

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique**



Département de Métallurgie

Mémoire de Master

en Génie des Matériaux

**Simulation à 2D par logiciel DEFORM de l'influence des paramètres de la technique ECAP sur l'inhomogénéité de déformation d'un alliage 6063.**

Présenté par :

MAAMERI Ettayib

Sous la direction du Professeur M. Mabrouk BOUABDALLAH

Présenté et soutenu publiquement le (29/06/2017)

**Composition du Jury :**

Président	H. YOUSFI	Professeur ENP
Examineur	A. KASSER	M.C.A ENP
Promoteur	M. BOUABDALLAH	Professeur ENP
Invité	M .O. DEJMA	Doctorant ENP

ENP 2017



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique**



Département de Métallurgie

Mémoire de Master

en Génie des Matériaux

**Simulation à 2D par logiciel DEFORM de l'influence des paramètres de la technique ECAP sur l'inhomogénéité de déformation d'un alliage 6063.**

Présenté par :

**MAAMERI Ettayib**

Sous la direction du Professeur M. Mabrouk BOUABDALLAH

Présenté et soutenu publiquement le (29/06/2017)

**Composition du Jury :**

Président	H. YOUSFI	Professeur ENP
Examineur	A. KASSER	M.C.A ENP
Promoteur	M. BOUABDALLAH	Professeur ENP
Invité	M .O. DEJMA	Doctorant ENP

# *Dédicace*

*À mes très chers parents ;*

*À mes frères et mes sœurs ;*

*À toute ma famille ;*

*À tous mes camarades et collègues ;*

*À tous ceux qui me sont chers*

*Je dédie ce travail.*

*MAAMERI Ettayib*

## Remerciements

Je remercie, en premier lieu, notre Dieu le très miséricordieux qui a bien voulu nous donner la force et le courage d'effectuer le présent travail.

Je tiens à remercier mon deux promoteurs Pr. M.BOUABDALLAH et Mr. Oussama DJEMA pour avoir accepté de m'encadrer et de me soutenir durant les moments difficiles de l'élaboration de ce projet.

Nous remercions Monsieur H.YOUSFI Professeur à l'ENP d'avoir accepté de présider le jury de notre soutenance .  
Nous remercions Monsieur M.KASSER Maitre de Conférence à l'ENP d'avoir accepté d'examiner  
notre soutenance.

Je remercie aussi à tous les enseignants de l'école nationale polytechnique, en particulier ceux du Département de Métallurgie, pour nous avoir offert un agréable cadre de formation.

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, trouve ici l'expression de mes vifs remerciements et mon profonde gratitude.

تم دراسة التجانس في توزيع التشوه البلاستيكي بعد معاجك قطعة ألومنيوم 6063 بتقنية تسمى ECAP باستخدام برنامج العناصر المحددة DEFORM. تم تغيير عوامل المعالجة بما في ذلك زاوية التقاطع  $\phi$ ، سرعة الضاغطة، والاحتكاك لدراسة آثارها على تجانس التشوه. تبين أن تمرير واحدة من ECAP لم تكن قادرة على إنتاج تشوهات متجانسة، على الرغم من أن توزيع التشوه يمكن تحسينه عن طريق اختيار عوامل المعالجة المناسبة.

**الكلمات الرئيسية:** ECAP، العناصر المحددة، DEFORM، تشوه متجانس.

## Abstract

The uniformity of plastic strain distribution in a workpiece 6063 Aluminum alloy after Equal Channel Angular Pression (ECAP) was studied using a 2D DEFORM finites elements software. The treatment parameters including the angle of intersection of the channel  $\phi$ , the speed of pressing, the friction have varied to study their effects on the strain homogeneity. It was found that a single ECAP pass was unable to produce homogenous strains in a workpiece, although strain distribution can be improved by selecting the appropriate processing parameters.

**Key words:** ECAP, finite element, DEFORM, strain homogeneity.

## Résumé

L'uniformité de la distribution de la déformation plastique dans une pièce à après Extrusion Coudée à Aires Égales (ECAP) a été étudiée en utilisant un logiciel d'éléments finis DEFORM en 2D. Les paramètres de traitement incluant l'angle d'intersection du canal  $\phi$ , la vitesse de pressage, le frottement ont varié pour étudier leurs effets sur l'homogénéité des déformations. On a constaté qu'une seule passe ECAP était incapable de produire des déformations homogènes dans une pièce, bien que la répartition des déformations puisse être améliorée en sélectionnant les paramètres de traitement appropriés.

**Mots clés :** ECAP, éléments finis, DEFORM, déformation homogène.

# Table des matières

## Listes des figures

Introduction générale .....	11
-----------------------------	----

### *Chapitre 1: Equal Channel Angular Pressing (ECAP)*

Introduction.....	14
1.1. Déformations plastiques sévères.....	15
1.2. Principe du procédé ECAP .....	15
Conclusion .....	19

### *Chapitre 2: Les techniques experimental*

Introduction.....	21
2.1. Le logiciel Deformed 3D .....	21
2.2. Avantages.....	23
2.3. Les étapes de simulation .....	24
2.3.1. Choix de représentation géométrique.....	24
2.3.2. Définir la géométrie de la pièce .....	26
2.3.3. Choix de matériaux de la pièce .....	27
2.3.4. Maillage .....	27
2.3.5. Définir la géométrie de la matrice.....	28
2.3.6. Contrôles de mouvement .....	29
2.3.7. Coefficient de frottement .....	29
2.3.8. Exécution de simulations .....	30
2.3.9. DEFORM-Post.....	31
Conclusion .....	32

### ***Chapitre 3: Resultants et discussion***

Introduction.....	34
3.1. Influence de l'angle du canal sur l'homogénéité des déformations .....	34
3.2. Influence de l'angle du canal sur la température de la pièce.....	38
3.3. L'indice d'inhomogénéité de déformation .....	39
3.4. Influence du frottement sur l'homogénéité des déformations.....	41
3.5. Influence du frottement sur la température de la pièce.....	46
3.6. Influence de la vitesse de pressage sur l'homogénéité des déformations..	51
3.7. Influence de la vitesse de pressage sur la température de la pièce .....	54
<b>Conclusion général</b> .....	<b>59</b>
<b>Références Bibliographiques</b> .....	<b>62</b>



## Listes des figures

<i>Figure 1-1- Représentation schématique du procédé ECAP</i> .....	16
<i>Figure 1-2- Principe de l'ECAP pour un angle <math>\Phi</math> quelconque et : <math>\Psi=0^\circ</math> a), <math>\Psi= (\pi-\Phi)^\circ</math> b) et une valeur arbitraire de <math>\Psi</math> qui se trouve entre <math>\Psi=0</math> et <math>\Psi= (\pi-\Phi)^\circ</math> c).....</i>	17
<i>Figure 1-3- Variation de la déformation équivalente <math>\epsilon_N</math> avec l'angle <math>\Phi</math> pour des différentes valeurs de l'angle de courbure <math>\Psi</math> (après un seul passage dans le coude). ...</i>	18
<i>Figure 2-1- Les différents procédés de formage. ....</i>	22
<i>Figure 2-2- Le module de microstructure. ....</i>	23
<i>Figure 2-3- Les deux représentations géométriques 2D. ....</i>	25
<i>Figure 2-4- La fenêtre d'objets.....</i>	26
<i>Figure 2-5- La géométrie de la pièce. ....</i>	26
<i>Figure 2-6 La base de données sur les matériaux dans DEFORM.....</i>	27
<i>Figure 2-7- Maillage de la pièce.....</i>	28
<i>Figure 2-8- Les différentes matrices utilisées. ....</i>	28
<i>Figure 2-9- Les vitesses d'avancement dans le coude .....</i>	29
<i>Figure 2-10- Fenêtre de coefficient de frottement. ....</i>	30
<i>Figure 2-11- L'étape d'exécution.....</i>	31
<i>Figure 2-12- Affichage des résultats. ....</i>	32
<i>Figure 3-1- Déformation effective moyenne en fonction de l'angle de canal. ....</i>	34
<i>Figure 3-2- Distribution de déformation effective pour une valeur <math>\phi=60^\circ</math>.....</i>	35
<i>Figure 3-3- Distribution de déformation effective pour une valeur <math>\phi=90^\circ</math>.....</i>	36
<i>Figure 3-4- Distribution de déformation effective pour une valeur de <math>\phi=90^\circ</math>.....</i>	36
<i>Figure 3-5- Distribution de déformation effective pour une valeur de <math>\phi=120^\circ</math>.....</i>	37
<i>Figure 3-6- Distribution de déformation effective pour une valeur de <math>\phi=120^\circ</math>.....</i>	37
<i>Figure 3-7- Distribution de la température pour une valeur <math>\phi=60^\circ</math>.....</i>	38
<i>Figure 3-8- Distribution de la température pour une valeur <math>\phi=90^\circ</math>.....</i>	38

<b>Figure 3-9-</b> <i>Distrubition de la température pour une valeur <math>\phi=120^\circ</math>.</i> .....	39
<b>Figure 3-10-</b> <i>Degré d'inhomogénéité en fonction de l'angel de canal.</i> .....	40
<b>Figure 3-11-</b> <i>Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement <math>\mu=0.01</math>.</i> .....	41
<b>Figure 3-12-</b> <i>Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement <math>\mu=0.04</math>.</i> .....	41
<b>Figure 3-13-</b> <i>Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement <math>\mu=0.06</math>.</i> .....	42
<b>Figure 3-14-</b> <i>Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement <math>\mu=0.08</math>.</i> .....	42
<b>Figure 3-15-</b> <i>Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement <math>\mu=0.1</math>.</i> .....	43
<b>Figure 3-16-</b> <i>Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement <math>\mu=0.2</math>.</i> .....	43
<b>Figure 3-17-</b> <i>Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement <math>\mu=0.3</math>.</i> .....	44
<b>Figure 3-18-</b> <i>La déformation effective en fonction de coefficient de frottement.</i> .....	45
<b>Figure 3-19-</b> <i>La variationde l'indice d'inhomogénéité en fonction de coefficient de frottment.</i> .....	46
<b>Figure 3-20-</b> <i>L'espace de coin remplir par la pièce.</i> .....	46
<b>Figure 3-21-</b> <i>Distrubition de la température pour coefficient de frottement <math>\mu=0.01</math> ....</i>	47
<b>Figure 3-22-</b> <i>Distrubition de la température pour coefficient de frottement <math>\mu=0.04</math>. ....</i>	47
<b>Figure 3-23-</b> <i>Distrubition de la température pour coefficient de frottement <math>\mu=0.06</math>. ....</i>	48
<b>Figure 3-24-</b> <i>Distrubition de la température pour coefficient de frottement <math>\mu=0.08</math>. ....</i>	48
<b>Figure 3-25-</b> <i>Distrubition de la température pour coefficient de frottement <math>\mu=0.1</math>. ....</i>	48
<b>Figure 3-26-</b> <i>Distrubition de la température pour coefficient de frottement <math>\mu=0.2</math>. ....</i>	49
<b>Figure 3-27-</b> <i>Distrubition de la température pour coefficient de frottement <math>\mu=0.3</math>. ....</i>	49
<b>Figure 3-28-</b> <i>Distrubition de la température pour coefficient de frottement <math>\mu=0.01</math>. ....</i>	50
<b>Figure 3-29-</b> <i>L'influence du frottement sur l'évolution de température.</i> .....	51

<b>Figure 3-30-Distribution de déformation effective pour une valeur de vitesse <math>v=1\text{mm.s}^{-1}</math>.</b>	52
<b>Figure 3-31-Distribution de déformation effective pour une valeur de vitesse <math>v=5\text{mm.s}^{-1}</math>.</b>	52
<b>Figure 3-32-Distribution de déformation effective pour une valeur de vitesse <math>v=10\text{mm.s}^{-1}</math>.</b>	52
<b>Figure 3-33-Distribution de déformation effective pour une valeur de vitesse <math>v=15\text{mm.s}^{-1}</math>.</b>	53
<b>Figure 3-34-Distribution de déformation effective pour une valeur de vitesse <math>v=20\text{mm.s}^{-1}</math>.</b>	53
<b>Figure 3-35-La vitesse de la pices au couer de deformation .</b>	54
<b>Figure 3-36-Distrubition de la température pour une valeur de vitesse <math>v=1\text{mm.s}^{-1}</math>...</b>	55
<b>Figure 3-37-Distrubition de la température pour une valeur de vitesse <math>v=5\text{mm.s}^{-1}</math>...</b>	55
<b>Figure 3-38-Distrubition de la température pour une valeur de vitesse <math>v=10\text{mm.s}^{-1}</math>.</b>	56
<b>Figure 3-39-Distrubition de la température pour une valeur de vitesse <math>v=15\text{mm.s}^{-1}</math>.</b>	56
<b>Figure 3-40-Distrubition de la température pour une valeur de vitesse <math>v=20\text{mm.s}^{-1}</math>.</b>	56

# INTRODUCTION GENERAL

### Introduction générale

Des procédés de déformation plastique sévère (SPD) comme la presse à pression angulaire égale (ECAP) font actuellement l'objet d'une enquête approfondie en raison de leur potentiel de production de microstructures ultra fines dans les métaux et les alliages. Les matériaux ultrafins présentent des propriétés mécaniques supérieures telles que la haute résistance et la ductilité. Le décès pour ECAP se compose de deux canaux d'une section transversale égale se croisant à un angle spécifié qui varie habituellement entre 90 et 120 degrés. La pièce de travail subit une déformation plastique intense dans une région située dans le coin d'intersection des deux canaux. Une connaissance approfondie de la déformation plastique et de la charge est nécessaire pour comprendre les relations entre la déformation plastique, la taille des grains et les propriétés mécaniques.

L'influence de la géométrie (angle de canal), la condition de frottement et la vitesse de pressage sur l'inhomogénéité du champ de déformation et la température de dans la section transversale de la billette et donc sur la répartition des propriétés mécaniques peut être étudiée par une simulation des éléments finis par le logiciel Deformd 3D.

Il a été largement admis que la méthode d'éléments finis (FEM) est un outil numérique puissant pour la conception des processus ECAP.

Il existe une géométrie (angle de canal) optimum pour lequel inhomogénéité de la déformation est minimale, même pour le coefficient de frottement et la vitesse de pressage.

Dans le présent travail, la simulation des éléments finis du processus ECAP s'effectue à l'aide du logiciel DEFORM 3D. L'angle d'intersection du canal a varié de 60 à 120 degrés. Une pièce de travail rectangle avec une longueur de 60 mm et larguer 10 mm a été considérée pour l'analyse. Le coefficient de frottement entre la matrice et la billette a varié de 0.01 à 0,3. La vitesse de pressage a varié de  $1\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  à  $20\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Les résultats présentés sont très utiles pour comprendre l'effet des paramètres de la technique ECAP sur l'inhomogénéité de déformation.

Ce travail s'articule sur trois (3) parties :

Dans la première partie, Nous présentons les déformations plastiques sévères, et plus précisément le procédé appelé ECAP.

Dans la deuxième partie nous définit le logiciel DEFROM 3D et présentons les étapes de simulation par le mémé logiciel.

Dans la troisième partie nous présentons les résultats obtenus ; L'influence de la géométrie (angle de canal), la condition de frottement et la vitesse de pressage sur

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

l'inhomogénéité du champ de déformation et la température de dans la section transversale de la billette

Nous clôturons cette étude par une conclusion générale et les perspectives qui se sortent de ce travail.

