

Simulations par éléments finis du procédé de grenailage par jet d'eau pour la prévision des propriétés de surface

Rihem Amri^a, Adnen Laamouri^b, Raouf Fathallah^c

- a. Unité de Génie de Production Mécanique et Matériaux (UGPMM/UR17ES43), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sousse, Tunisie, rihemamri5@gmail.com
- b. Unité de Génie de Production Mécanique et Matériaux (UGPMM/UR17ES43), Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Sousse (ISSATSO), Tunisie, adnen_laamouri@yahoo.fr
- c. Unité de Génie de Production Mécanique et Matériaux (UGPMM/UR17ES43), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sousse, Tunisie, raouf.fathallah@gmail.com

Résumé

Dans cet article, une comparaison entre deux types de simulations numériques du procédé du grenailage par jet d'eau pour prédire les propriétés de surface (contraintes résiduelles, déformations plastiques, et endommagement) induites sur une pièce métallique traitée par jet d'eau à haute pression est présentée. La première simulation, qui est une simulation par éléments finis dynamique transitoire tridimensionnelle (3D), considère l'impact d'une seule série de gouttelettes adjacentes qui frappent la surface traitée à grandes vitesses par des pressions d'impact sur les régions de contact correspondantes. Les pressions d'impact et leurs durées sont modélisées en utilisant la théorie de l'impact liquide combinée à une loi de vitesse d'impact en fonction des principaux paramètres du procédé. La deuxième simulation consiste à une simulation couplée eulérienne lagrangienne pour étudier l'effet d'une seule gouttelette sur l'évolution des propriétés de surface. L'alliage d'aluminium Al7075-T6 grenailé par jet d'eau présente l'instance lagrangienne et le domaine eulérien doit être suffisamment grand pour capturer tout le comportement potentiel de déformation de la gouttelette. Les deux simulations éléments finis ont été développées à l'aide de modèles 3D. La loi de comportement du matériau est une loi élasto-visco-plastique couplée au critère d'endommagement de Johnson-Cook. Les résultats expérimentaux présentés par Kunaporn sur une surface en alliage d'aluminium Al7075-T6 grenailée par jet d'eau ont été considérés pour étudier l'efficacité de deux simulations.

Abstract

In this paper, a comparison between two types of numerical simulations of waterjet peening process for predicting residual stresses and plastic strains induced on metallic part treated with high pressure water jet is presented. The first simulation, which is transient dynamic finite element 3-dimensional simulation, considers an impingement of one set of droplets which strike the treated surface by impact

pressures over the corresponding contact regions at high-velocities. The impact pressures and their durations are modelled by using the liquid impact theory combined with an impact velocity law depending on the main parameters of the process. The second simulation focus on the Coupled Eulerian Lagrangian (CEL) simulation for studying the effect of single droplet in the evolution of surface properties. The waterjet peened Al7075-T6 aluminum alloy presents the lagrangian part and the Eulerian domain must be sufficiently big to capture all the potential deformation behavior of the droplet. The two FE simulations were developed using 3-D models. The behaviour law of the material is an elasto-visco-plastic law coupled to the Johnson-Cook damage criterion. The FE simulations are conducted using the explicit/dynamic calculation. The experimental investigations presented by Kunaporn for a waterjet- peened Al7075-T6 aluminum alloy surface are considered to study the effectiveness of both transient dynamic and CEL simulations.

Mots clefs: Grenailage par jet d'eau; modélisation EF en 3D; simulation dynamique; couplage eulérien lagrangien; propriétés de surface.

1 Introduction

Le grenailage par jet d'eau, appelé en anglais waterjet peening (WJP), est un traitement de surface permettant d'améliorer la tenue en fatigue des composants mécaniques [1,2]. Son principe consiste à impacter la surface métallique avec des gouttelettes d'eau à grande vitesse. Ceci produit des déformations plastiques localisées et par conséquent, des contraintes résiduelles (CR) en compression sont générées en surface traitée [3] (Figure 1). Ces CR permettent d'augmenter la limite de fatigue des composants grenailés jusqu'à 25% [3]. Son avantage principal est d'obtenir une surface lisse et totalement recouverte. Cependant, ce procédé a tendance à causer quelques défauts endommageant tel que l'érosion et la rugosité en surface. Dans le procédé du grenailage par jet d'eau, plusieurs paramètres, tels que le diamètre de la buse (d_n), la pression d'alimentation (P_s), la distance buse-surface (SOD), la vitesse d'avance (u) et l'angle du jet d'eau (θ) affectent les propriétés de surface traitée. Ces paramètres doivent être optimisés pour avoir une meilleure tenue en fatigue.

