



HAL
open science

Modélisation thermoélasto-plastique du procédé de grenailage par la méthode des éléments finis

Sébastien Rouquette, Choumad Ould, Emmanuelle Rouhaud, Manuel
François, Jean Louis Chaboche

► **To cite this version:**

Sébastien Rouquette, Choumad Ould, Emmanuelle Rouhaud, Manuel François, Jean Louis Chaboche.
Modélisation thermoélasto-plastique du procédé de grenailage par la méthode des éléments finis. 17e
congrès français de mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-02615040

HAL Id: hal-02615040

<https://utt.hal.science/hal-02615040v1>

Submitted on 8 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation thermoélastoplastique du procédé de grenailage par la méthode des éléments finis.

Sébastien Rouquette, Emmanuelle Rouhaud, Manuel François,
& Jean-Louis Chaboche.

Université de Technologie de Troyes
Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée, BP 2060
12 Rue Marie Curie 10010 Troyes Cedex
rouhaud@utt.fr

Résumé :

Lors du grenailage, une augmentation de la température de la pièce est observée. Le champ de contraintes résiduelles dépend de l'histoire mécanique du matériau traité mais aussi de l'histoire thermique du traitement. Dans cette communication, nous présentons un modèle thermoélastoplastique de l'impact de billes sur un massif métallique pour évaluer l'influence des effets thermiques sur les contraintes résiduelles de grenailage.

Abstract :

During the shot peening process, a temperature rise of the treated material is observed. It is well known that the residual stress field of the treated material is related both to its mechanical and its thermal history. In this communication, a thermoelastoplastic model of shot impact on a metallic materials is studied in order to estimate the thermal effects on the residual stress field.

Mots Clés :

Impact, grenailage, modèle thermique, plasticity.

1. Introduction

Les effets thermiques sont rarement pris en compte dans les études des procédés mécaniques de précontrainte comme le grenailage alors qu'ils peuvent avoir un effet sur les contraintes résiduelles, sur la durée de vie et le dommage éventuel. Le grenailage est un des procédés de traitement de surface des plus utilisés industriellement pour accroître la tenue en fatigue des composants. Les effets thermiques existent dans le matériau au cours du grenailage : l'élévation de la température d'une pièce grenillée est conséquente et des expériences ont montré que l'élévation de température pour un seul impact était mesurable [1]. Pourtant les modélisations de grenailage existantes ne prennent pas en compte ces effets thermiques [2]. Les effets thermomécaniques sont donc ici étudiés avec deux objectifs:

- Obtenir une meilleure compréhension de la genèse des contraintes résiduelles au cours du grenailage et une plus grande maîtrise des paramètres caractéristiques du procédé. En effet, nous proposons de calculer l'élévation locale de température pour évaluer son effet éventuel sur la loi de comportement du matériau.
- Approfondir l'étude sur la faisabilité des mesures de température comme moyen de contrôle du procédé de grenailage. Ces méthodes expérimentales ont été proposées [1] et le travail présenté ici correspond à une première étape de modélisation.

2. Modèles éléments finis

2.1 Géométrie et maillage

Le modèle utilisant les éléments finis pour simuler les effets du grenailage doit être simple tout en assurant une gestion correcte du calcul dans un temps acceptable. La réalité du procédé étant à ce jour trop complexe, des simplifications sont nécessaires :

- La bille est considérée rigide dans la mesure où la grenaille est souvent beaucoup plus dure que la pièce grenillée. Le rayon des billes est $R1 = 0,3$ mm (dans le cas du grenailage standard) et $R2 = 1,5$ mm (dans le cas du grenailage par ultrason).
- Un seul impact perpendiculaire au matériau est ici modélisé pour mieux comprendre les phénomènes de génération de contraintes résiduelles.
- La pièce grenillée est modélisée par un massif cylindrique suffisamment grand pour être considéré comme semi infini. Cette hypothèse est possible dans la mesure où la zone affectée par le grenailage est souvent faible par rapport à la taille de la pièce. De plus, les rayons des grenailles sont généralement très faibles devant le rayon de courbure de la pièce.

Dans ces conditions, le problème devient axisymétrique ; le maillage a été optimisé pour garantir une bonne convergence numérique.

2.2 Matériaux et lois de comportement

Les matériaux choisis pour la modélisation sont d'une part un acier inox, le 35NiCrMo16, car c'est un matériau souvent utilisé pour des pièces mécaniques de qualité et l'acier inoxydable 304L qui a été utilisé au cours des expériences de mesures de température [1]. La loi de comportement pour le massif est une loi élasto-plastique linéaire isotrope. Les paramètres utilisés sont présentés dans le tableau ci-dessous. Le contact entre les deux matériaux est un contact normal sans frottement.

