



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

*Étude de l'effet des paramètres de grenailage sur les
contraintes résiduelles et les déformations plastiques*

Présenté par :

- ❖ MECHELOUF ROUMAÏSSA MOKHTARIA
- ❖ HAMIDOU FATIMA ZOHRA

Soutenu le 25 / 06 / 2023 devant le jury composé de :

Président	Pr. GUECHICHI HOCINE	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. BENKABOUCHE SALAH-EDDINE	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr. BENKHETTAB MOHAMED	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2022 / 2023

Remerciements

Dieu merci de nous avoir donné la volonté et le courage d'arriver à faire ce modeste travail.

En préambule à ce mémoire, nous souhaitons adresser notre reconnaissance à toute personne ayant apporté son aide et contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Nous remercions notre encadreur Docteur Benkhettab Mohamed, d'avoir accepté de diriger ce travail. Nous tenons à exprimer notre gratitude au Professeur Guechichi Hocine, d'avoir accepté de présider le jury de notre projet de fin d'études. Nos remerciements vont au Docteur Benkabouche Salah Eddine, qui nous a fait l'honneur d'accepter l'examen de ce mémoire. Le temps que les membres de jury aient passé, ainsi que l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail sont une marque de reconnaissance inestimable.

A tous nos enseignants de Génie mécanique de l'université de Mostaganem et particulièrement ceux qui ont contribué à notre formation particulièrement en master.

Résumé

Les matériaux se dégradent sous l'effet de divers facteurs tels que la corrosion, la fatigue ou l'usure, ce qui réduit leurs performances, et oblige les ingénieurs à rechercher des solutions. Ces solutions sont le traitement de surface, y compris le traitement par grenailage, qui est largement utilisé pour améliorer la résistance à la dégradation des matériaux. Dans certains cas, les contraintes résiduelles contribuent à diminuer le tenseur de contraintes, tandis que les déformations plastiques améliorent certaines propriétés mécaniques telles que la résistance à la fatigue. Des études expérimentales et des modèles numériques sont utilisés pour évaluer les contraintes résiduelles et les déformations plastiques, ainsi que pour prédire leur impact sur la dégradation des matériaux. Les traitements de grenailage ont des applications industrielles dans divers secteurs, tels que l'aérospatiale, l'automobile et la pétrochimie. Cependant, il est important de comprendre en détail les mécanismes et les limites de ces thérapies pour améliorer leur efficacité dans différentes applications. L'objectif de notre étude consiste à examiner l'effet des paramètres de grenailage sur les contraintes résiduelles et les déformations plastiques. Pour ce faire, nous avons développé un modèle numérique permettant d'évaluer l'influence des paramètres du grenailage (paramètres de la bille) sur le profil des contraintes résiduelles et les déformations plastiques obtenues par simulation. Notre étude se divise en deux parties principales : l'impact simple et les impacts multiples, dans le but d'assurer un taux de recouvrement de 100 % pour la surface traitée. Pour l'impact simple, nous avons analysé quatre paramètres, à savoir le rayon d'impact, la profondeur d'impact, la contrainte résiduelle à la surface et la contrainte résiduelle maximale, tout en faisant varier les paramètres du grenailage tel que le rayon de la bille, la vitesse de la bille, la masse volumique, etc. Dans la seconde partie de notre étude, nous avons examiné trois paramètres : la contrainte résiduelle à la surface, la contrainte résiduelle maximale et le facteur Q.

Mots clés : les traitements de surface, grenailage, les contraintes résiduelles, les déformations plastiques, Méthode des éléments finis.

ملخص

تدهور المواد بسبب عوامل مختلفة مثل التآكل أو التعب أو التآكل، مما يقلل من أدائها، مما يحتم على المهندسين البحث على حلول، تتمثل هذه الحلول في المعالجة السطحية ومن بينها معالجة عن طريق السفع بالكريات، تستخدم على نطاق واسع لتحسين مقاومة تدهور المواد. في بعض الحالات تساعد إجهادات المتبقية على إنقاص من مصفوفة الإجهاد باعتبارها إجهادات ضغط، بينما تعمل التشوهات البلاستيكية على تحسين بعض الخصائص الميكانيكية كمقاومة الكلال. تُستخدم الدراسات التجريبية والنماذج العددية لتقييم الضغوط المتبقية والتشوهات البلاستيكية، وكذلك للتنبؤ بتأثيرها على تدهور المواد. تستخدم معالجات السفع بالكريات تطبيقات صناعية في قطاعات مختلفة، مثل صناعة الطيران والسيارات والبتروكيماويات. ومع ذلك، من المهم أن نفهم بالتفصيل آليات وقيود هذه العلاجات لتحسين فعاليتها في التطبيقات المختلفة. الهدف من دراستنا في فحص تأثير معاملات السفع بالكريات على الضغوط المتبقية والتشوهات البلاستيكية. للقيام بذلك، قمنا بتطوير نموذج رقمي لتقييم تأثير معاملات السفع بالكريات على منحنى الضغوط المتبقية والتشوهات البلاستيكية التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة. تنقسم دراستنا إلى جزأين رئيسيين: تأثير فردي وتأثيرات متعددة، بهدف ضمان معدل معالجة (تغطية سطح) بنسبة 100٪ للسطح المعالج. من أجل التأثير البسيط، قمنا بتحليل أربعة معاملات، وهي نصف قطر التأثير، وعمق التأثير، والضغط المتبقي على السطح، والضغط الأقصى المتبقي، مع تغيير معاملات السفع

بالكريات مثل نصف قطر الكرة ، وسرعة الكرة ، الكثافة ، إلخ. في الجزء الثاني من دراستنا، قمنا بفحص ثلاثة معايير: الإجهاد المتبقي على السطح ، والضغط الأقصى المتبقي وعامل Q.

كلمات مفتاحية: المعالجات السطحية، السفع بالكريات، الضغوط المتبقية، التشوهات البلاستيكية، طريقة العناصر المحدودة.

Abstract

Materials degrade under the effect of various factors such as corrosion, fatigue or wear, which reduces their performance, forcing engineers to seek solutions. These solutions are surface treatment, including shot blasting treatment, which is widely used to improve the degradation resistance of materials. In some cases, the residual stresses help to reduce the stress tensor, while the plastic deformations improve certain mechanical properties such as fatigue resistance. Experimental studies and numerical models are used to assess residual stresses and plastic strains, as well as to predict their impact on material degradation. Shot peening treatments have industrial applications in various sectors, such as aerospace, automotive and petrochemicals. However, it is important to understand in detail the mechanisms and limitations of these therapies to improve their effectiveness in different applications. The objective of our study consists in examining the effect of the peening parameters on the residual stresses and the plastic deformations. To do this, we have developed a numerical model to assess the influence of peening parameters (bead parameters) on the profile of residual stresses and plastic deformations obtained by simulation. Our study is divided into two main parts: single impact and multiple impacts, with the aim of ensuring a 100% recovery rate for the treated surface. For the simple impact, we analyzed four parameters, namely the impact radius, the impact depth, the residual stress at the surface and the maximum residual stress, while varying the parameters of the peening such as the radius of the ball, the speed of the ball, the density, etc. In the second part of our study, we examined three parameters: the residual stress at the surface, the maximum residual stress and the Q factor.

Keys words: surface treatments, shot peening, residual stresses, plastic deformations, finite element method.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------	---

Chapitre I : Les traitements de surface

I.1	Introduction	3
I.2	Les traitements de surface	3
I.2.1	Les traitements de surface par voie mécanique	3
I.2.1.1	Grenaillage	3
I.2.1.2	Martelage	4
I.2.1.2.1	Exemple de Martelage	4
I.2.1.3	Galetage	4
I.2.1.4	Polissage	5
I.2.2	Les traitements de surface par voie chimique	6
I.2.2.1	Galvanisation	6
I.2.2.2	Chromage	6
I.2.2.3	Nitruration	7
I.2.2.4	La cémentation	8
I.2.3	Les traitements par voie électrochimique	8
I.2.3.1	Anodisation	8
I.2.3.2	Électro plaquage	9
I.2.3.3	Électro zingage	9
I.2.3.4	Électro polissage	9
I.2.4	Traitement par voie physique	10
I.2.4.1	Traitement par plasma	10
I.2.4.2	Traitement thermique	10
I.2.4.2.1	Trempe	10
I.2.4.2.2	Recuit	10
I.2.4.2.3	Revenu	11
I.2.4.3	Le choc laser	11
I.2.4.4	Dépôt physique en phase vapeur (PVD)	12
I.3	Influence des traitements de surface sur les structures	13
I.3.1	Corrosion	13
I.3.1.1	Exemple	14
I.3.2	Usure	15
I.3.3	Fatigue	16

Chapitre II : Étude du grenaillage de précontrainte

II.1	Principe	17
II.2	Différents types de grenaillageuses	17
II.3	Paramètres de grenaillage	18
II.3.1	Jet de grenailles	18
II.3.1.1	Nature et dimensions des grenailles	18
II.3.1.2	Qualité des billes	19
II.3.1.3	Vitesse de projection des billes	19
II.3.1.3.1	Méthode de mesure de la vitesse des billes	19
II.3.1.4	Angle d'incidence	20
II.3.2	Taux de recouvrement	20

II.3.3	Les conditions d'impact	20
II.4	Intensité Almen	20
II.5	Modélisation du choc	21
II.6	Champ de Hert	23
II.7	Champ des contraintes résiduelles, des déformations plastiques et des variables transformées	23
II.8	Contraintes résiduelles	23
II.9	Modèles numériques de grenailage	24
II.9.1	Modélisation de Majzoubi et al	25
II.9.2	Modélisation de Meguid et al	26
II.9.3	Modélisation de Frija et al	26
II.9.4	Modélisation de Hong et al	27
II.9.5	Modélisation de Renaud	28
II.9.6	Modélisation de Guagliano	30

Chapitre III : Simulation numérique du grenailage de précontrainte

III.1	Introduction	32
III.2	Premier cas (uni-impact)	32
III.2.1	Mises en données	32
III.2.1.1	Maillage	33
III.2.1.2	Optimisation du maillage	34
III.2.1.3	Conditions aux limites	35
III.2.1.4	Etude l'effet des paramètres de grenailage	35
III.2.1.4.1	Effet de la vitesse d'impact	36
III.2.1.4.2	Effet de la taille de la bille	37
III.2.1.4.3	Effet du coefficient de frottement	39
III.2.1.4.4	Effet angle d'incidence	41
III.2.1.4.5	Effet du coefficient de poisson	43
III.2.1.4.6	Effet de la masse volumique	44
III.2.1.4.7	Effet de module de Young	46
III.3	Deuxième cas (multi-impact)	48
III.3.1	Simulation du procédé du grenailage	48
III.3.2	Effets des différents paramètres	49
III.3.2.1	Effet de la vitesse d'impact	49
III.3.2.2	Effet de la taille de la bille	51
III.3.2.3	Effet de coefficient de frottement	52
III.3.2.4	Effet angle d'incidence	54
III.3.2.5	Effet du coefficient de poisson	55
III.3.2.6	Effet de la masse volumique	57
III.3.2.7	Effet de module de Young	58
	CONCLUSION GENERALE	61
	Bibliographie	62

NOTATION

J_{corr}	La densité de courant
F	La constante de FARADAY
S	La surface
W	L'énergie incidente (énergie cinétique)
W_{el}	L'énergie de déformation
P_m	Pression moyenne
a	Rayon d'empreinte
F	Résultante des efforts de pression de la bille sur la surface
δ	Profondeur de la pénétration de la bille
E	Module d'élasticité
W_{ep}	L'énergie de déformation élasto-plastique
W_d	L'énergie non négligeable
k	Rendement de choc
P_0	La pression maximale
$\overline{\sigma^h}$	Le tenseur des contraintes élastiques
\overline{R}	Le champ des contraintes résiduelles
μ	Coefficient de friction
λ	La longueur d'onde connue des rayons X
σ_e	Limite d'élasticité
E	Module de Young
XRD	Diffraction des rayons X
CRS	Contrainte résiduelle
FWHM	Full width at half maximum
HV	Dureté Vickers

Introduction générale

Les traitements de surface, les dégradations des matériaux et le grenailage sont étroitement liés dans le domaine de l'ingénierie des matériaux. Les pièces mécaniques sont exposées à différents types de dégradations, tels que la fatigue, l'usure et la corrosion, qui peuvent nuire à leur performance et à leur durabilité. Les traitements de surface peuvent être regroupés en différentes catégories, comprenant les traitements thermiques, les traitements thermochimiques et les traitements mécaniques. Les traitements thermiques, comme la trempe et le recuit, impliquent l'exposition du matériau à des températures élevées afin de modifier sa structure cristalline et ses propriétés mécaniques. Les traitements thermochimiques, tels que la cémentation et la nitruration, combinent des réactions chimiques et thermiques pour former des couches de surface résistante à l'usure et à la corrosion. Les traitements mécaniques, tels que le grenailage, le martelage et le sablage, utilisent des forces mécaniques pour altérer la topographie et les contraintes résiduelles de la surface du matériau. Le grenailage est une technique de traitement de surface très utilisée dans l'industrie, pour l'introduction des contraintes résiduelles de compression et des déformations plastiques à la surface d'une pièce. Il consiste à projeter avec vitesse élevée des billes, généralement de différentes natures, sur la surface de la pièce. Ce procédé induit une déformation plastique locale et engendre des contraintes de compression qui renforcent la résistance à la fatigue et à la fissuration de la pièce. Cependant, la bonne maîtrise du grenailage repose sur plusieurs paramètres, tels que la taille et la forme des billes, la vitesse d'impact, l'angle d'incidence et la durée du traitement. Une mauvaise sélection de ces paramètres peut entraîner des effets indésirables, tels que des contraintes résiduelles excessives, des déformations excessives ou une détérioration de la surface. Par conséquent, la maîtrise du processus de grenailage et la compréhension de son effet sur les matériaux sont essentielles pour obtenir les résultats souhaités.

Ce mémoire est composé en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur les traitements de surface et leur domaine d'utilisation, les voies des traitements de surface sont regroupées en quatre types : les traitements mécaniques, les traitements chimiques, les traitements électrochimiques et les traitements physiques. En générale l'application des traitements de surface sur des structures va engendrer des contraintes résiduelles de compression et des déformations plastiques. Le deuxième est réservé à l'étude bibliographique de grenailage de précontrainte et l'influence de chaque

paramètre. Le troisième chapitre est complètement réservé à l'étude que nous avons menée laquelle consiste à une modélisation numérique du procédé de grenailage en vue de déterminer l'effet des paramètres du grenailage. Le modèle numérique que nous avons mis au point vu de déterminer l'influence de quelques paramètres du grenailage (les paramètres de la bille) sur profil des contraintes résiduelles et les déformations plastiques obtenues par la simulation numérique. Nous nous intéressons, en premier lieu, à l'étude du simple impact, ensuite à l'effet des impacts multiples permettant découvrir la totalité de la surface traitée.

Pour le simple impact nous avons étudié quatre paramètres sont : le rayon d'impact et la profondeur d'impact, la contrainte résiduelle a la surface et la contrainte résiduelle maximale avec la variation des paramètres de grenailage comme le rayon de la bille, la vitesse de la bille, la masse volumique etc....

Pour la deuxième partie nous avons étudié trois paramètres sont : la contrainte résiduelle a la surface, la contrainte résiduelle maximale et le facteur Q.

Enfin, le présent mémoire s'achève par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus par la présente étude ainsi que les perspectives à envisager pour pouvoir poursuivre ce travail.

I.1 Introduction

Les traitements de surface revêtent une grande importance dans divers secteurs industriels, offrant une multitude d'avantages pour améliorer les propriétés des matériaux et des produits finis. Ces traitements consistent à modifier la surface d'un matériau grâce à des processus chimiques, mécaniques ou thermiques, afin d'obtenir des caractéristiques spécifiques.

Dans l'industrie, les traitements de surface sont largement utilisés pour préserver les matériaux de la corrosion, de l'usure, la fatigue et des rayures et autres types de détériorations. Ils contribuent également à améliorer les performances fonctionnelles des produits, à renforcer leur durabilité.

Ce chapitre est consacré aux traitements de surfaces, dans la plupart des cas les traitements de sont utilisés pour protéger les structures contre les phénomènes de dégradations. Ces traitements consistent à induire des contraintes résiduelles de compression et des déformations plastiques dans les couches superficielles. Le chapitre est organisé en quatre sections, chacune dédiée à un traitement de surface spécifique utilisé pour protéger contre un type particulier de dégradation.

I.2 Les traitements de surface

Le traitement de surface est utilisé dans plusieurs domaines selon l'utilité de traitement, c'est pourquoi on distingue plusieurs voies des traitements de surface, On peut distinguer quatre types de traitement de surface [1]:

- Voie mécanique.
- Voie chimique.
- Voie électrochimique.
- Voie physique.

I.2.1 Les traitements de surface par voie mécanique

Les traitements de surface mécaniques font partie des nombreux procédés permettant d'améliorer les caractéristiques superficielles et globales des pièces. Ils combinent les phénomènes de durcissement superficiel, une modification structurale et l'introduction de contraintes résiduelles de compression. Dans cette partie nous avons cité les différents traitements mécaniques [1].

I.2.1.1 Grenailage

Le grenailage de précontrainte est un traitement mécanique de surface à froid appliqué sur des pièces métalliques. Il est largement utilisé, principalement dans les industries automobile et aéronautique, en vue d'améliorer la tenue en fatigue des pièces. Ce traitement mécanique de surface consiste à projeter, à grande vitesse (entre 10 et 100 m /s), des grenailles de forme sphérique sur les surfaces

des pièces à traiter. L'impact des billes sur la surface du matériau génère une déformation plastique laquelle engendre la création des contraintes résiduelles de compression. Ces contraintes ont un effet bénéfique sur la résistance à la fatigue des pièces traitées. Pour le grenailage, elle sera étudiée en détail dans le deuxième chapitre théoriquement car elle fera l'objet de simulation numérique dans le troisième chapitre [2].

I.2.1.2 Martelage

Le martelage est un procédé de traitement de surface par voie mécanique. Il s'agit d'une technique utilisée pour améliorer les propriétés mécaniques d'une surface en lui appliquant des impacts répétés à l'aide d'un outil appelé marteau. Ce processus permet de modifier la structure de la surface et d'obtenir différents effets [3].

I.2.1.2.1 Exemple de Martelage

Le matériau utilisé est un acier de construction à haute résistance faiblement allié S690. Le matériau a été fourni sous forme de plaques de 10 mm d'épaisseur qui ont été soudées bout à bout. Après le soudage, les régions du pied de soudure ont été martelées manuellement ou automatiquement à l'aide d'un marteau pneumatique, comme illustré à la figure (I.1). Le rayon du marteau utilisé est $R = 2 \text{ mm}$ et la fréquence est de 80 Hz. La vitesse du martelage manuel est de 18 cm/min alors que dans le martelage automatique, avec le marteau pneumatique monté dans un bras robotisé, elle est de 10 cm/min [3].

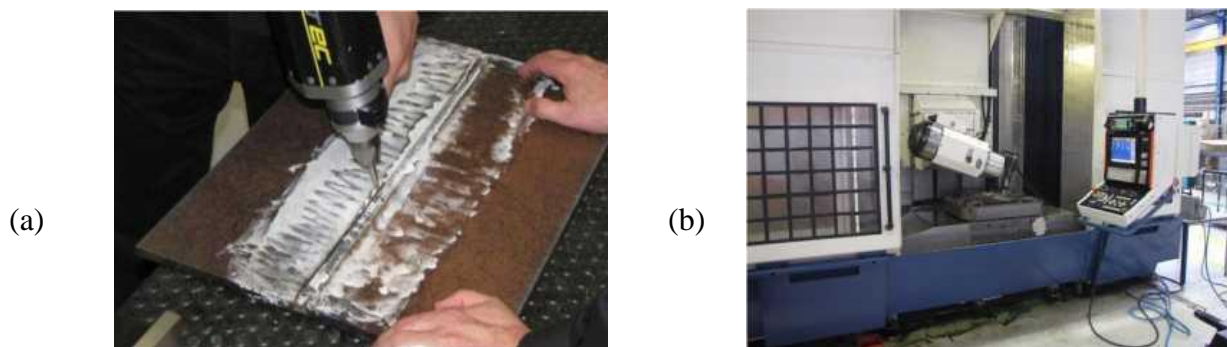


Figure I.1 Procédé de martelage. (a) martelage manuel, (b) martelage automatique.

I.2.1.3 Galetage

Le galetage est un procédé purement mécanique de finition et de renforcement sans enlèvement de matière. Il met en œuvre des déformations plastiques localisées suite à l'application d'une pression sur une bille (Figure I.2 (a)), sur un galet ou sur un rouleau (Figure I.2 (b)), placés sur une surface métallique moins dure. Cette technique remédie aux détériorations de la pièce en améliorant la finition

de surface, la dureté et augmente la résistance à l'usure et à la fatigue, grâce aux contraintes résiduelles de compression introduites [4].

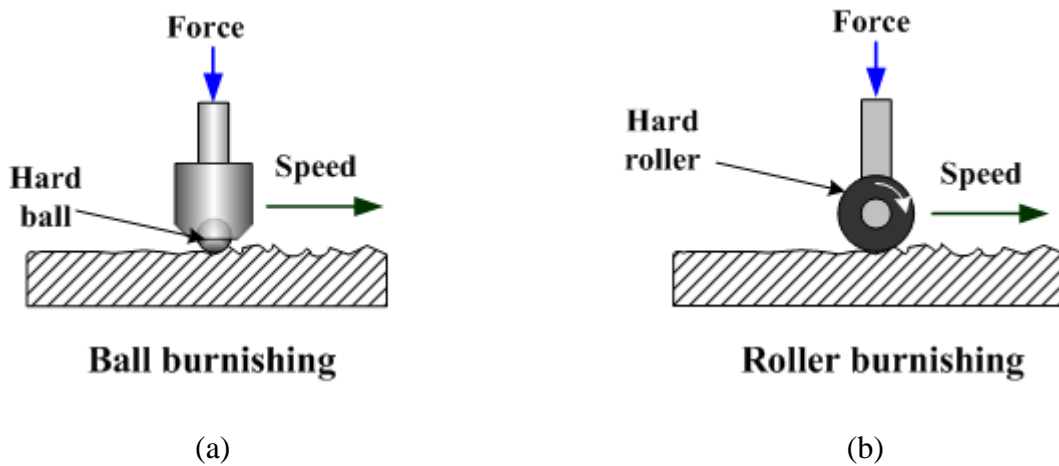


Figure I.2 (a) Procédé de galetage à bille, (b) Procédé de galetage à rouleau (2).

I.2.1.4 Polissage

Le polissage est un processus de finition pour le lissage de la surface (figure I.3) d'un objet utilisant un abrasif et une roue de travail. Le polissage mécanique par abrasion s'effectue en deux étapes principales, dans des conditions métallographiques standard.

- La première étape consiste à polir grossièrement la surface sur des papiers sablés (en Sic) en rotation, à pouvoirs abrasifs décroissants et en présence d'eau.
- La seconde étape consiste à finir le polissage en appliquant la pièce sur des tapis de feutre en rotation, sur lesquels des pâtes diamantées de granulométrie décroissante (jusqu'à $0.1 \mu\text{m}$) ont été déposées (figure I.4).

Le résultat de ce traitement complet est une diminution de la rugosité de la surface et son enrichissement en oxydes de fer et de chrome. Cependant, l'action mécanique de frottement par des abrasifs provoque non seulement des phénomènes d'oxydation superficielle, mais aussi des perturbations de la structure cristalline [4].



Figure I.3 Polissage des surfaces.



Figure I.4 Machine de polissage pour métaux.

I.2.2 Les traitements de surface par voie chimique

Les traitements de surface par voie chimique sont des procédés qui permettent de modifier les caractéristiques de la surface d'un matériau en utilisant des réactions chimiques spécifiques. Ils sont utilisés pour améliorer différentes propriétés telles que la résistance à la corrosion, la lubrification, l'adhérence, l'aspect esthétique, etc. [1]

I.2.2.1 Galvanisation

La galvanisation à chaud au trempé consiste à revêtir et à lier de l'acier avec du zinc en immergeant l'acier dans un bain de zinc en fusion à 450 °C environ. Ce procédé ne consiste pas uniquement à déposer du zinc sur quelques micromètres à la surface de l'acier. Le revêtement de zinc est chimiquement lié à l'acier de base, car il se produit une réaction chimique métallurgique de diffusion entre le zinc et le fer ou l'acier à 450 °C. Quand on retire l'acier du bain de zinc, il s'est formé à sa surface plusieurs couches d'alliages zinc-fer sur lesquelles le zinc entraîné se solidifie (Figure I.5). Ces différentes couches d'alliages, plus dures que l'acier de base pour certaines, ont une teneur en zinc de plus en plus élevée au fur et à mesure que l'on se rapproche de la surface du revêtement [5].

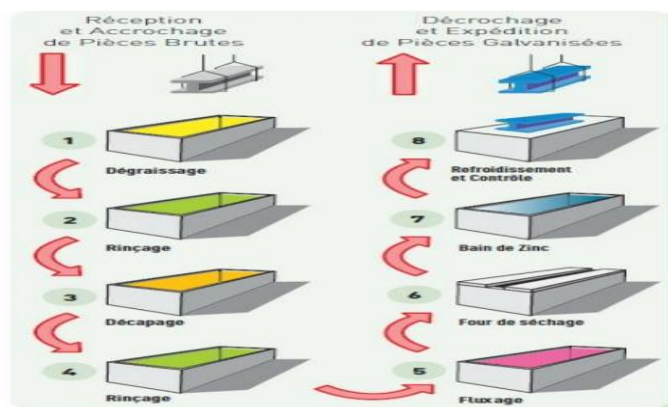


Figure I.5 les différentes étapes de la galvanisation de produits finis.

I.2.2.2 Chromage

Le chromage consiste à recouvrir une pièce en métal de chrome, d'une épaisseur plus ou moins grande, de 0,5 μm (chrome décoratif) à 1/10 mm rectifié (chromage dur). Ne pas confondre avec la « finition chromique » ou « chromatation », qui est un traitement de conversion chimique dans un bain à base chrome +VI ou +III après zingage ou cadmiage, ni avec la chromisation parfois appelée chromage électrolytique.

On distingue habituellement deux sortes de chromage, les qualités demandées à la couche superficielle n'étant pas les mêmes selon les applications envisagées [6].

- **Le chromage décoratif** a pour but de donner aux pièces l'aspect brillant caractéristique des surfaces de chrome polies. On l'utilise par exemple pour des pare-chocs et des poignées de porte.
- **Le chromage dur** est utilisé dans les applications mécaniques où les conditions de frottement sont sévères comme revêtement anti-usure. On l'utilise par exemple pour des trains d'atterrissage, des systèmes de portes d'avions, etc.

I.2.2.3 Nitruration

La nitruration est un traitement thermo-chimique dans lequel on fait diffuser l'azote, de la surface vers le cœur de la pièce, à une température comprise entre 450 et 580°C.

Dans le cas des aciers, la pièce subit initialement un traitement thermique de trempe suivi d'un revenu à haute température ; cela permet d'obtenir une structure métallurgique globulaire conférant au métal de base les caractéristiques mécaniques voulues. Ce revenu s'effectue à une température supérieure à celle de la nitruration.

A la fin du traitement, le refroidissement est généralement lent pour ne pas provoquer de fortes distorsions.

Le principal phénomène mis en jeu est la formation de la couche nitrurée par diffusion de l'azote dans la matrice ferritique. La nitruration conduit donc à l'obtention d'un durcissement par diffusion de l'azote sans traitement thermique ultérieur.

L'apport d'azote aux couches superficielles des métaux peut se faire par plusieurs procédés. Le choix d'un procédé de nitruration est conditionné par les possibilités de réalisation de la structure souhaitée et par les critères économiques [7].

Il y a quatre procédés de nitruration :

- **Nitruration solide** : elle s'effectue dans des caisses comme dans le cas de la cémentation. La cyanamide calcique est l'agent nitrurant en présence d'activateurs qui libèrent les éléments N, C, O et H.
- **Nitruration liquide** : la nitruration liquide en bain de sel est connue sous le nom de TENIFER. L'azote est obtenu par l'oxydation des cyanures.
- **Nitruration gazeuse** : ici l'azote est obtenu par dissociation de l'ammoniac.
- **Nitruration ionique** : elle est effectuée par dissociation de l'azote dans un plasma.

I.2.2.4 La cémentation

Son principe consiste en un enrichissement en carbone (cémentation) ou carbone + azote (carbonitruration) grâce à une atmosphère gazeuse appropriée. Cette opération est suivie immédiatement d'une trempe à l'huile. Ce traitement confère aux pièces des duretés de surface élevées et des duretés à cœur qui sont fonction de la nuance de l'acier employé ainsi qu'un excellent compromis entre une résistance à l'usure élevée et une bonne ductilité. Les profondeurs de traitement pouvant être réalisées en fonction de la durée du cycle thermique et de la matière employée [8].