Dans ce contexte, trois types de simulations EF ont été proposées dans la littérature. La première est une simulation statique développée par Kunaporn [4] et utilise une distribution parabolique de la pression d'impact. Cette simulation est simple mais elle permet de prédire des CR en surface dues à des déformations plastiques en sous couche. La deuxième est une approche dynamique transitoire proposée par Rajesh [5] et prend en compte la variation de pression lors de l'impact des gouttelettes sur la surface. Mais cette approche néglige les paramètres du procédé dans l'expression de la pression d'impact. La dernière simulation proposée par Xie [6] est basée sur une modélisation 3D stochastique des impacts multiples avec couplage eulérien lagrangien CEL, mais elle est complexe et génère un temps long de calcul.

Ce travail vise à développer et comparer deux types de simulations numériques du procédé du grenailage par jet d'eau pour prédire les propriétés de surface induites par ce procédé (déformations plastiques, contraintes résiduelles et endommagement). La première simulation est dynamique transitoire 3D et considère la pression d'impact d'une seule série de gouttelettes. La deuxième est une approche couplée eulérienne lagrangienne basée sur l'impact d'une seule goutte.

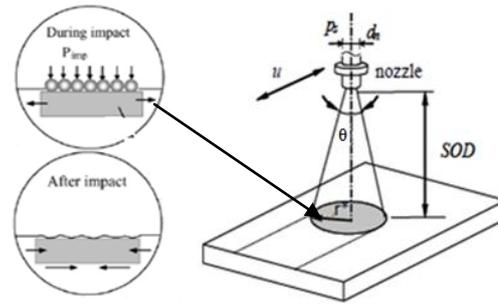


Figure 1: Principe du grenaillage par jet d'eau.

2 Distribution de la pression d'impact pour la modélisation dynamique transitoire

La pression d'impact (P_{imp}) est déterminée en utilisant la théorie de l'impact liquide combinée à une loi de la vitesse d'impact [7].

$$P_{imp}(r) = \rho V_e \left(1 - \frac{m^* SOD}{d_n} \right) \left[C_0 \exp\left(-219 \frac{r^2}{SOD^2} \right) + k V_e \left(1 - \frac{m^* SOD}{d_n} \right) \exp\left(-438 \frac{r^2}{SOD^2} \right) \right] \quad (1)$$

La distribution de la pression d'impact (équation 1) sera appliquée à un ensemble de régions d'impact adjacentes de rayon r_c exprimé par l'équation 2 [5].

$$r_c = r_w V_{max} / (C_0 + k V_{max}) \quad (2)$$

Les durées d'impact des gouttelettes (chargement/ déchargement) sont exprimées en fonction de la vitesse $V(r)$ [5].

$$t_{charg}(r) = t_{décharg}(r) = 3r_w V(r) / 2(C_0 + kV(r))^2 \quad (3)$$

3 Loi de comportement

Les caractéristiques d'alliage d'aluminium Al 7075-T6 sont déterminées par l'essai de traction et données par le tableau ci-dessous [4].

Tableau 1: Propriétés mécaniques du matériau Al-7075-T6

Module de Young E	70000 MPa
Coefficient de Poisson ν	0,33
Limite élastique R_e	464 MPa
Allongement à la rupture $A(\%)$	12,5
ρ	$2,7 \cdot 10^{-9}$ Tonne/mm ³

Le comportement du matériau est modélisé par la loi de Johnson-Cook (J-C) [8] donnée par l'équation 4.

$$\sigma(\varepsilon^p) = \left[A + B(\varepsilon^p)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right] \quad (4)$$

Il est composé, dans l'ordre d'apparition, d'un terme d'écroissage, d'un terme dynamique en fonction de vitesse de déformation plastique et d'un terme de l'influence thermique. Il convient de noter que le troisième terme de la loi Johnson-Cook est négligé car le procédé de grenailage par jet d'eau se déroule sans aucun effet thermique.

En fait, A, B, C, m, n sont respectivement la résistance au cisaillement statique, le module d'écroissage, le coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation, l'exposant d'adoucissement thermique et l'exposant d'écroissage.

$\dot{\varepsilon}_0$, T_0 et T_f sont, respectivement, la vitesse de déformation de référence, la température de référence et la température de fusion du matériau

Le paramètre d'endommagement D est défini par :

$$D = \sum (\Delta \bar{\varepsilon}^{pl} / \bar{\varepsilon}_f^{pl}) \quad (5)$$

L'accumulation de la déformation plastique est exprimé par :

$$\varepsilon_f^p = \left[d_1 + d_2 \exp \left(-d_3 \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right) \right] \left(1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left[1 + d_5 \frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right] \quad (6)$$

Les paramètres du modèle de J-C et d'endommagement pour l'alliage Al7075-T6 [9] sont donnés par les tableaux 1 et 2, respectivement.