**CHAPITRE 1: EQUAL CHANNEL  
ANGULAR PRESSING (ECAP)**

## Introduction

Les procédés de grandes déformations plastiques sont des techniques prometteuses pour le raffinement de la microstructure des matériaux. La plus connue et la plus répandue est celle de L'extrusion l'ECAE (Equal Channel Angular Extrusion ou Extrusion Coudée à Aires Égales), un procédé qui a été inventé dans l'ex Union Soviétique (Minsk) au début des années 1980 par Segal et al. L'objectif de base, à cette époque-là, était de développer un procédé de mise en forme qui sera capable d'introduire des grands taux de déformation aux billettes par cisaillement simple. Cependant, même si l'objectif a été atteint avec succès, le procédé ECAE connu aussi sous le nom d'ECAP (Equal Channel Angular Pression), a attiré une attention limitée de la part de la communauté scientifique. C'est seulement après dix ans que le procédé a commencé à attirer l'attention des chercheurs dans le monde et des plusieurs d'articles scientifiques ont été publiés dans les plus importants journaux des sciences des matériaux

Au cours de la dernière décennie, le pressage angulaire à canal égal (ECAP) est apparu comme une procédure largement connue pour la fabrication des métaux et d'alliages à grains ultrafins. Ce procédé examine les développements récents liés à l'utilisation de l'ECAP pour le raffinement des grains, y compris la modification de l'ECAP conventionnel pour augmenter l'efficacité du procédé, les techniques de mise à l'échelle de la procédure et le traitement des matériaux difficiles à déformer. Une attention particulière est accordée aux principes de base du traitement ECAP, y compris la déformation imposée dans l'ECAP, les systèmes de glissement, les modèles de cisaillement associés à l'ECAP et les principaux facteurs expérimentaux qui influencent l'ECAP, y compris la géométrie des matrices et les régimes de pressage. Il est démontré que tous ces paramètres fondamentaux et expérimentaux jouent un rôle essentiel dans le raffinement de la microstructure pendant l'opération de pressage. L'attention est portée sur les caractéristiques significatives des microstructures produites par l'ECAP dans les monocristaux, les matériaux poly-cristallins avec des composites monophasés et multiphasés, et les matrices métal-matrice. Il est montré que la formation de grains ultrafins dans les métaux et les alliages sous-tend à une amélioration très significative de leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles. Néanmoins, il est également démontré que, pour obtenir des propriétés avancées après traitement par ECAP, il est nécessaire de contrôler une large gamme des paramètres microstructuraux comprenant les désorientations des limites des grains, la texture cristallographique et les distributions de toutes les deuxièmes phases. Des progrès significatifs ont été réalisés au cours des dernières années dans le développement de l'ECAP, ce qui suggère qu'il existe d'excellentes perspectives pour la future intégration réussie du processus ECAP dans les opérations commerciales de fabrication.



## 1.1. Déformations plastiques sévères

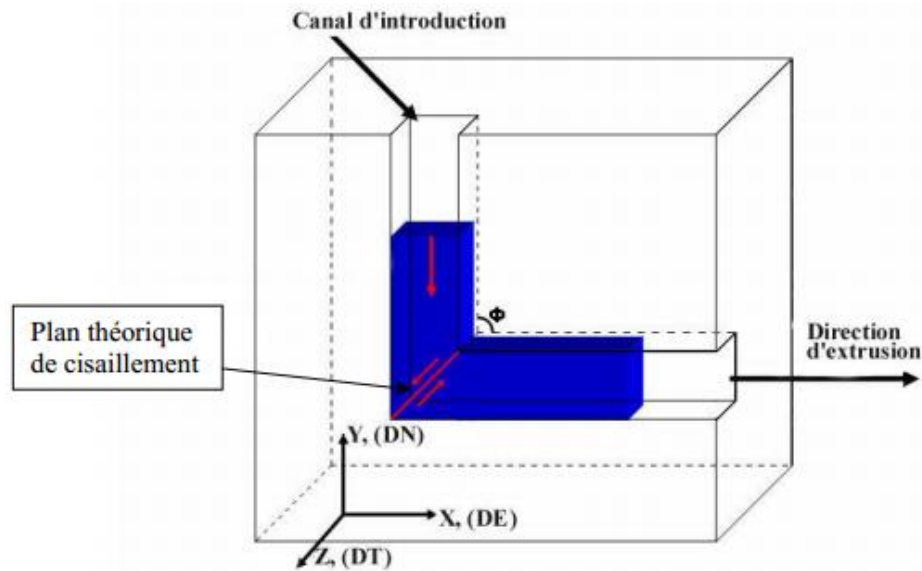
De nombreuses descriptions détaillées des techniques de déformations plastiques sévères. Ces méthodes doivent satisfaire un certain nombre de conditions dans le but de produire des échantillons massifs sous forme nanostructure. Tout d'abord, il est nécessaire d'obtenir des structures présentant des tailles de grains ultrafines avec un grand nombre de joints de grains fortement désorientés, un changement important des propriétés du matériau se produisent [1, 2].

De plus, la formation de nanostructures dans l'intégralité du volume de l'échantillon doit être uniforme afin de permettre aux matériaux d'avoir des propriétés stables. Enfin, bien que les échantillons soient sujets à d'importantes déformations plastiques lors du procédé de SPD, ils ne doivent pas subir de dégâts mécaniques autres que ceux provenant de celui-ci. On définit un matériau comme ayant une taille de grains ultrafine un poly-cristal possédant une taille de grains très petite avec des tailles moyennes inférieures à environ 1  $\mu\text{m}$  [1,2].

## 1.2. Principe du procédé ECAP

Il existe plusieurs articles qui décrivent le procédé fondamental d'écoulement plastique d'un métal pendant l'extrusion ECAP. Ce procédé consiste à extruder d'un échantillon, bien lubrifié, qui est introduit dans le canal vertical d'un coude et ensuite pressé, à l'aide d'un piston, afin de passer dans un deuxième canal ayant la même section transversale et qui forme un angle  $\Phi$  avec le canal d'introduction (**Figure I.1**). L'échantillon sous la forme d'une billette ou d'une barre, est usiné pour s'adapter dans le canal et la matrice, est soumis principalement à une déformation par cisaillement qui est considérée théoriquement comme du cisaillement simple s'exerçant dans le plan de la bissectrice de l'angle  $\Phi$ . Malgré l'introduction d'une déformation très intense lorsque l'échantillon passe à travers le plan de cisaillement, l'échantillon émerge finalement de la filière sans subir de changement dans les dimensions transversales [1,3].

L'échantillon en sortie de canal possède la même géométrie qu'avant déformation, ce processus peut donc être répété pour atteindre des déformations très importantes et ainsi obtenir une taille de grains très fine. Après chaque passe, l'échantillon peut être tourné dans différentes directions et ainsi modifier le chemin de déformation dans l'échantillon. Idéalement, la déformation est localisée dans un plan de cisaillement simple situé à l'intersection des deux canaux. Le frottement entre les matrices outils et l'échantillon doit être minimum pour conserver cet état de déformation « parfait ». Il est constaté expérimentalement que la déformation n'est pas totalement homogène et provoque donc une répartition de la taille de grains dans la section de l'échantillon [1,4].



**Figure 1-1- Représentation schématique du procédé ECAP [4].**

Un échantillon déformé par ECAP est soumis à une forte déformation au cours de chaque passage dans le coude. La grandeur de cette déformation peut être estimée à l'aide d'une méthode analytique basée sur plusieurs configurations du coude ECAP. Ces configurations sont présentées schématiquement dans la **figure 1-2**, où  $\Phi$  est l'angle d'intersection des deux canaux et  $\Psi$  représente l'angle associé à la courbure entre les deux canaux. Les conditions montrées dans la **figure 1-2** correspondent à deux situations limite quand  $\Psi=0^\circ$  et  $\Psi=(\pi-\Phi)^\circ$  pour les deux premiers cas (**Figure 1-2. a et b**) et une situation intermédiaire entre ces deux valeurs pour le troisième cas (**Figure 1-2.c**) [5,6].

Segal et al [6] ont donné les premières expressions pour la déformation équivalente par cisaillement imposée à un échantillon extrudé par ECAP après  $N$  passes dans le coude [4]. Dans son approche l'échantillon a été déformé dans un coude à  $\Psi=0^\circ$  et les effets du frottement ont été négligés (il faut préciser qu'à la place d'une notation  $\Phi$ , l'angle d'intersection a été noté  $2\phi$ ) :

$$\epsilon_N = \frac{2N}{\sqrt{3}} \cot\phi \quad (1.1)$$

Pour la situation présentée dans la **figure 1-2-a**, un petit élément carré qui se trouve à l'entrée du coude, noté **abcd**, pendant son passage dans le plan théorique de cisaillement sera transformé dans un parallélogramme noté **a'b'c'd'**. Il a été démontré que la déformation par cisaillement  $\gamma$  est donnée par l'équation suivante [3] :

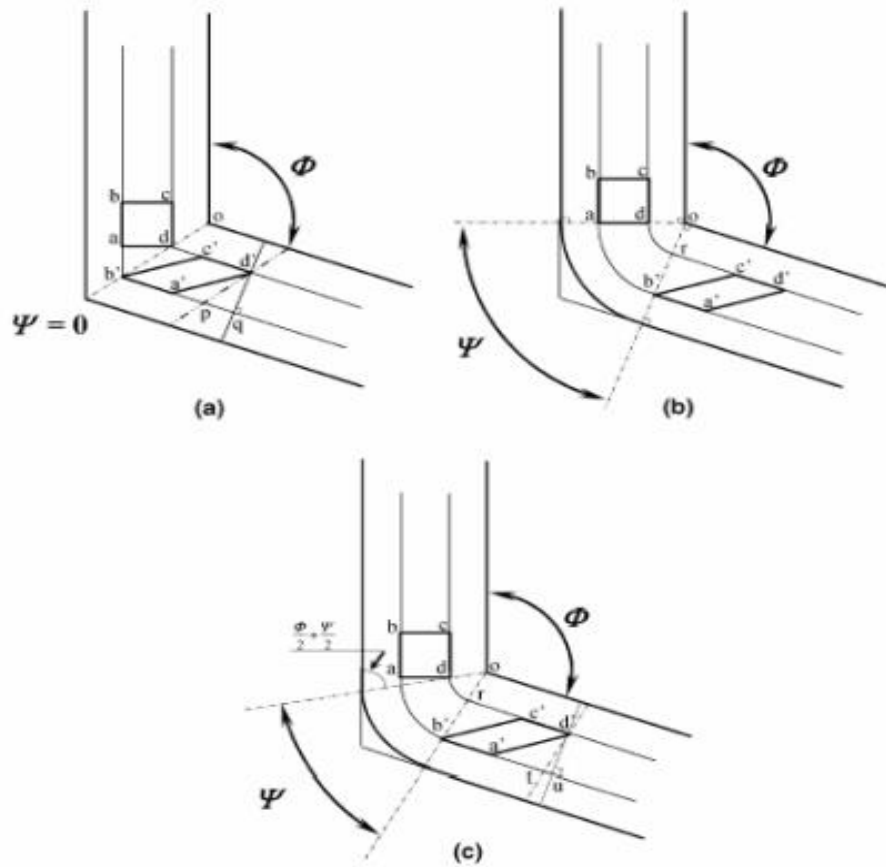
$$\gamma = 2 \cdot \cot\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (1.2)$$

En utilisant la même méthode pour le cas présenté dans la **figure 1-2-b**, on obtient [3] :

$$\gamma = \Psi \quad (1.3)$$

Une analyse similaire pour la situation présentée dans **la figure 1-2-c** amène à :

$$\gamma = 2. \cot \left( \frac{\emptyset}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\emptyset}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \quad (1.4)$$



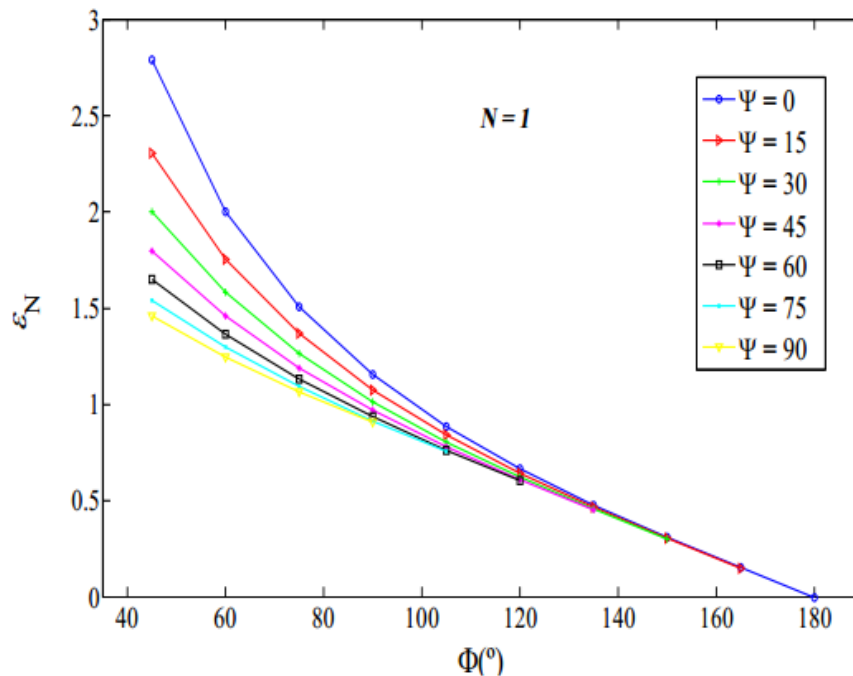
**Figure 1-2-Principe de l'ECAP pour un angle  $\Phi$  quelconque et :  $\Psi=0^\circ$  a),  $\Psi=(\pi-\Phi)^\circ$  b) et une valeur arbitraire de  $\Psi$  qui se trouve entre  $\Psi=0$  et  $\Psi=(\pi-\Phi)^\circ$  c) [3].**

Après une courte inspection il résulte que la solution générale de l'équation (4) est réduite à l'équation (2) quand  $\Psi=0^\circ$  et à l'équation (3) quand  $\Psi=(\pi-\Phi)^\circ$ . Finalement, la déformation équivalente après N passages dans le coude ECAP  $\epsilon_N$ , peut être écrite dans une forme générale par la relation [3].

$$\epsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[ 2. \cot \left( \frac{\emptyset}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\emptyset}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (1.5)$$

Même si les deux méthodes (de Segal et d'Iwahashi et al) amènent à des résultats similaires pour la déformation équivalente, **l'équation (5)** a l'avantage de prendre en compte aussi l'angle de courbure  $\Psi$ . **L'équation (5)** est aussi compatible avec d'autres approches alternatives et fourni une méthode simple et directe pour estimer la déformation équivalente pour des coudes ayant différentes valeurs des angles  $\Phi$  et  $\Psi$  [4].

La **figure 1-3** montre une représentation graphique de **l'équation (5)** qui a été établie premièrement par Iwahashi et al pour des coudes à  $\Phi=90^\circ$  et supérieures à cette valeur. Par la suite, cette représentation a été élargie par Furuno et al pour des coudes ayant des angles  $\Phi$  inférieurs à  $90^\circ$ .