I.2.3 Les traitements par voie électrochimique

Les traitements par voie électrochimique sont des techniques utilisées pour modifier les propriétés de surface des matériaux en utilisant des réactions électrochimiques. Ces traitements impliquent généralement l'immersion des pièces dans une solution électrolytique et l'application d'un courant électrique [9].

I.2.3.1 Anodisation

L'anodisation (appelé parfois éloxage, en Suisse Romande) est un traitement de surface (de type conversion) qui permet de protéger ou de décorer une pièce en aluminium (ou alliage) ou titane (ou alliage) par oxydation anodique (couche électriquement isolante de 5 à 50 micromètres). Elle octroie aux matériaux une meilleure résistance à l'usure, à la corrosion et à la chaleur. L'épaisseur varie en fonction de la destination du produit final.

Pour les usages courants à l'intérieur, cinq micromètres sont suffisants, dix pour l'extérieur, vingt pour le bord de mer et parfois plus (anodisation dure) pour des usages spécifiques très agressifs. L'anodisation améliore également l'aspect (incolore ou teinté). L'opération consiste en une succession de bains suivis de rinçage : un premier pour préparer la surface, un second pour produire l'oxyde, un troisième pour la couleur éventuelle et enfin le dernier pour stabiliser. L'oxydation naturelle incontrôlée des pièces en aluminium ne forme pas de barrière étanche, sauf pour certains alliages d'aluminium moins sensibles aux corrosions (par exemple AG6).

Cet oxyde d'aluminium, très pur, est de l'alumine, blanche en couche épaisse. Il est d'une dureté très élevée : c'est le corindon utilisé dans les abrasifs. L'anodisation forme une couche de cristaux qui sont très hydrophiles, propriété que l'on utilise pour colmater la surface. Cette hydratation (dernière phase du traitement) provoque une combinaison stable avec cet oxyde (étanche aux agents corrosifs) (pratiqué à chaud, plus de 70 °C, certains ajoutent du bichromate de potassium 50 g/l). Dans le cas de l'aluminium ces cristaux permettent d'emprisonner des colorants très fins qui sont bloqués dans la structure. La couleur des pièces en titane anodisé dépend de la tension appliquée lors de l'anodisation

(à composition de bain identique). Les couleurs obtenues sont très agréables. Il est possible aussi de ne pas colmater la couche d'anodisation, notamment dans le cas où une couche de peinture est appliquée ultérieurement. En effet la couche poreuse servira de base d'accroche (mécanique) à la peinture [10].

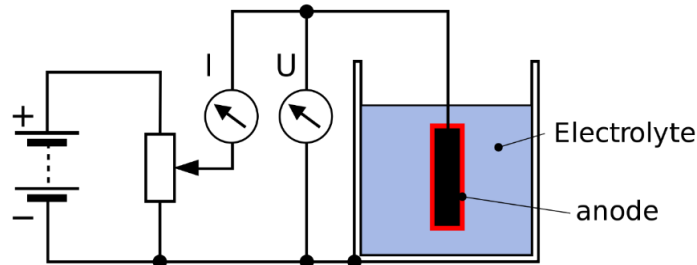


Figure I.6 procédé d'Anodisation.

I.2.3.2 Électro plaquage

L'électro plaquage est la méthode qui consiste à recouvrir des objets d'une fine pellicule d'un autre métal. Il est impliqué la réduction (diminution de l'état d'oxydation ; gain d'électrons) d'un composé métallique dissous dans l'eau et le dépôt du métal obtenu sur une surface conductrice.

Cette technique est probablement l'un des processus les plus complexes que l'on connaisse, car un grand nombre de phénomènes et de variables interviennent dans l'ensemble du processus, qui se déroule à la surface des matériaux concernés [11].

I.2.3.3 Électro zingage

Le zingage ou électro zingage est un procédé par lequel une couche de zinc adhère à l'acier, afin de le protéger contre la corrosion et donne une apparence agréable aux pièces. Il est également utilisé pour améliorer la persistance de la peinture. Il est réalisé par électrolyse d'une solution aqueuse contenant des sels métalliques (Zn, Na+...) et non métalliques dont la nature dépend de l'application envisagée et des propriétés souhaitées du revêtement [12].

I.2.3.4 Électro polissage

L'électro polissage est un processus de dissolution anodique normalement utilisé pour enlever une fine couche en surface d'un matériau métallique, grâce à un ensemble de réactions électrochimiques dans un milieu concentré en acide. La clé du procédé d'électro polissage est la variation de la densité du courant à travers la surface. De plus, ce procédé améliore l'effet chimique à la surface du matériel pour accroître la formation et accentuer le développement de la couche de protection résistante à la corrosion [13].

I.2.4 Traitement par voie physique

I.2.4.1 Traitement par plasma

Le traitement de surface par plasma consiste en une très forte oxydation de la surface du matériau. L'oxydation des molécules de surface permet d'augmenter la tension de surface d'un support en métal. Ainsi, le traitement de surface plasma vous permet d'améliorer les caractéristiques chimiques du matériau pour une meilleure adhésion au collage, à l'impression, ou de revêtements. Aucun besoin de consommable chimique, le procédé d'activation plasma fonctionne simplement avec de l'air comprimé et du courant électrique [14].

I.2.4.2 Traitement thermique

Le processus de traitement thermique de l'acier consiste à le soumettre à des changements de température au fil du temps. L'objectif est d'améliorer les propriétés du matériau pour mieux s'adapter aux conditions d'exploitation. Il existe différents types de traitements thermiques pour l'acier [15].

I.2.4.2.1 Trempe

La trempe consiste à chauffer lentement un alliage métallique (certains aciers, certains alliages de cuivre, certains alliages d'aluminium) puis à le refroidir brutalement (Figure I.7). En fait, le but principal de la trempe est de renforcer l'acier. Avec ce type de traitement on peut avoir des aciers assez durs et résistants [15].

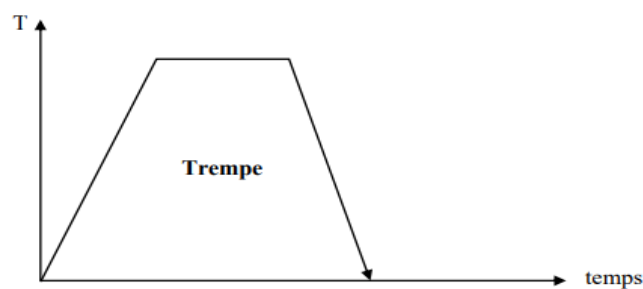


Figure I.7 Cycle thermique lors d'une trempe.

I.2.4.2.2 Recuit

Les recuits en général amèneront les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique (Figure I.8). Ils tendent à réaliser l'équilibre structural en faisant disparaître les états hors d'équilibre résultants des traitements thermiques et mécaniques antérieurs. Le recuit de détente est également utilisé pour stabiliser certaines pièces en cours d'usinage, lorsque la coupe dissymétrique des fibres détruit l'équilibre des contraintes internes et provoque des déformations [15].

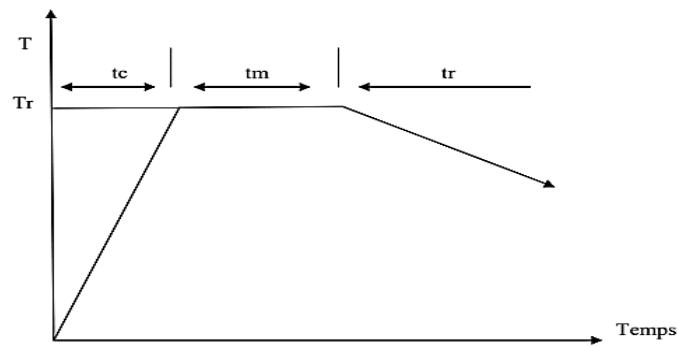


Figure I.8 Cycle thermique d'un recuit complet.

I.2.4.2.3 Revenu

Le revenu est une opération finale du traitement thermique qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe (Figure I.9). Il consiste à chauffer le métal trempé à une température inférieure à A_{c1} , à le maintenir à cette température et enfin à le refroidir jusqu'à la température ambiante. Le revenu provoque une évolution de la structure du matériau vers un état plus proche de l'état physicochimique d'équilibre, sans toutefois l'atteindre. Il permet d'avoir un compromis satisfaisant entre les propriétés de résistance (R_m, R_e, H) et de plasticité (A, Z et K) [15].

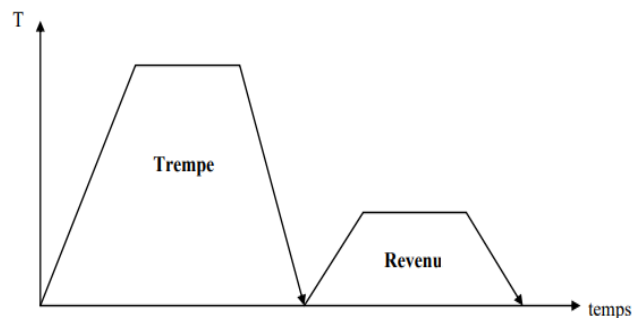


Figure I.9 Cycle thermique complet d'une trempe et revenu.

I.2.4.3 Le choc laser

La puissance générée par une explosion ou par des impulsions laser est très grande, cette puissance permet d'obtenir des pressions suffisantes pour créer une déformation plastique dans les couches superficielles de la pièce lorsque la limite d'élasticité du matériau est dépassée.

Ce traitement consiste à soumettre la surface d'un matériau à un choc pendant quelques dizaines de nanosecondes, à une densité surfacique d'énergie allant de 100 à 200 $J \cdot cm^{-2}$. Ceci provoque des pressions de choc, de l'ordre de 1 000 à 10 000 MPa, lesquelles introduisent localement des déformations plastiques dans les couches superficielles [16].

La figure I.10 représente le profil de la distribution des contraintes résiduelles obtenues sur une pièce en Inconel 718 traitée par choc laser.

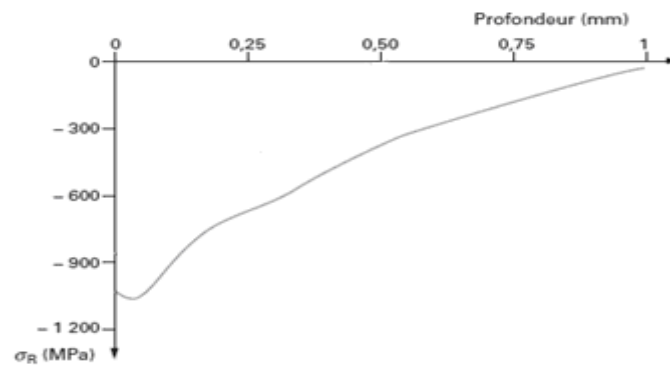


Figure I.10 Profils de contraintes résiduelles dans une pièce en Inconel 718 traitée par choc laser.

I.2.4.4 Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

Le dépôt physique par phase vapeur est un processus de revêtement utilisé pour déposer des couches minces de matériaux sur des substrats solides. Il est largement utilisé dans l'industrie pour la fabrication de revêtements fonctionnels et décoratifs sur une variété de produits tels que les outils de coupe, les pièces électroniques, les bijoux, les montres, etc.

Le processus de dépôt physique par phase vapeur implique généralement les étapes suivantes :[17]

- 1. Évaporation :** Un matériau source solide est chauffé jusqu'à ce qu'il atteigne la phase de vapeur. Cela peut être réalisé en utilisant diverses méthodes telles que l'évaporation sous vide, la pulvérisation cathodique, la sublimation, etc.
- 2. Transport de la vapeur :** La vapeur du matériau source se déplace à travers une chambre de dépôt sous vide pour atteindre le substrat sur lequel le revêtement sera déposé.
- 3. Condensation :** Lorsque la vapeur atteint le substrat, elle se condense et se dépose sous forme de couche mince solide. La température, la pression et d'autres paramètres de processus sont contrôlés avec précision pour obtenir les propriétés souhaitées du revêtement.

Les revêtements obtenus par dépôt physique par phase vapeur peuvent présenter diverses propriétés, telles que la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion, la conductivité électrique, la réflectivité optique, etc. Différents matériaux peuvent être utilisés comme sources pour produire des revêtements de différentes compositions, y compris des métaux, des alliages, des oxydes, des nitrures, des carbures, etc.

Le dépôt physique par phase vapeur est apprécié pour sa capacité à produire des couches minces uniformes, adhérentes et de haute qualité. Il est largement utilisé dans de nombreux secteurs industriels pour améliorer les performances et l'apparence des produits.

I.3 Influence des traitements de surface sur les structures

Les structures sont exposées à différents phénomènes de dégradation qui peuvent compromettre leur intégrité et leur durabilité. Trois des principaux phénomènes de dégradation rencontrés sont la corrosion, l'usure et la fatigue.

La corrosion est un processus chimique dans lequel les matériaux, en particulier les métaux, subissent des réactions avec leur environnement, ce qui entraîne une altération de leurs propriétés. Exposés à l'humidité, aux produits chimiques ou à d'autres substances corrosives, les matériaux peuvent subir une perte d'épaisseur, une diminution de leur résistance et même une perforation complète.

L'usure, quant à elle, est le résultat de l'interaction mécanique entre deux surfaces en mouvement relatif. Elle survient lorsque les matériaux subissent des frottements, des chocs, des vibrations ou d'autres contraintes mécaniques. Ce phénomène entraîne une perte de matière, une augmentation de la rugosité et une diminution de la résistance mécanique des structures.

Enfin, la fatigue est un mécanisme de dégradation qui se produit sous des charges cycliques ou répétitives. Lorsque les matériaux sont soumis à des contraintes fluctuantes, des fissures peuvent apparaître et se propager progressivement, ce qui peut conduire à une rupture soudaine de la structure. La fatigue est généralement causée par des charges dynamiques, des vibrations ou des cycles thermiques.

Les phénomènes qui conduisent à la dégradation des structures sont un problème majeur qui nous oblige à trouver des solutions techniques. C'est ce que nous avons fait dans cette partie de l'étude, nous avons étudié l'effet des traitements de surface et leur impact sur les trois types des dégradations. Le but de l'étude est de montrer la relation entre ces phénomènes et le traitement de surface représenté dans (contrainte résiduelle et déformation plastique), pour cette raison, cette partie est divisée en trois sections [18].

I.3.1 Corrosion

Les contraintes résiduelles de compression peuvent avoir un effet bénéfique sur la résistance à la corrosion d'une structure. Lorsqu'une structure est soumise à des contraintes résiduelles de compression, cela signifie qu'il y a une compression interne à l'intérieur du matériau. Ces contraintes résiduelles de compression peuvent avoir un effet de "fermeture" sur les sites de corrosion potentielles. En d'autres termes, elles exercent une pression qui peut empêcher l'ouverture des microfissures ou des défauts de surface, ce qui limite l'accès des agents corrosifs à ces zones sensibles. Par conséquent, les contraintes résiduelles de compression peuvent retarder ou inhiber l'initiation et la propagation de la corrosion. De plus, les contraintes résiduelles de compression peuvent également

améliorer la résistance à la corrosion par la formation d'une couche passive plus dense et stable sur la surface du matériau. Lorsque les contraintes compressives sont présentes, elles favorisent la formation d'une couche d'oxyde protectrice plus épaisse et adhérente, qui agit comme une barrière supplémentaire contre l'attaque corrosive. [19]

I.3.1.1 Exemple

Exemple suivant montre la relation entre le taux de corrosion et les contraintes résiduelles.

La figure suivante (Figure I.11) montre la relation entre les contraintes résiduelles et la densité de courante I_{crit} . pour plus d'explication, la relation entre le taux de corrosion et les contraintes résiduelles, la figure 4 montre la relation entre la densité de courante et le taux de corrosion. Nous avons remarqué que la relation entre la contrainte résiduelle et la densité de courant est une relation non proportionnelle, ce qui signifie qu'une augmentation de la contrainte résiduelle entraîne une diminution de la densité de courant [20].

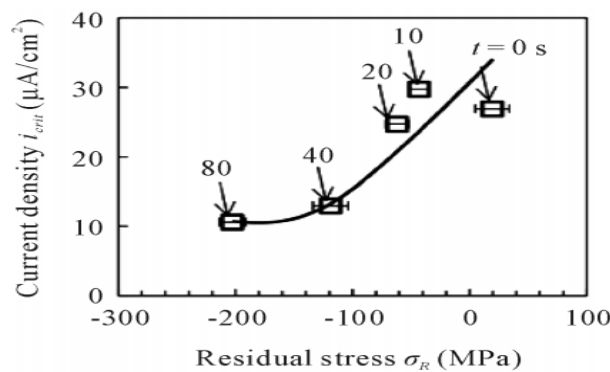


Figure I.11 la relation entre les contraintes résiduelles et la densité de courante.

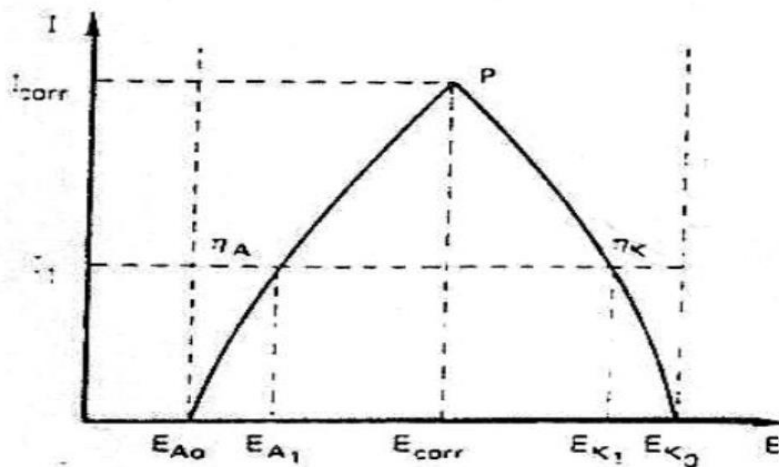


Figure I.12 Courbes de Polarisation (diagramme d'Evans).

La densité de courant au potentiel de corrosion est le courant de corrosion et est notée j_{corr} . Cette densité nous permet de quantifier le taux de corrosion. En fait, cela est lié au taux de consommation de fer :

$$j_{corr} = nF v_{ox} = -nF \frac{1}{s} \frac{dn_{Fe}}{dt} \quad (1)$$

I.3.2 Usure

Dans l'ingénierie, l'usure peut causer des défaillances prématurées, tandis que la dureté élevée des matériaux permet de minimiser l'usure et d'améliorer la durée de vie des pièces mécaniques. Dans des secteurs tels que l'automobile et l'industrie minière, des matériaux présentant une dureté élevée, tels que des alliages spéciaux où des composites renforcés de carbure, sont utilisés pour fabriquer des pièces résistantes à l'usure. Dans l'industrie des bijoux, la dureté des pierres précieuses, notamment des diamants, est essentielle pour leur durabilité. En résumé, l'augmentation de la dureté entraîne une diminution de l'usure. L'exemple suivant (Figure I.13-a et I.13-b) montre la relation entre la dureté et les contraintes résiduelles et le largeur de corde (FWHM) [21].

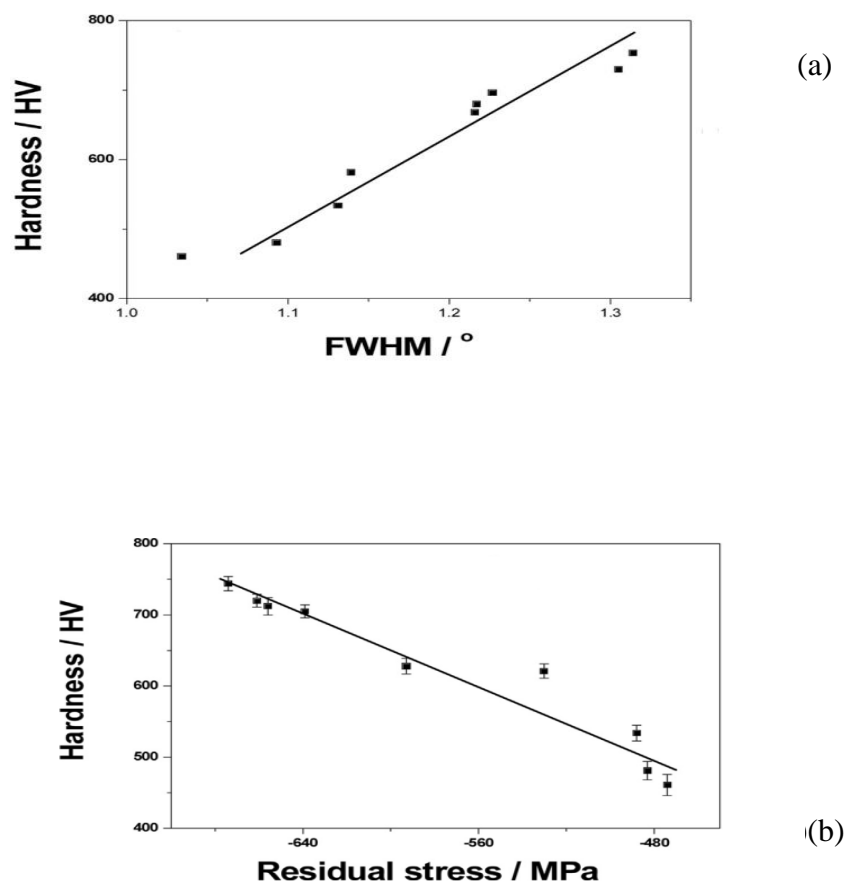


Figure I.13 a-b La variation de dureté de la surface de l'acier GCr15 après TSP avec largeur de corde FWHM.

I.3.3 Fatigue

Dans la plupart des études qui traitent le problème de prédiction de durée de vie sous chargement cyclique sont montrées qu'il suffit se prend en compte seulement les contraintes résiduelles, mais certaines études sont montrées que la prédiction de durée de vie nécessite l'introduction des deux paramètres, les contraintes résiduelles et les déformations plastiques dans le modèle de prédiction. L'exemple suivant montre (Figure I.14) l'effet des deux paramètres, les contraintes résiduelles et les déformations sur la durée de vie [22].

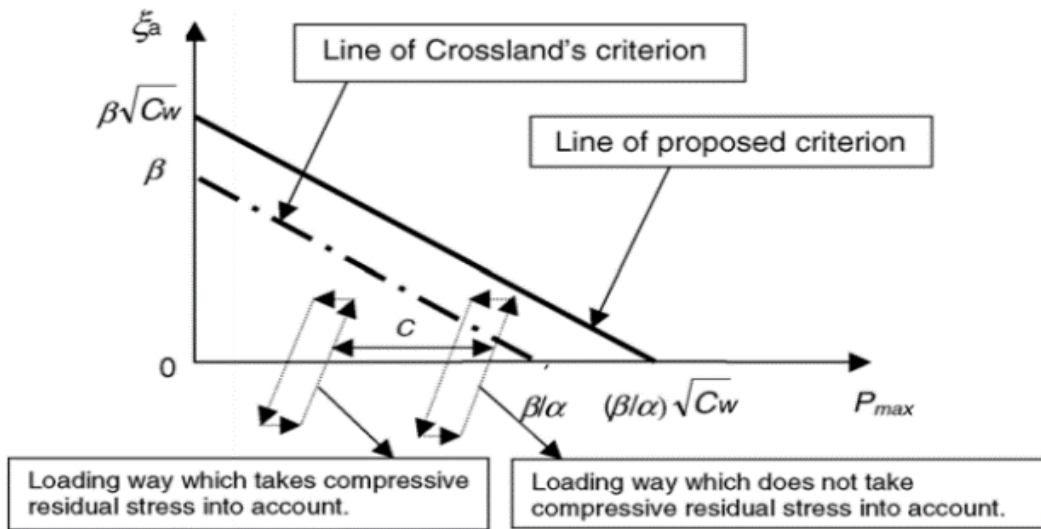


Figure I.14 Effet des contraintes résiduelles et des déformations plastiques sur le diagramme de Crossland.

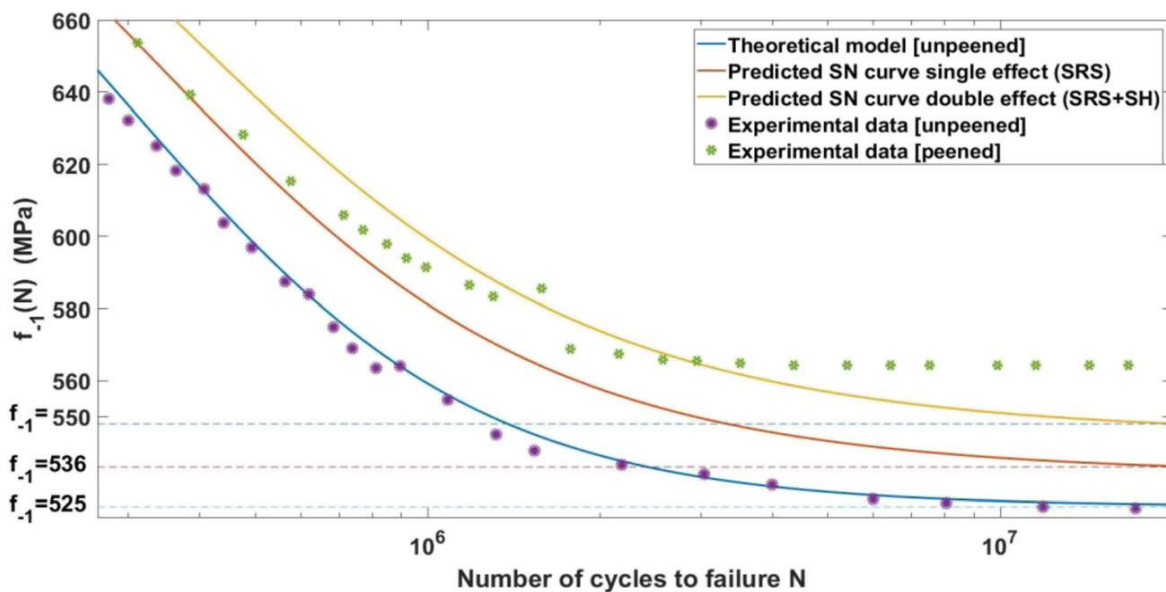


Figure I.15 Effet des contraintes résiduelles et des déformations plastiques sur la courbe de Wöhler.

II.1 Principe

Le grenailage de précontrainte (shot peening) est un procédé d'écrouissage à froid basé sur un grenailage à haute vitesse (10-100 m/s) de grenailage sur la surface de la pièce à traiter. La déformation plastique se produit lorsqu'un tir frappe la surface d'un matériau (figure II.1). Cela crée une contrainte de compression résiduelle. Ces charges ont un effet bénéfique sur l'amélioration de la résistance à la fatigue des pièces traitées [23].

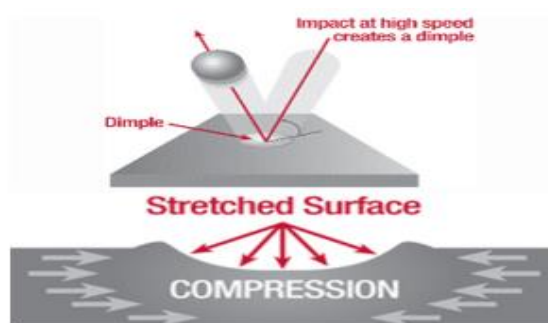


Figure II.1 Génération des contraintes résiduelles de compression.

II.2 Différents types de grenailleuses

Il existe deux types, turbine et machine à air, selon le mode de projection de grenaille. Il existe également des machines à tambour et à table rotative [24].

- **Machine à turbine**

Les machines à turbine transfèrent l'énergie cinétique au flux de grenaille via une roue rotative à grande vitesse (1000-3000 tr/min). La force centrifuge exercée sur la grenaille est suffisante pour durcir le matériau traité. Ces machines sont utilisées pour la démolition à grande série. La régularité du taux de recouvrement entre les pièces n'est pas requise [25].

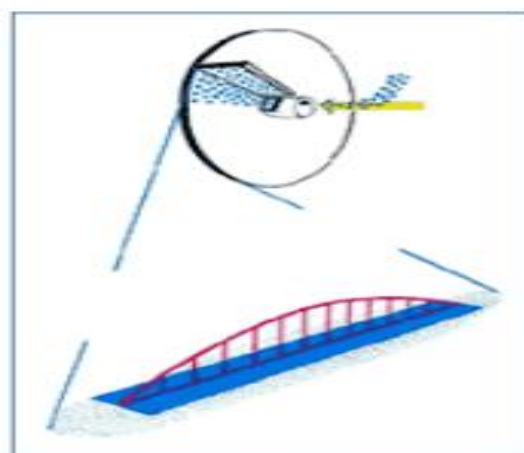


Figure II.2 Illustration d'une turbine de grenailage.

