d'étudier le processus du formage par laser, il faudrait fixer le paramètre du réglage numérique qui est l'absorption thermique A et ceci pour être en accord avec les résultats expérimentaux [20]. Pour cela on a effectué une simulation en faisant varier le coefficient A entre 0.60 et 0.85 et on mesure la température maximale au centre de la plaque (face supérieure et inférieure) pour un diamètre de laser $d=5.5\text{mm}$, une puissance $P=760\text{W}$ et une vitesse de déplacement du faisceau $v=30\text{mm/s}$.

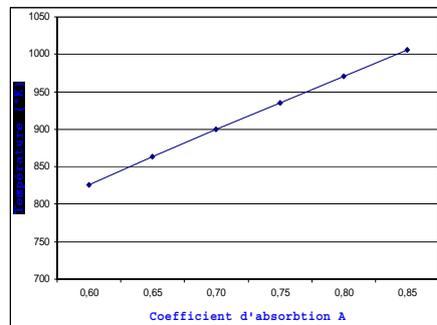
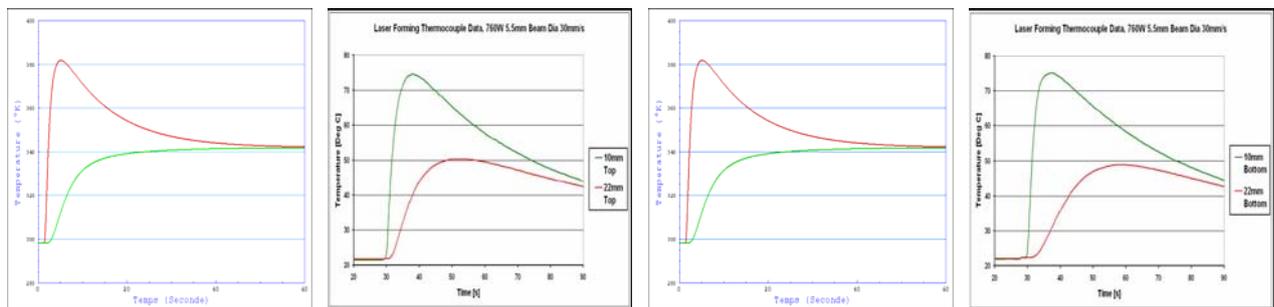


Figure 03 : variation du pic de la température en fonction de l'absorption thermique.

Cette courbe montre l'importance du coefficient d'absorption sur le processus du formage par laser. Le pic de température varie sensiblement avec le coefficient d'absorption A. La température maximale chute de 1006°K à 826°K pour des coefficients d'absorption qui varient respectivement de 0,85 à 0,60. Après analyse des données obtenues pour l'ensemble des les coefficients d'absorption ci-dessus, il a été remarqué qu'un meilleur accord à 10 et 22mm du centre de la plaque a été obtenu pour $A=0,85$. On le constate voit sur les figures qui suivent.



Surface supérieure

Surface inférieure

Figure 04: Comparaison entre les modèles numériques et les résultats expérimentaux obtenus par S.P.Edwardson [20] $P=760\text{W}$, $A=0.85$, $R=2.75\text{mm}$, $v=30\text{mm/s}$.

Dans ce qui suit, on fixe les paramètres du laser $P=760\text{W}$, le coefficient d'absorption $A=0.85$ et on étudie le champ de température pour une vitesse de déplacement du laser $v_1=55\text{mm/s}$ pour

un rayon de $R=1,5\text{mm}$. Une comparaison a été réalisée aux mêmes points entre la surface supérieure (chauffée) et la surface inférieure.