**Figure 1-3-Variation de la déformation équivalente  $\varepsilon N$  avec l'angle  $\Phi$  pour des différentes valeurs de l'angle de courbure  $\Psi$  (après un seul passage dans le coude) [3].**

Plusieurs conclusions peuvent être tirées après une analyse de cette représentation graphique :

- L'angle de courbure  $\Psi$  a une influence relativement faible sur la déformation équivalente sauf pour des coudes ayant des angles  $\Phi$  inférieures à  $90^\circ$ .
- Des déformations exceptionnellement et grandes peuvent être atteintes en une seule passe dans des coudes avec des angles  $\Phi$  et  $\Psi$  petits.
- Pour des coudes conventionnels, avec l'angle  $\Phi=90^\circ$ , la déformation équivalente est proche de  $\sim 1$  pour une seule passe et cette déformation est presque indépendante de l'angle  $\Psi$  [3,4].

## **Conclusion**

Le procédé d'extrusion ECAP présente un vaste champ d'applications dans le domaine de la synthèse et la déformation des matériaux, d'importantes contraintes et le mode de déformation simple contribuant tous deux à des effets importants et uniques sur la structure et les propriétés des alliages étudiés. Cette technique produit diverses modifications structurelles, selon le matériau et les conditions employées : l'affinement de grains jusqu'à l'échelle nanométrique, l'affinement de phases et de particules, la restitution de vides, de pores et d'autres volumes présentant des défauts, l'amélioration de la diffusivité, le contrôle des texturations, le contrôle de la géométrie des structures, la solidification et la création de liens entre les particules, la transformation de phases et l'amélioration de la super-élasticité du matériau.

# CHAPITRE 2: LES TECHNIQUES EXPERIMENTAL

## Introduction

La simulation par la méthode des éléments finis a été réalisée en utilisant le logiciel DEFORM 3D, dans ce chapitre nous commençons par quelques définitions, applications et avantages du logiciel, puis présentons les étapes des simulations que nous suivons dans notre étude.

### 2.1. Le logiciel Deformed 3D

DEFORM est un logiciel de simulation de processus basé sur la méthode des éléments finis (FEM) conçu pour analyser les différents procédés de formage et de traitement thermique utilisés par le formage des métaux et des industries connexes (**figure 2-1**). En simulant les processus de fabrication sur un ordinateur, cet outil avancé permet aux concepteurs et aux ingénieurs de :

- Réduire le besoin d'essais coûteux sur les ateliers et la refonte des outils et des procédés
- Améliorer la conception de l'outil et de la matrice pour réduire les coûts de production et de matériaux
- Raccourcir le temps en avance apportant un nouveau produit sur le Marché

Contrairement à l'usage général des codes FEM, DEFORM est adapté pour la modélisation de la déformation. Une interface utilisateur graphique conviviale permet la préparation et l'analyse des données faciles afin que les ingénieurs puissent se concentrer sur la formation, et non sur l'apprentissage d'un système informatique encombrant. Un élément clé de ce système est le remaillage automatique, optimisé pour les grands problèmes de déformation.

DEFORM-HT ajoute la capacité de modéliser les processus de traitement thermique, y compris la normalisation, le recuit, la trempe, le vieillissement et la carburation. DEFORM-HT peut prédire la dureté, les contraintes résiduelles, la déformation par trempe et d'autres caractéristiques mécaniques et matérielles importantes pour ceux qui traitent thermiquement [7].

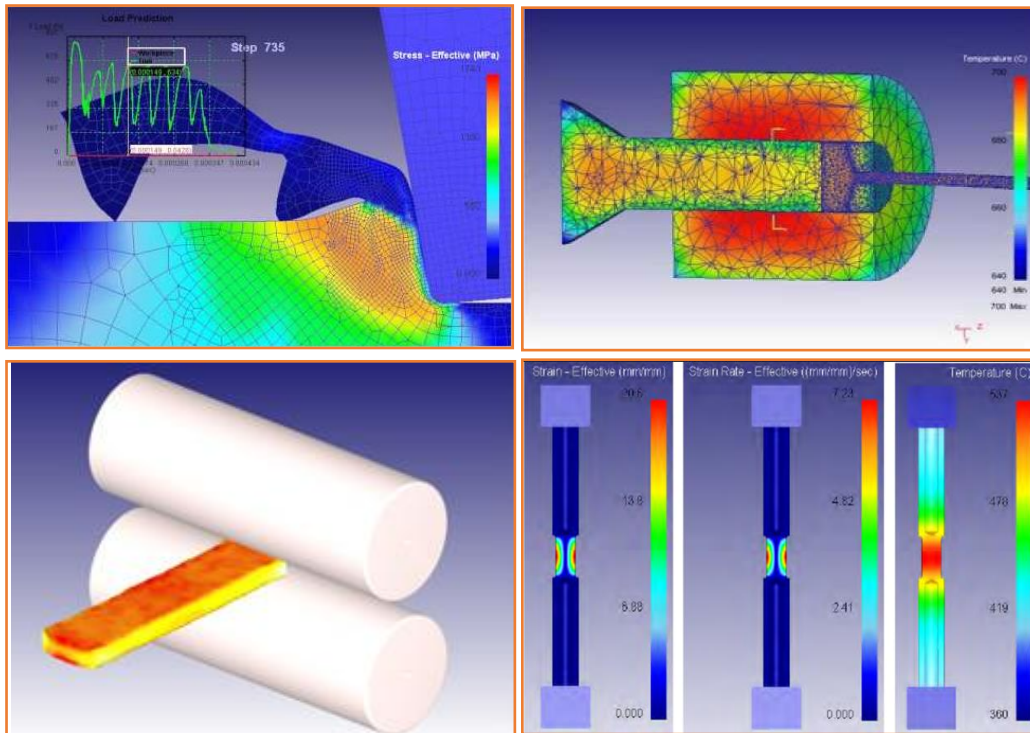


Figure 2-1-Les différents procédés de formage[7].

**DEFORM-2D (2D)**

Disponible sur toutes les plates-formes UNIX populaires ainsi que sur des ordinateurs personnels exécutant Windows. Capable de modéliser la déformation plane ou les pièces axisymétriques avec un modèle bidimensionnel simple. Un ensemble complet de fonctions contenant les dernières innovations dans la modélisation des éléments finis, également adapté aux environnements de production ou de recherche.

**DEFORM-3D (3D)**

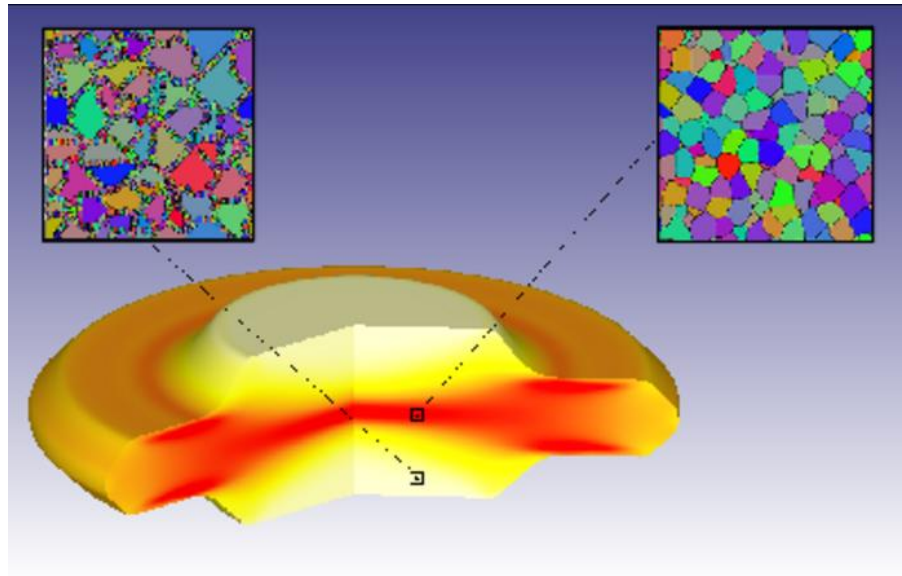
Disponible sur toutes les plates-formes populaires UNIX, ainsi que des ordinateurs personnels exécutant Windows. DEFORM-3D est capable de modéliser des modèles de flux de matériaux tridimensionnels complexes. Idéal pour les pièces qui ne peuvent être simplifiées à un modèle bidimensionnel.

**DEFORM-HT**

Disponible en tant que publicité sur DEFORM-2D et -3D. En plus des capacités de modélisation de déformation, DEFORM-HT permet de modéliser les effets d'un traitement thermique, y compris la dureté, la fraction volumique de la structure métallique, la déformation, la contrainte résiduelle et la teneur en carbone. Les procédés typiques de traitement thermique comprennent : - la normalisation - l'austénisation - la cémentation - les traitements de mise la solution - la trempe - le revenu - le vieillissement - le module de microstructure élargit les capacités de DEFORM-2D et DEFORM-3D pour



inclure une large gamme d'informations sur la microstructure et la mécanique des propriétés (**figure 2.2**). Deux approches pour la modélisation de l'évolution de la microstructure lors du traitement thermomécanique sont implémentées dans DEFORM.



*Figure 2-2-Le module de microstructure[7].*

## 2.2. Avantages

- Modélisation couplée de la déformation et du transfert de chaleur pour la simulation de procédés de forgeage à froid, chaud ou chaud.
- Base de données exhaustive sur les matériaux pour de nombreux alliages courants, y compris les aciers, les aluminures, les titanes et les superalliages.
- Entrée de données matérielles définies par l'utilisateur pour tout matériau non inclus dans la base de données matérielle.
- Informations sur le flux de matière, le remplissage de la matrice, la charge de forgeage, la contrainte de la charge, le flux des grains, la formation des défauts et la rupture ductile.
- Modèles rigides, élastiques et matériaux thermo-viscoplastiques, idéaux pour la modélisation de grande déformation.
- Modèle en matière plastique élastique pour le stress résiduel et les problèmes de rappel.
- Modèle de matériel poreux pour la modélisation de la formation de produits métallurgiques en poudre
- Les modèles de démarrage et de propagation des fissures basés sur des facteurs de dégâts bien connus permettent la modélisation du cisaillement, du blocage, du perçage et de l'usinage (2D), La normalisation, le recuit, la trempe, la trempe et la cémentation.

- DEFORM propose une interaction complexe entre la déformation, la température et, dans le cas du traitement thermique, de la transformation et de la diffusion. Il existe un couplage entre tout le phénomène, comme illustré dans la figure ci-dessous. Lorsque les modules appropriés sont autorisés et activés, ces effets de couplage comprennent le chauffage dû aux travaux de déformation, à l'adoucissement thermique, à la transformation à température contrôlée, à la chaleur de transformation latente, à la plasticité de la transformation, aux souches de transformation, aux effets de stress sur la transformation et aux effets de la teneur en carbone sur toutes les propriétés du matériau [7].

### 2.3. Les étapes de simulation

L'approche générale consiste à définir la géométrie et le matériau de la pièce d'œuvre initiale dans DEFORM, puis simuler séquentiellement chaque processus qui doit être appliqué à la pièce à usiner.

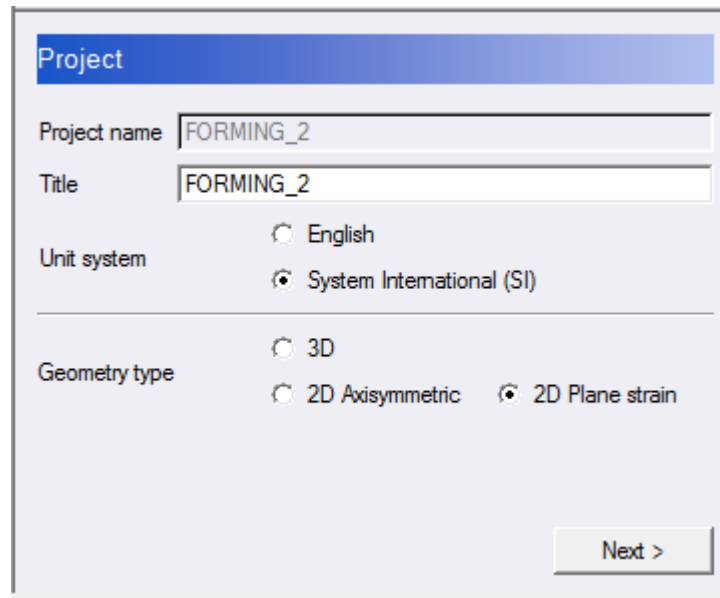
#### 2.3.1. Choix de représentation géométrique

Les simulations DEFORM peuvent être exécutées en tant que modèles bidimensionnels ou tridimensionnels (3D). En général, les modèles 2D sont plus petits, plus faciles à configurer et fonctionnent plus rapidement que les modèles 3D. Souvent, les détails ajoutés d'un modèle 3D ne valent pas le temps additionnel requis sur une simulation 2D si le processus peut raisonnablement être représenté dans 2D.

Il existe deux représentations géométriques 2D :

**Le modèles axio-métriques** : l'objet en coupe transversale par rapport à l'axe central. Par conséquent, le modèle exige que la géométrie de déformation soit symétrique axialement et dans le premier quadrant et le quatrième quadrant (c'est-à-dire  $X > 0$ ). En outre, le système suppose que l'écoulement dans chaque plan radial est identique. (**Figure 2-3**).

**Le modèle déformation- plan** : suppose que la géométrie d'avoir une profondeur de l'unité avec les deux faces avant et arrière limitées. La simulation suppose que les objets se comportent de façon identique dans toute section transversale donnée à travers la largeur et la hauteur de l'objet. (**Figure 2-3**).



*Figure 2-3-Les deux représentations géométriques 2D.*

Dans notre simulation ont choisi les modèles bidimensionnelles (2D) et les représentations géométriques **déformation- plan**.

On peut Simuler les effets thermiques au sein de la simulation, y compris le transfert de chaleur entre les objets et l'environnement, et la génération de chaleur due à une déformation.

On choisit de suivre la température de la pièce pendant la déformation et négligé le phénomène de Transfer de chaleur entre la pièce et la matrice.

Le système DEFORM résout les problèmes non linéaires dépendants du temps en générant une série de solutions FEM à des incréments discrets. À chaque incrément de temps, les vitesses, les températures et les autres variables clés de chaque nœud dans le maillage des éléments finis sont déterminées en fonction des conditions limites et des propriétés thermomécaniques des matériaux de la pièce à usiner. D'autres variables d'état sont dérivées de ces valeurs clés et mises à jour pour chaque incrément de temps. La longueur de cette étape du temps et le nombre d'étapes simulées sont déterminés en fonction des informations spécifiées dans le menu des contrôles des étapes.

La fenêtre d'objets contient toutes les données spécifiques à l'objet telles que la géométrie, le maillage, les conditions aux limites, le mouvement et les conditions initiales pour tous les objets d'une simulation (**figure 2-4**).