	35NiCrMo16	304L
Masse volumique (kg/m ³)	7900	7900
Module d'Young (GPa)	210	200
Coefficient de Poisson	0,3	0,28
Limite d'élasticité (MPa)	950	280
Pente d'écrouissage (MPa)	14450	2291
Coefficient de conductivité (W/m/°K)	45	16
Coefficient de dilatation thermique mm/°K	$16,6 \cdot 10^{-6}$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
Capacité calorifique (J/kg/°K)	480	500

2.3 Equivalence énergétique

Les analyses de grenailage ont toutes été effectuées grâce à des analyses statiques. En effet, les analyses dynamiques engendrent des oscillations élastiques après l'impact de la bille sur le matériau ; enfin les calculs qui permettent d'aboutir à l'équilibre de la structure sont relativement longs [2]. D'autres part, les vitesses d'impact des billes sont très généralement inférieures à 200 m/s. On peut montrer et vérifier que dans ce cas, l'impact d'une sphère sur un massif métallique est un événement qui peut être considéré comme quasi-statique [3].

Dans le cas d'un calcul statique, il faut définir un critère d'arrêt pour la pénétration de la bille dans le matériau. Ce critère correspond au principe de conservation de l'énergie dans tout le système considéré (dans notre cas, ce système correspond à la bille, plus le matériau impacté). Cette énergie peut se décomposer en :

- énergie de déformation élastique,
- énergie de déformation plastique.

Dans le cas expérimental, avant le premier impact, la seule énergie dans le système correspond à l'énergie cinétique initiale de la bille. Quand la bille entre en contact avec le matériau, l'énergie cinétique de la bille se transforme en énergie de déformation élastique et en énergie stockée dans le matériau (dislocation ...) et en énergie dissipée par chaleur. Au moment où l'impact est maximal, l'énergie cinétique de la bille est

nulle et, donc, l'énergie dans le système est égale à l'énergie cinétique initiale de la bille. Quand les calculs sont statiques, il n'y a donc pas d'énergie cinétique à considérer. Mais, nous pouvons définir un critère d'arrêt pour le calcul : l'enfoncement statique de la bille doit s'arrêter quand l'énergie dans tout le système est égale à l'énergie cinétique initiale de la bille. Les analyses présentées ici correspondent à des vitesses de bille avant l'impact allant jusqu'à 10 m/s pour la bille de rayon 1,5 mm et 80 m/s pour la bille de rayon 0,3 mm. Les tables suivantes présentent les enfoncements estimés pour les différentes billes à différentes vitesses.

Table 1 : Acier 35NiCrMo16 (bille de rayon 0,3 mm) :

Vitesse (m/s)	20	55	80
Energie cinétique (mJ)	0,169	1,31	2,87
Enfoncement maximal (mm)	0,0081	0,0194	0,0274

Table 2 : Acier 304L (bille de rayon 1,5 mm) :

Vitesse (m/s)	5	10
Energie cinétique (mJ)	1,47	5,6
Enfoncement maximal (mm)	0,018	0,033

2.4 Équations thermomécaniques et conditions aux limites

Les calculs ont été effectués avec le logiciel Zebulon dans le cadre d'une résolution implicite des équations classiques de la mécanique en grandes déformations couplé faiblement à l'équation de la chaleur.

Les conditions aux limites, pour le problème thermique, sont précisées sur la Figure 1. La température initiale, ainsi que la température extérieure sont de 20 °C.