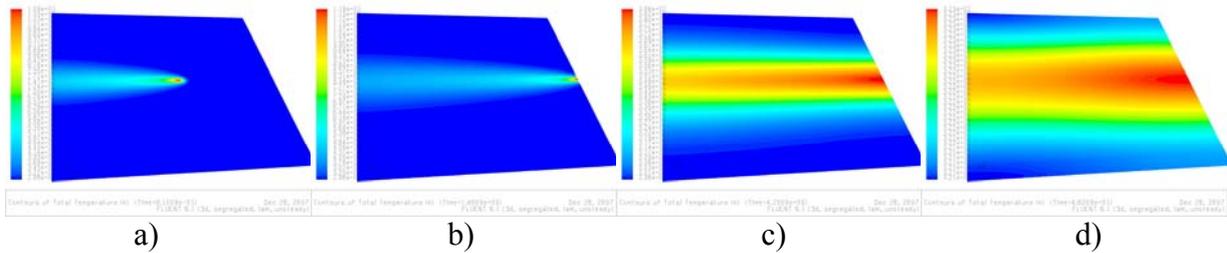
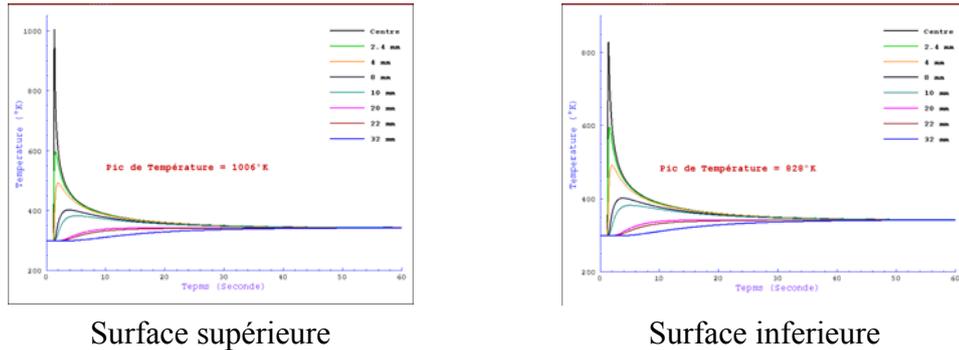


Figure 05 : Tracé des contours 3D de la température
a) Milieu de la passe, b) Fin de passe, c) $t=4.2\text{s}$, d) $t=46.2\text{s}$



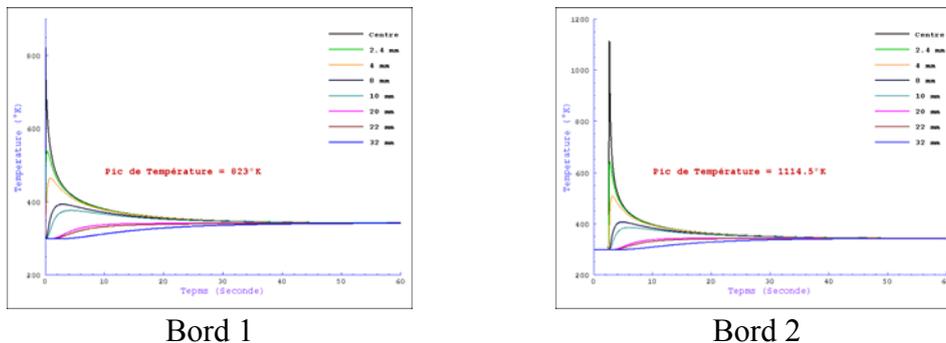
Surface supérieure

Surface inférieure

Figure 06 : Champ de température en divers point de mesure

Pour un diamètre du laser de 5.5mm (Figure 06) une température maximale élevée de 1004°K a été calculée au centre de la plaque sur la surface supérieure. Sur la surface inférieure au même point on a observé une température maximale de 828°K . Ceci nous permet de dire que le mécanisme en action est le TGM où un gradient thermique élevé appliqué à travers l'épaisseur de la plaque, nécessaire pour donner une dilatation thermique suivie de la compression en plastique à travers section pour générer d'un moment de flexion pour donner une courbure positive.

De plus, on a noté la différence de la température entre les bords suivant la trajectoire du laser due à la nature asymétrique du processus. On peut observer sur la représentation des contours du champ de température (figure 05) que pendant le refroidissement, l'extrémité 2 reste à une température plus élevée que l'extrémité 1 pendant que la chaleur est absorbée par la plaque. Pour démontrer cela, les profils de température au bord 1 et au bord 2 ont été présentés ci-dessous.



