

# Simulation active du procédé du grenailage de précontrainte contrôlé

M. Youssef<sup>a</sup>, R. Ben Sghaier<sup>a,b</sup>, R. Fathallah<sup>a</sup>

a. Laboratoire de Mécanique Sousse, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sousse  
marwayousseff@gmail.com

b. Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Sousse

## Résumé :

*L'objet de ce travail est de mettre en place un modèle éléments finis, permettant de faire des simulations actives très proches du procédé de grenailage de précontrainte contrôlé. On se propose en particulier, de prendre en compte les effets dynamiques des impacts, les dispersions dues aux vitesses d'impacts, des caractéristiques des billes, des angles d'incidence, des conditions de contact bille/matériau, de la durée du traitement (taux de recouvrement), la nature de l'érouissage cyclique du comportement du matériau traité, etc. Le modèle proposé est validé à travers une comparaison avec des investigations expérimentales d'analyses des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X. Une bonne cohérence a été observée suite à cette comparaison.*

## Abstract:

*This paper presents a numerical simulation of the shot peening process using finite element method. In this work we present a finite element model of the previous controlled shot peening simulation closer to reality. The model developed consists of a large number of shots impinging target randomly. In order to simulate these randomly distributed shots, a python program combined with Abaqus were used to generate the random coordinates of each shot, dispersion of the speed shot and shot radius. To validate the proposed model, residual stress profile is compared with experimentally obtained data from literature*

**Mots clefs : Grenailage de précontrainte ; Contraintes résiduelles ; simulation active ; dispersion ;**

---

## 1 Introduction

Le grenailage de précontrainte est l'un des traitements de surface qui a largement prouvé son efficacité pour l'amélioration de la tenue en fatigue en augmentant, très souvent, la durée de vie des pièces et structures métalliques. Il consiste à la projection de petites billes (0.1 à 2mm) dures sur les surfaces des pièces mécaniques à des vitesses relativement importantes (entre 20 et 120 m/s). Généralement, ce procédé permet d'introduire deux effets favorables à la tenue en fatigue, à savoir une consolidation des couches superficielles et un profil de contraintes résiduelles de compression en surface. Cependant, dans certains cas, il y a des risques d'altérer l'intégrité de la surface traitée. Il est donc nécessaire, de prévoir l'état initial des couches traitées pour optimiser les paramètres de ce procédé.

La méthode des éléments finis est un outil puissant pour la simulation de l'impact d'une ou de plusieurs billes sur la surface d'un massif semi infini. La plupart des travaux existants, sur la modélisation numérique du grenailage, simule l'impact d'une bille considérée rigide sur un massif semi-infini [1], [2] et [3] et d'autres qui ont supposé la bille élastique [4] et [5].

La différence entre les modèles proposés était au niveau de type d'étude (statique, dynamique), de comportement du matériau et au niveau des paramètres liés au procédé. Certains d'entre eux sont axisymétriques et consistent à simuler un impact d'une bille sur un massif semi infini [6], [3] et [7]. D'autres ont été développés en utilisant une simulation par éléments finis 3D afin d'être plus réaliste [2] et [8]. On propose dans ce travail d'établir un modèle plus proche de la réalité en tenant compte de l'effet de dispersion de la vitesse de projection, de la taille et de la position des billes en utilisant l'aspect multi impact.

## 2 Modèle de comportement

Le matériau du massif à traiter est de type AISI2205 qui est un acier à haute résistance mécanique souvent utilisé pour des pièces grenillées dans l'industrie.

Dans ce travail on a utilisé le modèle proposé par Chaboche et al. [9] qui est implémenté dans le code de calcul par éléments finis ABAQUS. Ce modèle permet de décrire les effets du chargement cyclique sur la redistribution des contraintes en combinant un écrouissage cinématique non linéaire avec l'écrouissage isotrope. Le domaine élastique est défini selon le critère de Von Mises par la surface de charge suivante :

$$f(\bar{\sigma}, \bar{X}, R) = J_2(\bar{\sigma} - \bar{X}) - R - k \leq 0 \quad (1)$$

Où  $\bar{X}$  est le tenseur variable d'écrouissage cinématique, ce tenseur représente la position de la surface de charge dans l'espace des contraintes. L'écrouissage cinématique non linéaire est décrit par l'équation différentielle suivante :

$$d\bar{X} = \frac{2}{3} C d\bar{\varepsilon}^p - \gamma \bar{X} dp \quad (2)$$

C et  $\gamma$  sont deux constantes du matériau à identifier,  $d\bar{\varepsilon}^p$  est l'incrément de la déformation plastique et p la déformation plastique cumulée.