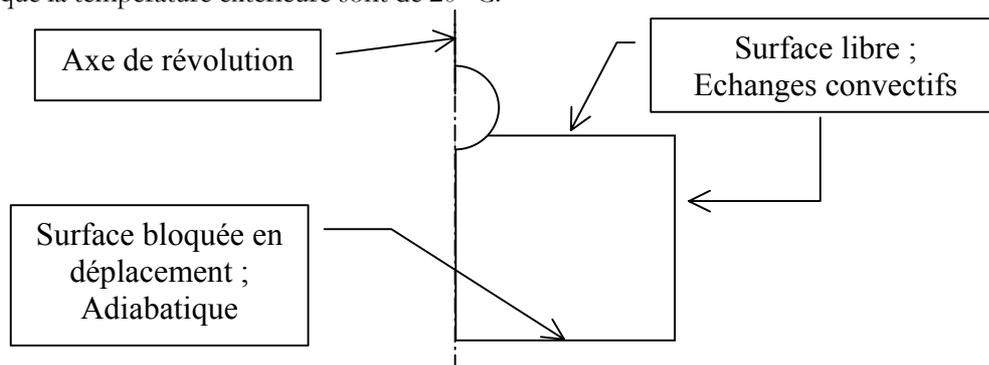


Figure 1 : Schéma du dispositif modélisé avec les conditions aux limites

3 Résultats et analyse

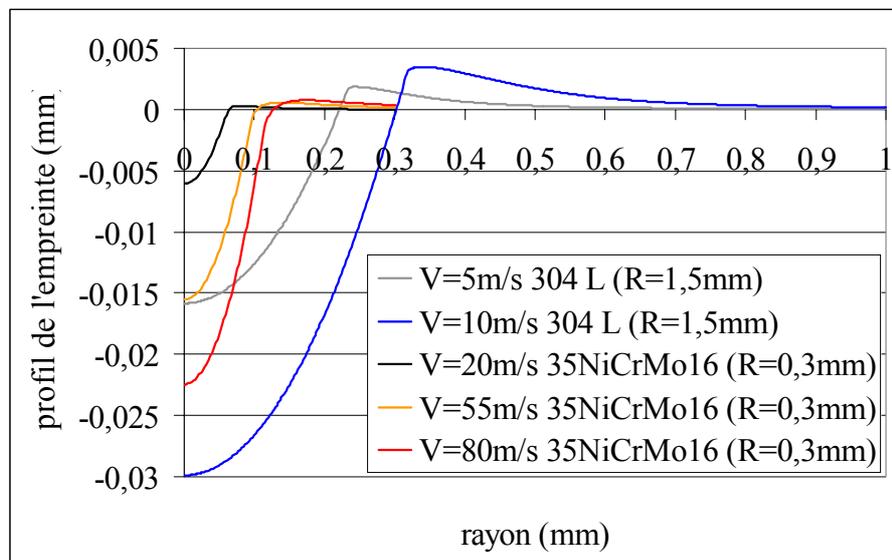


Figure 2 : Empreintes laissées par l'impact de la bille.

La figure 2 présente les empreintes laissées par les billes après l'impact. Ces allures sont classiques et correspondent à des profondeurs d'enfoncement typiquement rencontré dans ce type de modélisation. Les empreintes les plus larges sont obtenues avec la bille de plus fort diamètre. On remarque évidemment que la profondeur de l'empreinte augmente lorsque l'énergie cinétique augmente.

La figure 3 présente la distribution de l'élévation de la température au moment de l'enfoncement maximal de la bille dans le massif. L'élévation de la température est importante, de l'ordre de 115°C dans le cas de la petite bille et bien moins conséquente, environ 18°C, dans l'autre configuration. Ce constat remet en question l'hypothèse faite sur les propriétés thermomécaniques du massif vis à vis de la dépendance envers la température (conductivité thermique, limite d'élasticité ...) dans le cas de la petite bille. La connaissance de la distribution du champ de température dans le massif permettra une interprétation plus aisée des mesures de température par caméra infrarouge. En particulier le modèle utilisé pour interpréter les résultats expérimentaux nécessite la connaissance du volume dans lequel sont réparties les sources thermiques.