Bord 1

Bord 2

Figure 07 : Champ de température sur la surface supérieure en divers point de mesure $R=2.75\text{mm}$, $P=760\text{W}$ et $v=30\text{mm/s}$

La figure ci-dessus montre qu'au premier bord, on a observé une basse température maximale de 823°K par rapport au deuxième bord est à 1114.5°K , ces valeurs peuvent également être comparées à la valeur enregistrée au centre de la plaque de qui est de 1006°K . Une

explication possible pour ce phénomène est dans l'asymétrie du processus, la chaleur fournie à la plaque se propage continuellement dans la région froide en amont du faisceau, de ce fait augmentant la température. Au centre de l'équilibre de la plaque les conditions sont réalisées (la température maximale stable). Cependant, le faisceau atteint le deuxième bord, la chaleur se propageant en amont du faisceau, ainsi une accumulation de la chaleur se produit. Par conséquent, l'augmentation de la température au deuxième bord.

Cette asymétrie est susceptible de causer des déformations non désirées en particulier dans les échantillons traités à une vitesse transversale relativement basse et démontre la condition d'utiliser une stratégie alternative pour uniformiser à la distribution de la température en utilisant une stratégie de passage multiple. Même en utilisant cette technique, l'accumulation de la chaleur sur les deux bords se produira toujours. Ceci est interprété par le phénomène des effets de bord. Une autre solution est possible au problème d'effet de bord proposé par Magee [...] est de varier la vitesse transversale suivant la ligne de balayage, telle qu'une vitesse plus élevée devrait être employée vers les bords afin de réduire la température maximale.

3.2. Analyse structurelle :

3.2.1. Déplacement :

Cette partie contient les résultats de l'analyse thermomécanique du formage laser en termes de déplacement, à l'aide d'un rayon de laser $R=2.75\text{mm}$, est d'une puissance laser $P=760\text{W}$ et un parcours la vitesse de 30mm/s . Il est possible d'observer l'évolution du déplacement suivant la direction z du bord libre de la plaque en fonction du temps (figure 08).

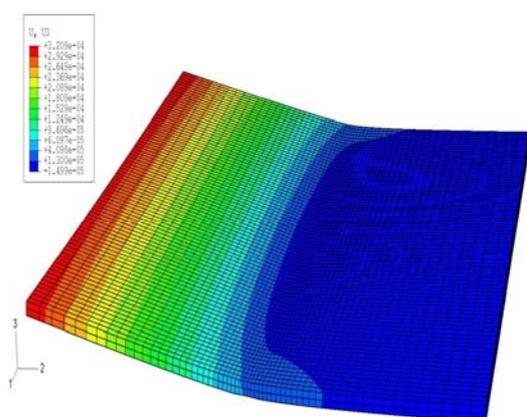


Figure 08 : Contour de la plaque formée (échelle de grossissement 30/1)

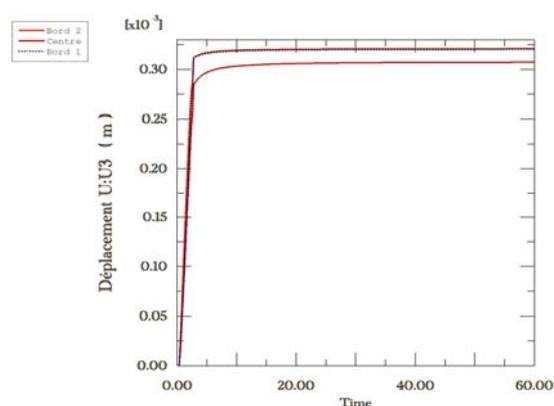


Figure 09 : le déplacement suivant la direction z en fonction du temps du bord libre de la plaque

La figure 09 montre le déplacement plaque (U_3 , déplacement longitudinal suivant z) cela confirme que la majorité de la déformation se produit au cours du passage du faisceau laser et que seulement une légère augmentation de l'angle de flexion se produit lors du refroidissement. La figure 09 montre que le développement du déplacement est dépendant de l'emplacement sur la plaque. On peut constater une légère différence entre le centre de la plaque et les deux bords et le bord 2 sur l'extrémité libre de la plaque est légèrement supérieur au bord 1. Ces résultats indiquent les problèmes de l'asymétrie du processus lorsqu'on essaye de reproduire une pièce symétrique. L'analyse des contours (figure 08) affirme cette conclusion, ceci peut être interprété par le phénomène d'effet de bord.