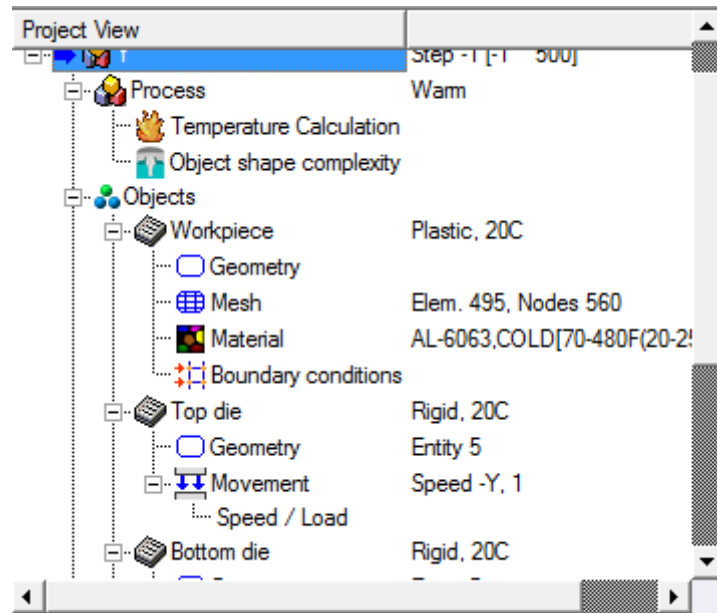


Figure 2-4-La fenêtre d'objets.

### 2.3.2. Définir la géométrie de la pièce

La pièce à usiner et chaque pièce d'outillage doivent être identifiées comme un objet unique et avoir un numéro et un nom d'objet codés. Le nom de l'objet est une chaîne de jusqu'à 64 caractères. Il est fortement recommandé que cela soit réglé sur quelque chose de significatif (p. Ex. Punch, die, workpiece) (figure 2-5).

La pièce utilisée pour la simulation était de forme rectangle avec une longueur de 60 mm et larguer 10 mm

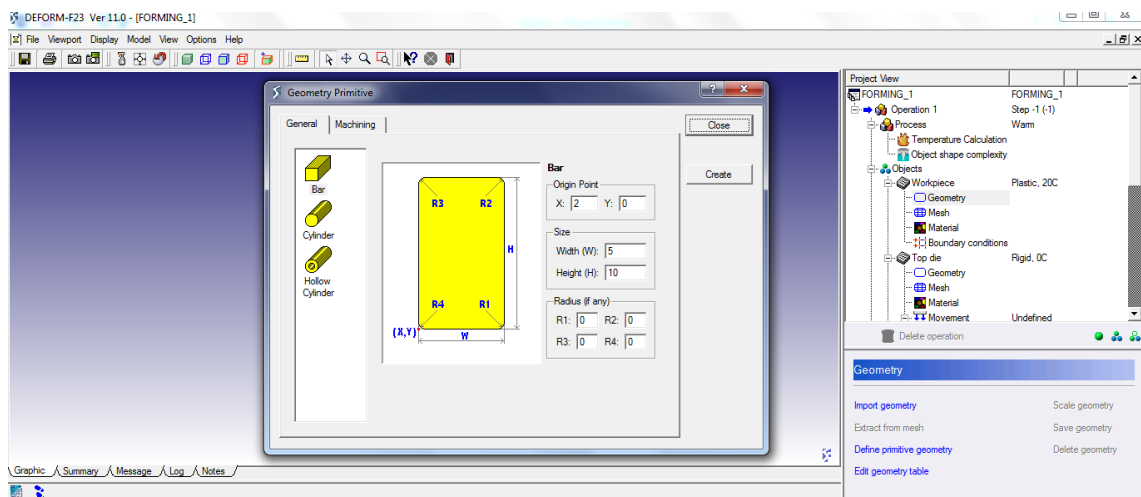


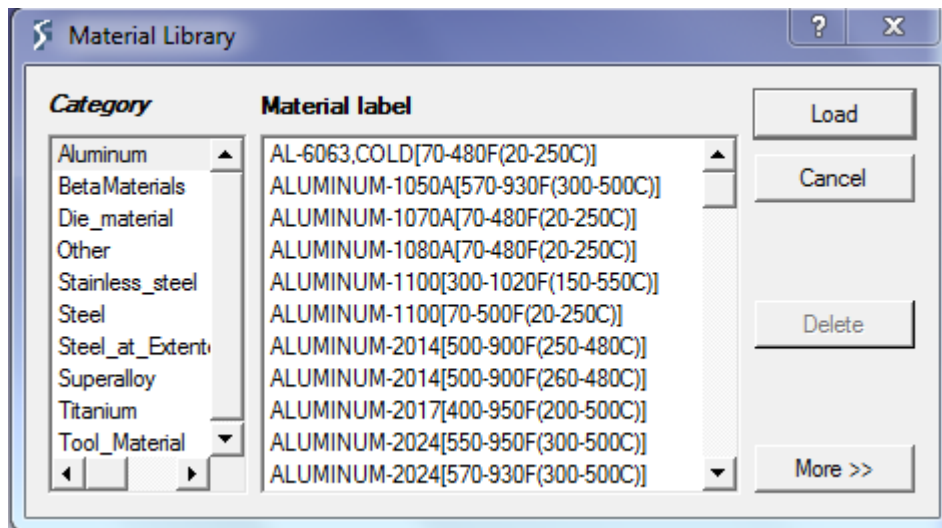
Figure 2-5-La géométrie de la pièce.

### 2.3.3. Choix de matériaux de la pièce

Pour qu'une simulation puisse atteindre un haut niveau de précision, il est important d'avoir une compréhension des propriétés matérielles nécessaires pour spécifier un matériau en DEFORM. Les propriétés matérielles que l'utilisateur doit spécifier sont la fonction des types de matériaux que l'utilisateur utilise dans la simulation.

Il existe une base de données exhaustive sur les matériaux pour de nombreux alliages courants, y compris les aciers, les aluminures, le titane et les superalliages (**figure 2-6**).

Dans notre étude on choisit l'alliage d'aluminium 6063 trouve dans DEFORM.



*Figure 2-6 La base de données sur les matériaux dans DEFORM.*

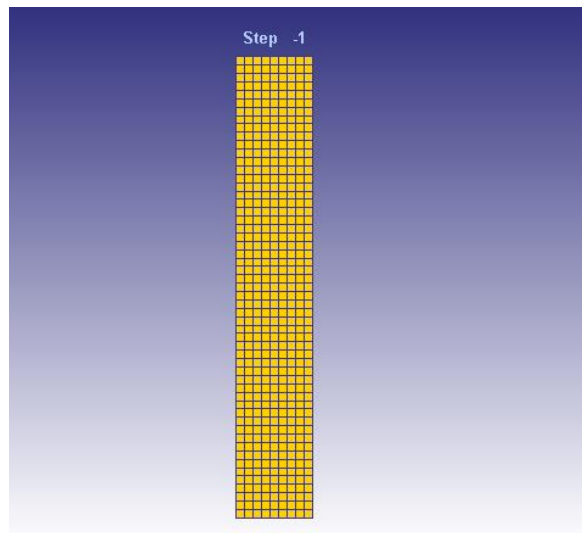
### 2.3.4. Maillage

La fenêtre Mesh Génération permet à l'utilisateur de générer un maillage pour l'objet en cours. L'utilisateur dispose de deux méthodes de contrôle de la densité du maillage :

La méthode définie par le système utilise un système de poids et des fenêtres affectées pour contrôler la taille des éléments lors de la génération initiale du maillage et des réémissions automatiques ultérieures.

User-Defined permet à l'utilisateur de spécifier certaines zones sur l'objet a ont des densités d'éléments plus élevées par rapport à d'autres zones de l'objet pendant la génération de maillage initiale uniquement.

Dans notre étude on choisit le maillage automatique.

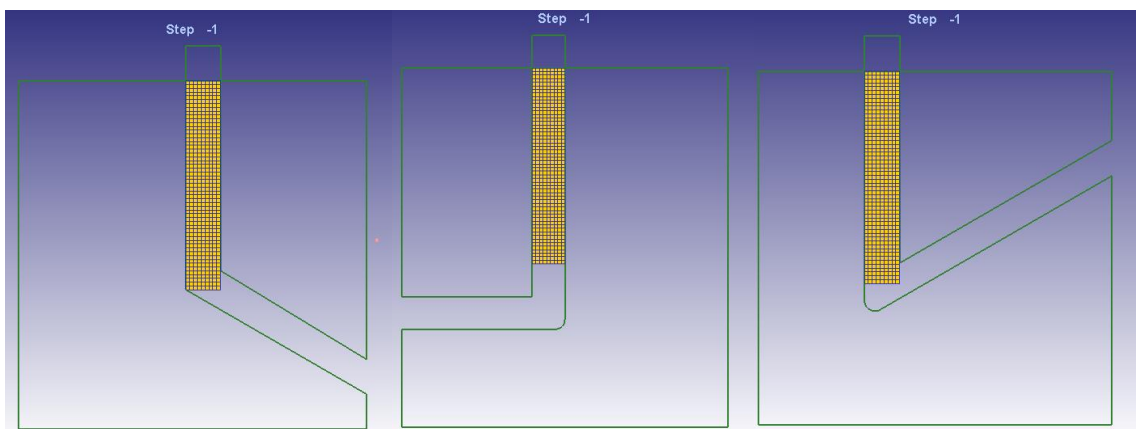


*Figure 2-7-Maillage de la piece.*

### 2.3.5. Définir la géométrie de la matrice

Les objets rigides sont modélisés comme des matériaux non déformables. Dans l'analyse de déformation, la géométrie de l'objet est représentée par un profil géométrique (DIEGEO). Les données de la solution de déformation disponibles pour les objets rigides incluent la charge et la vitesse de l'objet. Le profil géométrique est utilisé pour toute analyse de déformation et le maillage de l'objet rigide est utilisé pour tous les calculs thermiques, de transformation et de diffusion.

Pour étudier l'influence de l'angle sur l'inhomogénéité de déformation on définit trois matrices (Bottom die et die 3) des angles différents plus le poinçon (top die ou punch). La matrice et le poinçon sont définis comme un objet rigide. Les matrices utilisées dans la simulation sont représentées dans la **figure 2-8**.



*Figure 2-8- Les différentes matrices utilisées.*

### 2.3.6. Contrôles de mouvement

Les contrôles de mouvement peuvent être appliqués à des objets rigides (dans notre simulation le poinçon ou punch) et à des nœuds frontaux d'objets maillés (la pièce). La surface définie par ces nœuds peut être considérée comme une "surface rigide". Au cours de la simulation, les nœuds contraints se déplacent de manière synchrone dans la vitesse et la direction définies par les contrôles de mouvement.

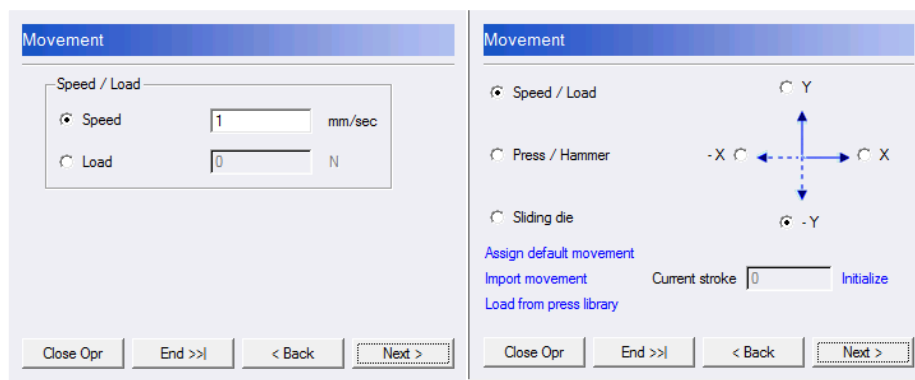
C'est le contrôle de mouvement par défaut. Ceci spécifie la vitesse et la direction d'un outil. La vitesse peut être définie comme une constante, ou en fonction du temps ou de l'accident vasculaire cérébral.

Pour étudier l'influence de la vitesse de pressage sur la distribution de la déformation par FEM. On choisit une vitesse constante pour chaque simulation (**figure 2-9**).

Typiquement, les vitesses d'avancement dans le coude sont dans le domaine  $\sim 1-20 \text{ mm} \cdot \text{S}^{-1}$ .

Les valeurs des vitesses sont :

$1 \text{ mm} \cdot \text{S}^{-1}$ ,  $5 \text{ mm} \cdot \text{S}^{-1}$ ,  $10 \text{ mm} \cdot \text{S}^{-1}$ ,  $15 \text{ mm} \cdot \text{S}^{-1}$  et  $20 \text{ mm} \cdot \text{S}^{-1}$ .



*Figure 2-9- Les vitesses d'avancement dans le coude .*

### 2.3.7. Coefficient de frottement

Le coefficient de frottement spécifie le frottement à l'interface entre deux objets. Le coefficient de frottement peut être spécifié comme une constante, une fonction du temps ou une fonction de la pression de l'interface. Les types de friction sont autorisés cisaillement constant, le frottement de Coulomb, et une contrainte de cisaillement constante (**figure 2-10**).

Le frottement constant par cisaillement est principalement utilisé pour les simulations de formage. La force de friction dans la définition de cisaillement constante est définie par relation :

$$f_s = m k \quad (\text{II.1})$$

Où  $f_s$  est la contrainte de frottement,  $k$  est la limite d'élasticité de cisaillement et  $m$  est le facteur de friction. Ceci indique que le frottement est fonction de la limite d'élasticité du corps de déformation.

Le lubrifiant utilisé sur l'outillage joue un rôle important dans la quantité de frottement qui existe entre l'outillage et la pièce. Le frottement affecte à son tour l'écoulement de métal au niveau des surfaces de contact.

Valeurs typiques (en cisaillement constant seulement) :

(0,08-0,1) pour les processus de formage à froid.

(0,2) pour les processus de formage à chaud.

(0,2 à 0,3) pour les procédés de formage à chaud lubrifiés.

(0.7-0.9) for unlubricated surfaces.

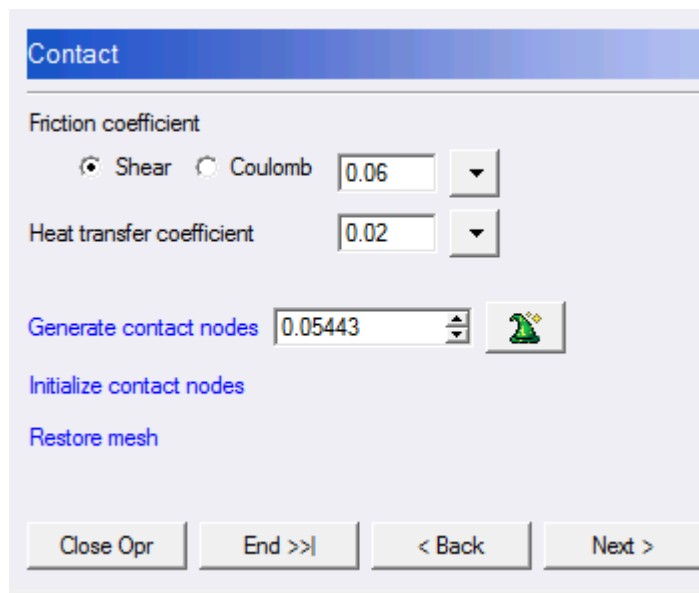


Figure 2-10- Fenêtre de coefficient de frottement.

### 2.3.8. Exécution de simulations

DEFORM est généralement exécuté en mode Batch. Dans certains cas, il est souhaitable de regarder le comportement d'itération dans le fichier de message pendant la



simulation est en cours d'exécution. (Par exemple, une simulation qui ne converge pas bien peut être arrêtée avant qu'il ne passe par toutes les itérations). Exécution de la simulation en mode interactif affiche des informations de fichier de message directement à l'écran afin qu'il puisse être vu en temps réel (figure 2-11).