- **Machine à air comprimé**

Dans ce type de machine (figure II.3), les billes sont lancées par de l'air comprimé. Ces machines ont l'avantage de produire un flux de grenaille entièrement localisable et de déterminer avec précision son orientation. Ils sont particulièrement adaptés à l'usinage de pièces présentant des cavités ou des surfaces complexes [25].



Figure II.3 Exemple d'une buse de grenailleuse à air comprimé.

II.3 Paramètres de grenailage

Les principaux paramètres du procédé de grenailage sont:[25]

- Le jet de grenailles.
- Le taux de recouvrement.
- Les conditions d'impact.

II.3.1 Jet de grenailles

II.3.1.1 Nature et dimensions des grenailles

La sélection de la grenaille est déterminée par des critères technologiques et économiques. Généralement, la bille est au moins plus dure que le matériau traité. La dureté est un facteur important dans l'efficacité du grenailage. Le diamètre de la bille est choisi en fonction de la géométrie de la pièce à traiter et de la profondeur de la couche à écrouir. Selon la nature des grenailles, on peut les classer en trois familles: [26]

- Grenaille d'acier.
- Grenaille en céramique.
- Grenaille de verre.

Ces trois familles se différencient par leurs propriétés mécaniques, leur masse volumique et leur dureté (tab.II.1)[27].

Tableau II.1 Caractéristiques mécaniques des billes de grenailage.

Nature de la bille	Masse volumique (g/ cm ³)	Module de Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Dureté Vickers (daN /mm ²)
Acier	7.5	210 000	0.23	470-540
Céramique	3.8	80 000	0.20	800-10
Verre	2.5	65 000	0.23	500-53

II.3.1.2 Qualité des billes

Il y a en général des billes acceptables ou inacceptables (figure II.4). Les abrasifs doivent généralement être de forme sphérique. Si le faisceau se brise à cause d'un impact, les débris doivent être enlevés pour éviter d'endommager la surface de la pièce. Le diamètre des billes doit être uniforme. L'énergie d'impact transmise par un milieu est en fonction de sa masse et de sa vitesse. Plus la bille est grosse, plus la masse et l'énergie d'impact sont importantes [28].

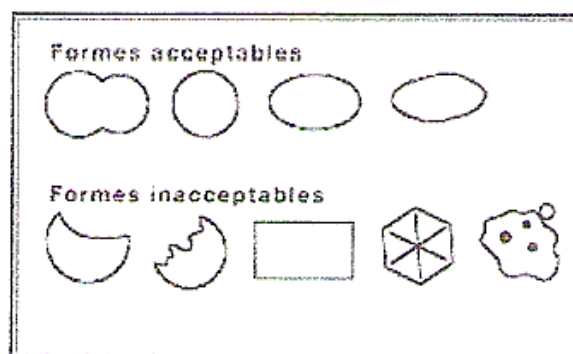


Figure II.4 formes des billes.

II.3.1.3 Vitesse de projection des billes

La vitesse et la masse volumique de la bille déterminent l'énergie cinétique de celle-ci. Ce qui en fait un paramètre primordial. Elle est généralement comprise entre 20 et 100 m/s pour les grenailleuses traditionnelles. Elle augmente la zone affectée par le traitement et le niveau maximal de contrainte [29].

II.3.1.3.1 Méthode de mesure de la vitesse des billes

Il existe plusieurs moyens de mesure de la vitesse des grenailles avec une précision suffisante dont la méthode de TRAVEL. Le principe de ce système, permet de mesurer la vitesse d'une particule. Quand une particule passe à travers le volume de mesure, elle émet de la lumière. La modulation de cette lumière à travers le filtre spatial est alors mesurée, au moyen d'un photodétecteur. Le système TRAVEL (figure II.5) peut mesurer la vitesse de particules de toutes tailles. Parmi d'autres caractéristiques, la dimension du volume de mesure est adaptée à la taille de la particule [25].

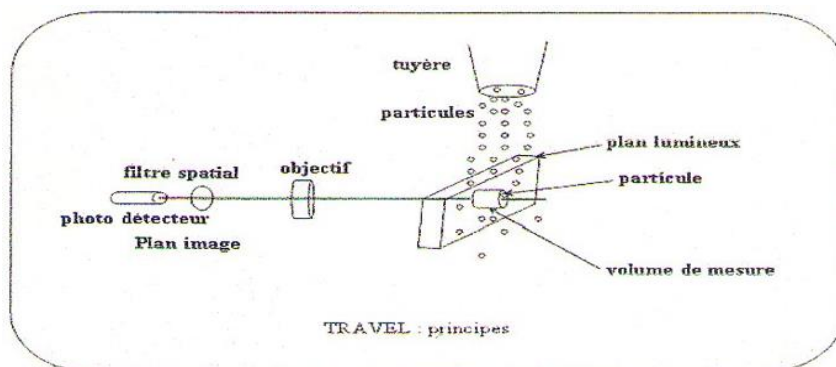


Figure II.5 Principe du système TRAVEL pour la mesure de la vitesse de projection des billes.

II.3.1.4 Angle d'incidence

En général, l'angle d'incidence est de 85° pour éviter le cisaillement de surface, mais ce n'est pas toujours bénéfique en service, car il peut varier entre 30° et 90° selon la géométrie de la pièce en cours de traitement [30].

II.3.2 Taux de recouvrement

Le taux de recouvrement est le rapport entre la surface des impacts et la surface à grenailier, Il est défini en pourcentage (R%) [31].

$$R\% = \frac{\text{surface des impacts}}{\text{surface à grenailier}}$$

Si la surface de la pièce est complètement grenillée, on dit qu'elle a un taux de 100 %, mais en réalité elle ne peut pas vérifier un recouvrement de 100 %. En revanche, on admet que le recouvrement de 100% est atteint lorsque le rapport (R%) est en voisinage de 98% [32].

II.3.3 Les conditions d'impact

Les conditions d'impact bille/surface sont déterminées par de nombreux facteurs inhérents au jet de grenailles et la pièce traitée, on peut noter [23]:

- L'état de surface de la pièce à grenailier qui évolue au cours du traitement.
- L'état mécanique de la surface conditionne sa réponse aux chocs.
- La forme des grenailles.
- Le rapport de dureté entre le matériau de la bille et de la surface traitée.
- L'environnement du contact (température, humidité, propreté, etc.).

II.4 Intensité Almen

La répétabilité des procédés de mise en compression se contrôle à l'aide d'éprouvettes Almen et universellement adopté (Norme AFNOR NFL 06-832. Présentée à la figure II.6). On utilise une éprouvette en acier au carbone du type XC65 trempée et revenue, bridée sur un support et exposée à un

jet de grenaille, au voisinage immédiat des pièces à grenailer. Lorsque l'éprouvette est libérée de ses brides, elle se déforme car la face grenillée est allongée. On observe alors une flèche caractéristique appelée flèche d'Almen (figure II.6). Les normes définissent trois types d'éprouvettes N, A, C [33].

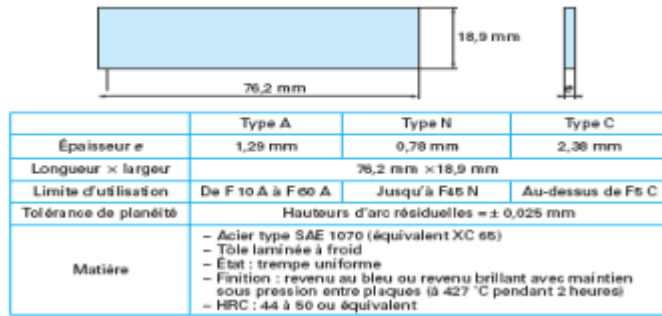


Figure II.6 Norme de l'éprouvette d'Almen.

Cependant, l'intensité du traitement combinée au temps de saturation est déterminée à l'aide d'une courbe de saturation (figure II.7). Il est important de noter que les mêmes flèches Almen sont obtenues dans des conditions de traitements différentes. Les paramètres les plus influents sont la vitesse d'impact, les matériaux utilisés (pièce et grenaille), la taille des particules éjectées et la contrainte résiduelle induite [34].

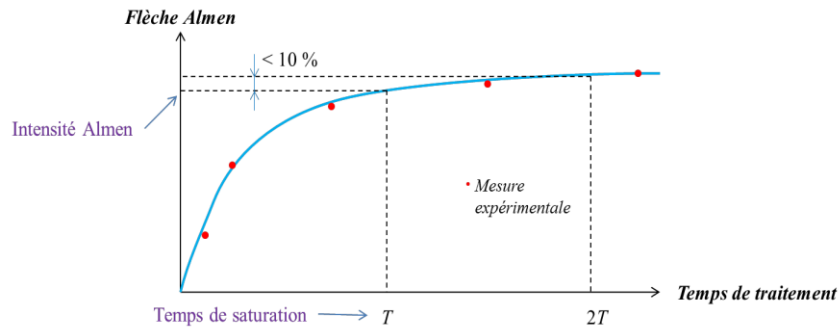


Figure II.7 Détermination du temps de saturation et de l'intensité Almen associée.

II.5 Modélisation du choc

L'impact entre une bille et un massif semi-infini est considéré comme un cas particulier de la théorie hertz. Une empreinte est faite sur le massif sous la forme d'une calotte sphérique (figure II.8) [35].

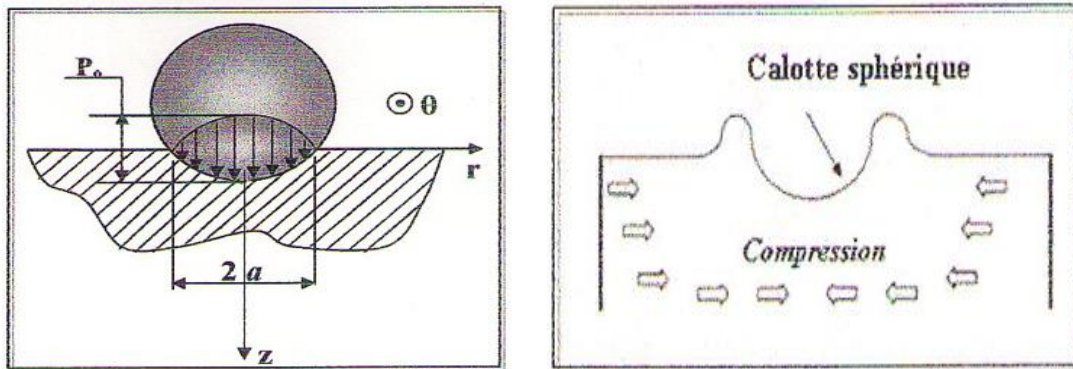


Figure II.8 Schéma du contact bille-massif semi infini.

Le choc élastique du type Hertz est énergétiquement équivalent au choc élasto-plastique. L'énergie de déformation W_{el} générée par l'indentation est donnée par[36]:

$$W_{el} = \frac{P_m \cdot \pi \cdot a^4}{2D} \quad (1)$$

$$P_m = \frac{F}{\pi \cdot a^2} \quad (2)$$

$$F = \frac{4 \cdot E \cdot \sqrt{D}}{3\sqrt{2}} \cdot \delta^{(3/2)} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{a^2}{D} \quad (4)$$

a : Rayon d'empreinte.

D : Diamètre de la bille.

P_m : Pression moyenne.

F : Résultante des efforts de pression de la bille sur la surface.

δ : Profondeur de la pénétration de la bille.

E : Module d'élasticité commun des matériaux de la bille et du massif semi infini, il est défini par :

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (5)$$

Avec :

E_1, ν_1 :Module de Young et coefficient de poisson du matériau de la bille.

E_2, ν_2 :Module de Young et coefficient de poisson du matériau du massif.

On suppose que l'énergie incidente (énergie cinétique) W de la bille à l'impact se divise en deux quantités d'énergie : l'énergie de déformation élasto-plastique W_{ep} à l'intérieur du matériau et l'énergie non négligeable W_d dissipée sous forme de chaleur, vibrations etc...

$$W = W_{ep} + W_d \quad (6)$$

Rendement de choc k est le rapport entre l'énergie de déformation élasto-plastique W_{ep} et l'énergie totale, Il est défini en pourcentage ($k\%$) à 80% [37] :

$$k = \frac{W_{ep}}{W} = 0.8 \quad (7)$$

Avec :

$$W_{ep} = \frac{k \cdot \pi \cdot \rho_m \cdot V^2 \cdot D^3}{12} \quad (8)$$

Selon les relations précédemment évoquées, le rayon d'impact a et la pression maximale sont fonction des paramètres du grenailage.

$$a = D. \left(\frac{k. \pi. \rho_m. V^2. \sqrt{2}}{8. E} \right)^{1/5} \quad (9)$$

$$P_0 = \left(\frac{k. \rho_m. E^2. V^2}{\pi^4} \right)^{1/5} \quad (10)$$

II.6 Champ de Hertz

Le tenseur des contraintes élastiques dû à la distribution de pression de Hertz est donné sous la forme [38]:

$$\overline{\sigma^h} = \begin{pmatrix} \sigma_{rr}^h(z) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta\theta}^h(z) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz}^h(z) \end{pmatrix} \quad (11)$$

Avec :

$$\begin{cases} \sigma_{rr}^h(z) = \sigma_{\theta\theta}^h(z) = P_0(1 + \nu). \left(\frac{z}{a} \cdot \operatorname{arccot} g \frac{z}{a} - 1 \right) + \frac{P_0 \cdot a^2}{2 \cdot (a^2 + z^2)} \\ \sigma_{zz}^h(z) = - \frac{P_0 \cdot a^2}{(a^2 + z^2)} \end{cases} \quad (12)$$

II.7 Champ des contraintes résiduelles, des déformations plastiques et des variables transformées :

Les contraintes résiduelles introduites par grenailage sont indépendantes des coordonnées (r, θ) et restent constantes dans tout plan parallèle à la surface du matériau traité. La contrainte résiduelle doit satisfaire les équations d'équilibre et les conditions aux limites.

Les contraintes résiduelles se réduisent comme suit [25]:

$$\begin{cases} \frac{R_{rr} - R_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial R_{rz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial R_{\theta z}}{\partial z} = 0 \\ \frac{R_{rz}}{z} - \frac{\partial R_{zz}}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Après les conditions aux limites, le champ des contraintes résiduelles prend la forme comme suit :

$$\overline{\bar{R}} = \begin{pmatrix} R(z) & 0 & 0 \\ 0 & R(z) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

II.8 Contraintes résiduelles [22]

Les contraintes résiduelles de compression, générées en surface de la pièce grenailée, jouent un rôle bénéfique sur les caractéristiques mécaniques et la durée de vie en fatigue du matériau traité. Elles permettent également de lutter contre les phénomènes de corrosion sous contraintes. Lors d'un impact, une zone de plastification (déformations plastiques irréversibles) est générée dans la pièce, sous le lieu d'impact (Figure II.9). La répétition de ces impacts sur la pièce cause une élévation de celle-ci en

surface ; la mettant ainsi en traction. Afin de maintenir un état d'équilibre, le matériau de la pièce se comprime près de la surface, générant ainsi des contraintes résiduelles de compression. Plus en profondeur, le matériau s'étire, ce qui génère des contraintes résiduelles de traction.

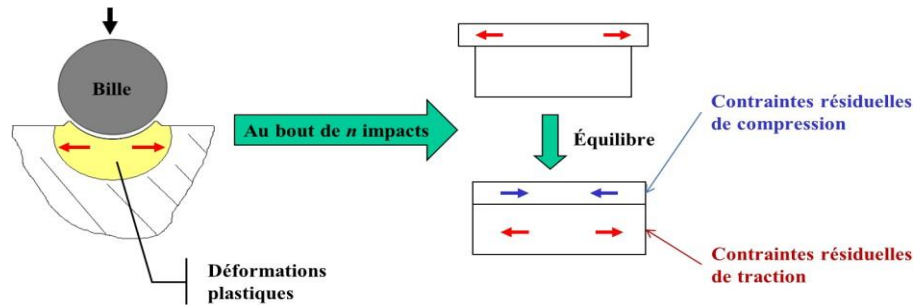


Figure (II.9) : Génération de contraintes résiduelles de compression par impact.[22]

Le profil typique des contraintes résiduelles associées aux procédés de mise en compression est schématisé dans la Figure (II.10). Il est caractérisé par une contrainte de compression surfacique, une contrainte de compression maximale en subsurface, une profondeur maximale en compression et une contrainte de traction maximale. Ces cinq grandeurs physiques sont-elles influencées par des paramètres procédé, tels que la taille et le matériau de grenaille, les vitesses et les angles d'impacts associées, ainsi que les caractéristiques matériaux de la pièce traitée.

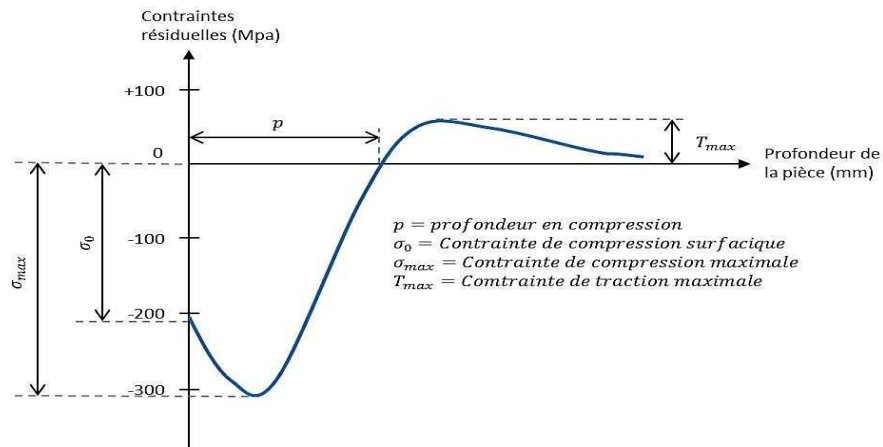


Figure (II.10) : Profile des contraintes résiduelles généralement obtenu en grenaille de précontraintes dans le matériau grenailé.[22]

II.8 Modèles numériques de grenailage

Ces dernières années, des études de grenailage ont été menées afin de mieux contrôler l'influence des multiples paramètres régissant ce traitement de surface. De nombreux laboratoires de recherche entreprennent et développent des projets de modélisation de procédés par élément finis. Dans cette section, nous résumons certains des travaux effectués jusqu'à présent sur la modélisation par élément finis du grenailage.

II.8.1 Modélisation de Majzoobi et al

Les auteurs ont proposé des modèles d'impact à une seule bille et à plusieurs balles dans une étude publiée en 2005. Ils insistent sur l'importance d'utiliser la loi de comportement en ce qui concerne les paramètres dynamiques d'érouissage, ils utilisent donc la loi de comportement de Johnson-Cook dans leur modélisation et interpolent les valeurs des paramètres dérivés expérimentalement. Dans un premier temps, ils ont simulé un seul impact de bille en faisant varier les paramètres de grenailage (Figure II.11) afin de pouvoir valider leur modèle. Pour ce faire, ils ont comparé les courbes de déformation obtenues par simulation avec celles mesurées par des essais d'impact mono-bille. Par conséquent, ils ont trouvé des résultats très proches entre les simulations et les expériences, attribuant les quelques petites différences à des erreurs de mesure ou même à des approximations numériques [39].

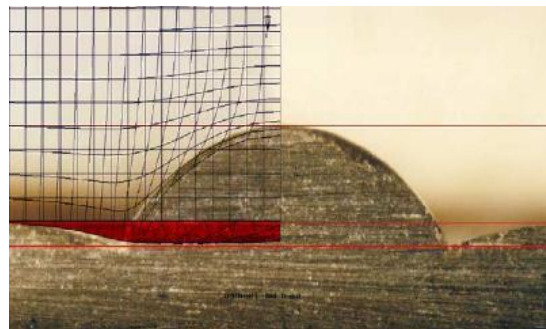


Figure II.11 Maillage du massif pour un Impact mono bille.

Modèle précédemment validé pour simuler l'impact de 4 à 25 billes, affectant ainsi l'effet de la modification de la vitesse d'impact, et ils en ont déduit que l'augmentation de la vitesse d'impact améliore la répartition des contraintes résiduelles jusqu'à un certain point. Il convient de noter la finesse du maillage près de la zone martelée (Figure II.12).

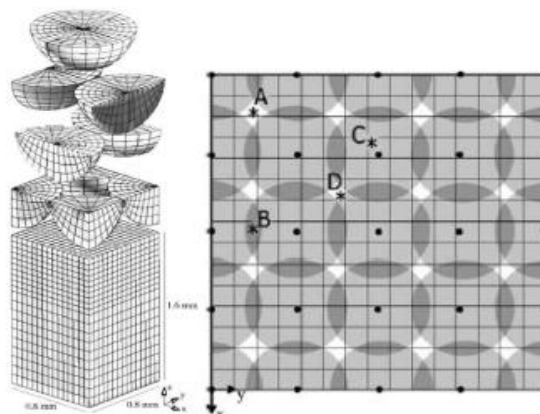


Figure II.12 Maillage du massif et ordre des billes.

II.8.2 Modélisation de Meguid et al

Meguid et al ont réalisé une étude impliquant une analyse dynamique par éléments finis élasto-plastiques du processus de grenailage à l'aide d'un modèle d'impact multi-billes quasi réalistes de matériaux sensibles à la vitesse. Le modèle a été utilisé pour prédire la résistance aux chocs ainsi que l'effet de la couverture sur le champ de contraintes résiduelles et développement de zones plastiques induites mécaniquement dans différentes classes de matériaux. La simulation conçue et réalisée sous le logiciel LS-DYNA comporte un grand nombre de billes identiques dont la distribution est représentée sur la (Figure II.13) [40].

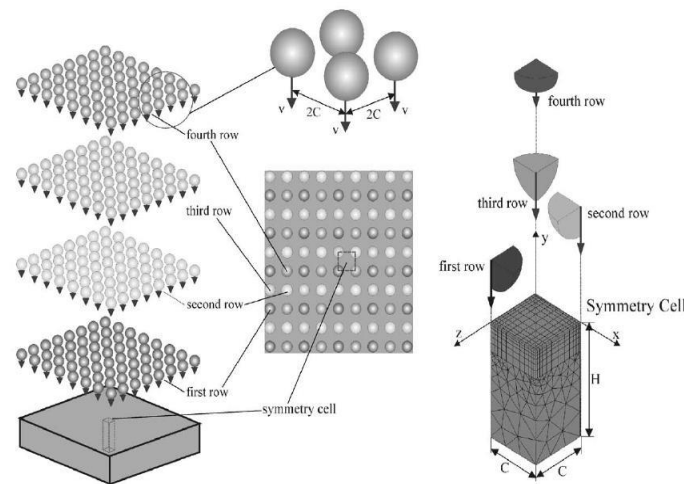


Figure II.13 Modèle éléments finis d'un impact multi billes.

Dans cette étude, les auteurs ont montré que l'impact multi-billes multiples entraînaient une distribution plus uniforme des contraintes résiduelles que les impacts à billes simples ou doubles. Enfin, cette modélisation permet de faire d'avantage allusion à l'influence de la distance entre les billes. À partir de là, plus la distance entre les axes d'impact des billes est petite, plus les déformations et les contraintes résiduelles sont réparties de manière homogène.

Par conséquent, cette simulation permet de tirer des conclusions sur les effets bénéfiques d'un meilleur taux de recouvrement dans le cas d'un traitement par grenailage de précontrainte.

II.8.3 Modélisation de Frija et al

Ces auteurs ont modélisé l'impact d'une bille rigide sur un massif solide supposée infini (Figure II.14). Ils se sont principalement intéressés à la détermination de l'endommagement après le traitement (Figure II.15) en introduisant les variables d'endommagement. Ce travail est intéressant car il permet d'optimiser au plus juste les conditions paramétriques de grenailage. Cette modélisation met l'accent sur le fait que l'endommagement de la pièce a lieu en périphérie de la zone de contact. De plus, plus le coefficient de frottement est élevé, plus les dommages sont importants (Figure II.16). Cette modélisation permet donc

de prédire les zones les plus endommagées et de déterminer les paramètres de grenailage appropriés pour éviter des dommages trop importants [41].

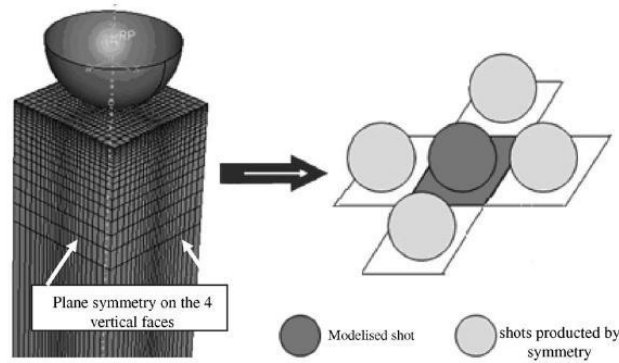


Figure II.14 Modèle élément finis en 3D.

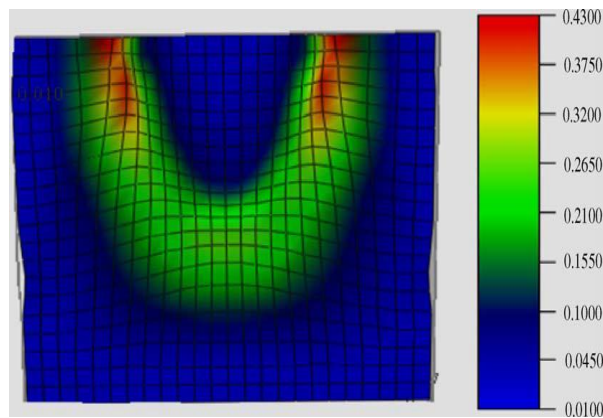


Figure II.15 Endommagement en coupe transversale (avec : $V= 52$ m/s, Taux de couverture 100% et coefficient de friction $\mu= 0.2$).

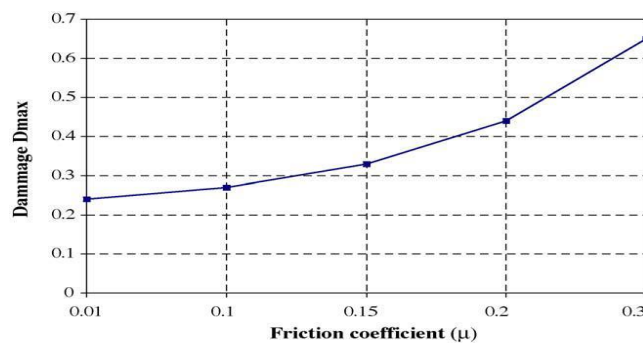


Figure II.16 Evolution de l'endommagement en zone de contact avec le coefficient de frottement(μ).

II.8.4 Modélisation de Hong et al

Les auteurs Hong et al ont publié une étude décrivant une analyse dynamique par éléments finis 3D de l'impact d'une mono bille sur une masse solide considérée comme une pièce métallique. Ils ont utilisé une bille rigide. L'utilisation d'éléments en briques à 8 nœuds a été choisie pour la zone d'impact. Notez que le maillage est construit de telle sorte que sa finesse diminue avec la profondeur et la distance de la zone d'impact (Figure II.17) [42].

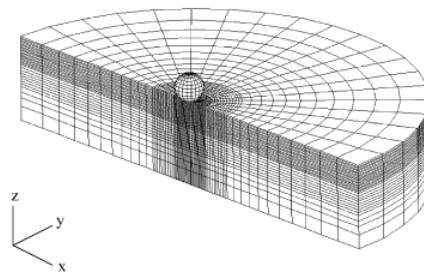


Figure II.17 Modèle éléments finis.

Ensuite ils ont fait une étude paramétrique sur les effets du diamètre de la bille et de la vitesse d'impact, et l'effet de l'angle d'incidence sur le profil de contrainte résiduelle (Figures II.18 et II.19). Les résultats présentés ci-dessous peuvent être considérés comme un ensemble de prédictions de contraintes résiduelles pour les paramètres clés régissant le processus de grenaillage et devraient être utiles pour d'autres études numériques du grenaillage.

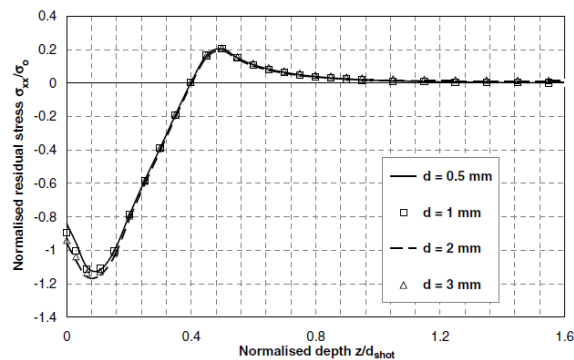


Figure II.18 Influence du diamètre des billes.