Tableau 2: Paramètres du modèle de J-C

A	B	n	m	T ₀	T _f	C	$\dot{\varepsilon}_0$
527	575	0,72	1,61	25	635	0,017	1

Tableau 3: Paramètres d'endommagement de J-C

d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
0,11	0,572	3,446	0,16	1,099

Les propriétés de la goutte d'eau [6] sont données par le tableau ci-dessous.

Tableau 3: Propriétés de la goutte d'eau

Densité ρ	1.10 ⁻⁹ Tonne/mm3
Pente Us-Up s	2
Grüneison coefficient Γ_0	1,65
Viscosité dynamique ν	10 ⁻⁹ MPa.s
Vitesse du son	1476 m/s

4 Données expérimentales et Modèles éléments finis

4.1 Données expérimentales

Les simulations EF ont été réalisées dans le cas d'alliage d'aluminium Al7075-T6 grenailé par jet d'eau et déduit des travaux de Kunaporn [4] est considéré. Cet alliage d'aluminium se caractérise par une haute résistance et une résistance à la fissuration par corrosion. Les conditions du procédé sont: $d_n = 0,33$ mm; $P_s = 310$ MPa; $SOD = 45$ mm; $u = 12,7$ mm/s; $\theta = 20^\circ$. La surface grenailée est caractérisée par : (i) un durcissement d'une couche de 250 μ m d'épaisseur avec un niveau maximum \approx

25% en surface, (ii) un champ de contrainte résiduelle d'amplitude - 150 MPa en surface et une profondeur de 250 μm , et (iii) une faible rugosité, mais sans aucune trace d'érosion.

4.2 Modèles éléments finis

Pour le modèle dynamique transitoire, la pièce grenillée est représentée par un massif de taille $15 \times 15 \times 40 \text{ mm}^3$. La zone d'impact ($4 \times 4 \times 1 \text{ mm}^3$) est maillée avec un maillage raffiné de $0,125 \times 0,125 \times 0,05 \text{ mm}^3$ et ne représente que le quart du massif en tenant compte de deux plans de symétrie (Figure 2a). Le modèle dynamique transitoire considère un ensemble de gouttelettes adjacentes qui frappent la surface, exerçant ainsi des pressions d'impact sur les régions de contact correspondantes de rayon r_c . En utilisant l'équation 1, la zone d'impact est composée de 32 gouttelettes réparties uniformément dans la direction radiale. Les pressions d'impact et les durées correspondantes sont estimées à l'aide des équations des équations 1 et 3. D'après ces données, nous obtenons une distribution temporelle de la pression gaussienne. Cette distribution de pression d'impact est appliquée à différents nœuds dans la région de $4 \times 4 \text{ mm}^2$. Les pressions d'impact ont été appliquées successivement en deux étapes (chargement et déchargement). La base du massif a été bloquée.

Pour la simulation CEL, les dimensions du massif (partie lagrangienne) sont de $15 \times 15 \times 20 \text{ mm}^3$ et maillées à l'aide des éléments C3D8R (Figure 2b). La zone traitée est réduite sur la zone centrale avec des dimensions de $8 \times 8 \times 1 \text{ mm}^3$. Le domaine eulérien de taille $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ doit être suffisamment grand pour capturer toutes les déformations des gouttelettes. Il a été maillé avec des éléments eulériens de type EC3D8R. La gouttelette est supposée sphérique et caractérisée par un rayon $r_w = 0,25 \text{ mm}$. Les éléments de la gouttelette ont été créés à l'aide de l'outil « Volume Fraction » disponible dans ABAQUS. Pour les conditions aux limites, la base du massif est bloquée. La vitesse de la gouttelette reste uniforme à 787 m/s pendant le mouvement dans la direction verticale z avant l'impact. Nous adoptons un coefficient de frottement égal à 0,3. Le temps du calcul a été fixé à $2,4 \cdot 10^{-6} \text{ s}$, ce qui est suffisant pour atteindre un état stable.