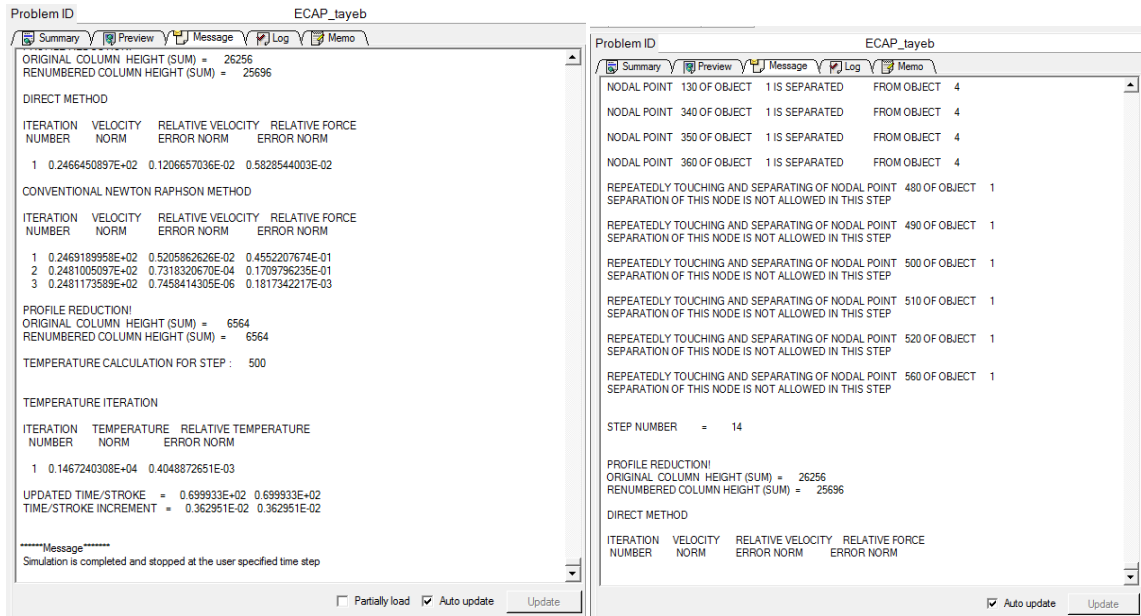
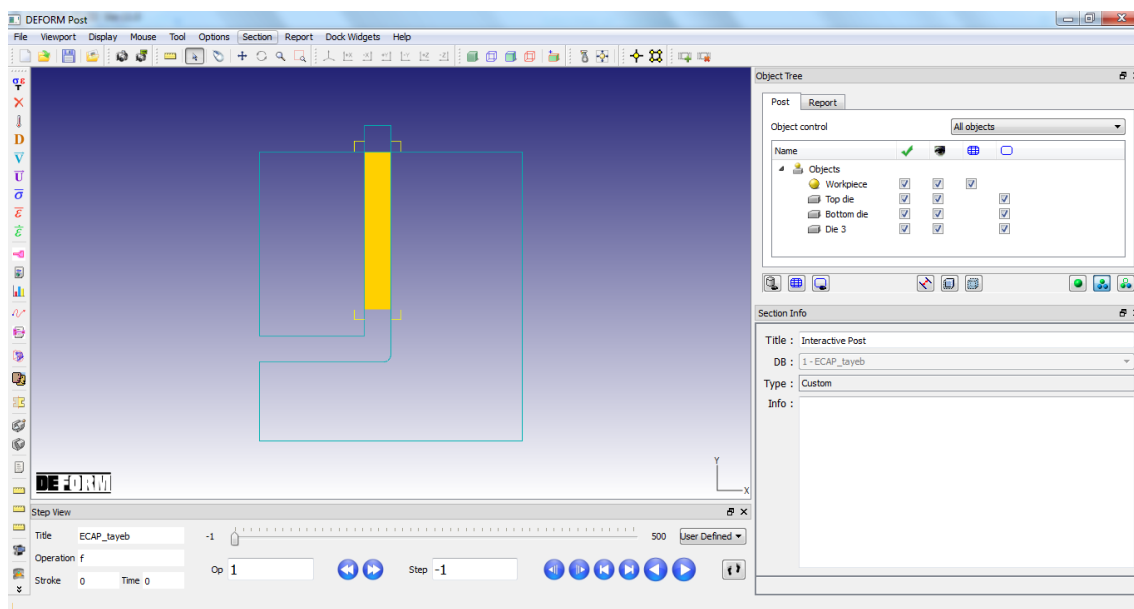


Figure 2-11-L'étape d'exécution.

### 2.3.9. DEFORM-Post

DEFORM-Post est utilisé pour afficher et extraire des données des résultats de simulation dans le fichier de base de données. Toutes les étapes de résultats qui sont enregistrées par le moteur de simulation sont disponibles dans le post-processeur. Les informations qui sont disponibles à partir du post-processeur comprennent :

- Géométrie déformée, y compris les mouvements d'outils et la maille déformée à chaque étape
- Plages de contour : Les contours de ligne ou ombrés affichent la distribution de tout état variables, y compris le stress, la déformation, la température, les dommages et autres.
- Les vecteurs de déplacement et de vitesse indiquent la grandeur et direction de déplacement ou de vitesse pour chaque nœud à chaque étape tout au long du processus.
- Graphique de toute variable d'état entre deux points qui peuvent être spécifiés par l'utilisateur. Ces points peuvent suivre la limite ou suivre linéairement la ligne formée entre les points.



*Figure 2-12-Affichage des résultats.*

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel DEFORM utilisé dans la réalisation de notre simulation et les étapes de simulation.

# CHAPITRE 3: RESULTANTS ET DISCUSSION

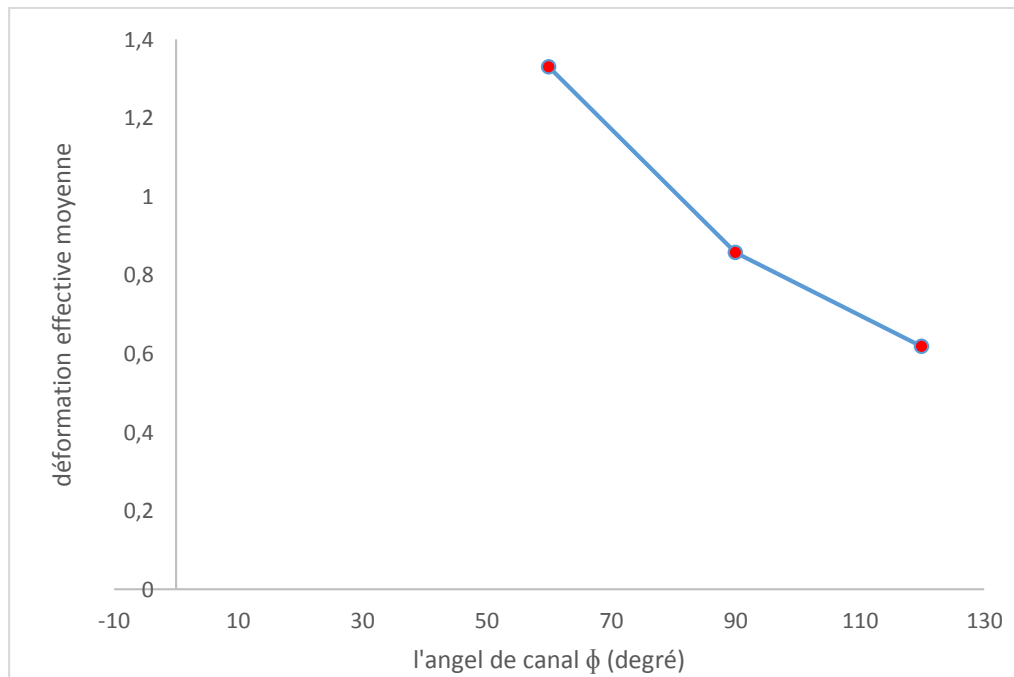
## Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats de simulation pour chaque paramètre. Les différents résultats seront interprétés en relation avec d'autres travaux et informations recueillies dans la bibliographie.

### 3.1. Influence de l'angle du canal sur l'homogénéité des déformations

L'angle d'intersection du canal  $\phi$  est le paramètre le plus important car il dicte la quantité de déformation par passe ECAP que la matrice peut imposer à la pièce à usiner.

Dans la **Figure 3-1-**, chaque augmentation de  $10^\circ$  dans la valeur de  $\phi$  réduit la valeur de la déformation effective de  $\gamma$  15%.



**Figure 3-1-Déformation effective moyenne en fonction de l'angle de canal.**

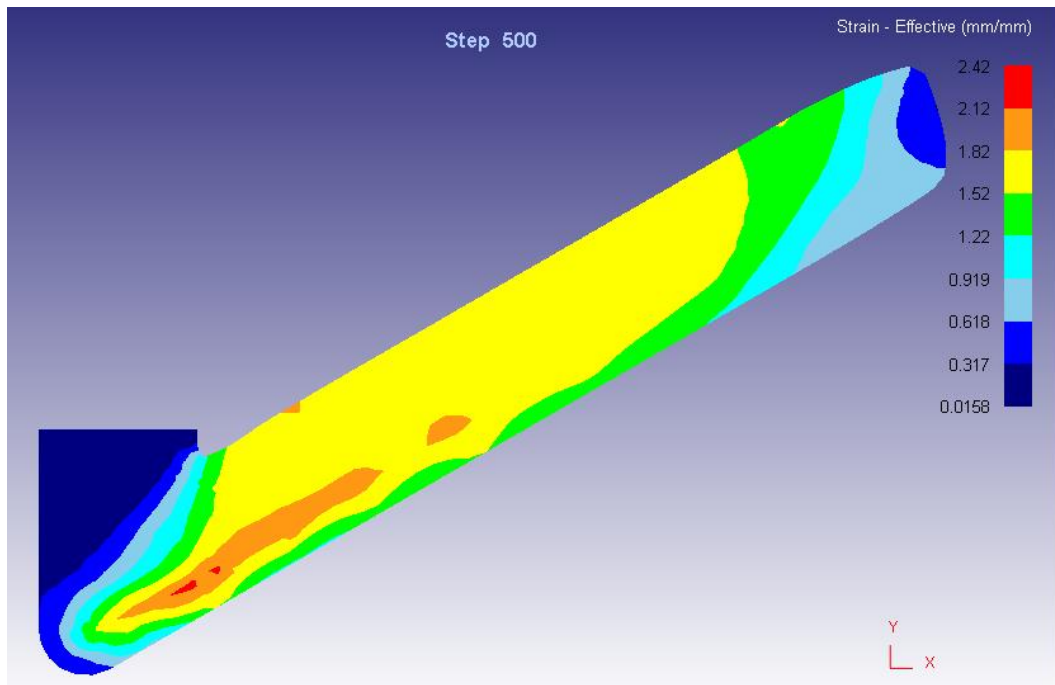
La distribution efficace de la déformation dans la section longitudinale (X Plane) est représentée sur les **Figure 3-2,3,4,5 et 6** révèle que la partie médiane de la pièce de travail déformée présente des distributions de déformation relativement stables tandis que les parties avant et à la fin présentent une grande inhomogénéité de déformation. Il est également constaté que la longueur des régions avant et à la fin avec des déformations très faibles est approximativement égale à la largeur ou diamètre de la pièce à usiner.

La section de matériau à très faible déformation à l'avant de la pièce est due à la partie du matériau qui se trouve en dehors de la zone de cisaillement dès le début du processus ECAP. En ce qui concerne la partie finale, le matériau a des déformations très faibles car il n'a pas encore traversé la zone de cisaillement à la fin du processus ECAP.

Par conséquent, il est recommandé d'écarter une longueur minimale égale à la largeur ou au diamètre d'une pièce à la fois pour les régions avant et les extrémités pour obtenir une pièce finale avec déformation constante dans le sens de la longueur.

En outre, la longueur de la région de déformations constante dans la section longitudinale peut être augmentée avec une pièce à usiner plus longue et la longueur d'une pièce doit être préférable d'au moins cinq fois sa largeur ou son diamètre.

Les résultats de simulation de distribution de la déformation plastique équivalente de la section longitudinale, pour diverses valeurs de la vitesse de pressage. (Paramètre de simulation  $v=1\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  ;  $\mu=0.08$  ;  $T_0=20\text{C}^0$ ).



*Figure 3-2-Distribution de déformation effective pour une valeur  $\phi=60^\circ$ .*

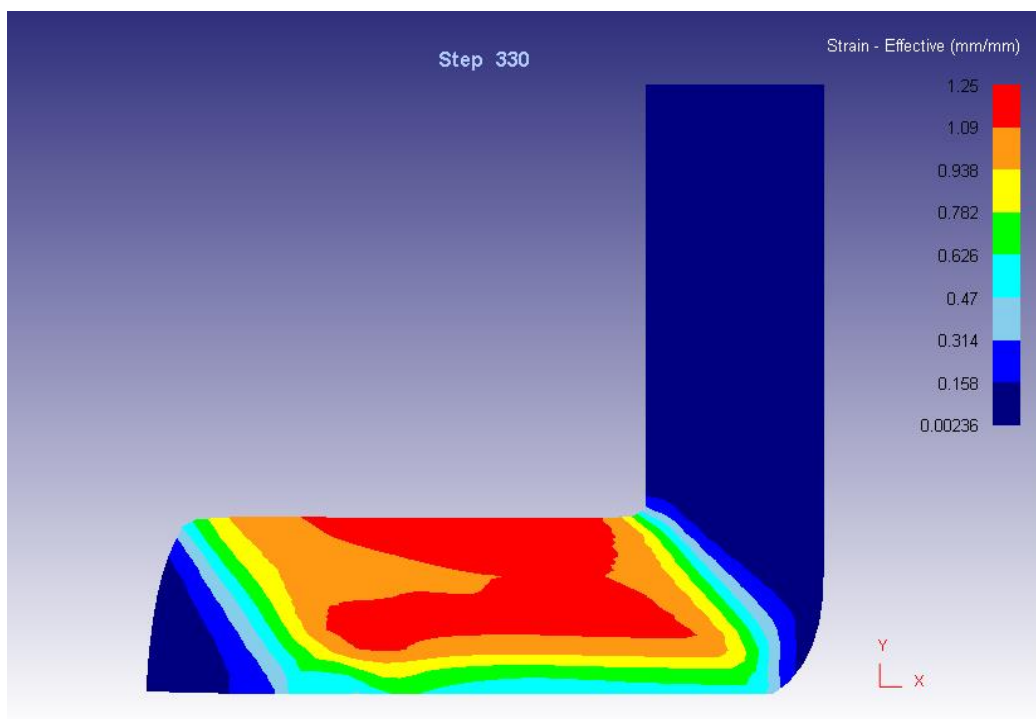


Figure 3-3-Distribution de déformation effective pour une valeur  $\phi=90^\circ$ .