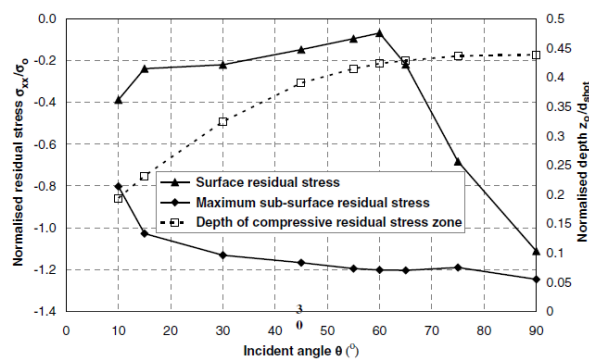


Figure II.19 Influence de l'angle d'incidence.

II.8.5 Modélisation de Renaud

Les auteurs ont étudié l'influence de divers paramètres liés au procédé (vitesse, angle d'incidence, géométrie), des paramètres numériques (type d'élément, finesse du maillage) sur les contraintes résiduelles et les profils de déformation plastique équivalents. En revanche, dans le cas d'un impact à multi-billes, l'effet du nombre de billes sur l'évolution des contraintes résiduelles en profondeur, ainsi que l'uniformité des profils des contraintes et des déformations plastiques obtenus dans la zone de

contact, est analysé. Le modèle 3D simule l'impact d'une ou plusieurs billes (jusqu'à 28 billes) sur un massif parallélépipédique. Le comportement des matériaux de la bille et du massif est supposé élasto-plastique, indépendant du temps (Figure II.20) [43].

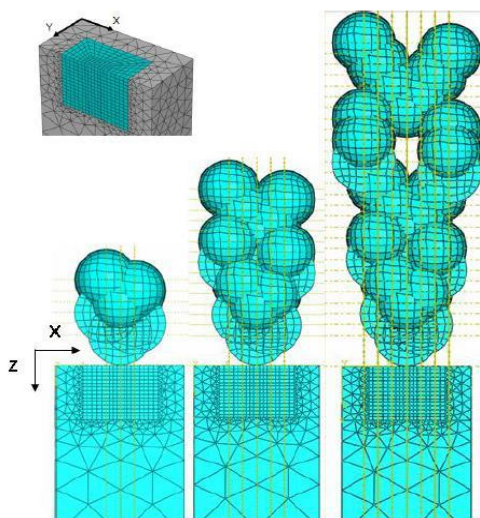


Figure II.20 Modèle multi-billes (6, 15, 28 billes). Symétrie par rapport au pal (XZ).

L'enchaînement des impacts est assuré en plaçant les billes à une certaine distance avant d'impacter le massif (Figure II.21). Le massif est maillé de manière réglée au niveau de la zone d'impact (éléments linéaires hexaédriques) et libre dans le reste du massif (éléments linéaires tétraédriques).

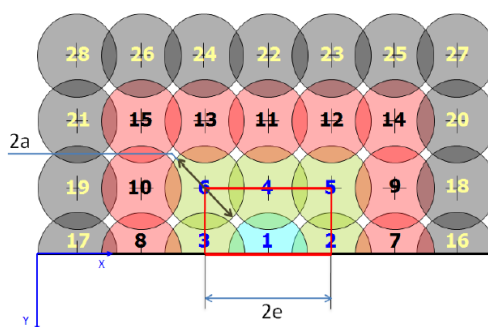


Figure II.21 Représentation de l'ordre des impacts de billes.

Ils ont constaté qu'une comparaison des profils de contrainte résiduelle d'impact et de déformation plastique pour 1, 6, 15 et 28 billes montre que le niveau de contrainte maximal atteint et la zone affectée par le traitement diminuent avec le nombre de billes autour de l'impact central. Comme on peut le voir sur (la figure II.22), les contraintes sont réparties plus uniformément à une profondeur donnée pour un plus grand nombre d'impact. Dans ce cas on voit que le profil est le même pour 15 et 28 balles ; ce qui montrerait que les contraintes se sont déjà installées sur les 15 billes incidentes autour de la bille centrale. Il a également pu constater que le niveau de contrainte maximal est atteint à la même profondeur quel que soit l'angle d'incidence (figure II.23) [43].

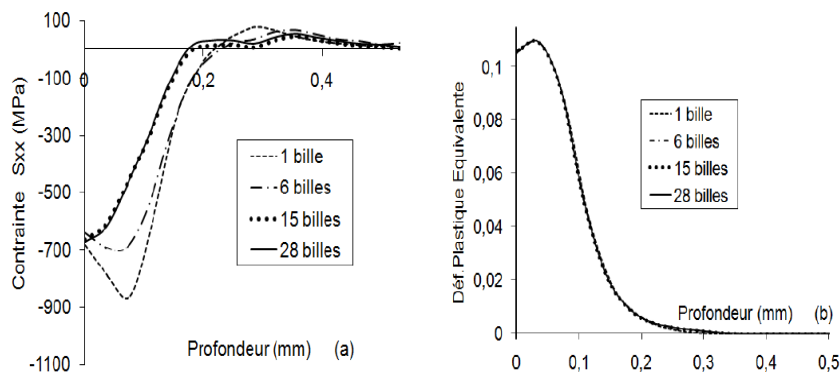


Figure II.22 Evolution des paramètres de grenailage : a) des contraintes en fonction du nombre de billes b) des déformations plastiques en fonction du nombre de billes.

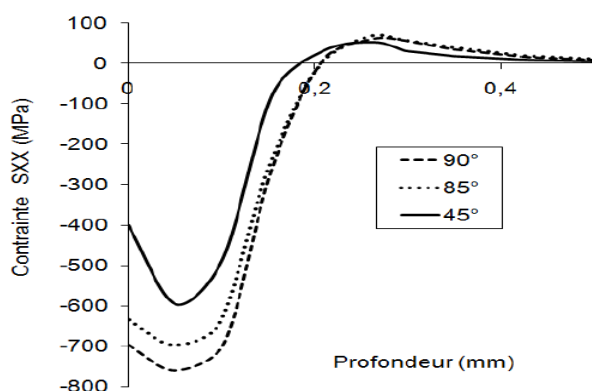


Figure II.23 Etude d'influence de l'angle d'impact.

II.8.6 Modélisation de Guagliano

Les travaux de Guagliano ont contribué au sujet du grenailage tant au niveau expérimental qu'au niveau numérique. Il a créé un modèle numérique par éléments finis des impacts multi-billes en réalisant une étude paramétrique pour voir l'effet des principaux facteurs sur le processus. Il a pu relier l'intensité d'Almen à la contrainte résiduelle sur un massif métallique (Figure II.24) [44].

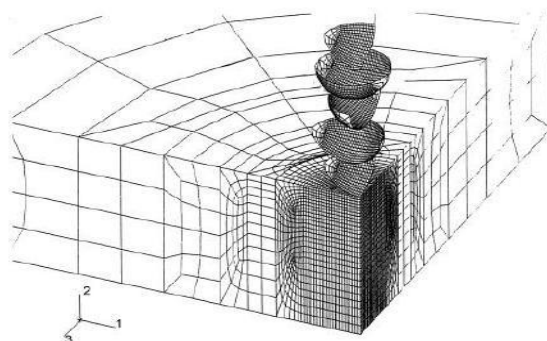


Figure II.24 Modèle éléments finis pour la simulation.

Pour vérifier son modèle, il a analysé expérimentalement les contraintes résiduelles à l'aide de la méthode $\sin 2\psi$ en diffraction des rayons X et les a comparées aux valeurs données par simulation. Ses

résultats ont montré une bonne concordance des contraintes résiduelles de simulation avec celle expérimentale jusqu'à une profondeur de 0,08 mm, ce qui montre la différence enregistrée entre les contraintes de compression (Figure II.25).[44]

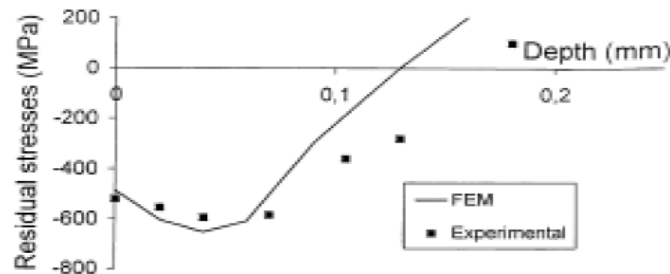


Figure II.25 Contraintes résiduelles obtenues pour une intensité F 30A et une bille de diamètre 0.3mm.

Il étudie l'effet de la vitesse d'impact mais aussi du diamètre de la bille sur la répartition des contraintes résiduelles (Figure II.26).

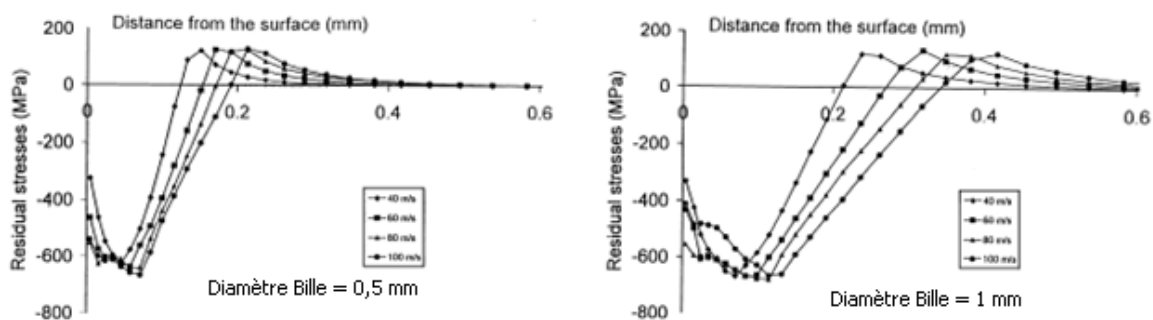


Figure II.26 Profils de contraintes résiduelles pour différentes vitesses et des billes de diamètres 0,5 mm et 1 mm.

Il a effectué des régressions polynomiales de ses courbes (Figure II.27) pour pouvoir obtenir des équations liant l'intensité d'Almen à la vitesse de projection, pour différents diamètres de bille.

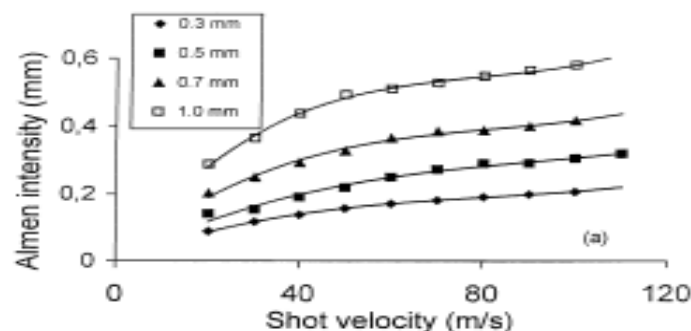


Figure II.27 Courbes donnant l'intensité Almen en fonction de la vitesse, pour des billes en acier de différentes tailles.

III.1 Introduction

Le grenailage de précontrainte, également connu sous le nom de shot peening, est une méthode de traitement de surface qui utilise la projection de grenailles sphériques à grande vitesse sur la surface des pièces à traiter. Ce procédé provoque des déformations plastiques grâce à l'impact des billes sur la surface du matériau, ce qui entraîne la formation de contraintes résiduelles de compression dans les couches superficielles.

L'objectif principal de ce traitement est de créer des contraintes résiduelles de compression à la surface des pièces. Ces contraintes s'ajoutent aux contraintes de service existants et réduisent les tensions superficielles, ce qui conduit à une amélioration significative de la durée de vie des pièces mécaniques.

Nous avons élaboré une méthodologie de simulation numérique pour modéliser le procédé de grenailage. Cette méthode permet de calculer les distributions des contraintes résiduelles et des déformations plastiques. Pour ce faire, nous avons développé un programme de calcul qui combine les logiciels Matlab et Ansys, en utilisant le mode Ansys/ls-dyna.

Ce chapitre est composé en deux parties distinctes. La première partie de la simulation numérique se consacre pour l'impact mono-bille et l'étude de chaque paramètre de grenailage sur le profil des contraintes résiduelles et des déformations plastiques. La deuxième partie de l'étude est similaire à la première, mais avec une petite différence : elle examine la simulation numérique du grenailage à impact multi-billes.

III.2. Premier cas (uni-impact)

III.2.1 Mises en données

Le modèle numérique proposé simule l'impact d'une bille sur un massif représenté par solide (cellule).

Dans cette étape, nous considérons une cellule parallélépipède (massif) dimensionnée et partitionnée (sous forme de blocs) de manière à respecter la condition de maillage de telle sorte d'avoir un maillage fin dans la zone de contact et grossier ailleurs. Le maillage optimal a pour but de minimiser le temps de calcul et d'obtenir des résultats plus précis.

L'analyse du jet de grenailles est menée sur une cible (cellule parallélépipède) en acier 35NiCrMo16 à haute résistance dont la densité volumique $\rho_m = 7800 \text{ kg/m}^3$ et un module d'élasticité $E_m = 213 \text{ GPa}$.

Le comportement du matériau de la cible est supposé élasto-plastique bilinéaire avec une limite d'élasticité $\sigma_e = 1000 \text{ MPa}$, un taux d'écroutissage $H = 800 \text{ MPa}$ et un coefficient de Poisson $\nu_m = 0.3$. La figure III.1 montre la loi de comportement considérée.

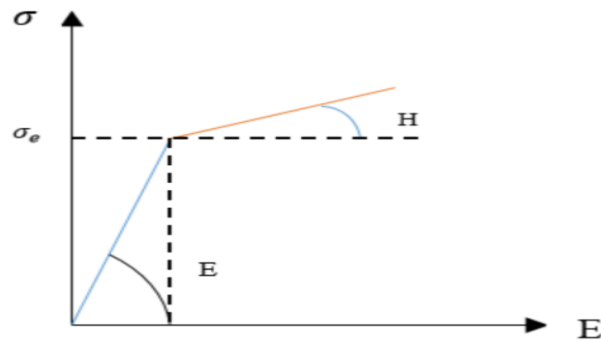


Figure III.1 La loi de comportement du matériau traité.

La bille utilisée est supposée rigide (avec une densité volumique $\rho_b = 7800 \text{ kg/m}^3$, module de Young $E_b = 213 \text{ GPa}$ et un coefficient de Poisson $\nu_m = 0.29$ et est projetée à une vitesse V . Le modèle a été conçu dans le cas d'une grenaille, en acier, de rayon R (figure III.2).

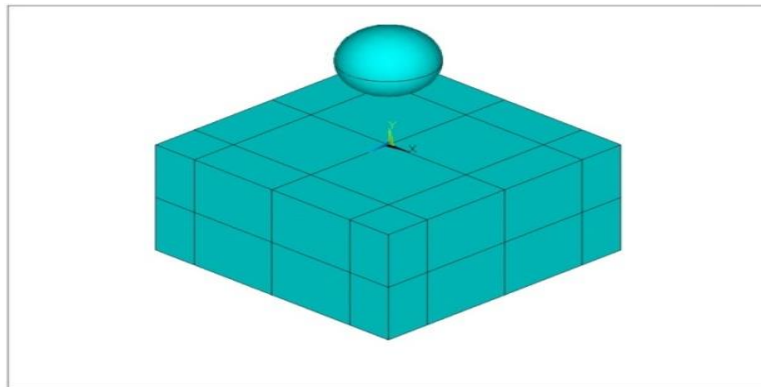


Figure III.2 Principe de simulation du grenailage (uni-impact).

III.2.1.1 Maillage

Le maillage du massif et de la bille est conçu, sous le code ANSYS (LS-DYNA), de manière à obtenir un bon compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul [40], de telle sorte qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un maillage uniforme, ni de mailler avec la même précision au niveau de la zone d'impact et au pied du massif.

La cellule est maillée de façon réglée dans la zone du contact et libre dans tout le reste du massif. La taille de l'élément est de 0.05 mm. Le type d'élément utilisé est le Solid164, tel qu'il est utilisé pour la modélisation 3D des structures solides. Cet élément est uniquement utilisé dans les analyses dynamiques explicites. Pour cet élément, nous pouvons l'utiliser dans le cas des matériaux dont la loi de comportement est comme suit :

- Bilinéaire iso-tropique.
- Bilinéaire cinématique.
- Anis-tropique élastique.

- Orthotopique élastique.
- Isotropique élastique.

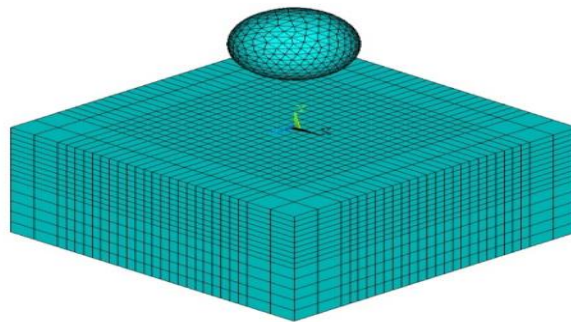


Figure III.3 Maillage de la cellule et de la bille.

III.2.1.2 Optimisation du maillage

Afin d'assurer une meilleure précision de la simulation, nous avons procédé à un raffinement du maillage de la structure. Pour ce faire, il est nécessaire de vérifier la convergence des résultats dans l'optique d'opter pour un maillage optimal. Nous avons opté pour l'élément solide 164 et nous avons fixé une combinaison de paramètres de grenailage telle que [45]: $\sigma_e = 1000 \text{ MPa}$, $V = 40 \text{ m/s}$, $H = 800 \text{ MPa}$, $R = 0.2 \text{ mm}$, $fr = 0.2$, $\rho_b = \rho_m = 7800 \text{ kg/m}^3$, $E_b = E_m = 213 \text{ GPa}$, $\nu_b = 0.29$ et $\nu_m = 0.3$. Par la suite, nous avons cherché la convergence des résultats obtenus par la simulation. Les tests de convergence sont montrés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 Résultats de raffinement du maillage.

Ordre	1	2	3	4	5	6
$\sigma_x \text{ (MPa)}$	671.04	792.15	824.34	863.99	879.37	880.28
Nombre	32749	287981	343666	422019	667202	705775

La figure III.4 illustre la convergence du paramètre.

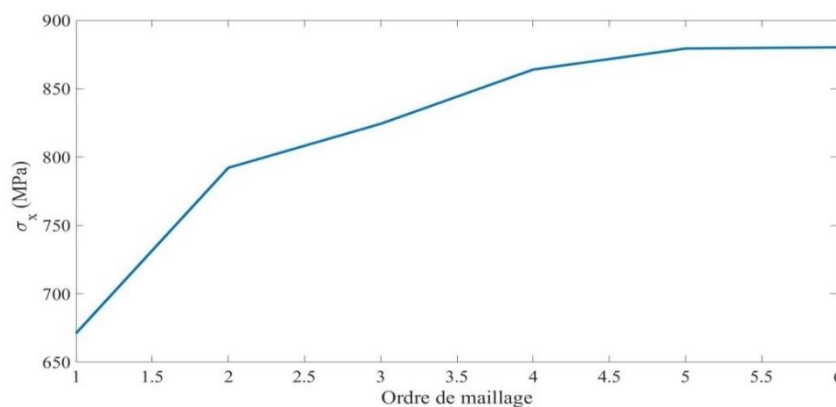


Figure III.4 Recherche de la convergence des résultats.

Pour faire un test de convergence, il suffit de choisir une composante du tenseur de contrainte. Dans notre cas, nous avons choisi la composante σ_x . À cet effet, nous avons considéré un nœud qui ne change pas de position quel que soit le maillage. La figure III.5 montre ce nœud.

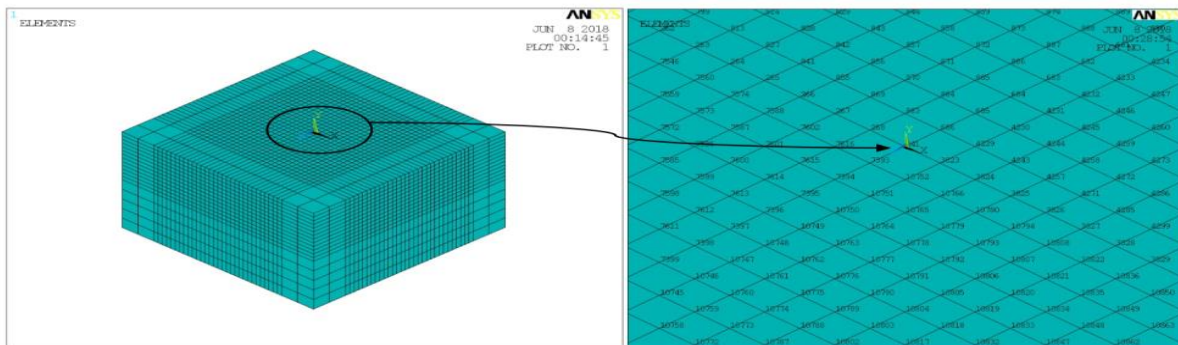


Figure III.5 Nœud considéré pour le test de convergence.

III.2.1.3 Conditions aux limites

Pour la cellule de forme parallélépipédique, il est indispensable d'observer les conditions aux limites suivantes :

- La face supérieure est libre.
- La face inférieure est encastrée.
- Les faces latérales restent planes, par conséquent tous les points appartenant à ces faces ne se déplacent pas suivant les normales respectives à ces faces.

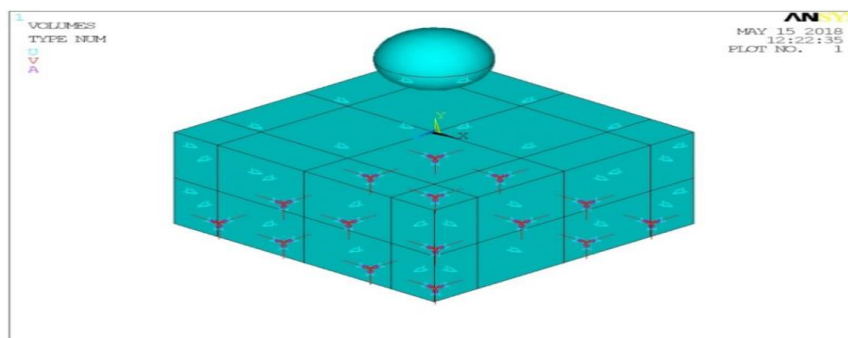


Figure III.6 Les conditions aux limites de la cellule de forme parallélépipédique.

III.2.1.4 Etude l'effet des paramètres de grenailage

Dans cette étude, nous avons fixé les propriétés mécaniques de matériau traité (massif) et nous intéressons aux influences des paramètres de grenailage qui reste, tels que la vitesse, l'angle d'incidence, le rayon, la masse volumique de la bille, module de Young de la bille, le coefficient de poisson de la bille et le coefficient de frottement sur les profils des contraintes résiduelles et les déformations plastiques. Pour chaque paramètre nous avons tracé cinq courbes :

La contrainte résiduelle à la surface σ_{r0} , la contrainte résiduelle maximale σ_R^{\max} , la profondeur δ et le diamètre a de l'empreinte d'indentation.

III.2.1.4.1 Effet de la vitesse d'impact

Nous avons étudié l'influence de la vitesse de la bille. Pour ce faire, nous avons varié la vitesse de 40 m/s à 100 m/s avec un pas de 10 m/s. Les figures III.7.a, III.7.b, III.7.c et III.7.d illustrent le profil des paramètres étudiés en fonction de la vitesse de la bille.

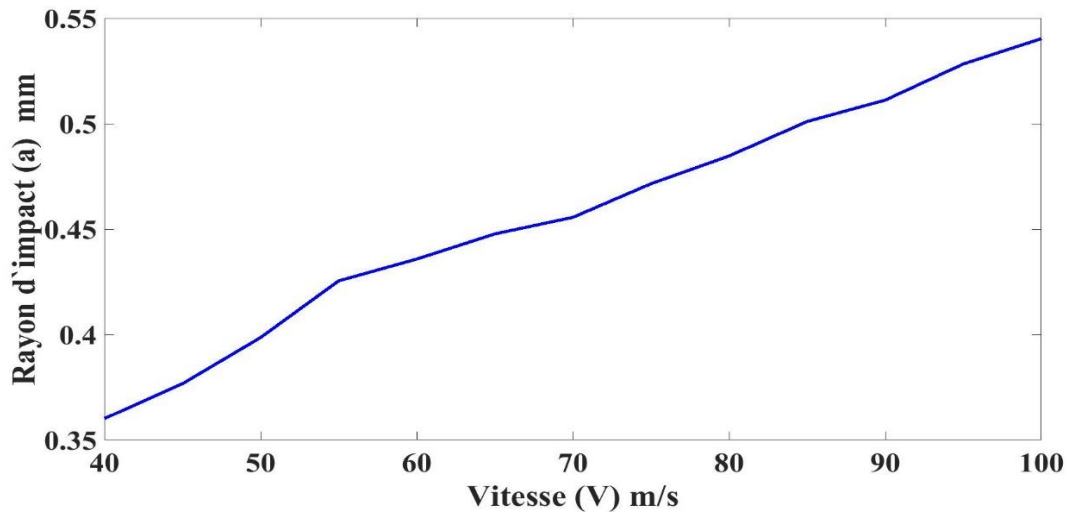


Figure III.7.a Effet de la vitesse sur le rayon de l'empreinte (a).

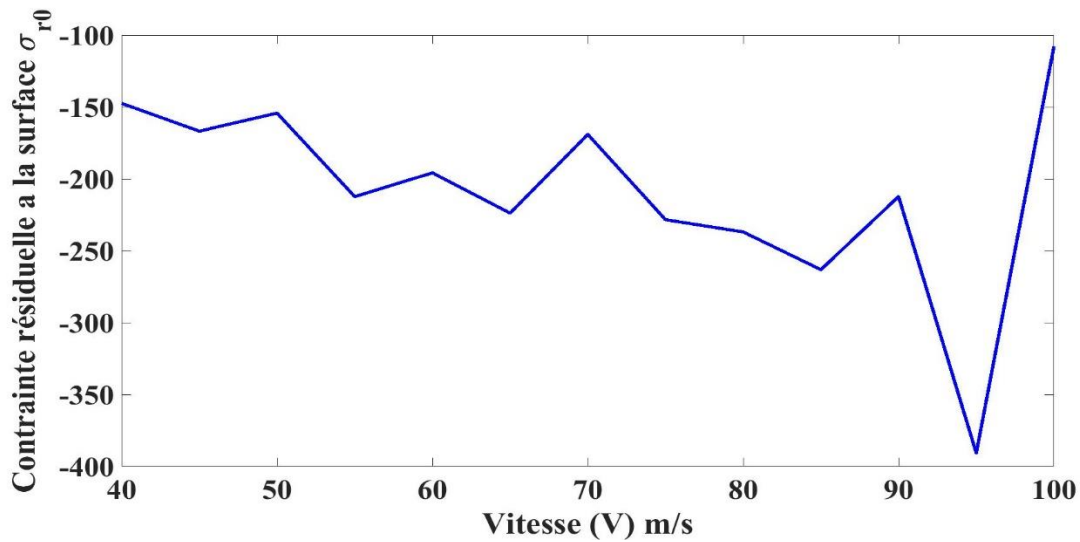
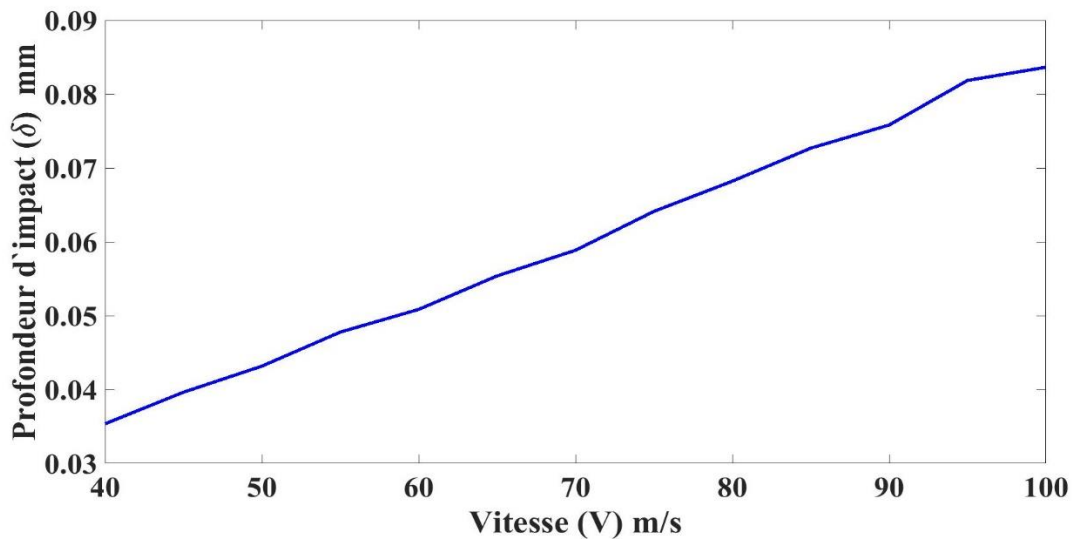
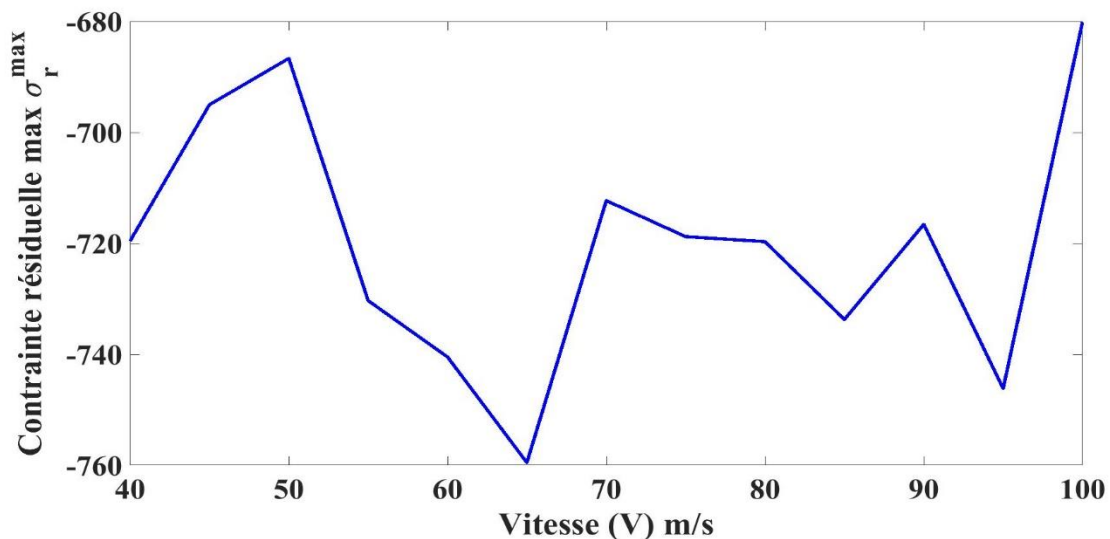


Figure III.7.b Effet de la vitesse sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{r0}).