Avec

$$dp = \sqrt{\frac{2}{3} d\bar{\varepsilon}^p : d\bar{\varepsilon}^p} \quad (3)$$

$$d\bar{\varepsilon}^p = \lambda \frac{\delta f}{\delta \bar{\sigma}} \quad (4)$$

La variable R de l'écrouissage isotrope est la solution de l'équation suivante :

$$dR = b(Q - R)dp \quad (5)$$

Q et b sont deux constantes du matériau à identifier. Q représente les niveaux de durcissement (ou d'adoucissement) cyclique et b la vitesse du durcissement (ou de l'adoucissement) cyclique. Les caractéristiques mécaniques de l'AISI 2205 sont reportées dans le tableau 1.

Tableau 1 Caractéristiques mécaniques de l'AISI 2205 [10]

<b>Limite élastique</b>	$\sigma_0=632$ MPa
<b>Contrainte à la rupture</b>	$\sigma_t=1860$ MPa
<b>Module d'Young</b>	E=205 GPa
<b>Coefficient de Poisson</b>	$\nu=0.25$
<b>Densité</b>	$\rho= 8200$ Kg/m <sup>3</sup>
<b>C</b>	193556MPa
<b>Q<sub>∞</sub></b>	-24 MPa
<b>b</b>	12
<b>γ</b>	584

La bille est considérée selon un comportement élastoplastique avec écrouissage isotrope supposé sphérique de taille S230. Le tableau 2 présente les caractéristiques mécaniques de la bille.

Tableau 2 Caractéristiques mécaniques de la bille

<b>Limite élastique</b>	$\sigma_0=1500$ MPa
<b>Contrainte à la rupture</b>	$\sigma_t=1850$ MPa
<b>Module d'Young</b>	E=210 GPa
<b>Coefficient de Poisson</b>	$\nu=0.3$
<b>Densité</b>	$\rho= 8200$ Kg/m <sup>3</sup>

### 3 Modélisation numérique

#### 3.1 Modèle élément finis

Le code de calcul par éléments finis ABAQUS/Dynamic Explicit est utilisé pour simuler le procédé du grenailage de précontrainte par une approche dynamique.

Afin de présenter une modélisation active et plus proche de la réalité, on doit tenir compte de la dispersion de la taille des billes, de la vitesse de projection et de la position des billes sur le massif. On a utilisé un outil numérique paramétré et relativement simple d'utilisation, qui permet de modéliser la plupart des cas de grenailage. La programmation du modèle éléments finis en langage Python a

permet de simplifier et d'automatiser les opérations de modélisation, facilitant l'optimisation de certains paramètres.

La figure 1 donne le modèle 3D considéré avec un massif de taille 0,001x0,001x0,005 m suffisamment raffiné et il est maillé par 306000 éléments de type C3D8R. Il faut noter que la zone d'impact est au centre du massif (est d'une surface de  $3.14E-8 \text{ m}^2$ )

La seule condition aux limites utilisée est l'encastrement des nœuds de la base du massif.

Pour toutes les simulations nous adoptons un coefficient de frottement  $f=0,2$  et un angle d'incidence égale à  $90^\circ$ .