3.2.2. Analyse des contraintes (transversale σ_{11} et longitudinale σ_{22})

La contrainte transversale ou latérale σ_{11} est perpendiculaire à la ligne de balayage ou elle est exercée suivant direction x et la contrainte longitudinale σ_{22} est Parallèle à la direction du balayage. Le développement des contraintes montrées sur la figure 10 et 11 (en Pa)

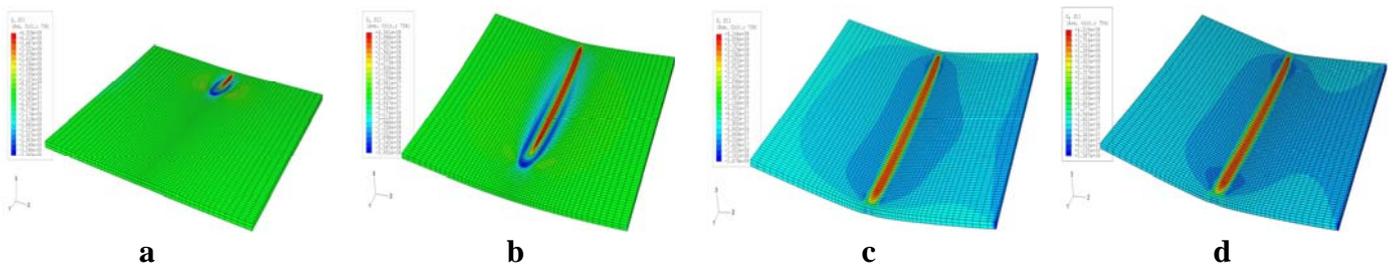


Figure 10 : Contours des contraintes transversales σ_{11}

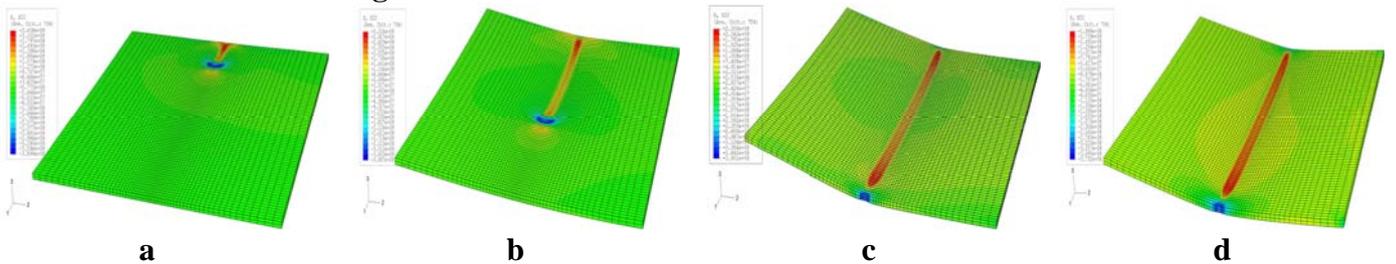


Figure 11 : Contours des contraintes longitudinales σ_{22}

Il peut être observée sur la figure 10, que directement sous le faisceau laser sur la face supérieure, une contrainte négative ou de compression transversale (zone bleu). Il peut également être observée (figure 10b) qu'une contrainte de traction transversale se produit en amont et en aval du faisceau laser. Sur la figure 10d, on peut noter l'existence de contraintes transversales résiduelles en compression à aux deux extrémités de la ligne de balayage. Ceci est relié au phénomène des effets de bords couplé avec la nature asymétrique du processus, ce qui conduit à une variation dans la distribution de contraintes le long la ligne de balayage pendant et après traitement.

On peut constater sur la figure 11 que, une contrainte de compression longitudinale survient directement sous le faisceau laser. Des zones de traction similaires peuvent être observées en amont du faisceau à ceux dans les contraintes transversales σ_{11} . Il s'agit de la compression localisée provoquant un effet mécanique autour la du faisceau illustré dans la figure 12. La région de compression sous le faisceau laser est Transformée immédiatement à l'arrière suivant la ligne d'analyse (figure 11b) en une contrainte de traction résiduelle relativement grande entourée d'une région de compression. Cela persiste après refroidissement (figure 11d) le long de la longueur de la ligne de balayage, hors mis les bords. Une explication possible, cela pourrait être due à la contrainte de compression longitudinale générée par le faisceau laser, dans ce cas, uniquement les contraintes transversales de compression qui provoquent une compression en plastique, nécessaires pour produire une flexion suivant la ligne de balayage.