Figure III.7.c Effet de la vitesse de la bille sur la profondeur de l'empreinte (δ).Figure III.7.d Effet de la vitesse sur la contrainte résiduelle max (σ_R^{\max}).

Nous avons constaté que le rayon et la profondeur de l'empreinte augmentent avec la croissance de la vitesse. Pour les deux paramètres la contrainte résiduelle à la surface et la contrainte résiduelle maximale, nous avons constatés une fluctuation de deux paramètres en fonction de la croissance de la vitesse.

III.2.1.4.2 Effet de la taille de la bille

Nous avons également étudié l'influence de la taille de la bille. Pour ce faire, nous avons varié la taille de rayon de la bille de 0.1 mm à 1 mm avec un pas de 0.1 mm. Les figures III.8.a, III.8.b, III.8.c et III.8.d illustrent le profil des paramètres étudiés en fonction de la taille de la bille.

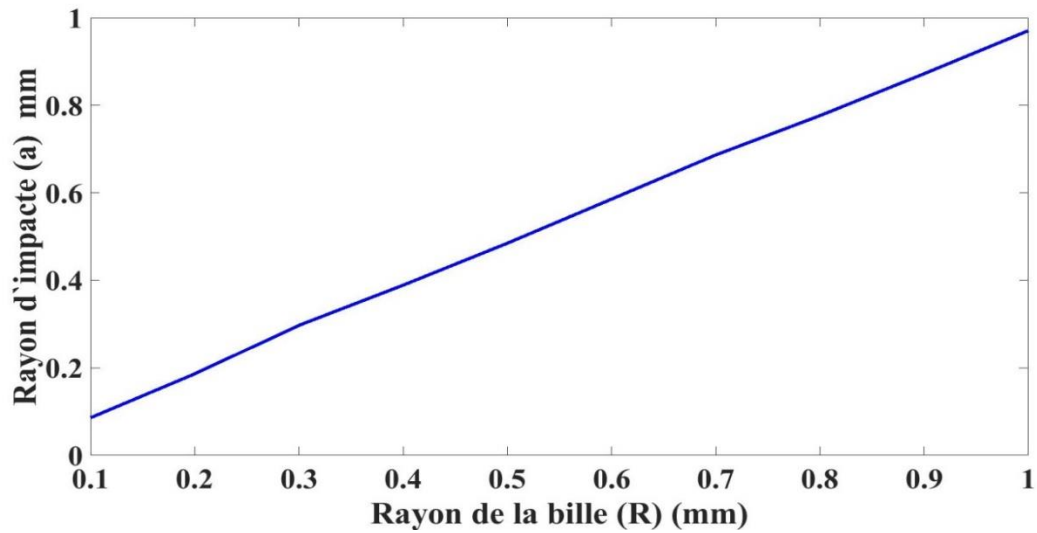
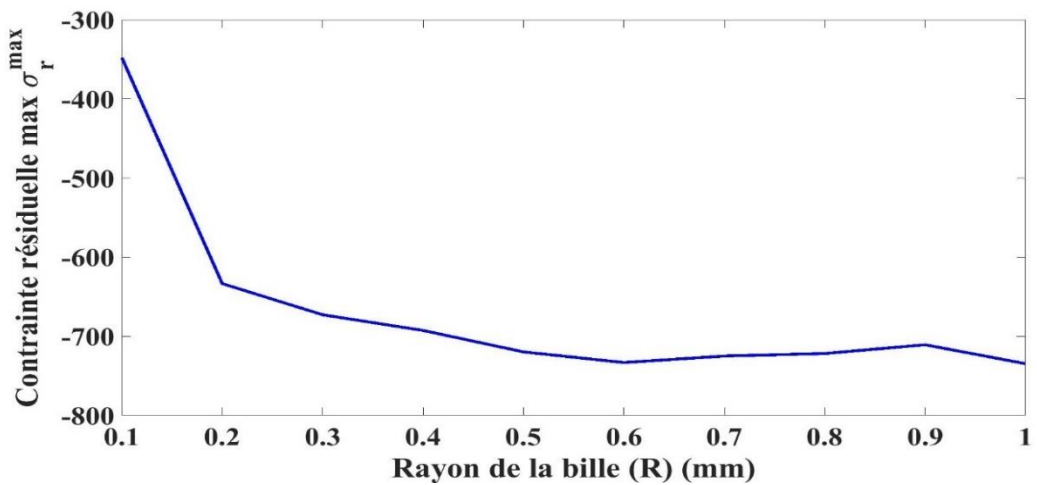
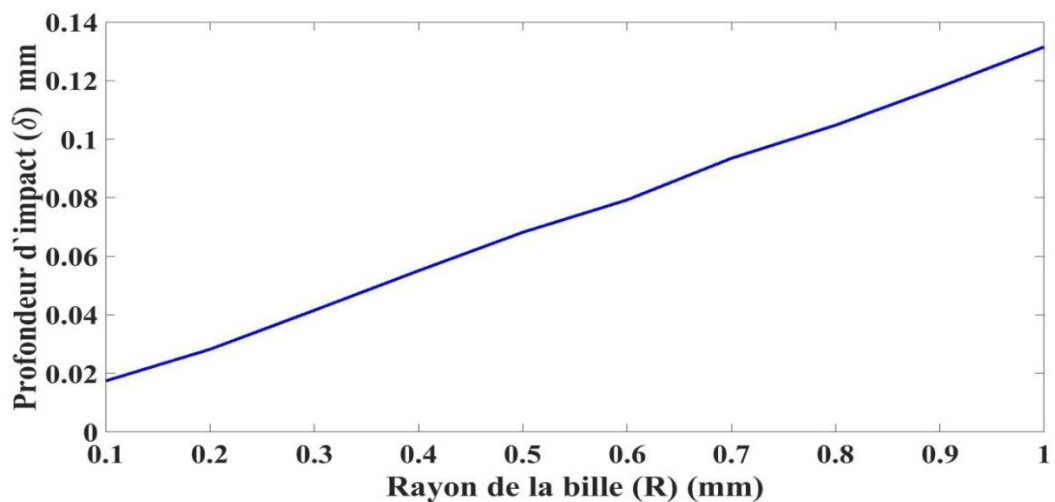


Figure III.8.a Effet de la taille de la bille sur le rayon de l'empreinte (a).

Figure III.8.b Effet de la taille de la bille sur la contrainte résiduelle max (σ_R^{\max}).Figure III.8.c Effet de la taille de la bille sur la profondeur de l'empreinte (δ).

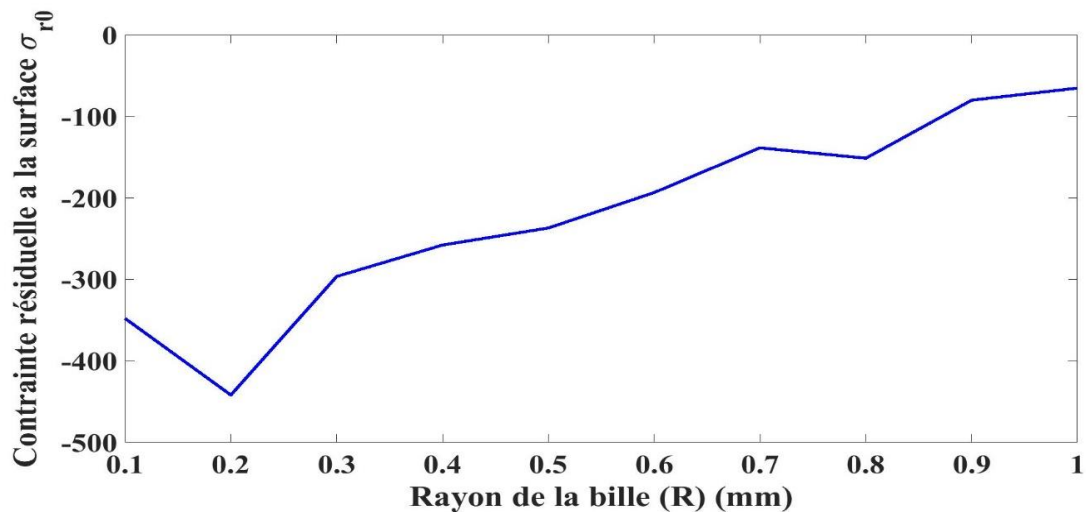


Figure III.8.d Effet de la taille de la bille sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{r0}).

Nous avons constaté la même influence que dans le cas précédent, à savoir que le rayon et la profondeur de l'empreinte augmentent avec une croissance de la taille de la bille. Pour les autres paramètres nous avons une augmentation pour la contrainte résiduelle à la surface et une diminution pour la contrainte résiduelle maximale en fonction de la taille de la bille.

Nous pouvons noter aussi que l'allure de la courbe de l'effet de la taille de la bille sur le rayon d'empreinte est une droite, tandis que l'allure de la courbe de l'effet de la taille de la bille sur la profondeur d'empreinte est presque une droite.

III.2.1.4.3 Effet du coefficient de frottement

Nous avons également étudié l'influence du coefficient de frottement sur les paramètres d'impact. Pour ce faire, nous avons considéré plusieurs coefficients de frottement : de 0.1 à 0.4 avec un pas de 0.05. Le rayon de la bille R est égal à 0.2 mm, les autres paramètres de la simulation sont maintenus constants.

Les figures III.9.a, III.9.b, III.9.c et III.9.d montrent les résultats obtenus par la simulation.

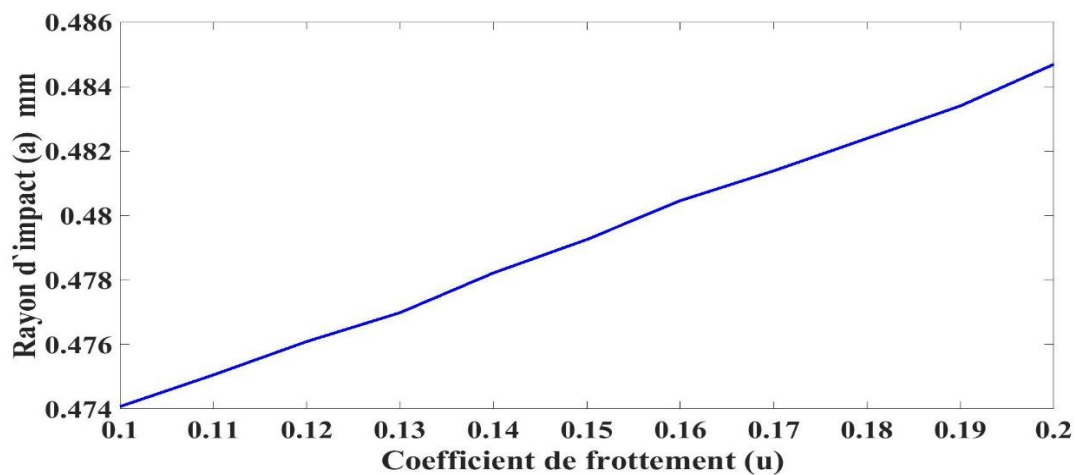
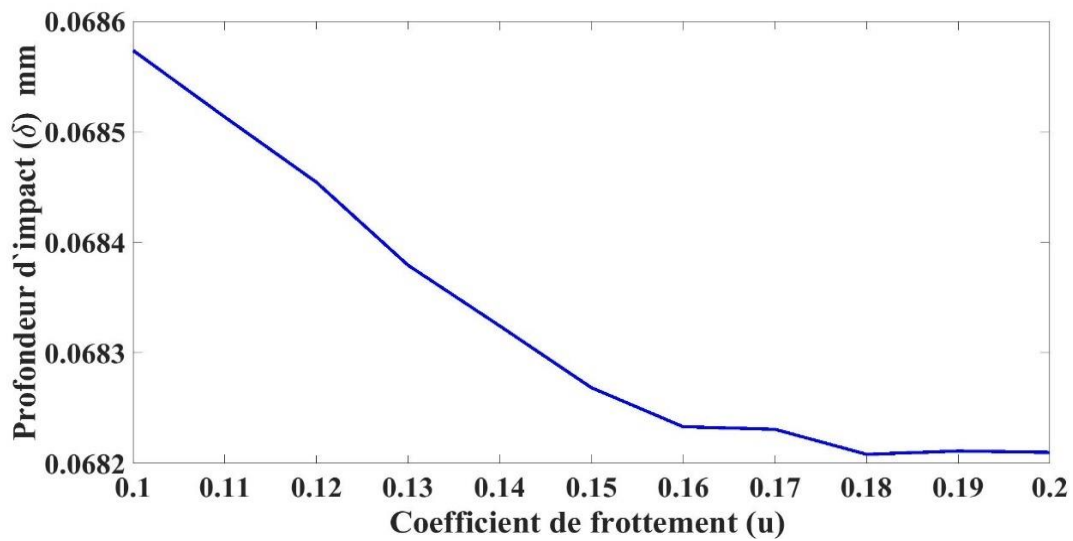
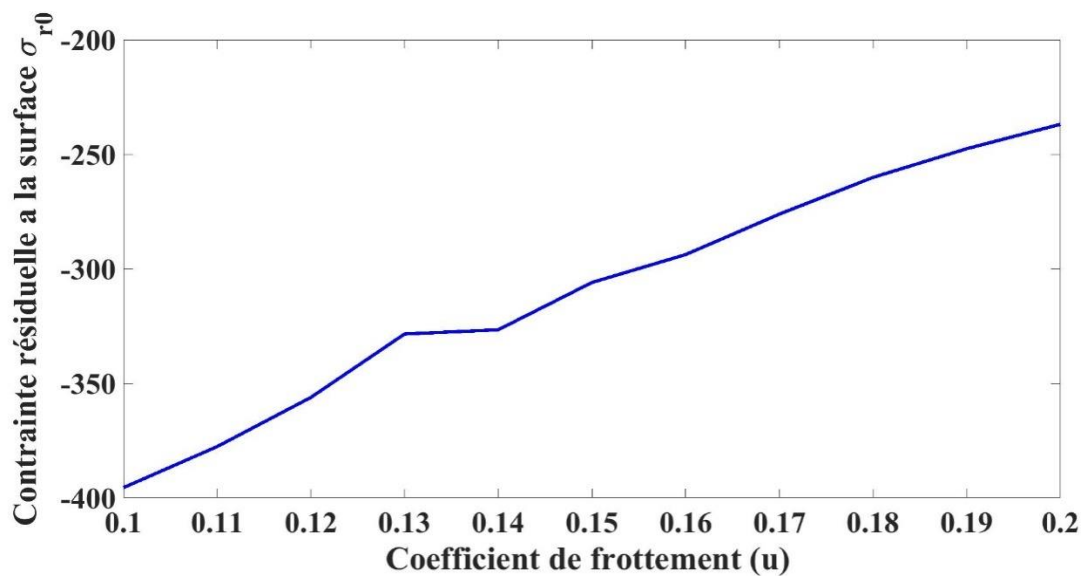


Figure III.9.a Effet du coefficient de frottement (fr) sur le rayon de l'empreinte (a).Figure III.9.b Effet du coefficient de frottement (fr) sur la profondeur de l'empreinte (δ).Figure III.9.c Effet du coefficient de frottement (fr) sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{r0}).

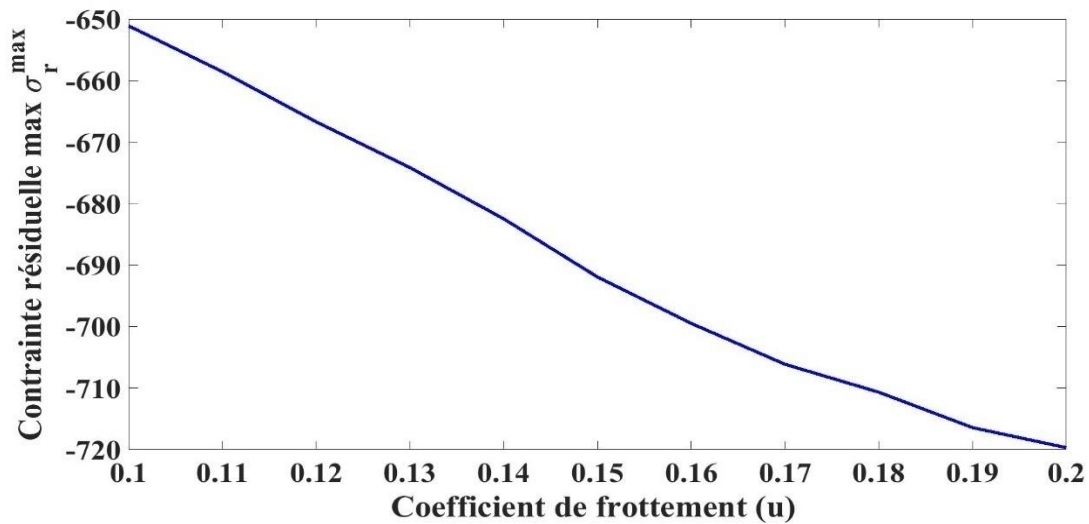


Figure III.9.d Effet du coefficient de frottement (f_r) sur la contrainte résiduelle max (σ_R^{\max}).

L'effet du coefficient de frottement sur le rayon et la profondeur de l'empreinte montre une augmentation de ces deux derniers avec l'augmentation du coefficient de frottement.

III.2.1.4.4 Effet angle d'incidence

L'influence de l'angle de la bille a été également étudiée. Pour ce faire, nous avons varié l'angle d'incidence de la bille de 30° à 90° avec un pas égal 10° . Pour la simulation, nous gardons constant les autres paramètres. Les figures III.10.a, III.10.b, III.10.c et II.10.d montrent les résultats obtenus par la simulation.

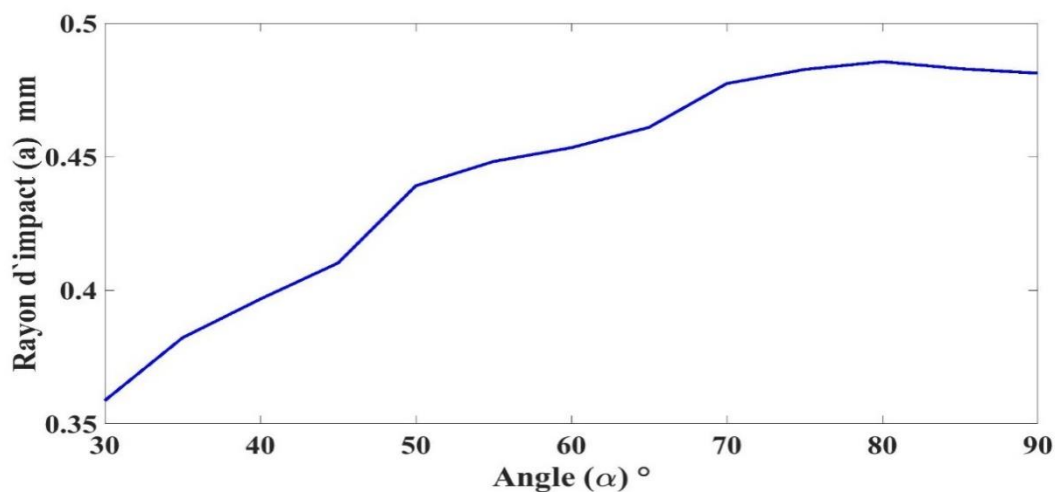
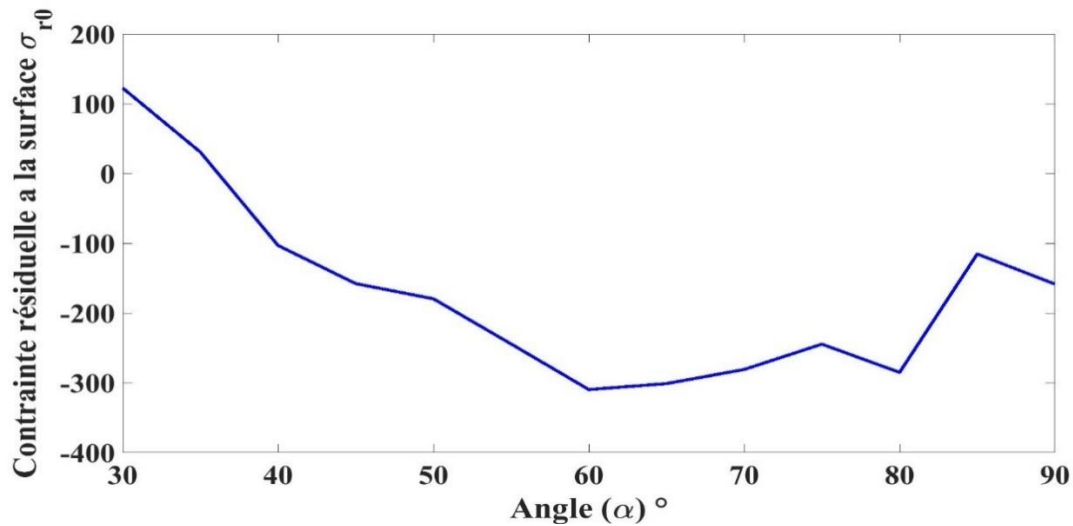
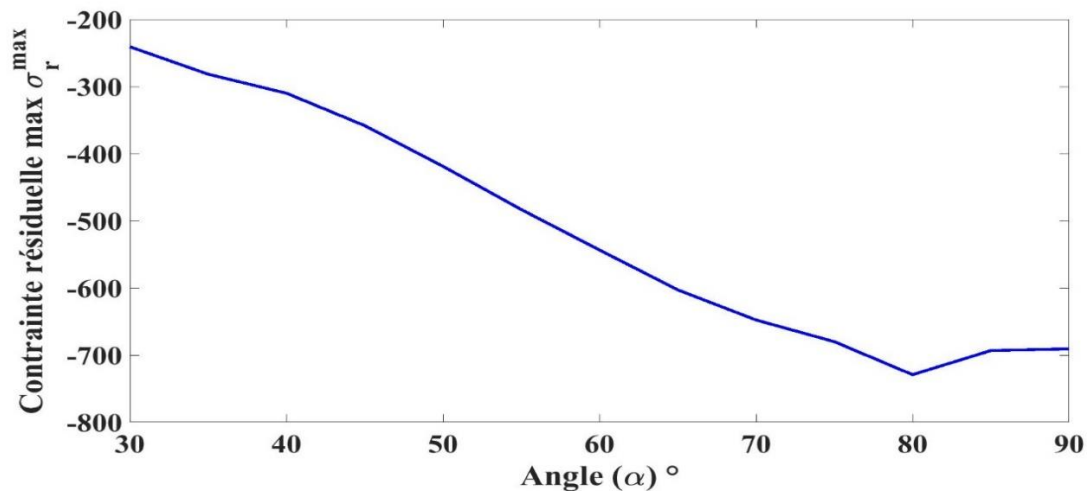
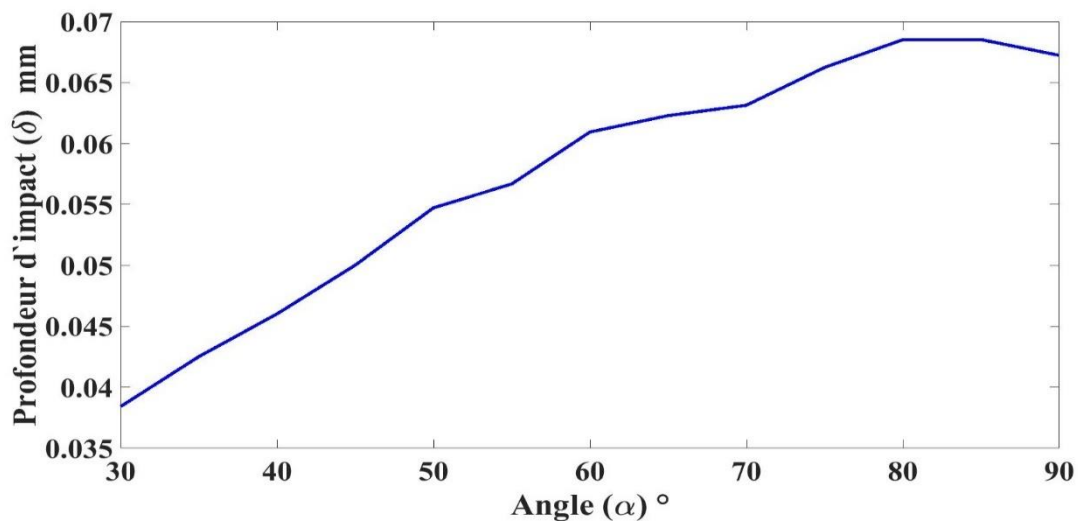


Figure III.10.a Effet de l'angle (α) $^\circ$ sur le rayon d'impact (a).

Figure III.10.b Effet de l'angle (α)° sur la conainte résiduelle à la surface (σ_{r0}).Figure III.10.c Effet de l'angle (α)° sur la conainte résiduelle max (σ_r^{\max}).Figure III.10.d Effet de l'angle (α)° sur la profondeur d'impact (δ).

L'effet de l'angle sur le rayon et la profondeur de l'empreinte montre une augmentation de ces deux derniers avec l'augmentation de l'angle .

III.2.1.4.5 Effet du coefficient de poisson

L'influence du coefficient de poisson a été également étudiée. Pour ce faire, nous avons varié coefficient de poisson de la bille de 0.25 à 0.35 avec un pas égal 0.01. Pour la simulation, nous gardons constant les autres paramètres. Les figures III.11.a, III.11.b, III.11.c et II.11.d montrent les résultats obtenus par la simulation.

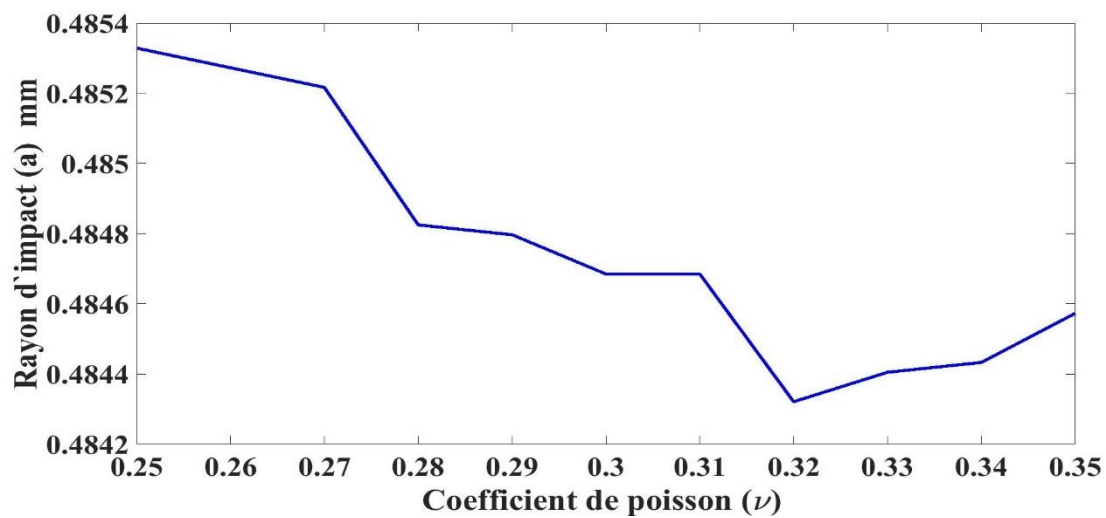


Figure III.11.a Effet de coefficient de poisson(ν) sur le rayon d'impact (a).