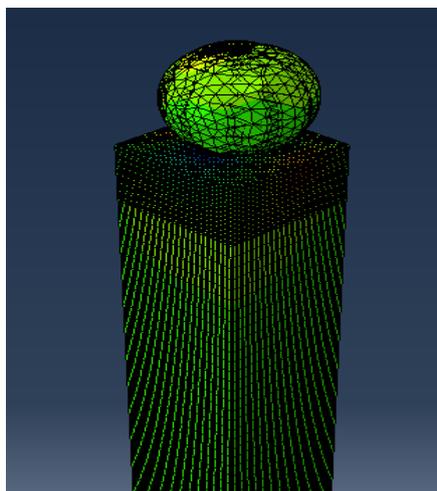


Figure 1 Modèle éléments finis du procédé de grenailage

### 3.2 Validation de la modélisation

La validation de ce modèle se fait par comparaison des résultats obtenus par simulations à ceux obtenus par analyse de diffraction des rayons X [10]. La figure 2 montre la projection de 74 billes de taille S230 avec une vitesse  $V=44\text{m/s}$  pour le matériau AISI 2205.

La figure 2 montre une bonne corrélation entre les profils des contraintes résiduelles obtenus par simulation et par analyse des diffractions des rayons X.

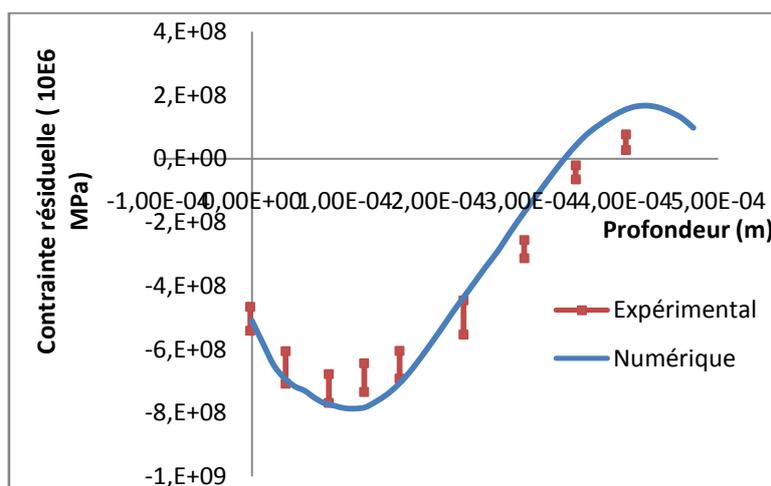


Figure 2 Comparaison entre le modèle expérimental et le modèle numérique

## 4 Résultats et discussion

### 4.1 Effet de la variation de la vitesse de projection

Afin d'étudier l'influence de la vitesse sur le grenailage, on a simulé l'impact d'une bille de rayon  $R=0.4\text{mm}$  tout en faisant varier la vitesse de projection.

D'après la figure 3, on peut remarquer que si on augmente la vitesse de projection on aura une augmentation de la profondeur écrouie, de la contrainte résiduelle en surface et de la contrainte résiduelle maximale avec une profondeur presque constante.

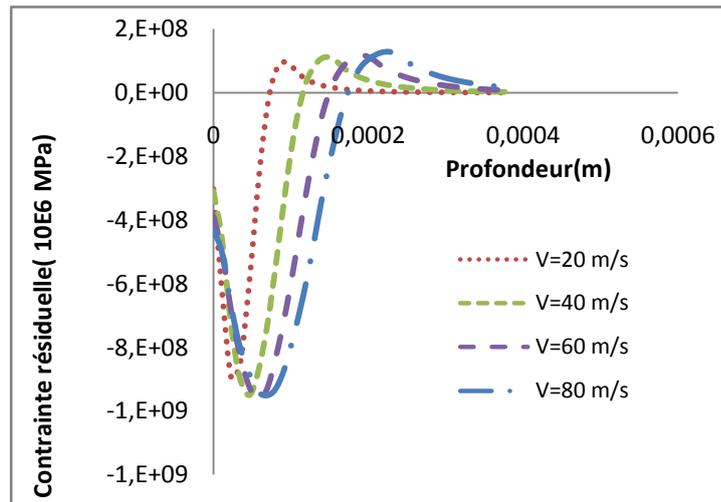


Figure 3 L'effet de la variation de la vitesse

### 4.1 Effet de variation de la taille de la bille

En faisant varier la taille de la bille et en fixant la vitesse  $V=40\text{m/s}$ , on obtient les profils représentés dans la figure 4.