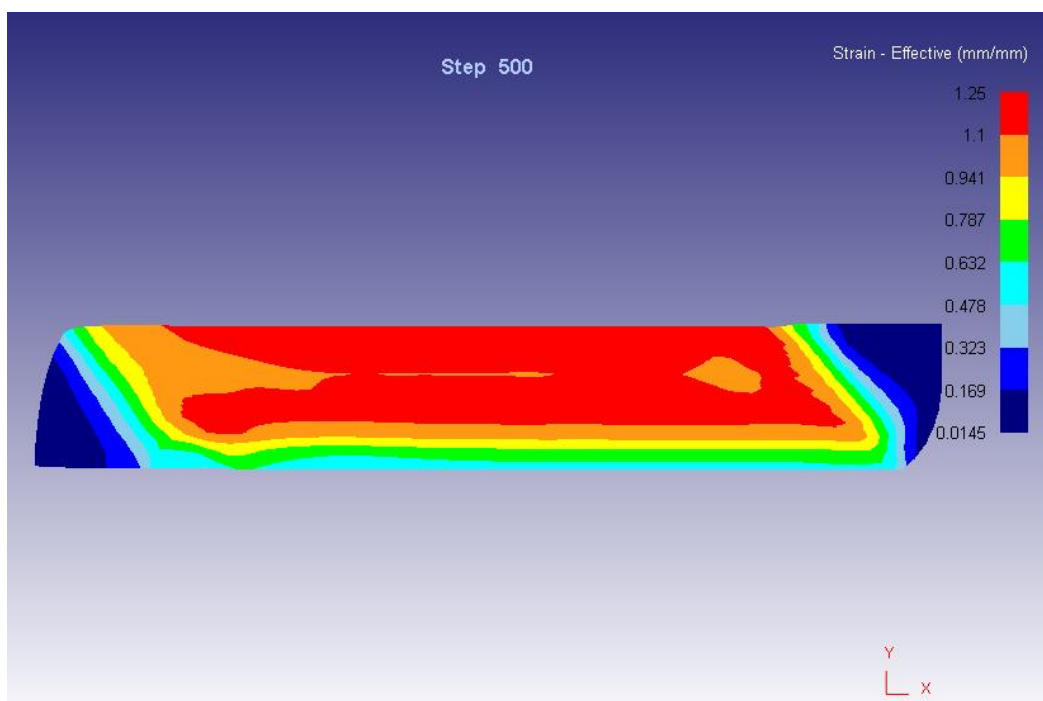


Figure 3-4-Distribution de déformation effective pour une valeur de  $\phi=90^\circ$ .

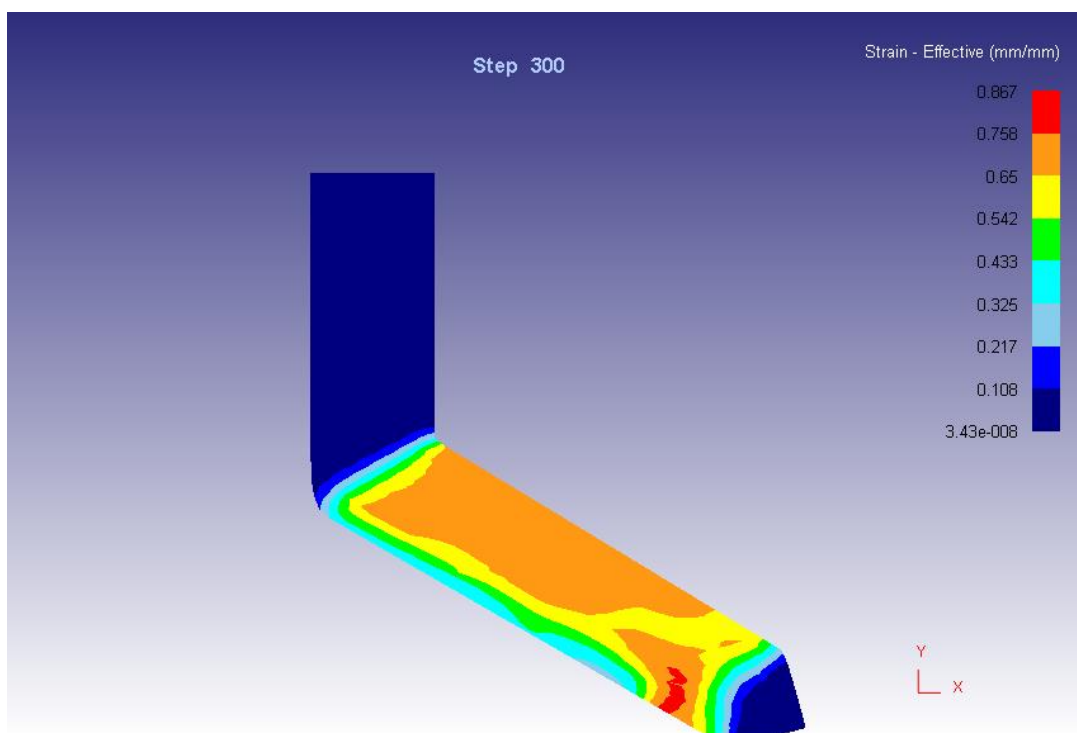


Figure 3-5-Distribution de déformation effective pour une valeur de  $\phi=120^\circ$ .

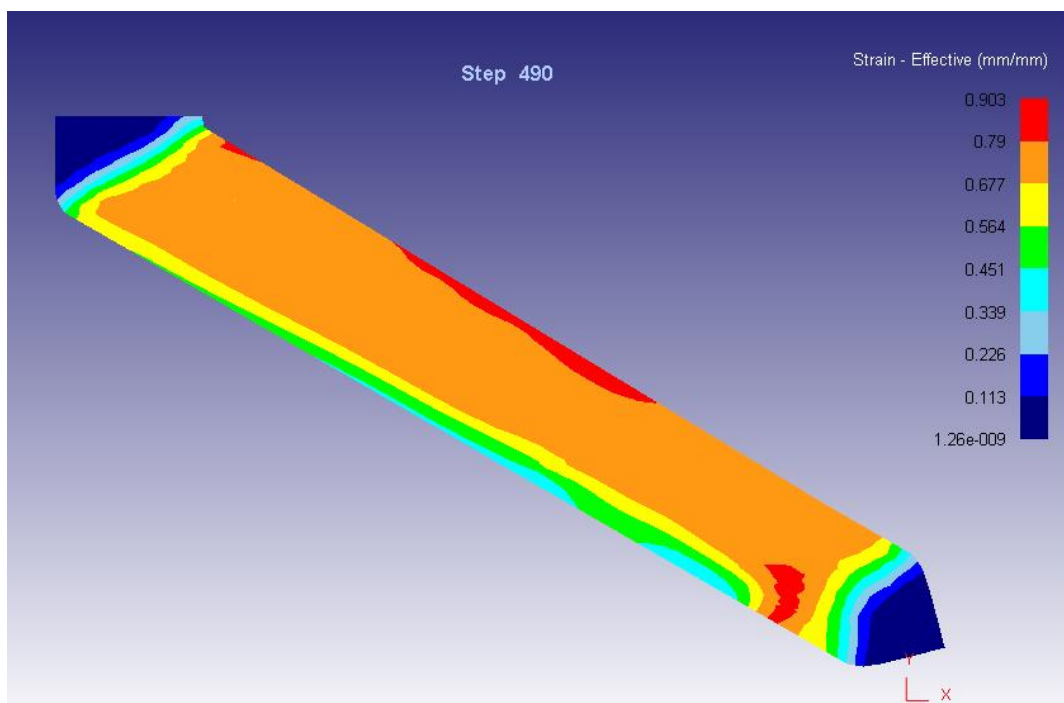
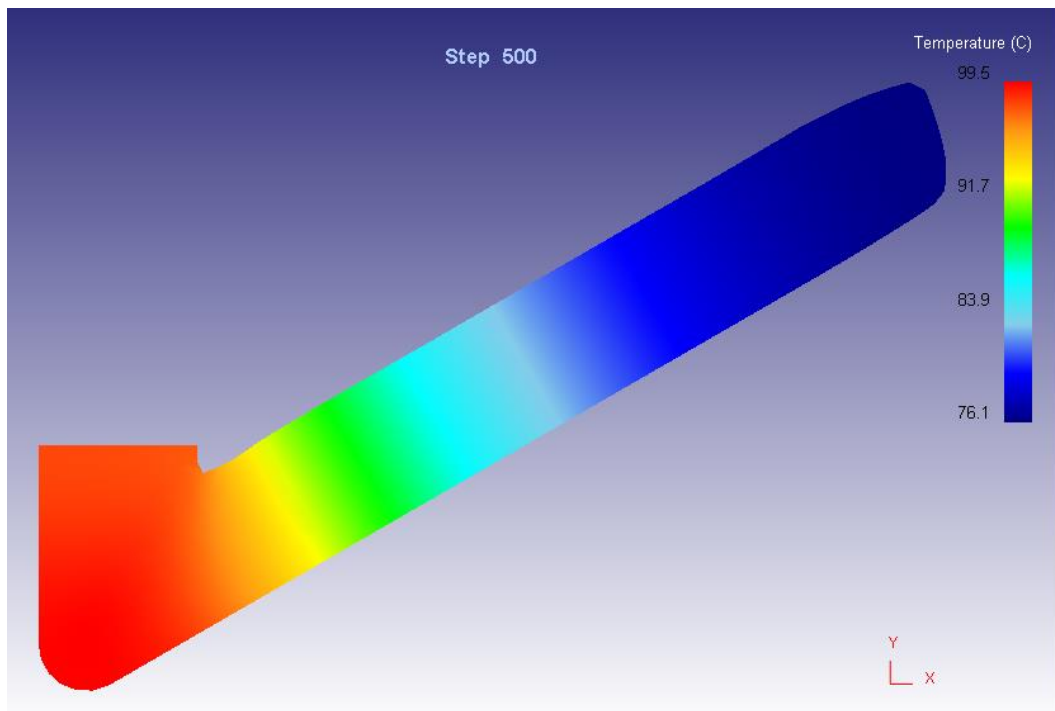


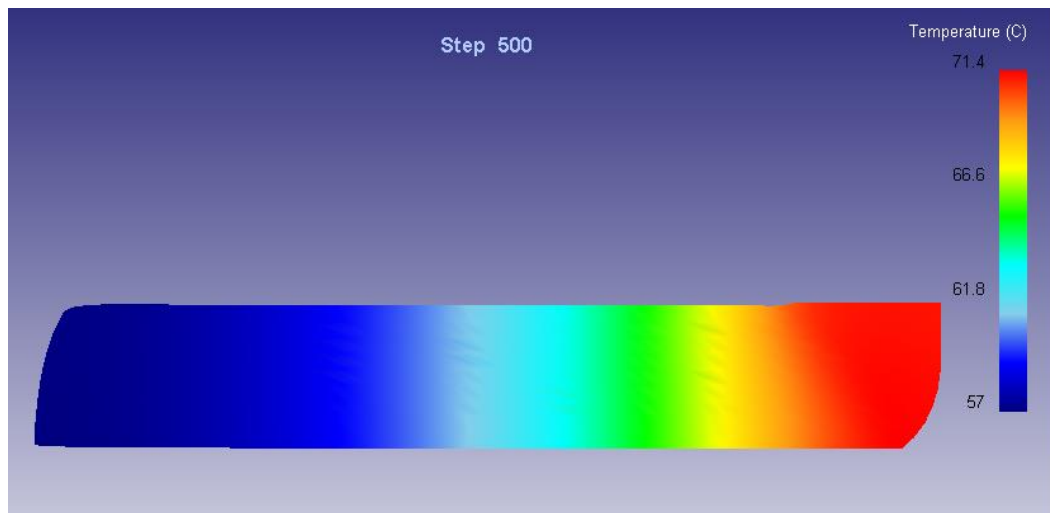
Figure 3-6-Distribution de déformation effective pour une valeur de  $\phi=120^\circ$ .

### 3.2. Influence de l'angle du canal sur la température de la pièce

Les résultats de simulation de distribution de la déformation plastique équivalente de la section longitudinale, pour diverses valeurs de la vitesse de pressage sont présente dans les **figures 3-7,8,9**. (Paramètre de simulation  $v=1\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  ;  $\mu=0.08$  ;  $T_0=20\text{C}^0$ ).



*Figure 3-7-Distrubition de la température pour une valeur  $\phi=60^\circ$ .*



*Figure 3-8-Distrubition de la température pour une valeur  $\phi=90^\circ$ .*



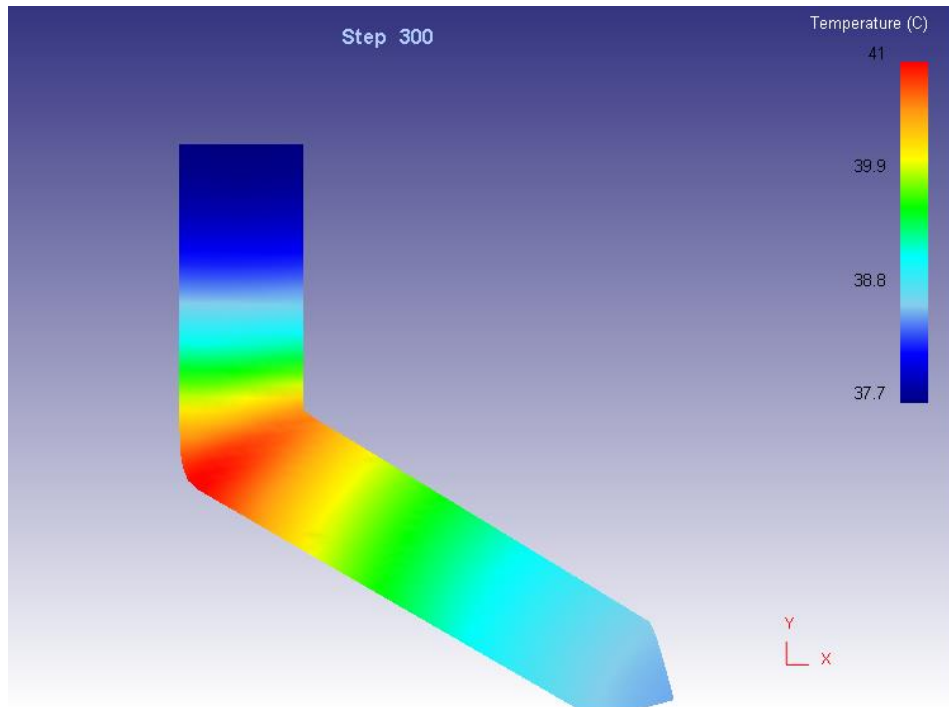


Figure 3-9-Distribution de la température pour une valeur  $\phi=120^\circ$ .

Comme on peut le voir, la répartition de la température dans l'échantillon n'est pas uniforme. La température maximale se situe dans la zone d'intersection des deux canaux. En outre, la température diminue avec une augmentation de distance de la zone de déformation. La comparaison montre que la distribution de la température dans l'échantillon ne change pas avec la modification de l'angle du canal entre les échantillons et le canal de matrice.

En augmentant l'angle du canal, la température de différentes régions de l'échantillon est augmentée.