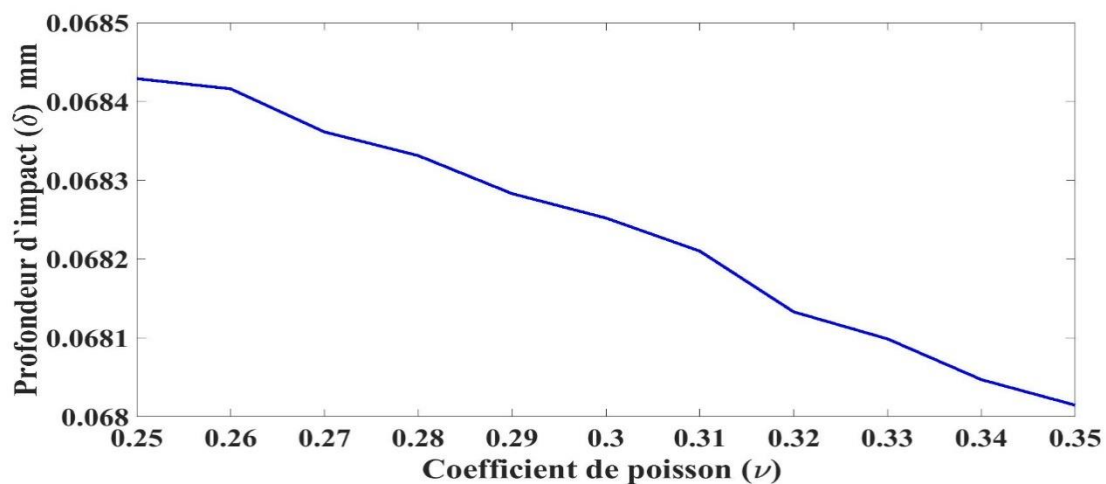


Figure III.11.b Effet de coefficient de poisson(ν) sur la profondeur d'impact (δ).

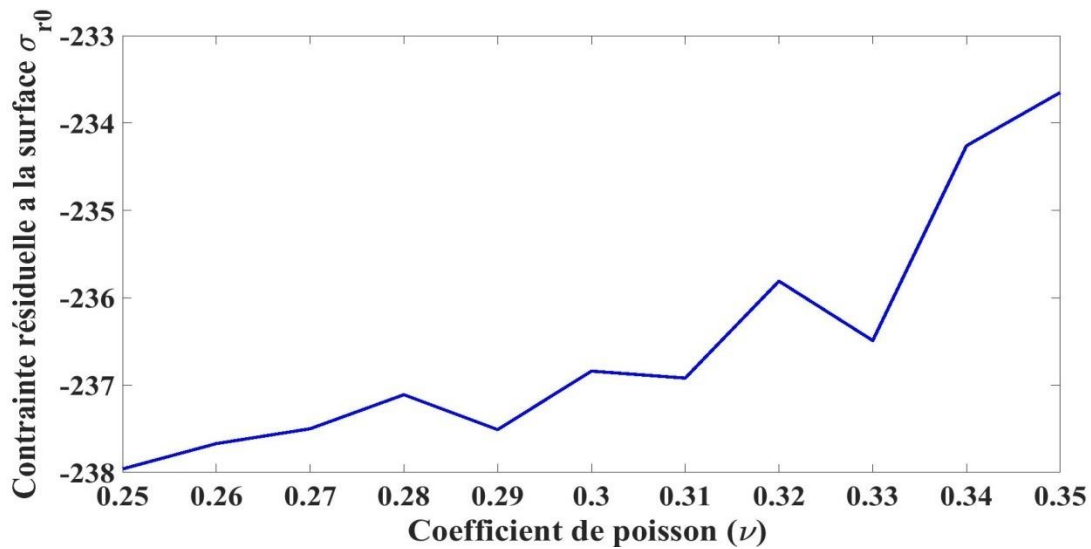


Figure III.11.c Effet de coefficient de poisson(ν) sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{R0}).

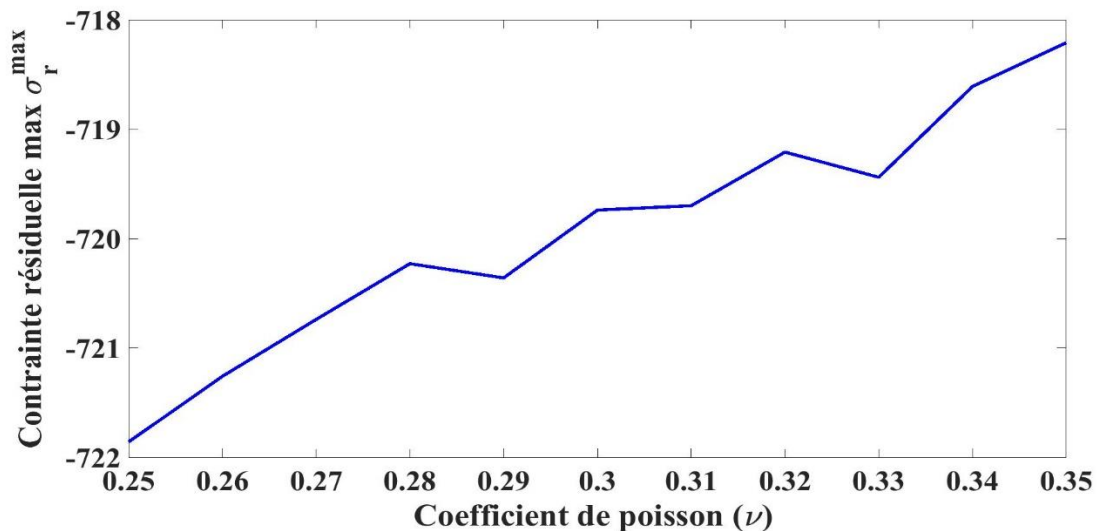


Figure III.11.d Effet de coefficient de poisson(ν) sur la contrainte résiduelle max (σ_R^{\max}).

L'effet du coefficient de poisson sur le rayon et la profondeur de l'empreinte montre une augmentation de ces deux derniers avec l'augmentation du coefficient de poisson.

III.2.1.4.6 Effet de la masse volumique

Nous avons étudié l'influence de la masse volumique de la bille. Pour ce faire, nous avons varié la masse volumique de 3500 kg/m^3 à 7500 kg/m^3 avec un pas de 500 kg/m^3 . Les figures III.12.a, III.12.b, III.12.c et III.12.d illustrent le profil des paramètres étudiés en fonction de la vitesse de la bille.

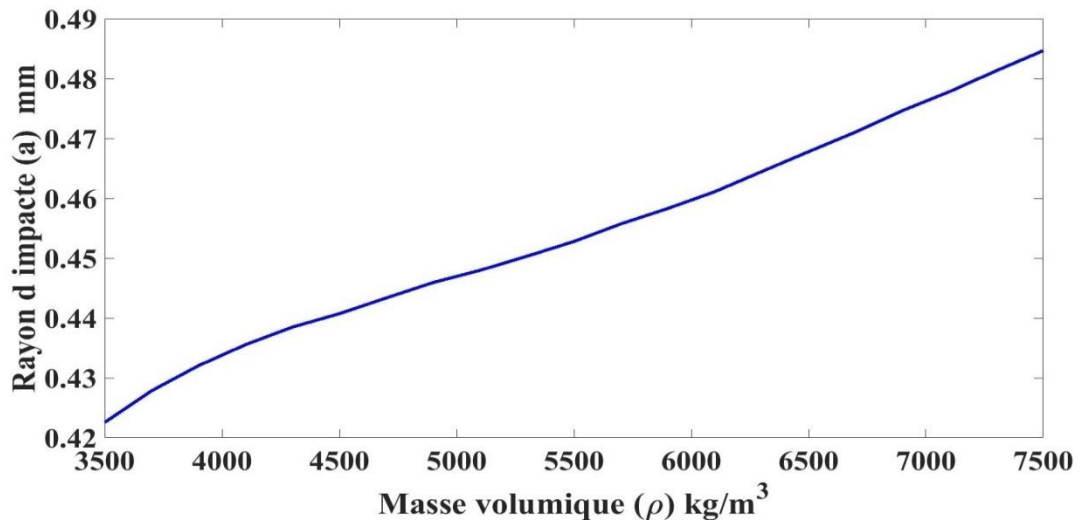


Figure III.12.a Effet de la masse volumique (ρ) sur le rayon d'impact (a).

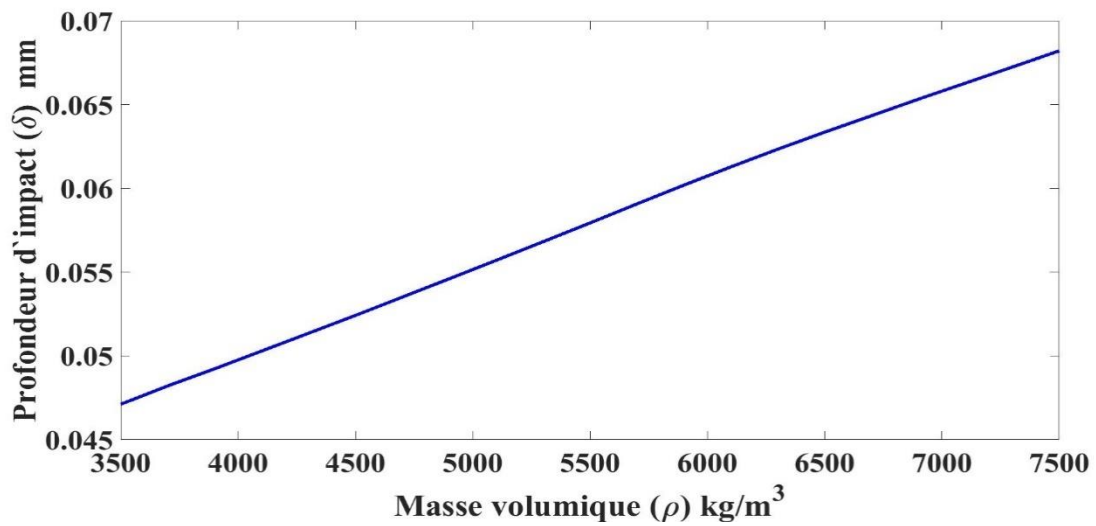


Figure III.12.b Effet de la masse volumique(ρ) sur la profondeur d'impact (δ).

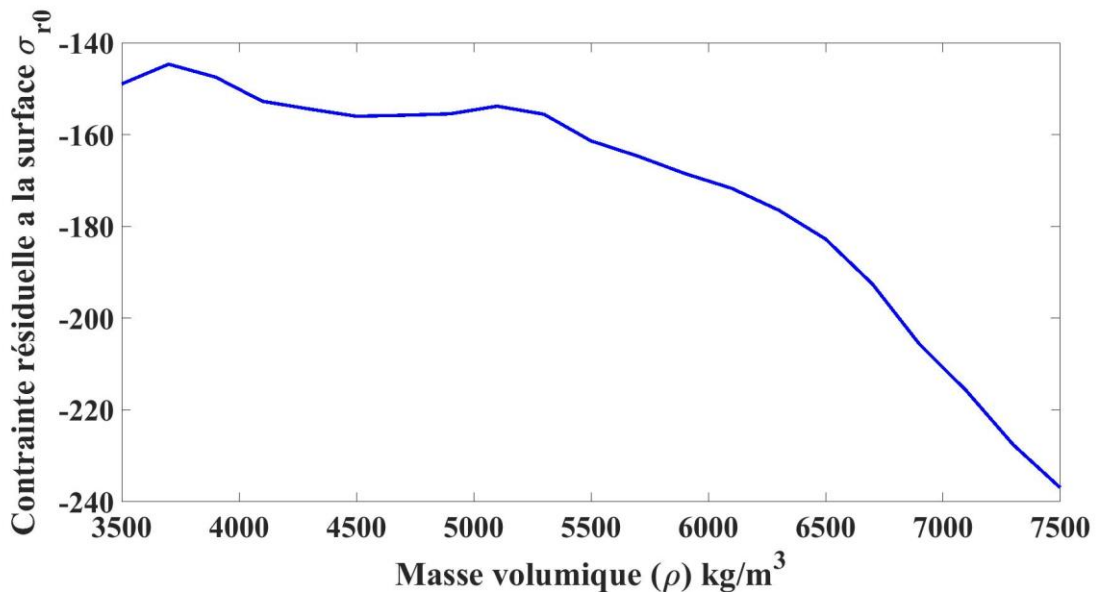


Figure III.12.c Effet de la masse volumique(ρ) sur contrainte résiduelle à la surface (σ_{R0}).

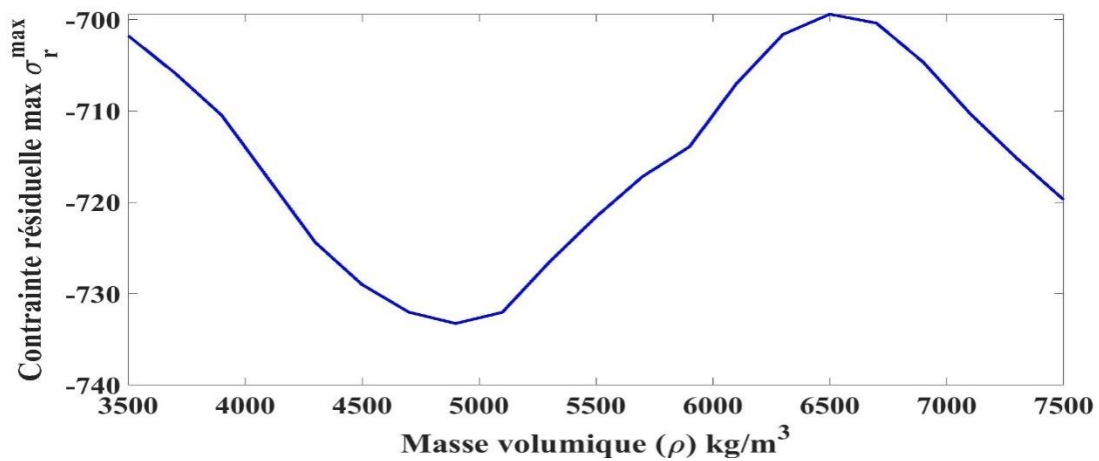


Figure III.12.d Effet de la masse volumique(ρ) sur contrainte résiduelle max (σ_R^{\max}).

L'effet de masse volumique sur le rayon et la profondeur de l'empreinte montre une augmentation de ces deux derniers avec l'augmentation de masse volumique.

III.2.1.4.7 Effet de module de Young

Nous avons étudié l'influence de module de Young de la bille. Pour ce faire, nous avons varié le module de Young de $(0.6 \text{ à } 2.2) \times 10^5 \text{ MPa}$ avec un pas de 20000 MPa. Les figures III.13.a, III.13.b, III.13.c et III.13.d illustrent le profil des paramètres étudiés en fonction de la vitesse de la bille.

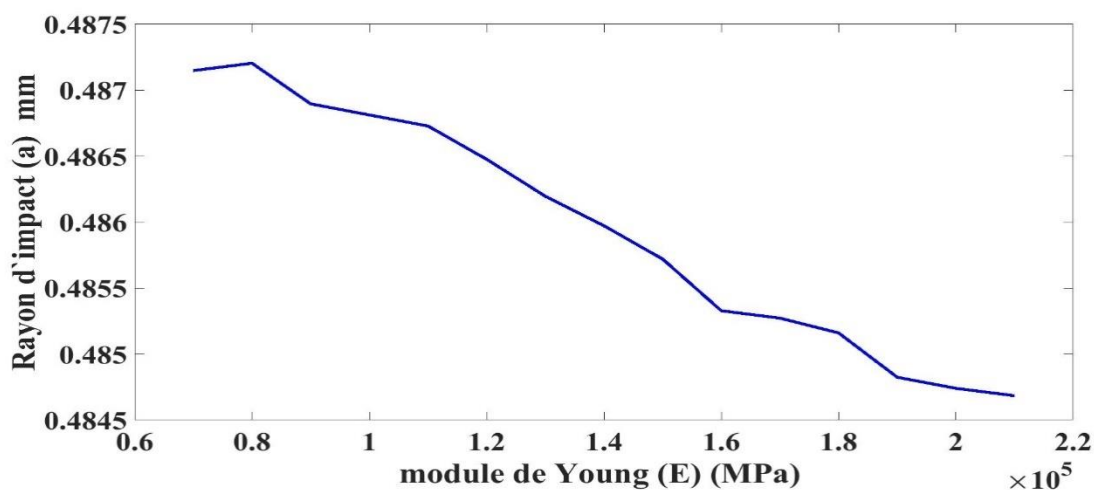


Figure III.13.a Effet de module de Young(E) sur le rayon d'impact (a).

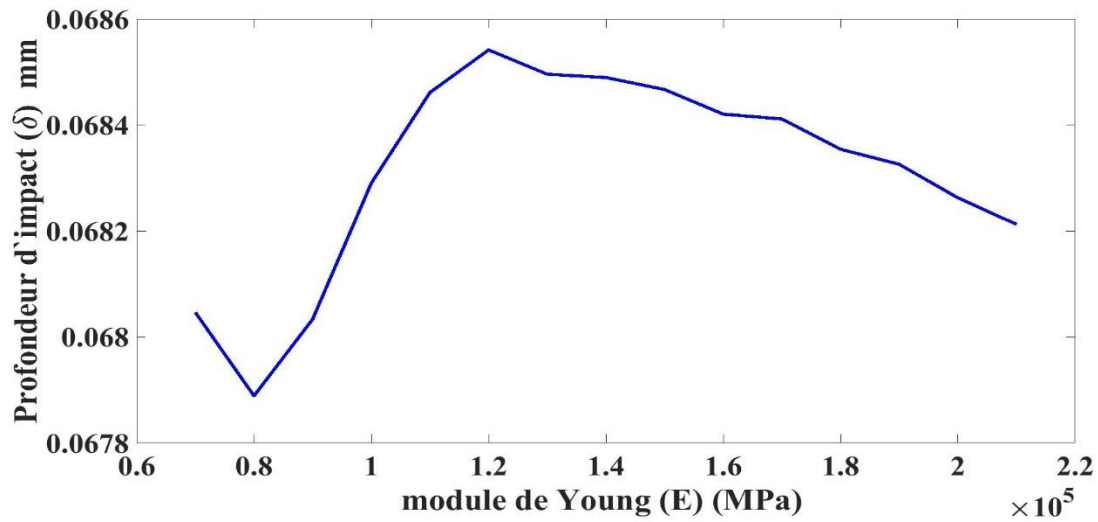


Figure III.13.b Effet de module de Young(E) sur la profondeur (δ).

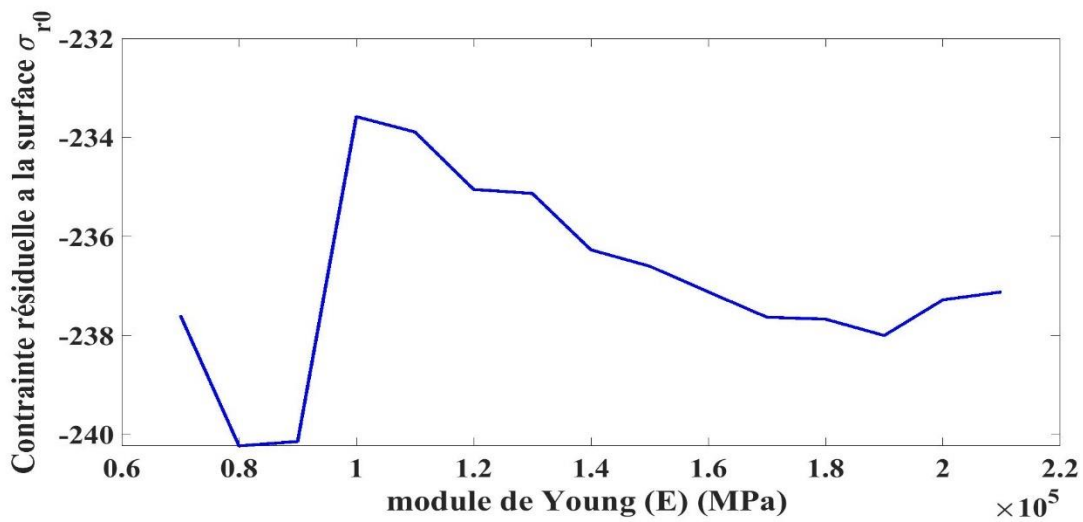


Figure III.13.c Effet de module de Young(E) sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{R0}).

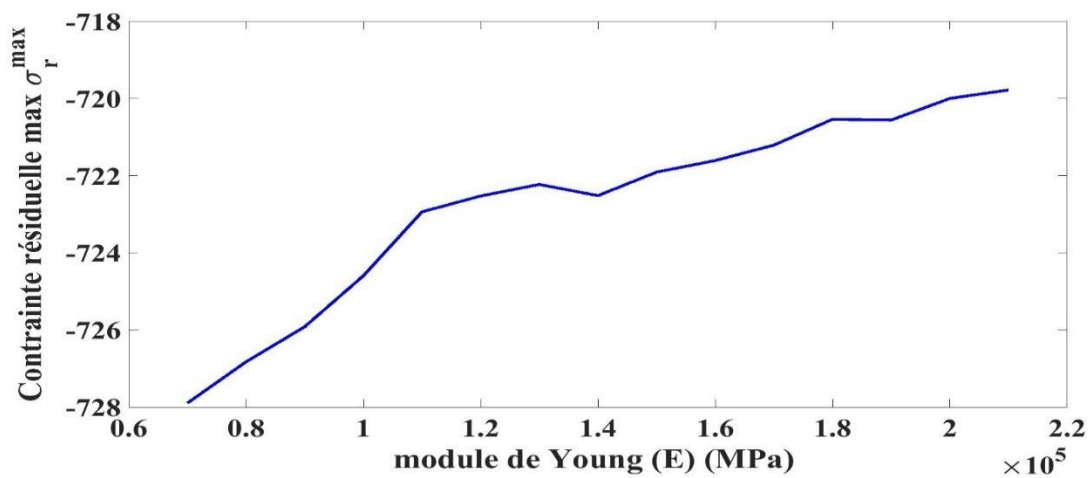


Figure III.13.d Effet de module de Young(E) sur la contrainte résiduelle max (σ_R^{\max}).

L'effet de module de Young sur le rayon et la profondeur de l'empreinte montre une augmentation de ces deux derniers avec l'augmentation de module de Young.

III.3 Deuxième cas (multi-impact)

III.3.1 Simulation du procédé du grenailage

Afin de simuler le procédé de grenailage, nous utilisons les résultats obtenus par la simulation du simple impact d'une bille sur la surface d'un matériau. A cet effet, nous procédons aux mêmes étapes réalisées lors de la simulation du simple impact. Nous avons utilisé les résultats de l'uni-impact (dimensions de l'impact : le rayon et la profondeur) pour déterminer le nombre d'impacts nécessaires pour balayer toute la surface traitée.

La couverture, exprimée en pourcentage, est définie comme le rapport entre la surface effectivement grenillée et la surface à greniller. Pour obtenir une couverture complète, la détermination du nombre d'impact est requise. Le nombre d'impacts dépend des dimensions de la cellule, du diamètre de la grenaille et du diamètre d'indentations résultant des impacts sur la surface de la cellule.

La figure III.14 montre une surface traitée de façon complète (taux de recouvrement 100%) ; les cercles représentent les indentations résultant de chaque impact. On remarque, que toute la surface est couverte par les indentations.

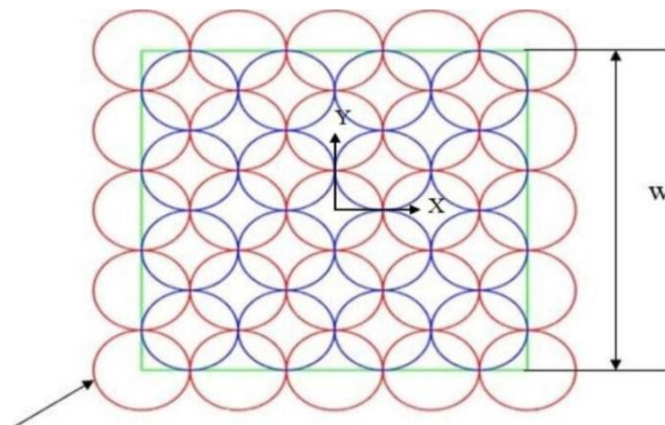


Figure III.14 Surface traitée de façon complète et représentation des indentations (taux de recouvrement 100%).

Pour assurer une couverture de toute la surface traitée, le jet de grenailles est réparti en plusieurs rangées de billes. Pour une première couverture de la surface par des billes, le centre de chacun des indentations, dans le plan $y=0$, est tel que les coordonnées x et z de chaque indentation varie de $-\frac{W}{2}$ à $\frac{W}{2}$ avec un pas de $2a$. Il est évident que pour assurer un taux de recouvrement de 100%, cela nécessite encore une seconde couverture pour laquelle le centre de chacun des indentations, dans le plan $y=0$,

est tel que les coordonnées x et z de chaque indentation varie de $-W/2+a$ à $W/2-a$ avec un pas de $2a$. D'après la figure III.18, on peut simplement établir le nombre d'impact NI par la relation suivante :

$$NI = \left(\frac{W}{2a}\right)^2 + \left(\frac{W}{2a} + 1\right)^2 \quad (\text{III.1})$$

Nous avons choisi une répartition pyramidale des billes. La figure III.15 illustre une représentation schématique de la simulation du procédé de grenailage.

L'équation suivante donne la coordonnée y de chaque bille :

$$y = y_{\max} - [\max(|x|, |z|)] \quad (\text{III.2})$$

y_{\max} est la coordonnée que nous fixons pour la bille située au sommet de la pyramide.

x et z sont les coordonnées du centre de gravité de chaque bille correspondant aux indentations préalablement établies.

La valeur de y conditionne la répartition des billes dans l'espace et génère le jet de grenailles.

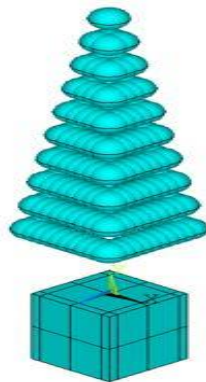


Figure III.15 Représentation schématique de la simulation du processus de grenailage.

III.3.2 Effets des différents paramètres

III.3.2.1 Effet de la vitesse d'impact

Nous avons étudié l'influence de la vitesse de la bille. Pour ce faire, nous avons varié la vitesse de 40 m/s à 100 m/s avec un pas de 10 m/s. Les figures III.18.a, III.18.b, III.18.c illustrent le profil des trois paramètres étudiés sont : la contrainte résiduelle à la surface, la contrainte résiduelle maximale et le facteur Q en fonction de la vitesse de la bille.

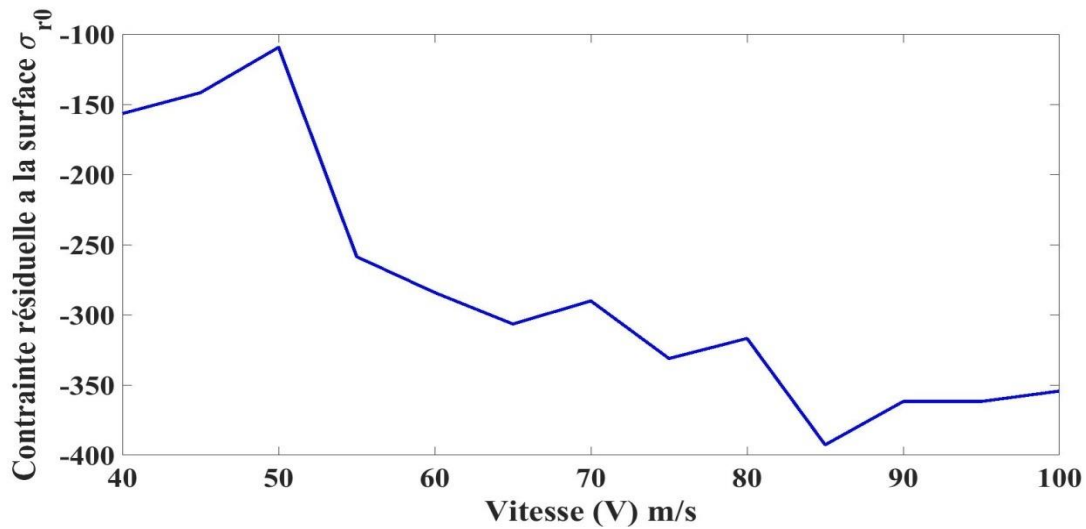


Figure III.18.a Effet de la vitesse (V) sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{R0}).