On remarque que au fur et à mesure le rayon de la bille augmente une augmentation de la profondeur écrouie sera suivie. D'autre part, on remarque que la contrainte résiduelle en surface ainsi que la contrainte résiduelle maximale de compression en sous-couche restent constantes. Cependant, la profondeur écrouie augmente en fonction de la taille de la bille.

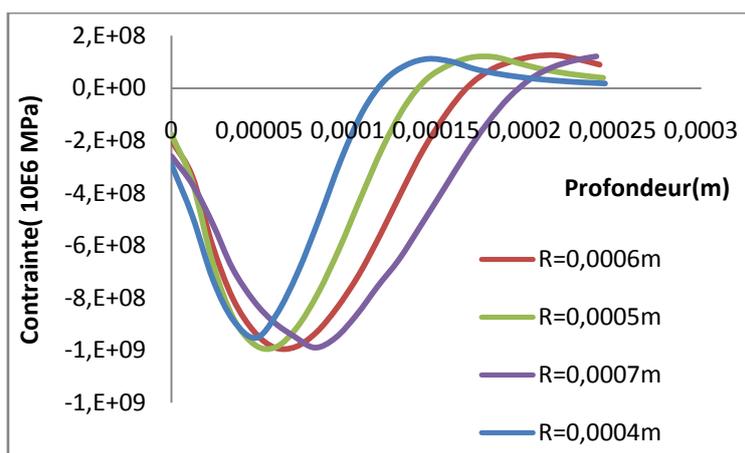


Figure 4 L'effet de la variation de la taille de la bille

## 4.2 Effet du frottement

On a supposé dans le reste de travail que le coefficient de frottement égal à 0.2. Dans cette partie on va étudier son influence sur les pièces grenillées. On a simulé l'exemple d'une bille de rayon  $R=0.4\text{mm}$  impactant une pièce avec une vitesse  $V=40\text{m/s}$  tout en variant le coefficient de frottement. Trois profils des contraintes résiduelles sont schématisés dans la figure 5 et chaque profil est associé à un coefficient de frottement différent.

L'influence de ce coefficient sur les champs résiduels introduits semble non négligeable. Nous affirmons que l'augmentation du frottement a une influence certaine sur le champ des contraintes résiduelles, principalement sur la valeur de la contrainte maximale et sur la valeur de la contrainte résiduelle superficielle qui passe d'une contrainte de compression vers une contrainte de tension. Cet effet semble dégrader le comportement en fatigue polycyclique de la pièce traitée.

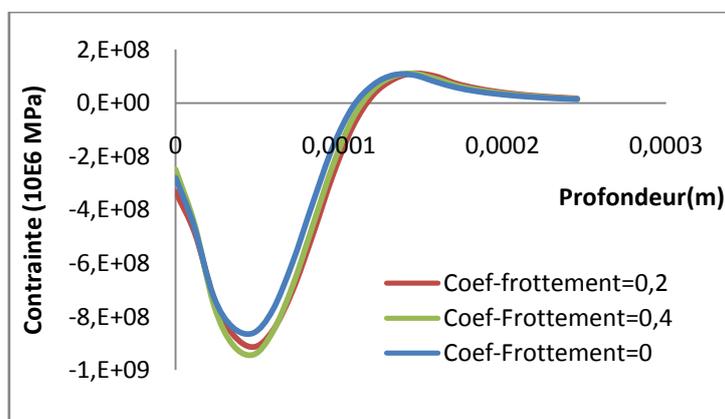


Figure 5 L'effet de la variation du coefficient de frottement

## 4.3 Effet du nombre d'impact

Dans cette partie de travail, on essaye de traduire le cas réel du procédé du grenillage de précontrainte par une simulation numérique concrète. On a fait recours au langage Python qui permet de tenir compte de la projection aléatoire des billes avec des paramètres dispersées comme constatées expérimentalement tels que la vitesse (12-14A), la taille des billes (S230) ainsi que la position des billes projetées aléatoirement (la surface de la zone grenillée est estimée à  $3.14\text{E}-8\text{ m}^2$ )

La figure 6 montre l'effet de l'aspect multi impact. On peut conclure que si on augmente le nombre de bille impactant une surface, on aura une augmentation de la profondeur écrouie et de la contrainte résiduelle à la surface et celle maximale.