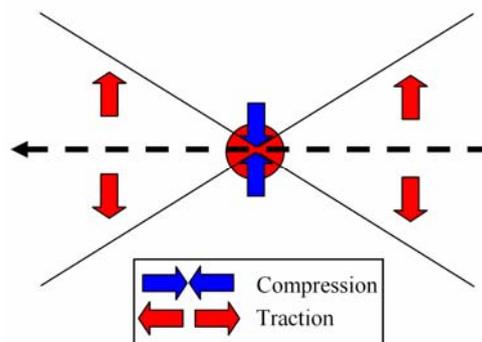


Figure 12 : Schéma illustrant les distributions des contraintes autour du faisceau laser

Une explication possible est illustrée sur la figure ci dessus, la contrainte de compression localisée ou pincement autour du faisceau conduit à une contrainte de traction en amont et en aval le long de la ligne de balayage.

4. Conclusion

L'analyse thermique a révélé des pics de température ainsi que l'évolution de la température en fonction du temps, ces pics ont été évalués et dépendent du coefficient d'absorption. Au cours de l'analyse des déplacements, il a été observé que la majorité des déformations se produisent lors du passage du laser sur la plaque (période de chauffage). Des effets de bords indésirable pour obtenir des diverses distributions ont été observé. L'analyse des contraintes transversales révèle qu'au centre de la plaque aucune contrainte résiduelle n'est enregistrée, toutefois, près des bords, il y a des contraintes transversales de compression résiduelles relativement grandes.

Par contre, l'analyse des contraintes longitudinales montre l'existence de contraintes de traction résiduelles relativement élevées le long de la ligne de balayage entouré d'une zone de compression.

Références

- [1] F. Vollersten, I. Komel, R. Kals, *Materials Science and Engineering* **3** (1995) 107–119.
- [2] Wenchuan Li, Y. Lawrence Yao, *Journal of Manufacturing Processes* **3** (2) (2001) 73–81.
- [3] F. Vollertson *Proceedings of Laser Assisted Net shape Engineering Conference (LANE 94)*, 1994, 345–359.
- [4] Z. Ji, S. Wu, *Journal of Materials Processing Technology* **74** (1998) 89–95.
- [5] P.J. Cheng, S.C. Lin, *Journal of Materials Processing Technology* **101** (2000) 260–267.
- [6] Z. Hu, M. Labudovic, H. Wang, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **41** (2001) 589–607.
- [7] A.K. Kyrzanidi, T.B. Kermanidis, S.G. Pantelakis, *Journal of Materials Processing Technology* **87** (1999) 281–290.
- [8] F. Vollertsen, *Engineering* **2** (1994) 261–276.
- [9] C.J. Yau, K.C. Chan, W.B. Lee, *Laser Assisted Net Shape Engineering 2, Proceedings of the LANE'97*, Meisenbach Bamberg, 1997.
- [10] A.K. Kyrzanidi, T.B. Kermanidis, S.G. Pantelakis, *Journal of Materials Processing Technology* **104** (2000) 94–102.
- [11] P.J. Cheng, S.C. Lin, *Journal of Materials Processing Technology* **108** (2001) 314–319.
- [12] H. Shen, Z. Yao, Y. Shi, et al., *Journal of Mechanical Engineering Science* **220** (2) (2006) 243–247.
- [13] Hong Shen, Yongjun Shi, Zhenqiang Yao, Jun Hu, *Computational Materials Science* **37** (2006) 593–598.
- [14] S.P. Edwardson, E. Abed, K. Bartkowiak, G. Dearden, K. GWatkins, *Journal of Physics D Applied Physics* **39** (2006) 382–389.
- [15] Hong Shen, Yongjun Shi, Zhenqiang Yao, *Computational Materials Science* **37** (2006) 239–245.
- [16] Guan Yanjin, Sun Sheng, Zhao Guoqun, et al., *Journal of Materials Processing Technology* **142** (2003) 400–407.
- [17] Hom-Shen Hsieh, Jehnming Lin, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **45** (2005) 1368–1374.
- [18] W. Li, M. Geiger, F. Vollersten, *Chinese Journal of Lasers* **25** (9) (1998) 859–864.
- [19] An.K. Kyrzanidi, Th.B. Kermanidis, Sp.G. Pantelakis, *Journal of Materials Processing Technology* **104** (2000) 94–102.
- [20] Stuart P. Edwardson, *PhD Thesis*, Laser Group, Liverpool, UK, March 2004