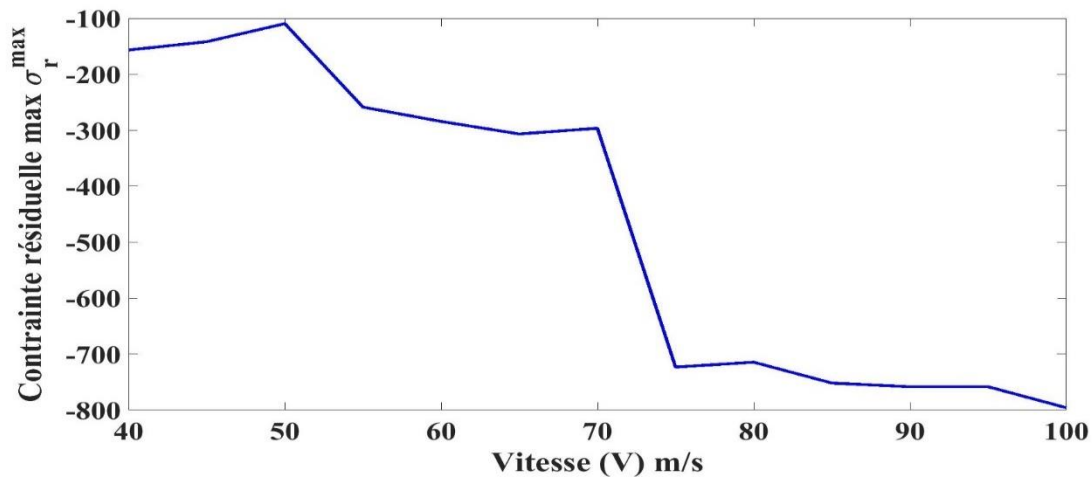


Figure III.18.b Effet de la vitesse (V) sur la contrainte résiduelle max (σ_R^{\max}).

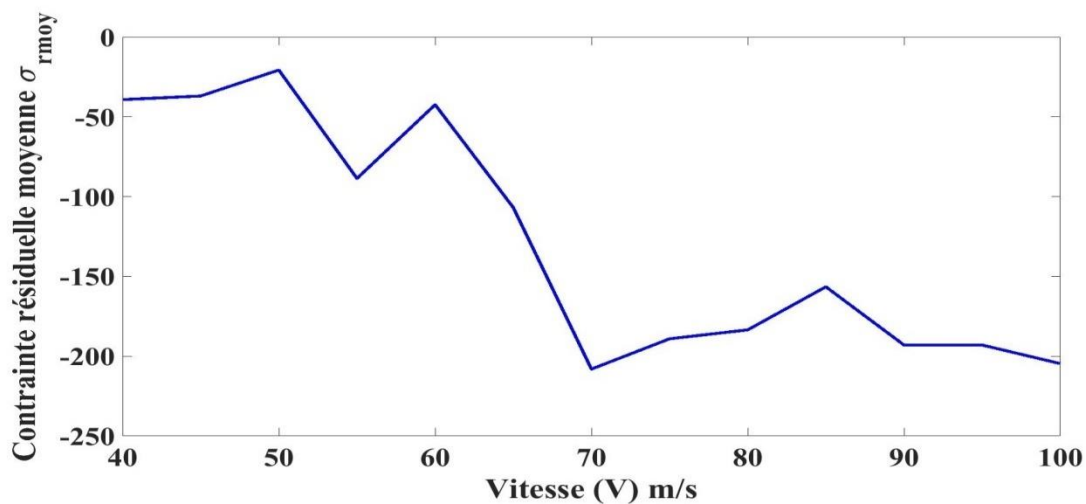


Figure III.18.c Effet de la vitesse (V) sur la contrainte résiduelle moyenne (σ_{rmoy}).

L'effet de la vitesse sur la contrainte résiduelle à la surface, la contrainte résiduelle maximale et le facteur Q montre une diminution avec l'augmentation de la vitesse de la bille.

III.3.2.2 Effet de la taille de la bille

L'influence de la taille de la bille (rayon) a été également étudiée. Pour ce faire, nous avons varié le rayon de la bille de 0.1 à 1 mm avec un pas égal 0.1 mm. Pour la simulation, nous gardons constant les autres paramètres : vitesse égale à 80 m/s, un angle d'incidence égal à 90°.

Les figures III.19.a, III.19.b et III.19.c montrent les résultats obtenus par la simulation.

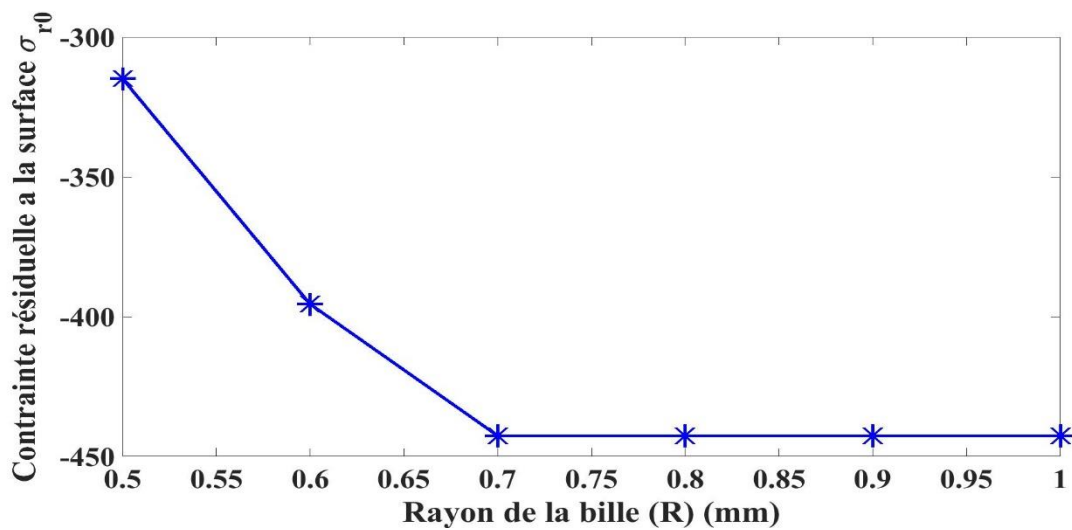


Figure III.19.a Effet de Rayon de la bille (R) sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{r0}).

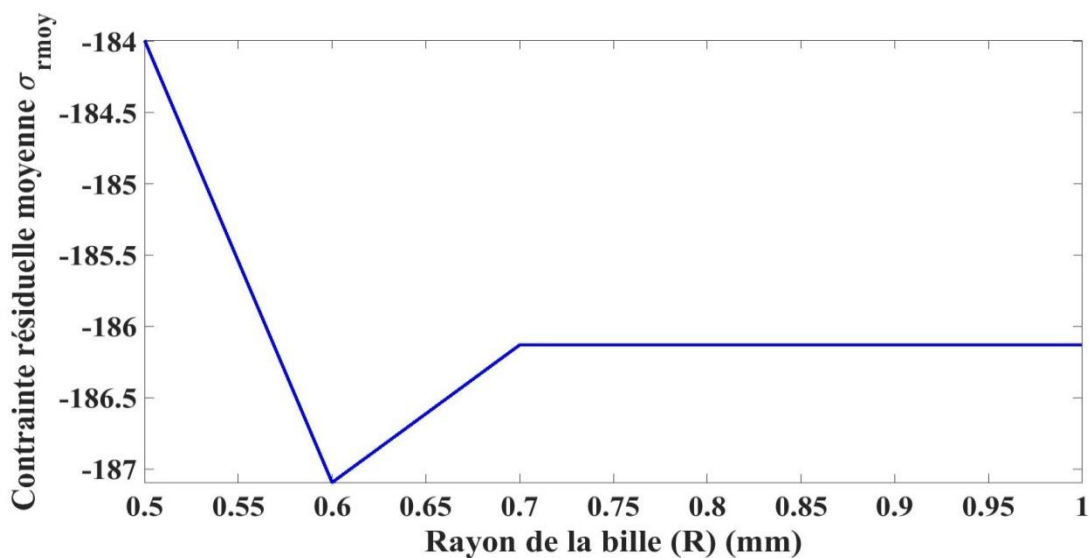


Figure III.19.b Effet de Rayon de la bille (R) sur la contrainte résiduelle moyenne (σ_{rmoy}).

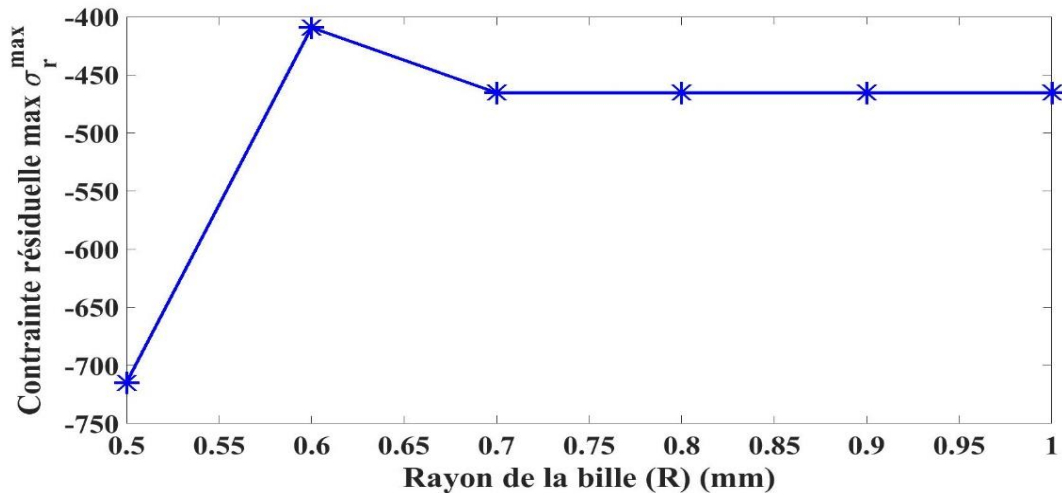


Figure III.19.c Effet de Rayon de la bille (R) sur la contrainte résiduelle max (σ_R^{\max}).

L'effet de rayon de la bille sur la contrainte résiduelle à la surface, la contrainte résiduelle maximale et le facteur Q montre une diminution avec l'augmentation de rayon de la bille.

III.3.2.3 Effet de coefficient de frottement

Nous avons également étudié l'influence du coefficient de frottement sur les paramètres d'impact. Pour ce faire, nous avons considéré plusieurs coefficients de frottement : de 0.1 à 0.4 avec un pas de 0.05. Le rayon de la bille R est égal à 0.2 mm, les autres paramètres de la simulation sont maintenus constants.

Les figures III.20.a, III.20.b, III.20.c et III.20.b montrent les résultats obtenus par la simulation.

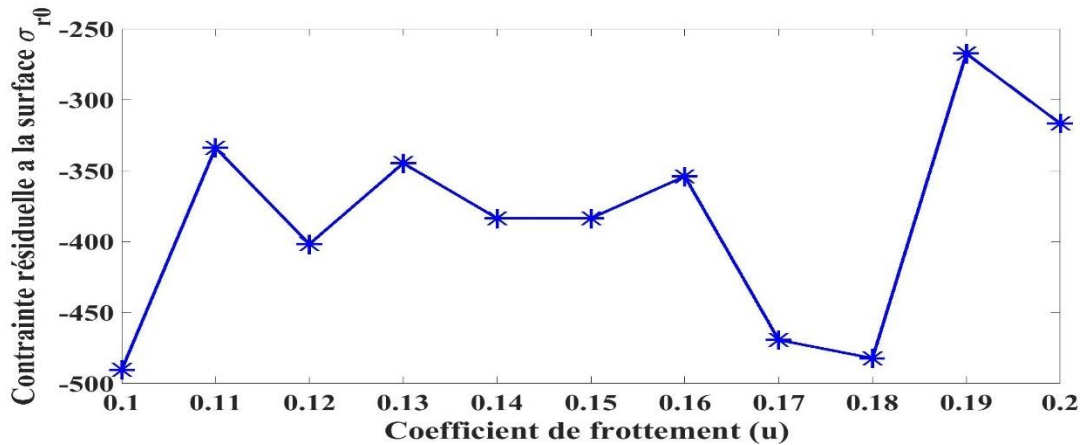


Figure III.20.a Effet de coefficient de frottement (u) sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{R0}).

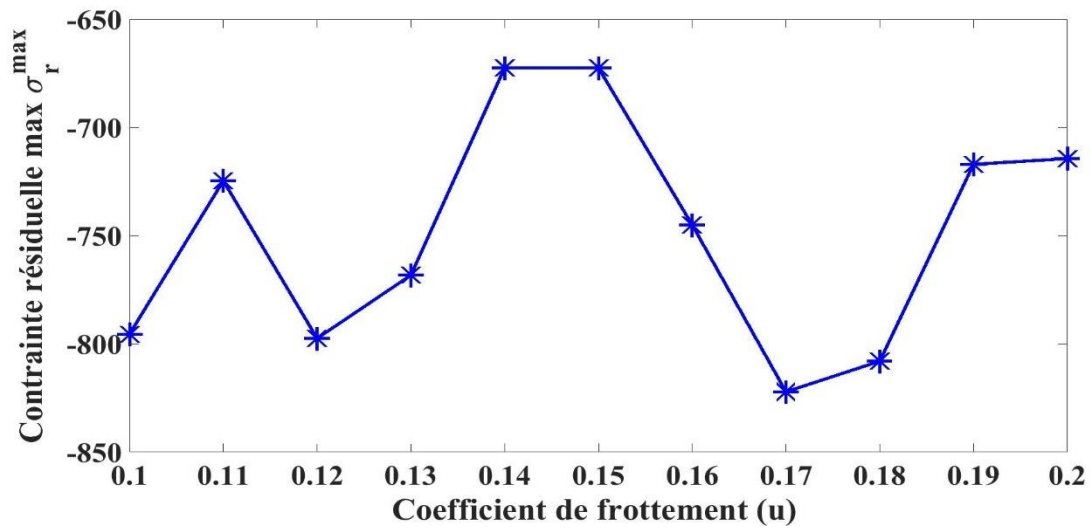


Figure III.20.b Effet de coefficient de frottement(u) sur la contrainte résiduelle max (σ_R^{\max}).

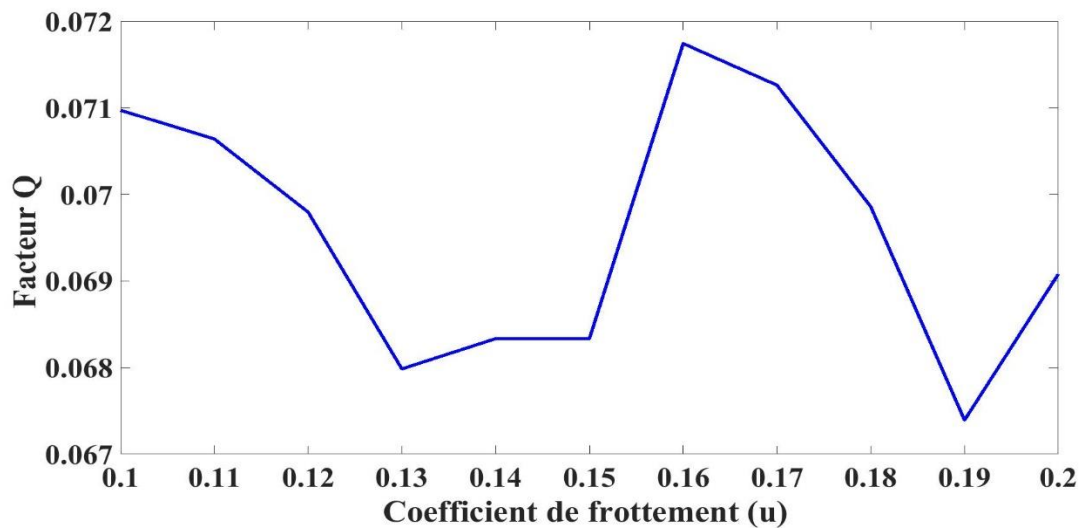


Figure III.20.c Effet de coefficient de frottement(u) sur Facteur(Q).

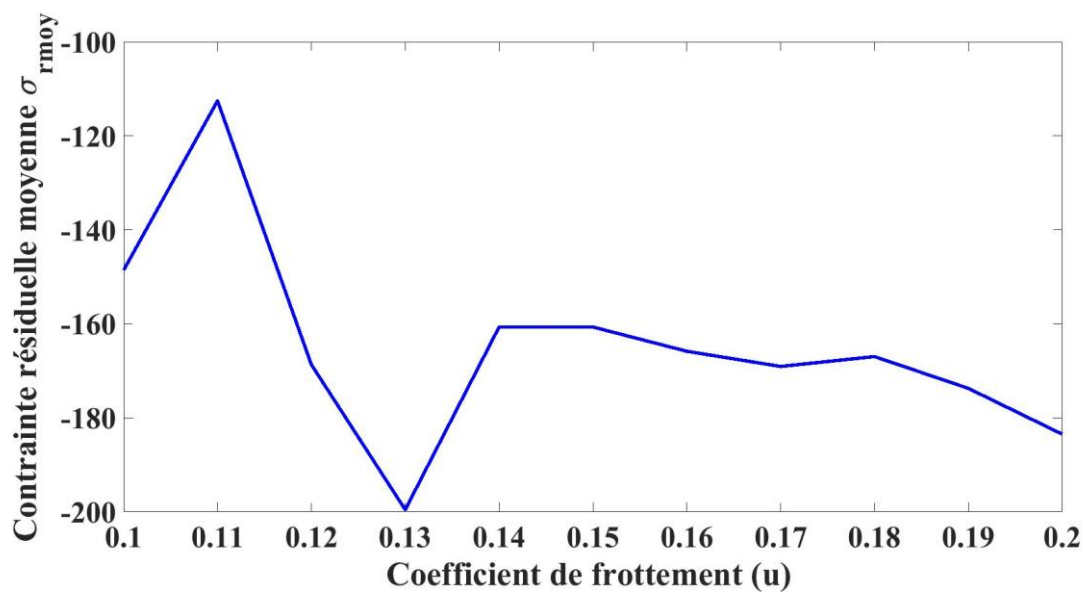


Figure III.20.d Effet de coefficient de frottement(μ) sur la contrainte résiduelle moyenne ($\sigma_{r moy}$).

L'effet de coefficient de frottement sur la contrainte résiduelle a la surface, la contrainte résiduelle maximale et le facteur Q montre une fluctuation avec l'augmentation de coefficient de frottement.

III.3.2.4 Effet angle d'incidence

L'influence de l'angle de la bille a été également étudiée. Pour ce faire, nous avons varié l'angle d'incidence de la bille de 30° à 90° avec un pas égal 10° . Pour la simulation, nous gardons constant les autres paramètres. Les figures III.21.a, III.21.b, III.21.c et II.21.d montrent les résultats obtenus par la simulation.

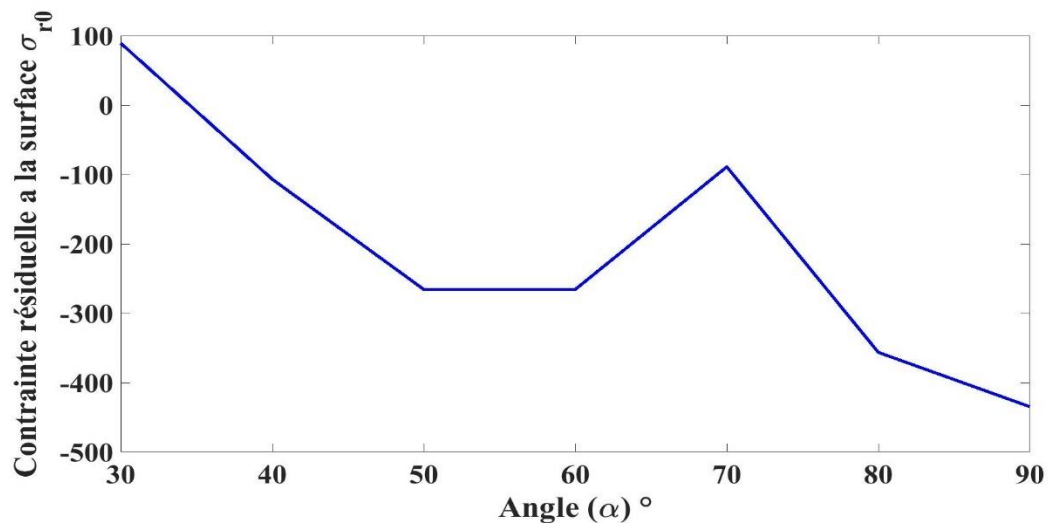


Figure III.21.a Effet de l'angle (α) $^\circ$ sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{R0}).

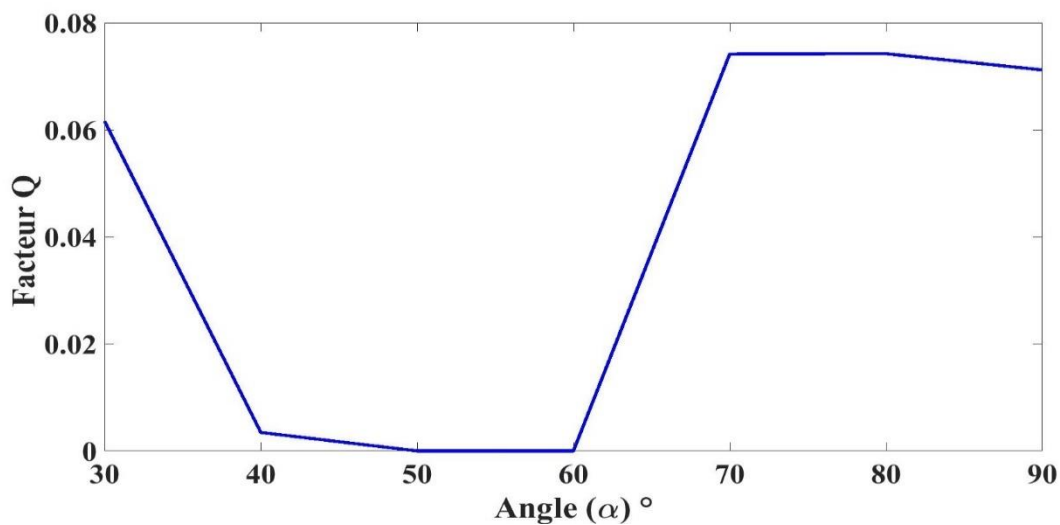


Figure III.21.b Effet de l'angle (α) $^\circ$ sur Facteur (Q).

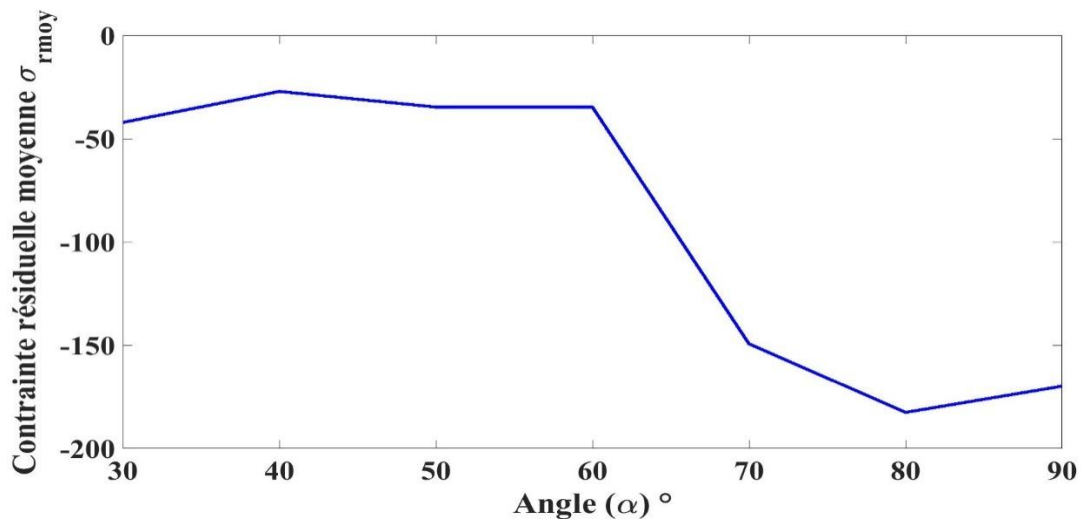


Figure III.21.c Effet de l'angle (α)° sur la contrainte résiduelle moyenne ($\sigma_{r moy}$).

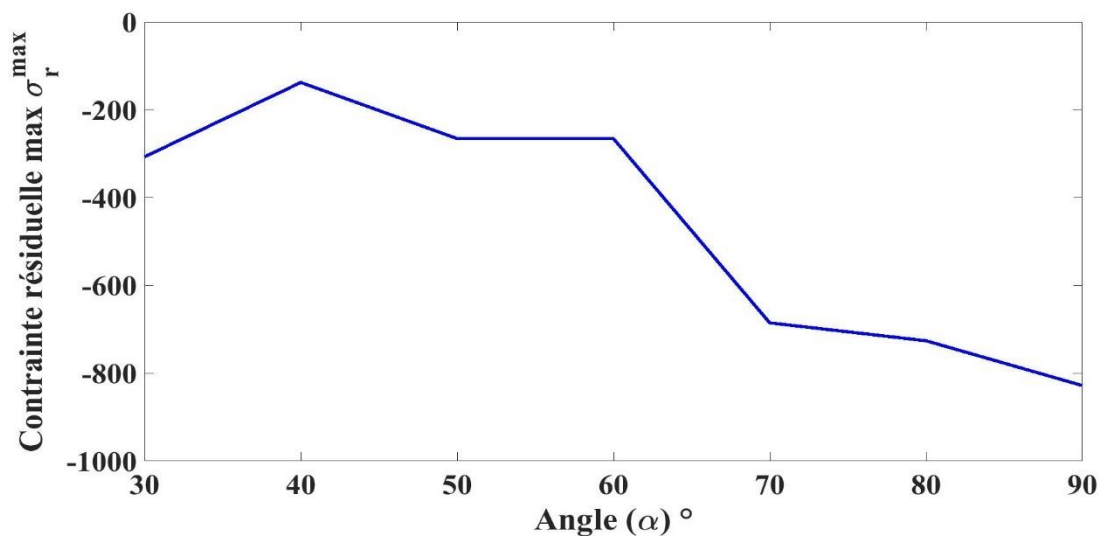


Figure III.21.d Effet de l'angle (α)° sur la contrainte résiduelle max (σ_r^{max}).

L'effet de l'angle sur la contrainte résiduelle à la surface, la contrainte résiduelle maximale et le facteur Q montre une fluctuation avec l'augmentation de l'angle.

III.3.2.5 Effet du coefficient de poisson

L'influence du coefficient de poisson a été également étudiée. Pour ce faire, nous avons varié le coefficient de poisson de la bille de 0.25 à 0.35 avec un pas égal 0.01. Pour la simulation, nous gardons constant les autres paramètres. Les figures III.22.a, III.22.b, III.22.c et II.23.d montrent les résultats obtenus par la simulation.

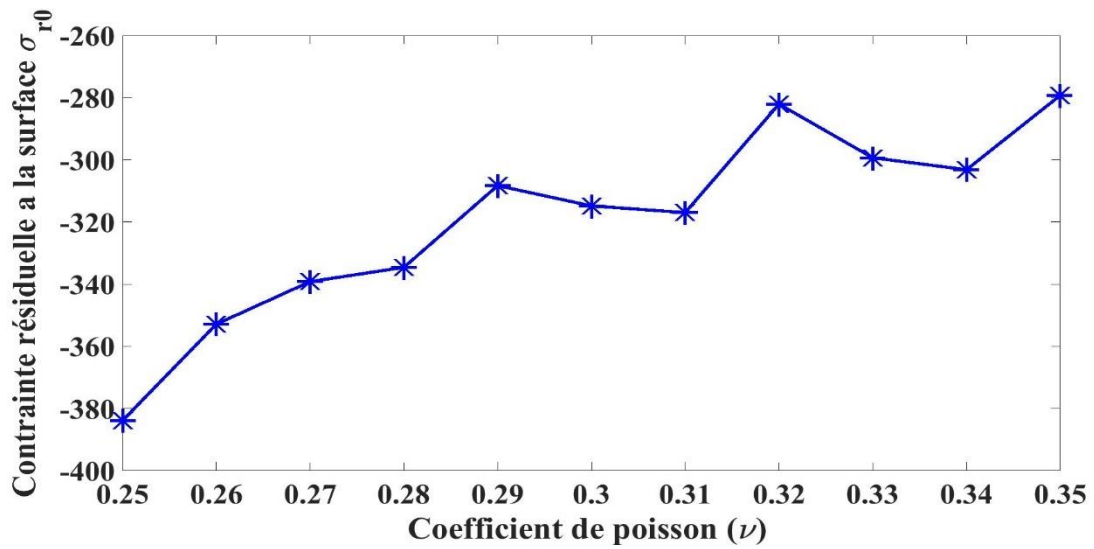


Figure III.22.a Effet de coefficient de poisson(ν) sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{r0}).