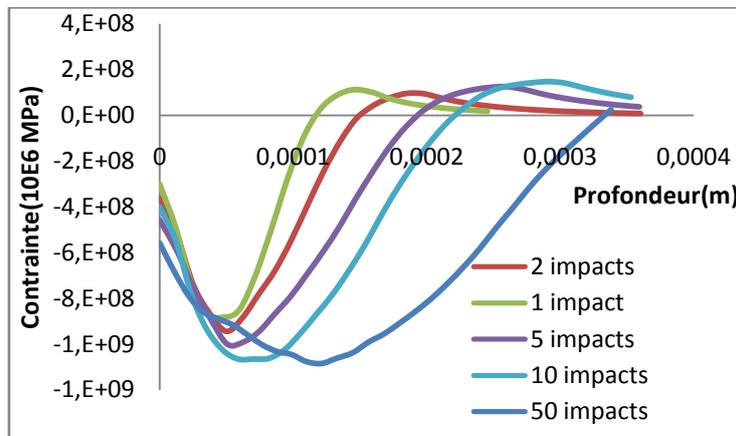


Figure 6 L'effet du nombre d'impact

## 5 Conclusions

Dans cette étude on a proposé un modèle éléments finis de grenailage de précontrainte qui permet d'établir une simulation active et plus proche de la réalité. Grâce au couplage du langage Python avec le code E.F Abaqus, on a pu tenir compte de la dispersion de la vitesse de projection, de la taille des billes ainsi que leurs positions. Le modèle proposé dans ce travail est validé à travers une comparaison avec les résultats expérimentaux XRD. L'application de ce modèle nous a permis de vérifier les effets des paramètres du procédé (taille des billes, vitesse de projection et coefficient de frottement) sur les conditions des surfaces (profil de contrainte résiduelle).

Enfin, et après une étude multi-impacts, on a trouvé que la simulation active du grenailage par plusieurs billes, ayant des conditions opératoires aléatoires, permet d'obtenir des résultats les plus réalistes.

## Références

- [1] R.Fathallah, G.Inglebert and L.Catex “Modelling of shot peening residual stresses and plastic deformation induced in metallic parts page 468-469
- [2] O. Voïhinger, “Changes in the states of the material by shot peening”, Shot peening Science Technology Application, ICSP3, (ed. H. Wohlfarht et al.), 185-204, 1987, DGM Information-Sgesellschaft Verlag.
- [3] I. Altenberger, B. Scholtes, U. Martin, H. Oettel, “Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304”, Materials Science and Engineering, 1999, Vol. A264, 1-16.
- [4] D.Admovic, M.Babic, B. Jeremic, “Shot peening influence on tribological characteristics of surfaces”, Proceedings of the seven international conference on shot peening, p.350-358
- [5] R.Fathallah , A.Laamouri, H. Sidhom , C. Braham "High cycle fatigue behavior prediction of shot-peened parts". International Journal of Fatigue Vol 26, issue10, october (2004) pages: 1053-1067
- [6] H. Guechichi, “Prévision des contraintes résiduelles dues au grenailage de précontrainte”. Thèse ENSAM. 1986.
- [7] E.Rouhaud , A.Oakka, C.Ould , J.Chaboche , M.Francois , Finite Elements Model of Shot Peening, Effects of Constitutive Laws of the Material, Proceedings ICSP-9, Paris, France, 2005
- [8] T.Hong , J.Y.Ooi , J.Favier , B.Shaw , A numerical simulation to relate the shot peening process parameters to the induced residual stresses, Proceedings ICSP-9, Paris, France 2005.
- [9] J.L. Chaboche, J. Lemaitre – Mécanique des matériaux solides – Editions Dunod,1988.
- [10] P.Sanjurjo, C.Rodríguez, I.Peñuelas, T.Eduardo García, F.Belzunce, “Influence of the target material constitutive model on the numerical simulation of a shot peening process” Surface & Coatings Technology 258 (2014) pages: 822–831.