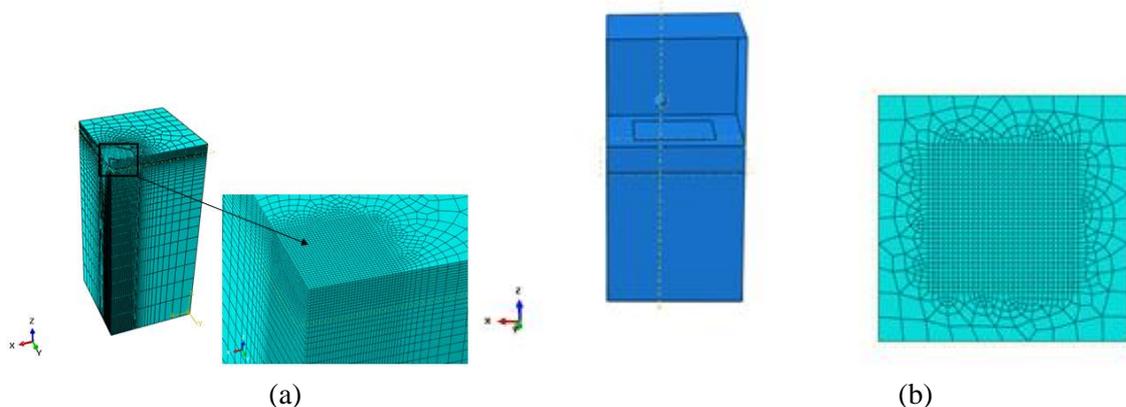


Figure 2: Modèle du procédé WJP EF-3D (a) dynamique transitoire et (b) CEL

5 Comparaison de l'effet des deux simulations sur les propriétés de surface

La précision de deux modèles proposés du grenaillement par jet d'eau est validé en prenant en compte les mêmes conditions adoptées par les investigations expérimentales Kunaporn sur l'alliage d'aluminium Al 7075-T6.

La figure 3 présente une comparaison entre les profils numériques obtenus par la simulation dynamique transitoire basée sur la pression d'impact d'une seule série de gouttelettes et la simulation CEL avec profil expérimental. Les profils numériques sont compressifs jusqu'à une profondeur de 0,38 mm. Mais le profil prévu par la simulation CEL est plus proche et en bonne corrélation avec celui obtenu expérimentalement.

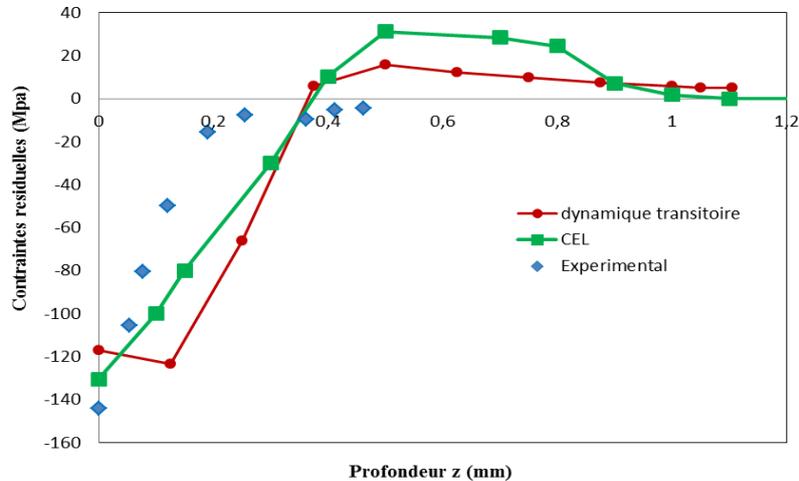


Figure 3: Comparaison du profil de contrainte résiduelle expérimental obtenu par la méthode de diffraction aux rayons X [4] et profils numériques obtenus par la simulation dynamique et CEL.

La figure 4 représente le profil en profondeur de déformation plastique détaillé obtenu par les deux modèles EF. On observe que la zone plastique obtenue par la simulation dynamique transitoire et l'approche CEL est de même profondeur (0,4 mm). En outre, il est à noter que la simulation CEL induit 8 fois plus de déformation plastique en surface que la simulation dynamique.

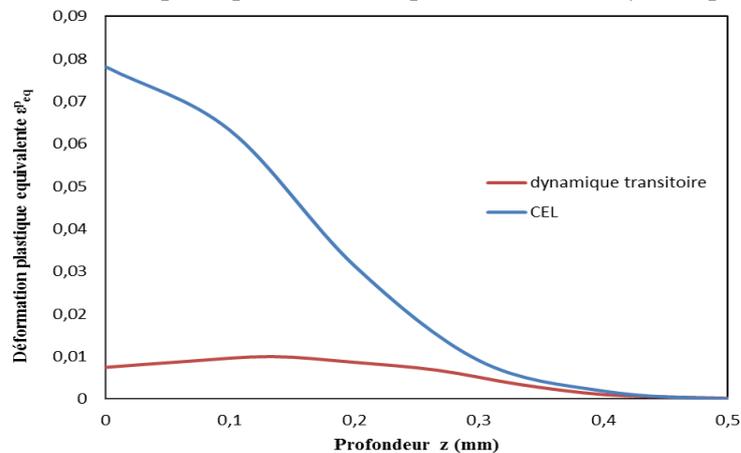


Figure 4: Distribution de la déformation plastique équivalente induite par la simulation dynamique et la simulation CEL.