### 3.3. L'indice d'inhomogénéité de déformation

La déformation moyenne dans le corps de la pièce peut être obtenu par

$$\epsilon_m = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i}{n} \tag{3-1}$$

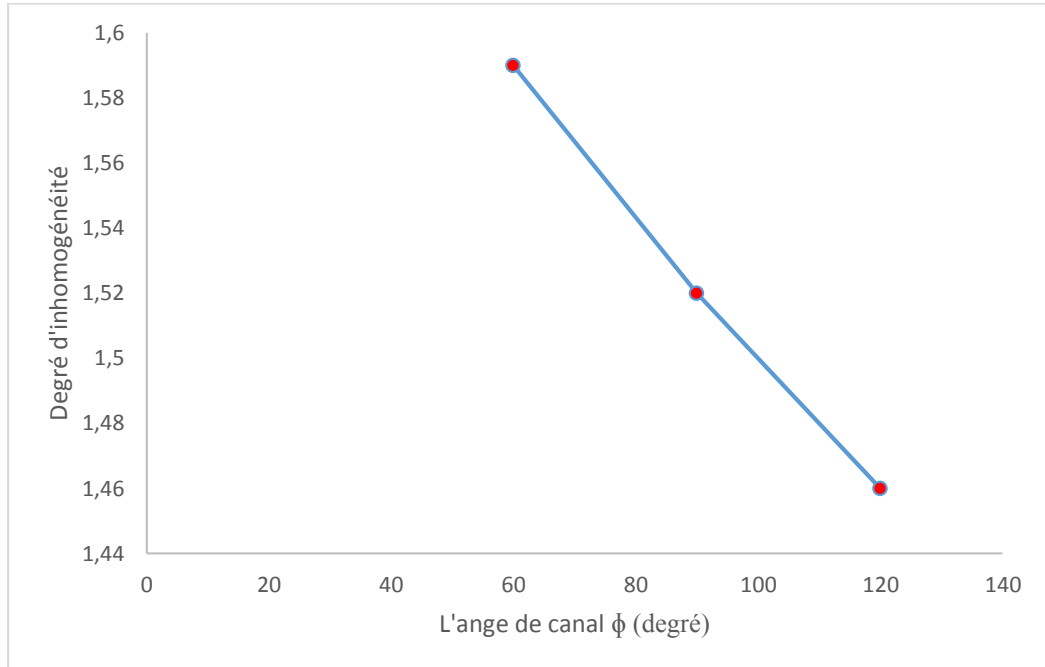
Où n est le nombre d'éléments dans le corps de la pièce de travail et  $\epsilon_i$  est la déformation plastique équivalente à l'élément i [8].

L'indice d'inhomogénéité (Ci) peut être déterminé par relation suivante :

$$C_i = \frac{MAX_\epsilon - MIN_\epsilon}{\epsilon_m} \tag{3.2}$$

Où  $MAX\epsilon$ ,  $MIN\epsilon$  et  $\epsilon_m$  sont les déformations plastiques maximales, minimales et moyennes, respectivement.

L'indice d'inhomogénéité des déformation  $C_i$  peut être obtenu à partir de l'équation (3-1) en utilisant les données de déformation dans les sections longitudinales représentées sur les **Figure 3-2,3,4,5 et 6**.  $C_i$  a été tracé en fonction de l'angle d'intersection du canal  $\phi$  et les résultats sont représentés sur la **Figure 3-9**.



**Figure 3-10-Degré d'inhomogénéité en fonction de l'angel de canal.**

L'indice d'homogénéité de la déformation plastique équivalente ( $C_i$ ) est diminué avec l'augmentation de l'angle de canal. Il est meilleure en cas d'un plus grand angle canal ( $\phi > 90^\circ$ ).

Pour l'angle  $\phi = 120$  présente plus grande homogénéité avec  $C_i = 1.46$  après un passe en ECAP. Les effets du  $\phi$  sur la distribution de la déformation sont significatifs. L'augmentation de  $\phi$  diminue la déformation effective moyenne, c'est-à-dire que la grande valeur de  $\phi$  renvoie une plus petite valeur de déformation effective moyenne à la pièce.

C'est parce qu'une plus grande valeur de  $\phi$  réduit efficacement la entendre l'angle de la zone de cisaillement, réduisant ainsi la quantité de déformation de cisaillement imposée sur la pièce. Les résultats montrent que l'homogénéité de la déformation dans la direction longitudinale est optimale en utilisant des valeurs de  $\phi$  entre  $90^\circ$  et  $110^\circ$ .

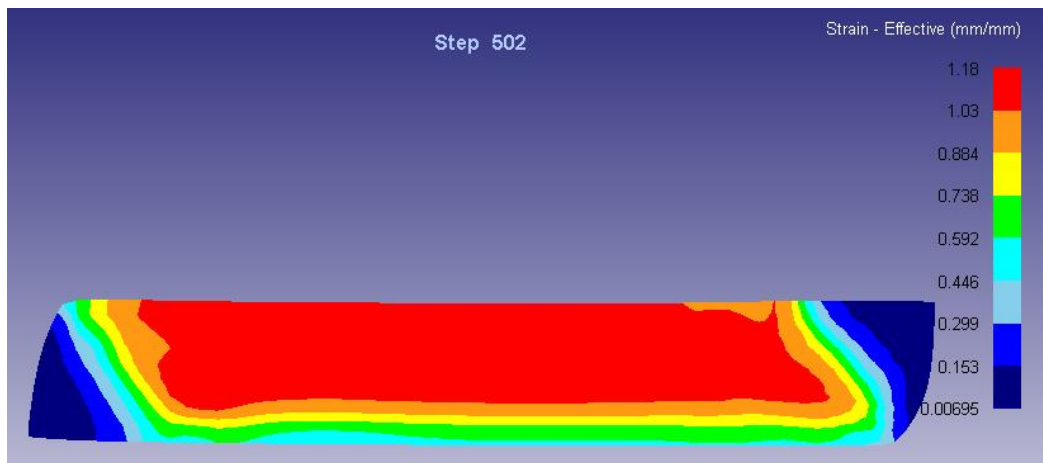
En général, les angles d'angle de canal plus grand à une faible déformation, mais une répartition de la déformation plus homogène

### 3.4. Influence du frottement sur l'homogénéité des déformations

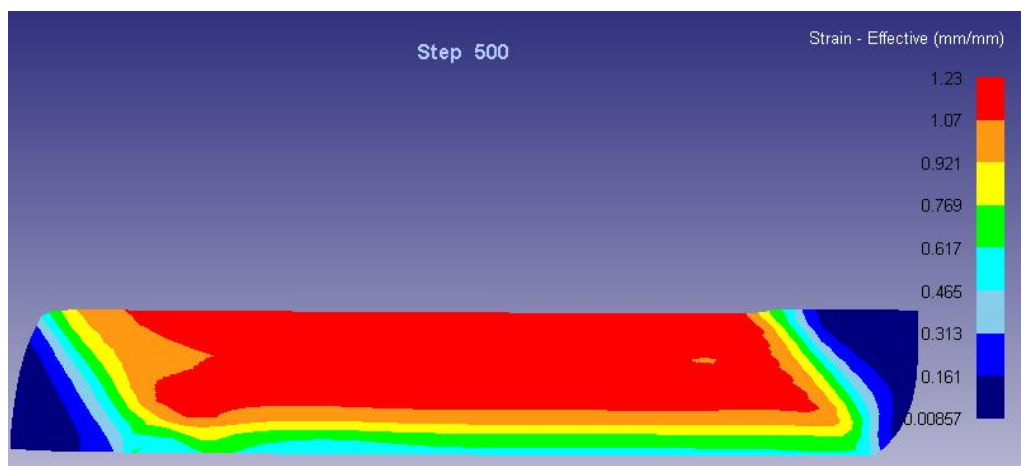
Les effets du frottement sur la distribution de la déformation effective moyenne pendant ECAP sont présentés aux figures suivantes. Les résultats de simulation de distribution de la déformation plastique équivalente de la section longitudinale, pour diverses valeurs des coefficients de frottement (Paramètre de simulation  $\phi=90^0$  et  $\Psi=20^0$  ;  $V=1\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  ;  $T_0=20\text{ C}^0$ ) sont représentés sur les **Figures 3-11-...-17**.

Le coefficient de frottement utilisé dans la simulation a été fixé à 0.01, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2 et 0.3 [le coefficient de frottement pour l'analyse (élément finis) FE de l'ECAP avec lubrification a généralement été considéré comme  $< 0, 3$ ].

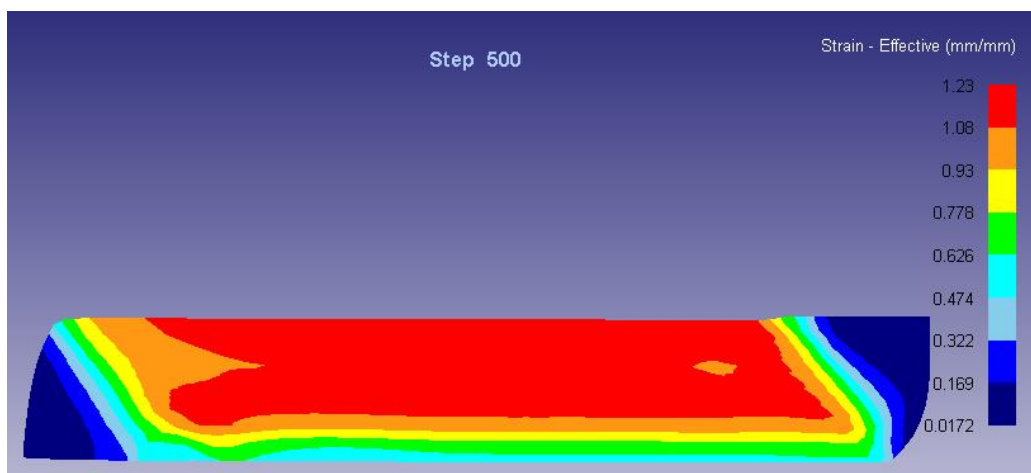
En estimant que le coefficient de frottement pour la lubrification au graphite soit 0, 2.



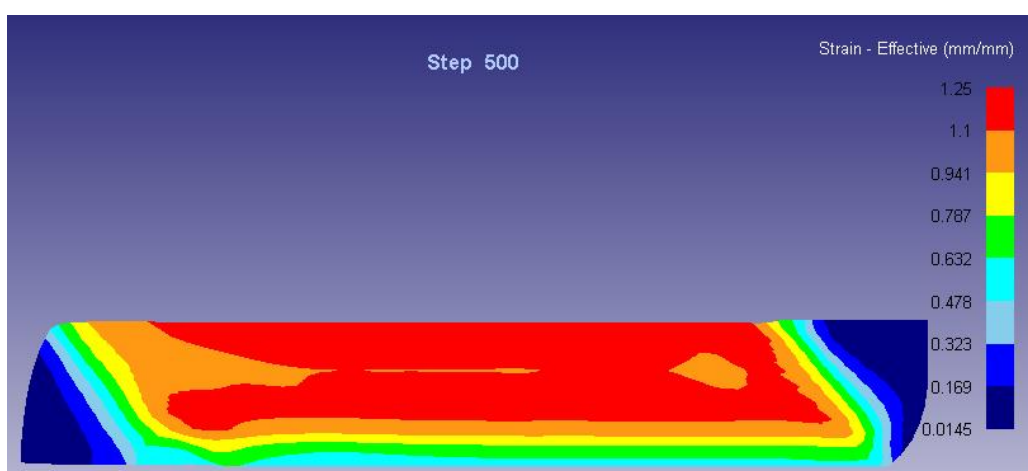
*Figure 3-11-Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement  $\mu=0.01$ .*



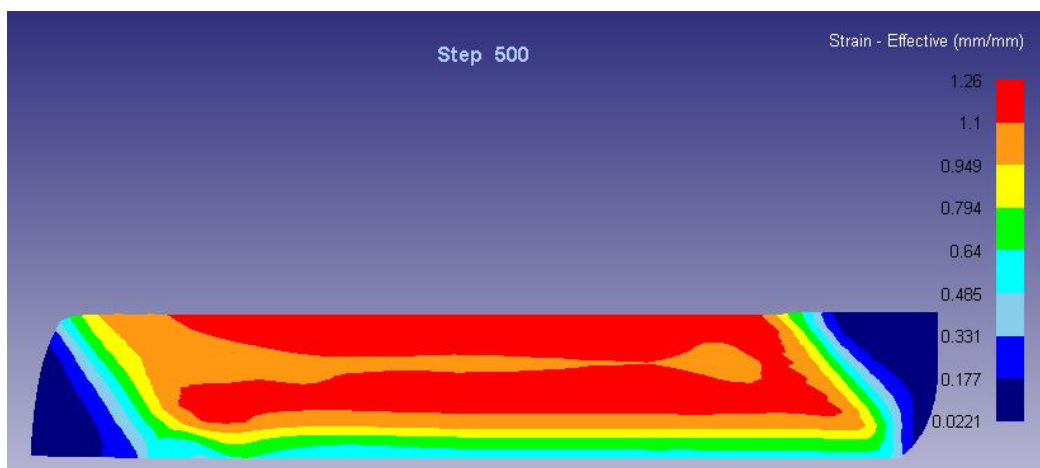
*Figure 3-12-Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement  $\mu=0.04$ .*



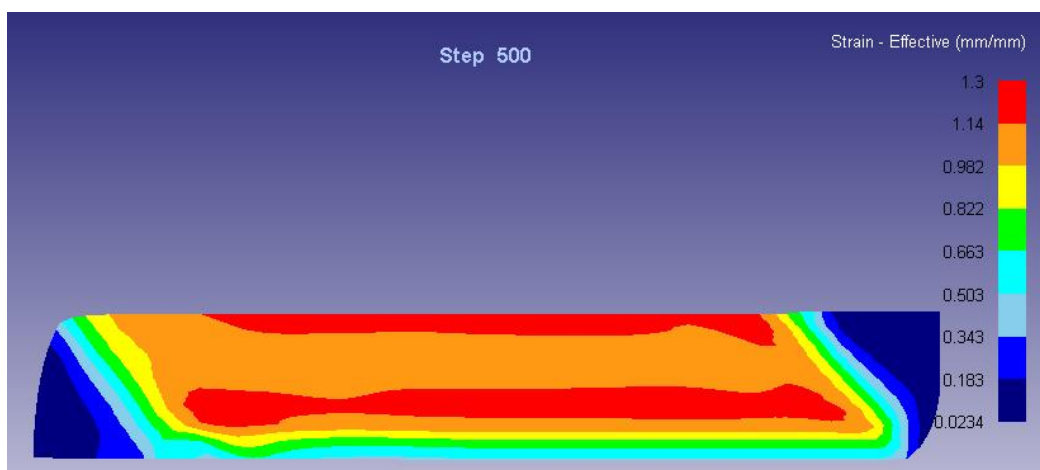
*Figure 3-13-Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement  $\mu=0.06$ .*



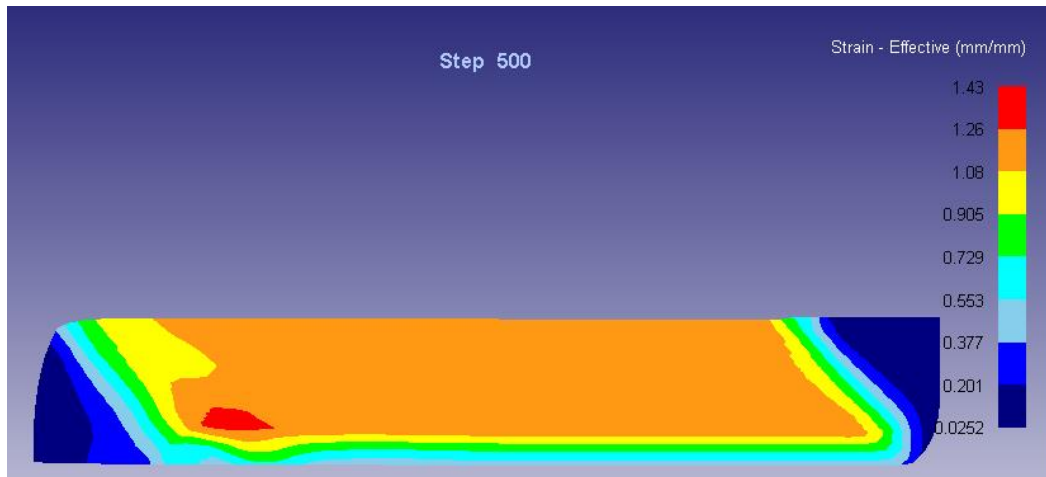
*Figure 3-14-Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement  $\mu=0.08$ .*



*Figure 3-15-Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement  $\mu=0.1$ .*



*Figure 3-16-Distrubition de déformation effective pour coefficient de frottement  $\mu=0.2$ .*



*Figure 3-17- Distribution de déformation effective pour coefficient de frottement  $\mu=0.3$ .*

On a observé à partir des résultats de simulation que le frottement augmente réellement la déformation effective ainsi que l'inhomogénéité des déformations pour une matrice canalisée carrée avec  $\phi=90^\circ$  et  $\Psi=20^\circ$ .