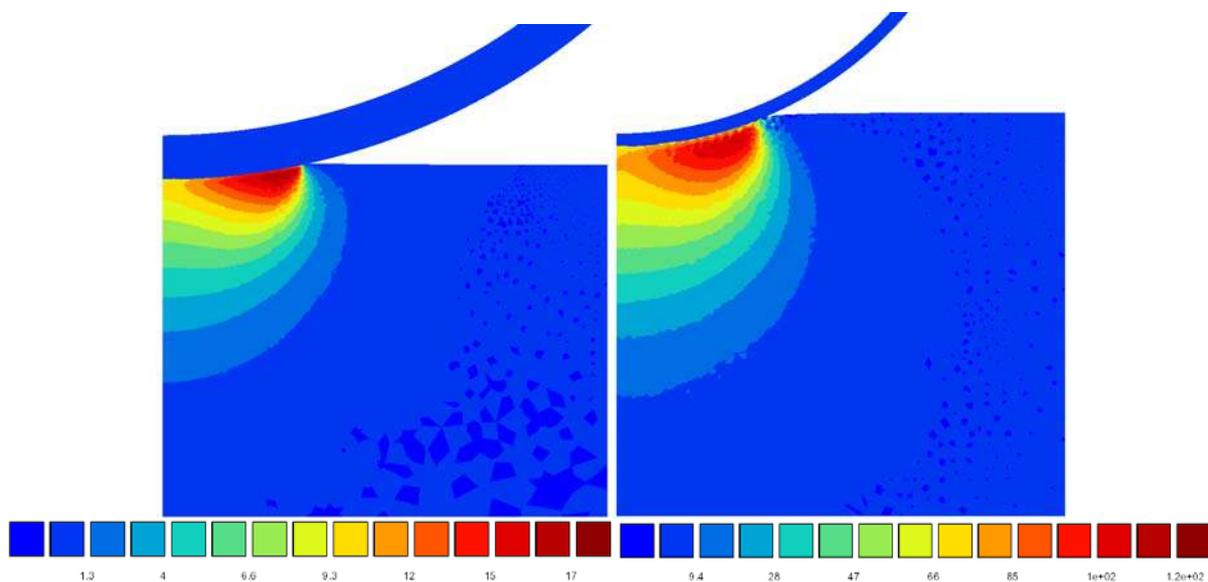


FIGURE 3 : Champs de l'élévation de température au moment où l'enfoncement de la bille est maximal pour le 304L à gauche ($T_{max} \sim 18^\circ\text{C}$; $V=10$ m/s) et le 35NiCrMo16 à droite ($T_{max} \sim 115^\circ\text{C}$; $V=80$ m/s).

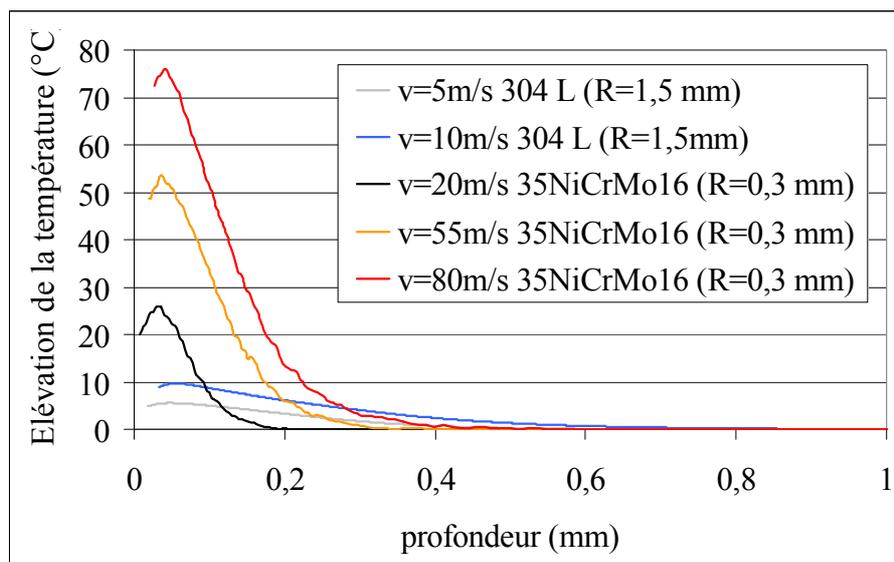


Figure 4 : Elévation de température dans le massif en fonction de la profondeur au niveau de l'axe de révolution de la structure au moment où l'enfoncement de la bille est maximal.

La figure 4 présente l'élévation de la température au niveau de l'axe de révolution du système au moment où l'enfoncement de la bille est maximal. C'est aussi à cet instant que la température est maximale dans le massif. Le point le plus chaud est situé légèrement en dessous de la surface et à droite de l'axe de symétrie, figure 3, là où le travail de déformation plastique est le plus important; l'élévation de la température décroît rapidement avec la profondeur pour s'annuler autour de 1 mm de profondeur. La température décroît très vite du fait que la grande taille du massif absorbe toute la chaleur par conduction. Ces valeurs peuvent être comparées à des résultats obtenus par ailleurs [3] qui montrent que, dans ce type de configurations, les déformations plastiques sont non nulles à l'intérieur d'un hémisphère ayant le même rayon que la bille (voir figure 5).

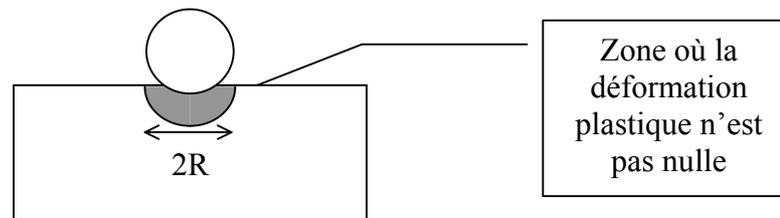


Figure 5: Ordre de grandeur de la taille du volume où la déformation plastique n'est pas nulle dans le cas de l'impact d'une bille sur un massif semi infini (R : rayon de la bille).