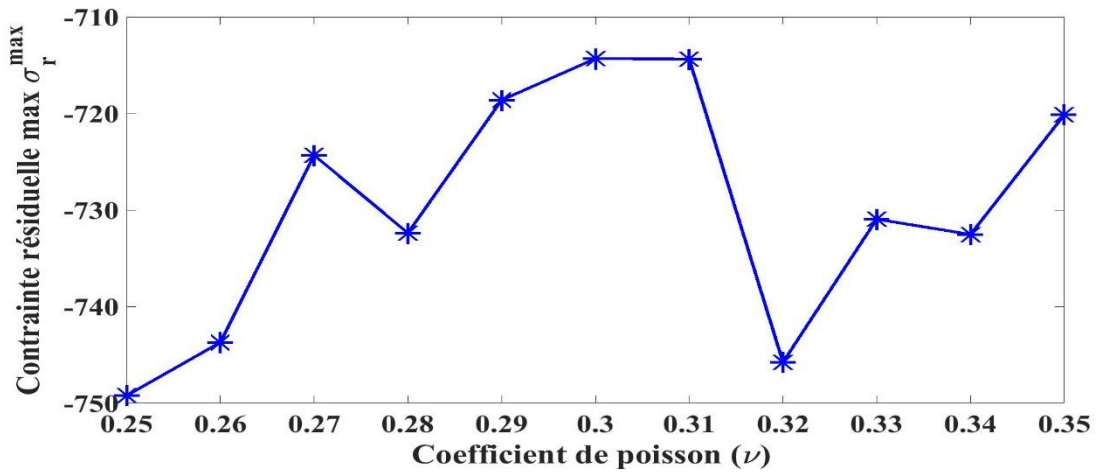


Figure III.22.b Effet de coefficient de poisson(ν) sur la contrainte résiduelle max (σ_R^{\max}).

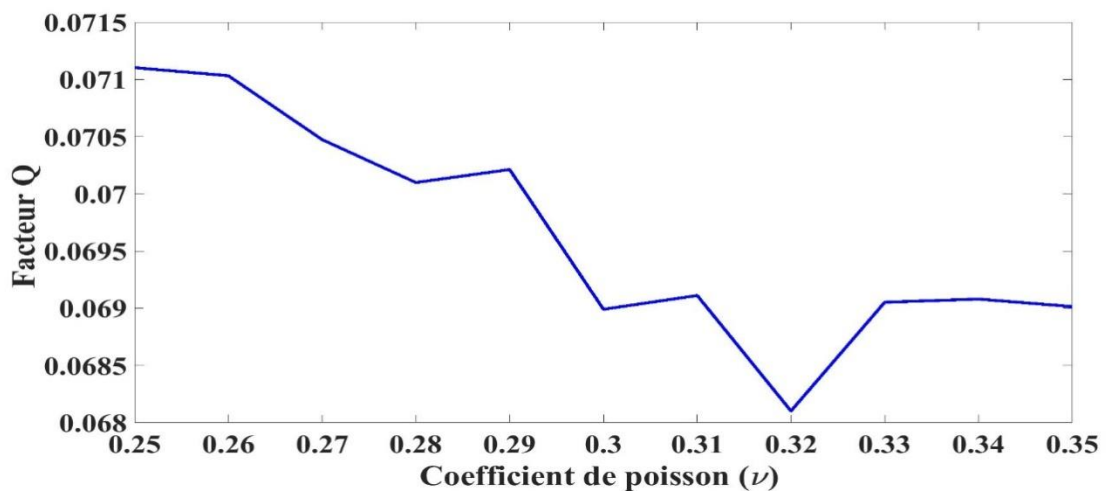


Figure III.22.c Effet de coefficient de poisson(ν) sur Facteur (Q).

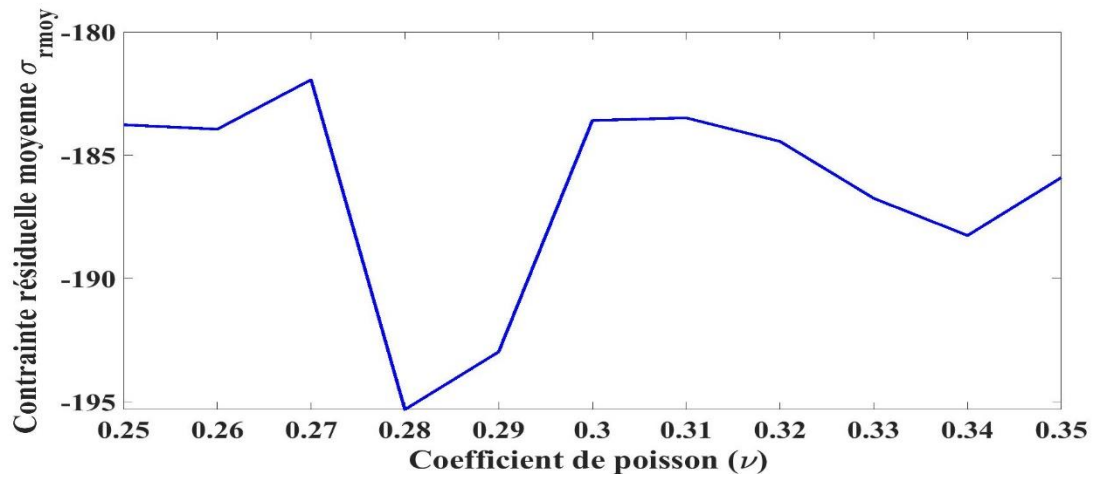


Figure III.22.d Effet de coefficient de poisson(ν) sur la contrainte résiduelle moyenne ($\sigma_{r moy}$).

L'effet de coefficient de poisson sur la contrainte résiduelle à la surface, la contrainte résiduelle maximale et le facteur Q montre une fluctuation avec l'augmentation de coefficient de poisson.

III.3.2.6 Effet de la masse volumique

Nous avons étudié l'influence de la masse volumique de la bille. Pour ce faire, nous avons varié la masse volumique de 3500 kg/m^3 à 7500 kg/m^3 avec un pas de 500 kg/m^3 . Les figures III.23.a, III.23.b, III.23.c illustrent le profil des paramètres étudiés en fonction de la vitesse de la bille.

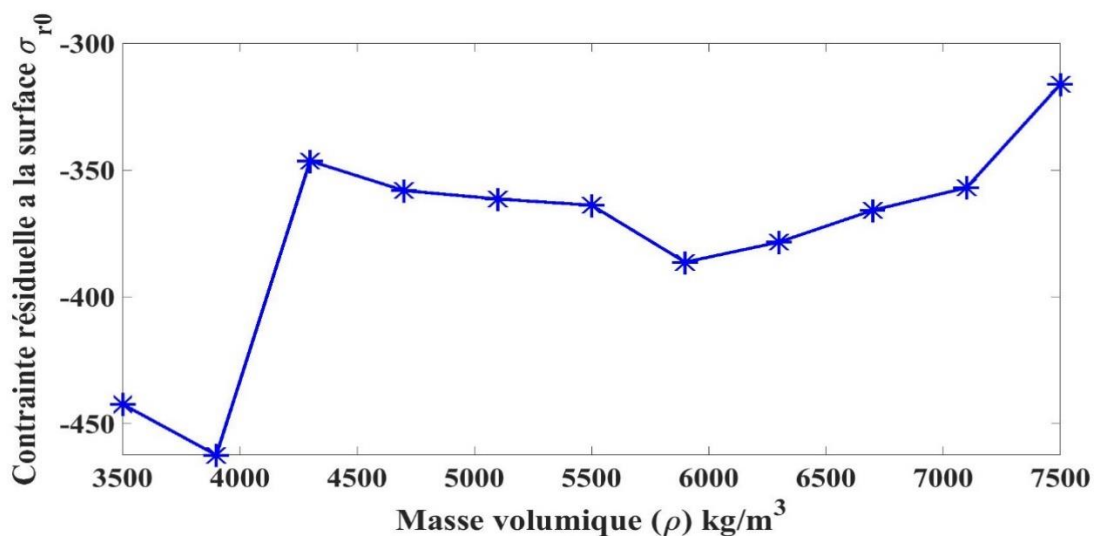


Figure III.23.a Effet de Masse volumique(ρ) sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{r0}).

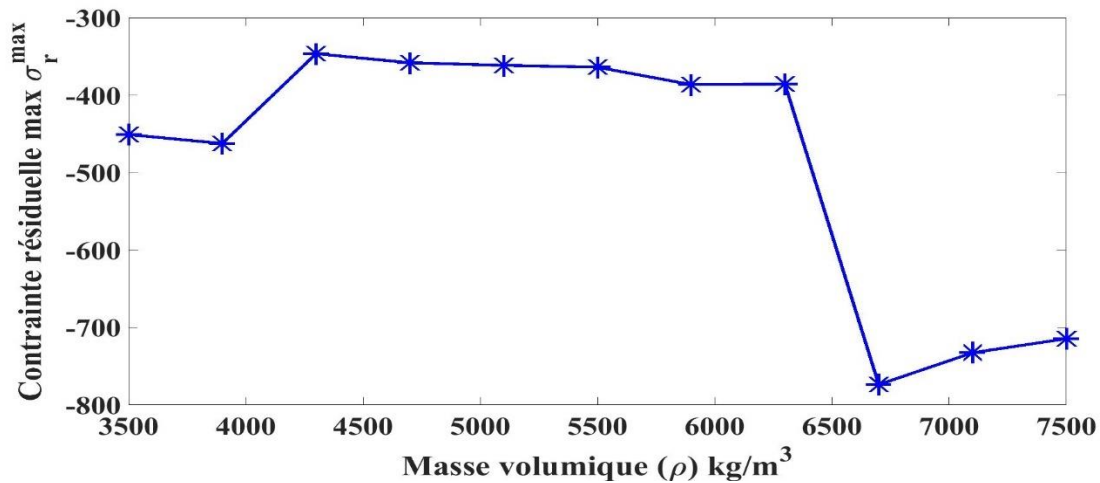


Figure III.23.b Effet de Masse volumique(ρ) sur la contrainte résiduelle max (σ_R^{\max}).

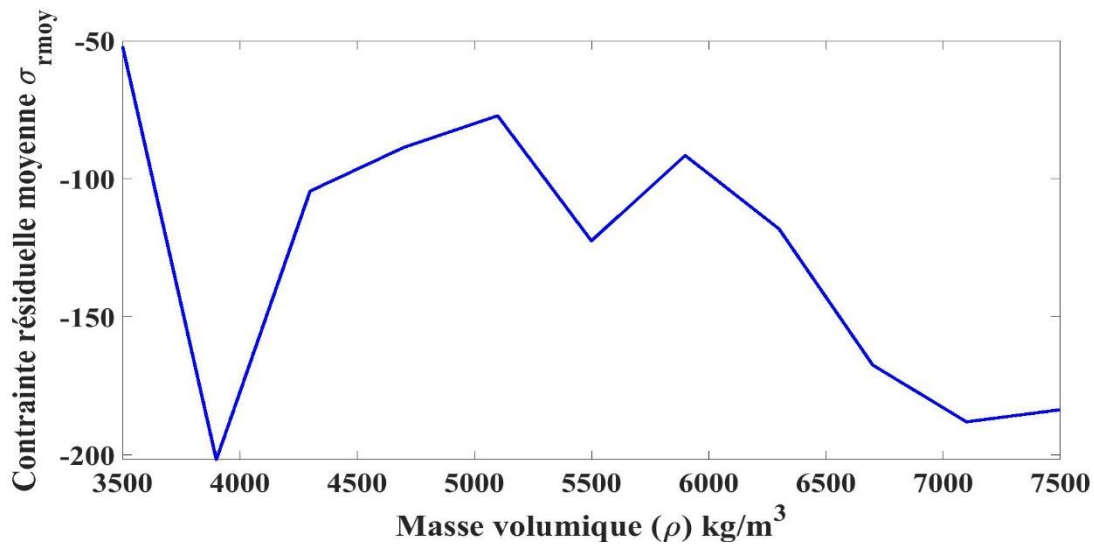


Figure III.23.c Effet de Masse volumique(ρ) sur la contrainte résiduelle moyenne (σ_{rmoy}).

L'effet de masse volumique sur la contrainte résiduelle a la surface, la contrainte résiduelle maximale et le facteur Q montre une fluctuation avec l'augmentation de masse volumique.

III.3.2.7 Effet de module de Young

Nous avons étudié l'influence de module de Young de la bille. Pour ce faire, nous avons varié le module de Young de $(0.6 \text{ à } 2.2) \times 10^5 \text{ MPa}$ avec un pas de 20000 MPa. Les figures III.24. a, III.24. b, III.24.c et III.24.d illustrent le profil des paramètres étudiés en fonction de la vitesse de la bille.

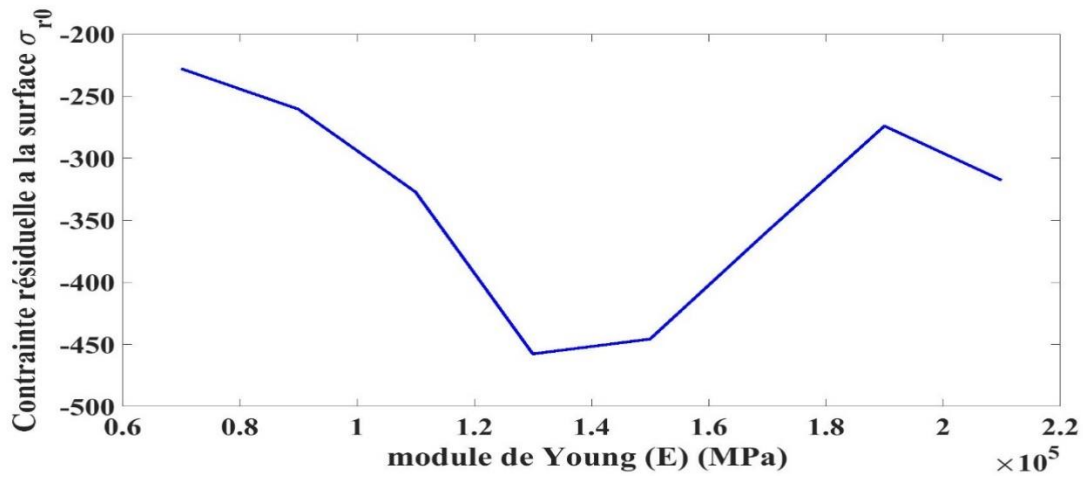


Figure III.24.a Effet de module de Young (E) sur la contrainte résiduelle à la surface (σ_{r0}).

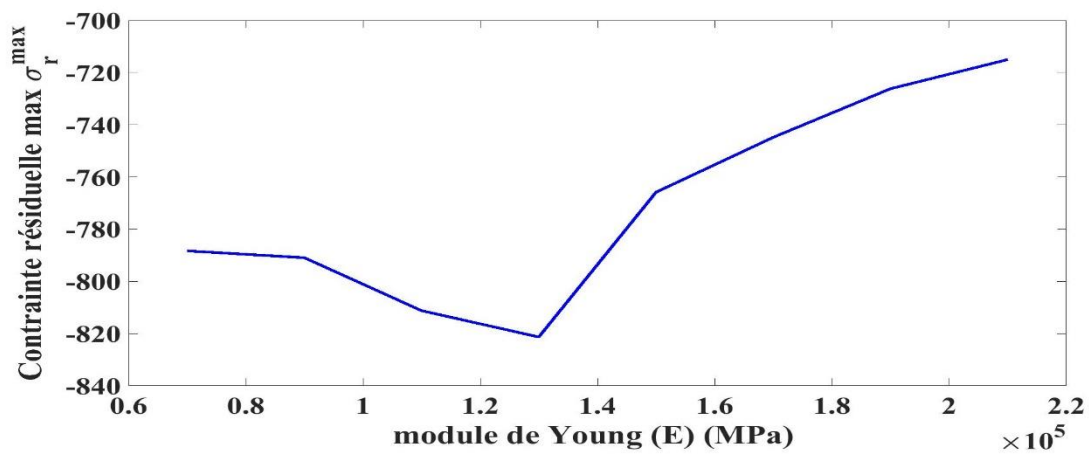


Figure III.24.b Effet de module de Young (E) sur la contrainte résiduelle max (σ_r^{\max}).

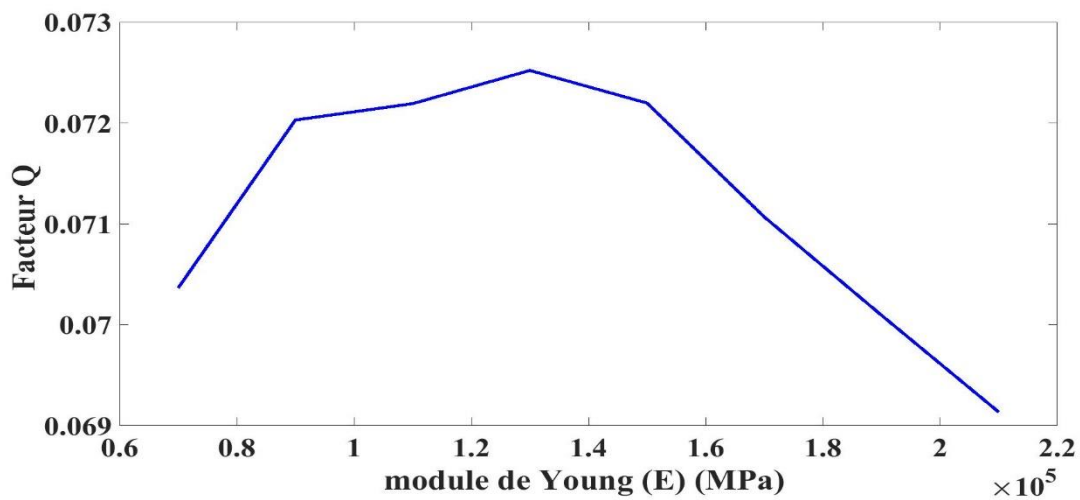


Figure III.24.c Effet de module de Young (E) sur Facteur (Q).

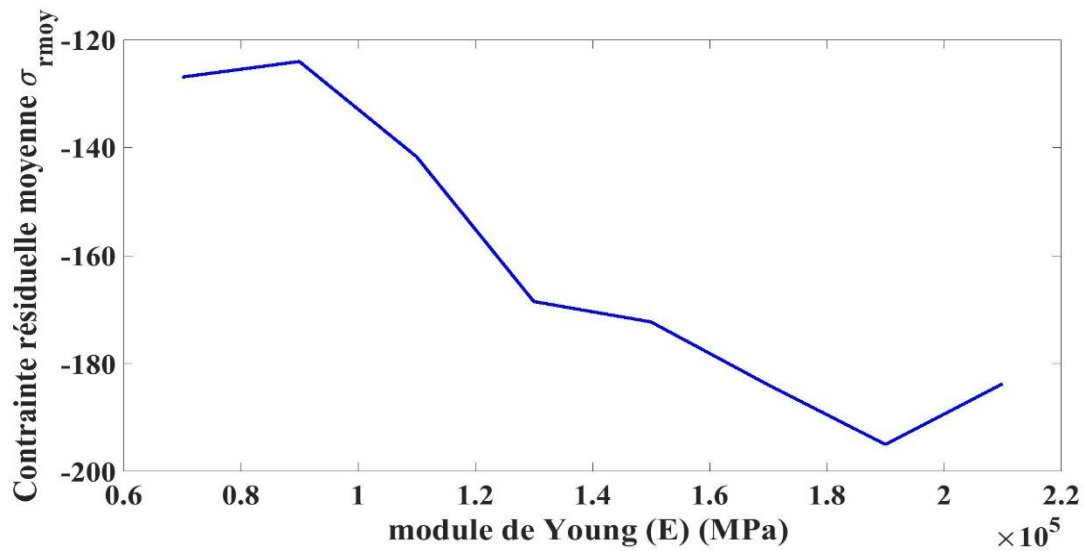


Figure III.24.d Effet de module de Young (E) sur la contrainte résiduelle moyenne ($\sigma_{r moy}$).

L'effet de module de Young sur la contrainte résiduelle a la surface, la contrainte résiduelle maximale et le facteur Q montre une fluctuation avec l'augmentation de module de Young.

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude est de mettre au point une simulation numérique du procédé de grenailage dont le principal objectif est d'étudier l'influence des paramètres de la bille sur le profil de contraintes résiduelles et des déformations plastiques.

L'étude est scindée en deux parties, en premier lieu, l'étude est réservée à la simulation numérique du grenailage uni-impact sous le code Ansys (module LS-Dyna), le modèle numérique est composé d'une cellule représentative du matériau traité et d'un jet de grenailles à une vitesse donnée, la seconde relate les impacts multiples sur la surface traitée et simule la réalité du procédé. Pour ces deux parties de l'étude, l'influence de chacun des paramètres de grenailage était aussi examinée.

La première étude, nous a démontré qu'une augmentation des paramètres de grenailage va donner à une augmentation des dimensions de l'indentation (rayon et profondeur) et les deux autres paramètres, la contrainte résiduelle a la surface et la contrainte résiduelle maximale nous avons remarqué une fluctuation de ces deux paramètres en fonction des paramètres de la bille.

La deuxième partie de l'étude, nous a indiqué une fluctuation des paramètres étudiés (contrainte résiduelle a la surface, contrainte résiduelle maximale et le facteur Q) en fonction des paramètres de grenailage comme la vitesse d'impact, de la taille de la bille (rayon), du coefficient de frottement et de la limite d'élasticité.

Enfin, en perspective, il serait intéressant de poursuivre cette étude en abordant les problèmes de recherche suivants :

- Combiné plusieurs traitements de surface comme le grenailage et les traitements thermiques, pour étudier l'effet des paramètres de plusieurs traitements et l'optimisation des paramètres.
- L'étude des propriétés mécaniques après les traitements de surface (comme le grenailage) par la simulation numérique.
- L'étude de l'effet de la rugosité sur les trois phénomènes de dégradation.

Bibliographie

- [1] Chaise T, Elguedj T, Girardin F, Martini L, Noel N, Tardif N. Parachèvement de surface GM-3-PROFA Équipe Procédés de Fabrication 2017.
- [2] Diepart CP. Applications pratiques du grenailage de precontrainte n.d.
- [3] Hacini L, Lê VN, Bocher P. Traitement de surfaces par impacts : Évaluation des contraintes résiduelles induites par martelage. 18eme Congr Fr Mec 2007:27–31.
- [4] Kermouche G. Étude De Traitements Mécaniques Des Surfaces Reposant Sur Des Sollicitations De Rayure (Superfinition, Polissage, Galetage). Mater Tech 2013;101.
- [5] Ferrier A, Galdon F. Relations Entre Etat De Surface Et Comportement De L'Acier a La Galvanisation a Chaud. Cah d'Informations Tech - Rev Metall 1982;79:1007–12.
- [6] Sollac MSM, Apport OUD, Sollac SM. Traitements de surface et revêtements des opérations de finition conditionnent et en particulier sa tenue à la corrosion . 1989:73–86.
- [7] Barrallier L, Jégou S. Traitement de nitruration et durabilité des pièces mécaniques. CPI, Rabat, Maroc 2015.
- [8] Renaud P. Modélisation numérique du grenailage des pièces initialement cémentées ou carbonitrurées 2011.
- [9] Bureau M-A. Stabilisation et traitement électrochimique des boues d'épuration municipales et industrielles 2004:1–123.
- [10] Equilibria JP. Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO) 2006;508:621–8.
- [11] Blais JF, Mercier SDG. État du développement technologique en matière d ' enlèvement des métaux des effluents industriels 2021.
- [12] Zahra CF, Wissem B, Soulef Y, Zohra BF. Comportement à la corrosion de l'acier 9S20K traité par un procédé d ' électrozingage n.d.
- [13] Urlea V. Amélioration du fini de surface par électropolissage des composants en alliage de titane (Ti64) et nickel (IN625) fabriqués par FSL. Master Thesis, ÉCOLE Technol SUPÉRIEURE, Univ DU QUÉBEC 2017.
- [14] Benoist P, Legeay G. Traitement de surface d'un polyurethane par plasma froid: fixation de fluor. Eur Polym J 1994;30:1283–7.
- [15] Bensaada S. Traitements thermiques, classification et designation 2010.
- [16] Julan E, Stolz C, Taheri S, Peyre P, Gilles P. Simulation du traitement de surface par choc laser

- en présence d'un état initial de contraintes. CSNA, 11^e Colloq Natl En Calc Des Struct 2013.
- [17] Lagarde M, Lagarde M. Relations procédés d'élaboration, état métallurgique, propriétés des alliages nanostructurés de Ni-W 2018.
- [18] ABDELJALIL D. INFLUENCE DES TRAITEMENTS DE SURFACE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES 2007.
- [19] Qiao M, Hu J, Guo K, Wang Q. Influence of shot peening on corrosion behavior of low alloy steel. Mater Res Express 2020;7.
- [20] Peral LB, Zafra A, Bagherifard S, Guagliano M, Fernández-Pariente I. Effect of warm shot peening treatments on surface properties and corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy. Surf Coatings Technol 2020.
- [21] Fu P, Chu R, Xu Z, Ding G, Jiang C. Relation of hardness with FWHM and residual stress of GCr15 steel after shot peening. Appl Surf Sci 2018;431:165–9.
- [22] Gasqueres C, Henon C, Danielou A, Fanget MM, Ehrstrom JC. Effet Du traitement de surface sur le comportement en fatigue des alliages de posaluminium Al-Cu-Li.
- [23] L. Evolution d'une couche grenillée sous sollicitations thermiques et mécaniques - cas de la fatigue oligocyclique. Bull Géodésique 1999:254–61.
- [24] Niku-Lari A, Lu J, Flavenot JF. Measurement of residual-stress distribution by the incremental hole-drilling method. Exp Mech 1985;25:175–85.
- [25] DERBAL Y. Détermination des contraintes résiduelles par la méthode simplifiée dans le cas du grenillage de précontrainte n.d.
- [26] Wohlfahrt H. Shot peening and residual stresses. Residual Stress Stress Relax 1982:71–92.
- [27] Guechichi H. Prédiction des contraintes résiduelles dues au grenillage de précontrainte 1986.
- [28] Edition N. Shot Peening NINTH EDITION. Springs n.d.
- [29] Yong Huang Z, Wagner D, Bathias C, Louis Chaboche J. Cumulative fatigue damage in low cycle fatigue and gigacycle fatigue for low carbon-manganese steel. Int J Fatigue 2011;33:115–21.
- [30] Ebenau Vohringer M. Influence Of The Shot Peening Angle On The Condition Of Near Surface Layers In Materials. Int Conf Shot Peen 1997;3:p.253-260.
- [31] Kirk D. Residual Stresses and Retained Austenite in Shot Peened Steels. 1982:271–227.
- [32] Hakimi D. Caractérisation mécanique et métallurgique de la structure d'une couche grenillée 1984.

- [33] Mod PR. Modélisation numérique du grenailage des pièces initialement cémentées ou carbonitrurées To cite this version : l ' École Nationale Supérieure d 'Arts et Métiers 2011:47–8.
- [34] Badreddine J. Modélisation du grenailage ultrason pour des pièces à géométrie complexe 2014.
- [35] Fathallah R. Modélisation du procédé de grenailage incidence des billes et taux de recouvrement 1994.
- [36] Hamdane N. Modelisation des contraintes residuelles introduites par martelage dans les parois d'un tube de generateur de vapeur 1990.
- [37] Johnson W. Impact strength of materials 1972.
- [38] SARDAIN C. Contribution a l'étude du contact entre deux solides photoelastiques dans le cas d'un probleme plan 1981.
- [39] Majzoubi GH, Azizi R, Nia AA. A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts. *J Mater Process Technol* 2005;164:1226–34.
- [40] Meguid SA, Shagal G, Stranart JC. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model. *Int J Impact Eng* 2002;27:119–34.
- [41] Frija M, Hassine T, Fathallah R, Bouraoui C, Dogui A, de Génie Mécanique L. Finite element modelling of shot peening process: Prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity. *Mater Sci Eng A* 2006;426:173–80.
- [42] Hong T, Ooi JY, Shaw B. A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses. *Eng Fail Anal* 2008;15:1097–110.
- [43] Renaud P, Desvignes M, Kubler R. Simulation numérique du grenailage sous ABAQUS. CFM 2009-19ème Congrès Français Mécanique, AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie; 2009.
- [44] Guagliano Mario. Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach. *J Mater Process Technol* 2001;110:277–86.
- [45] Bignonnet A. Fatigue Strength of Shot-Peened Grade 35 NCD 16 Steel. Variation of Residual Stresses Introduced by Shot Peening According to Type of Loading, 3th Int Conf Shot Peen, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 1987:659-566.