La figure 5 illustre l'évolution de profils d'endommagement de Johnson-Cook en profondeur pour la simulation dynamique transitoire et la simulation CEL. Le niveau d'endommagement en surface induit par la simulation CEL est 8 fois plus important que celui obtenu par la simulation dynamique. Cette observation est liée à la distribution de la déformations plastiques en profondeur.

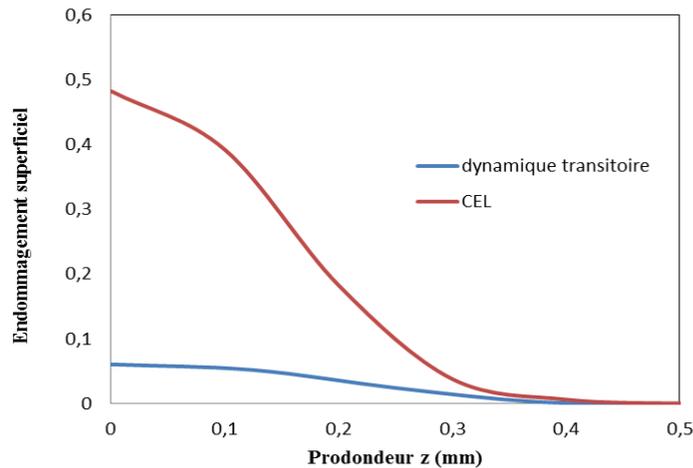


Figure 5: Endommagement de J.C après la simulation dynamique et la simulation CEL.

6 Conclusion

Les propriétés de surface induites par grenailage par jet d'eau (déformations plastiques, contraintes résiduelles et endommagement superficiel) ont été simulées et analysées par deux types de simulations, à savoir la simulation dynamique transitoire et la simulation couplée eulerien lagrangien. La validité de deux simulations a été discutée en comparant les résultats numériques avec ceux obtenus expérimentalement pour un alliage d'aluminium Al7075-T6 grenailé par jet d'eau.

Le modèle dynamique transitoire prenant en compte l'impact d'une série de gouttelettes a permis de prédire toutes les propriétés de surface induites par le procédé WJP. En revanche, cette modélisation n'est valable que pour prédire les propriétés de surface dans la direction radiale du jet d'eau. La simulation CEL active basée sur l'impact d'une seule gouttelette au centre de la région traitée a permis d'étudier le comportement du matériau sous l'impact du jet d'eau et d'obtenir des résultats plus réalistes et proches des résultats expérimentaux.

Références

- [1] Azmir. A, Christian. S, Eberhardb. K, Jhislain. N, Surface Erosion of Carbon Steel 1045 during waterjet peening, 2014, 1870–1880.
- [2] Azmir. A, Christian. S, Eberhardb. K., Patrick. G, Improving Surface hardness of austenitic stainless steel using waterjet peening process, 2012, 1035-1046.
- [3] Srivastava. M, Tripathi. R, Hloch. S, Chattopadhyaya. S, Rai Dixit. A, Potential of using water jet peening as a surface treatment process for welded joints, International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, 2016, 472 – 480.
- [4] Kunaporn. S, Ramulu. M, An Experimental and Numerical Analysis of Waterjet Peening of 7075-T6 Aluminum Alloy, Ph.D thesis, University of Washington, 2002.
- [5] Rajesh. N, Veeraraghavan. S, Ramesh Babu. N, A novel approach for modeling pf water jet peening, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 855-863.
- [6] Xie. J, Rittel, D, Three-dimensional stochastic modeling of metallic surface roughness resulting from pure waterjet peening, International Journal of Engineering Science, 2017, 241–253.
- [7] J. Gauntner, W. Hrycak, P.J. Livingood, Survey of literature on flow characteristics of a single turbulent jet impinging on a flat plate, 1970.

[8] Johnson. G.R, Cook. W.H, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics 54, 1983, pp. 541–547.

[9] Brar. N.S, Joshi. V.S, Harris. B.W, Constitutive model constants for Al7075T651 and Al7075T6, AIP Conference Proceedings, 2009.