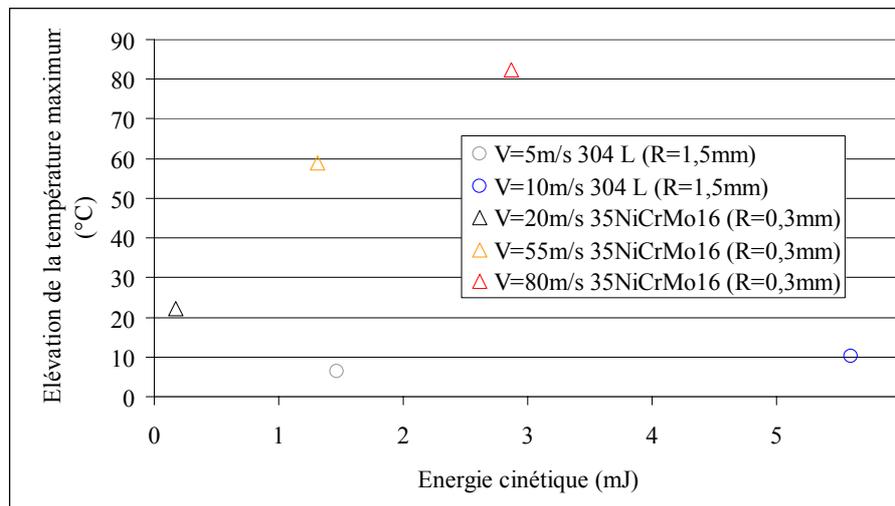


Figure 6 : Élévations maximales de la température (sur l'axe de symétrie du massif) en fonction de l'énergie cinétique de la bille. $R = 0,3$ mm pour une bille impactant un acier 35NiCrMo16 et $R = 1,5$ mm pour une bille impactant un acier 304L.

La figure 6 présente l'élévation maximale de la température atteinte sur l'axe de symétrie du matériau en fonction de l'énergie cinétique de la bille avant l'impact. L'élévation de la température est supérieure pour l'acier 35NiCrMo16. On remarque que pour une même énergie cinétique, l'élévation de la température est dix fois plus importante dans l'acier 35NiCrMo16. Cela peut s'expliquer par le fait que les déformations plastiques dans ce matériau sont plus importantes pour un volume de matière plus restreint. On remarque aussi que l'élévation de la température paraît être une fonction linéaire de la vitesse (ou de l'énergie cinétique).

4. Conclusion

L'évolution de la température a été étudiée pour un modèle simple de grenailage. L'accroissement de la température reste suffisamment faible pour influencer de façon déterminante les lois de comportements dans le cas de la bille de fort diamètre : les effets visqueux dus à l'élévation de la température de même que l'évolution du module de Young ou de la limite élastique peuvent être négligés. Cela n'est pas le cas pour la bille de faible diamètre dont les vitesses élevées produisent des niveaux de température importants donc

capables de modifier les propriétés mécanique et thermique du matériau. Par conséquent, une étude sur les contraintes résiduelles devrait montrer une modification significative du champ de contrainte, surtout pour des billes de forte énergie cinétique (ou vitesse). De plus, la distribution de la température dans le matériau devrait compléter l'interprétation de mesures pariétales de la température effectuées par thermographie infrarouge pour le contrôle en temps réel du procédé de grenailage.

Bibliographie

- [1] H. Pron, J-F Henry, B. Flan, J. Lu, S. Offermann et J.L. Beaudoin. Estimation of residual stresses induced by shot-peening. Measurement of the thermal dissipation with an infrared camera. *Int. Journal of Thermal Sciences*, Vol. 41, pp. 369-375 (2002).
- [2] E., David Deslaef, Jian Lu, Jean-Louis Chaboche, *Modeling of Residual Stress, Shot Peening*, Chapitre de livre : « Residual Stress and Mechanical Design » éditeur : Jian Lu, Society of Experimental Mechanics (SEM), à paraître.
- [3] David Deslaef, *Modélisation numérique du grenailage de précontrainte : approche tridimensionnelle et dynamique*. Université de Technologie de Troyes, Thèse de Doctorat (2000).
- [4] P. Rosakis, A.J. Rosakis, G. Ravichandran, J. Hodowany. A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals. *Journal of the Mechanics and Physics of solids*. Vol. 48, pp. 581-607 (2000).