Le frottement résiste à l'écoulement du matériau sur les surfaces de contact et par conséquent intensifie la déformation du cisaillement des éléments de surface car le frottement fonctionne dans la direction opposée à celle des surfaces en mouvement par conséquent, le frottement peut réduire l'inhomogénéité des déformations en réduisant les zones de cisaillement inférieur surtout aux coins extérieurs de la matrice.

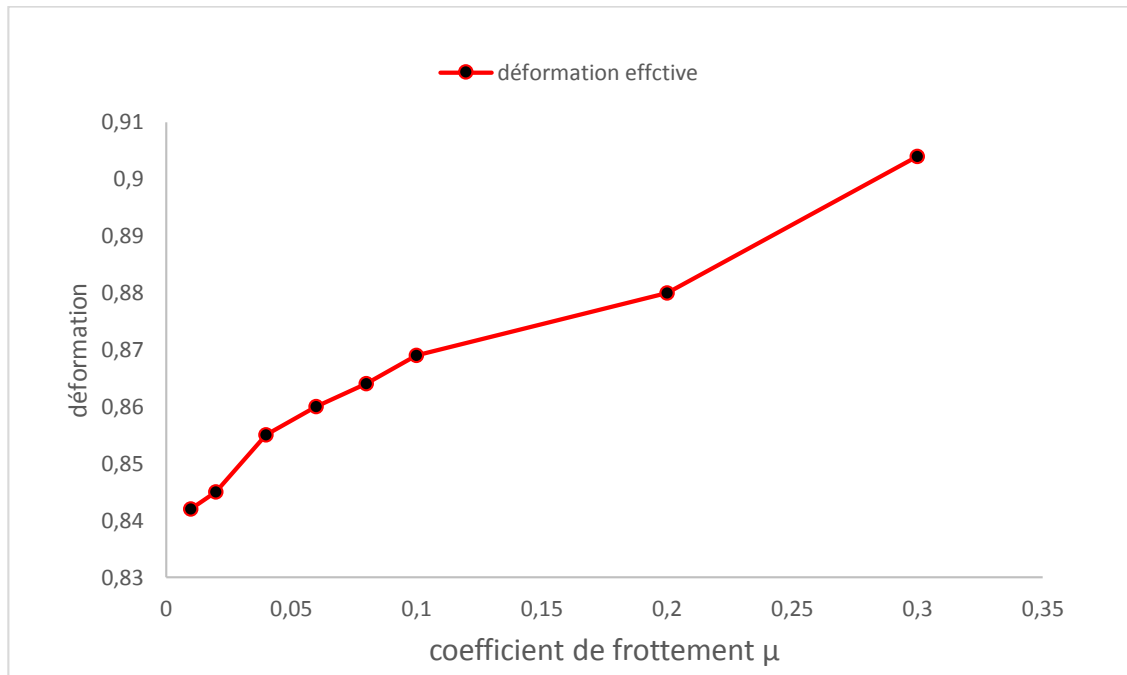
Dans les sections 'Effets de  $\phi$  et Effets de  $\Psi$ ' l'analyse FE a été réalisée sans frottement et donc l'homogénéité de la déformation a été contrôlée uniquement par la géométrie des dents  $\phi$  et  $\Psi$ .

Il faut éviter de grandes quantités de frottement entre la matrice et la pièce sans lubrification appropriée car les forces de frottement génèrent de la chaleur et causent également l'usure de la matrice. En outre, la surface de la pièce peut endommager et même rupture prématurée qui devrait être évitée.

En pratique, un lubrifiant approprié comme le graphite ou  $\text{MoS}_2$  est utilisé pour minimiser les effets de frottement avec les surfaces de contact. D'autres approches pour minimiser le frottement sont l'utilisation des configurations de matrices complexes qui utilisent des murs mobiles [9].

La **figure 3-18** montre la déformation plastique équivalente moyenne obtenue en utilisant l'équation **3.1**.

L'augmentation de la déformation effective (moyenne) avec frottement est due à la présence d'un intervalle d'angle initial et de son remplissage partiel au fur et à mesure que le processus se poursuit.



*Figure 3-18- La déformation effective en fonction de coefficient de frottement.*

La **figure 3-19** montre la variation de l'indice d'inhomogénéité  $C_i$  (indice d'inhomogénéité) obtenue par l'équation (3.2). Pour différentes conditions de frottement. Pour les cas étudiés, l'inhomogénéité diminue jusqu'à 1.4 où l'espace de coin est presque rempli (**figure 3-20**), mais augmente en cas d'augmentation supplémentaire du frottement. On peut conclure que l'inhomogénéité diminue avec l'augmentation du frottement jusqu'à ce que la contre-pression (exercée par frottement par friction dans le canal de sortie) soit juste suffisante pour combler l'espace de coin. Une augmentation supplémentaire de la friction entraîne une augmentation de l'inhomogénéité, cette resautes est confirmée dans la littérature [9].

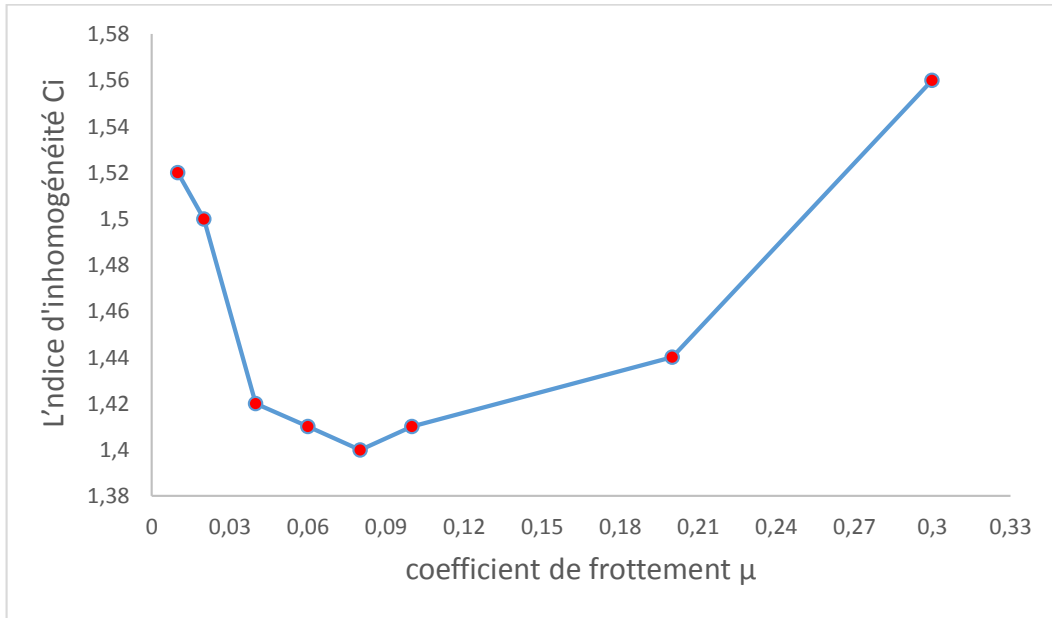


Figure 3-19- La variation de l'indice d'inhomogénéité en fonction de coefficient de frottement

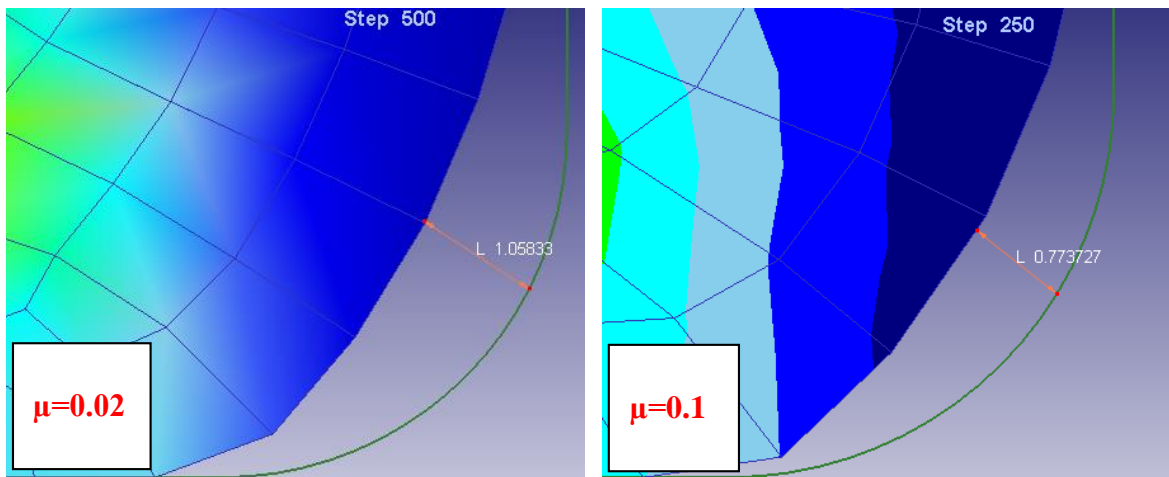


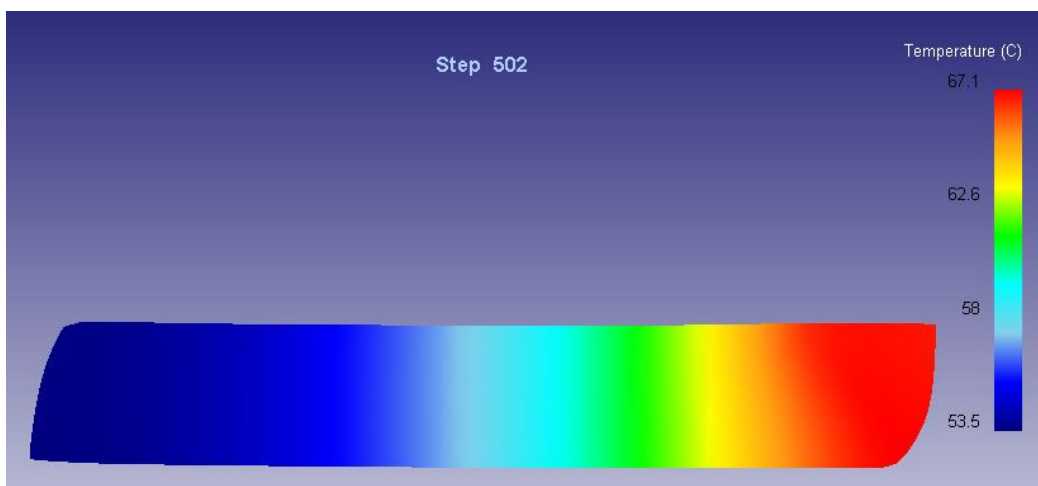
Figure 3-20- L'espace de coin rempli par la pièce.

### 3.5. Influence du frottement sur la température de la pièce

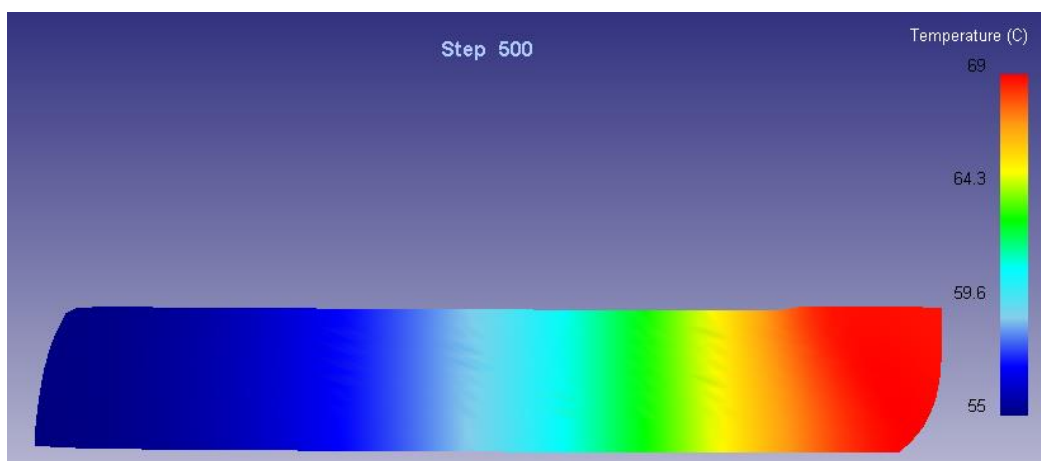
Les figures 3-21-28 montrent la répartition de la température de l'alliage 6063 après application de la déformation avec vitesse de  $1\text{mm.s}^{-1}$  à différents coefficients de frottement.

Les résultats de simulation de distribution de la température de la section longitudinale, pour diverses valeurs des coefficients de frottement (Paramètre de simulation  $\phi=90^\circ$  et  $\Psi=20^\circ$ ;  $V=1\text{mm.s}^{-1}$ ;  $T_0=20\text{C}^\circ$ ).

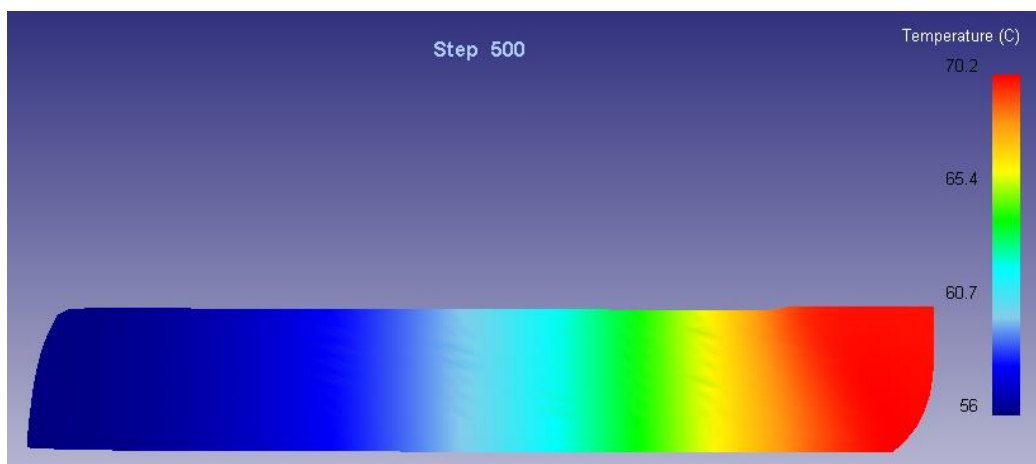




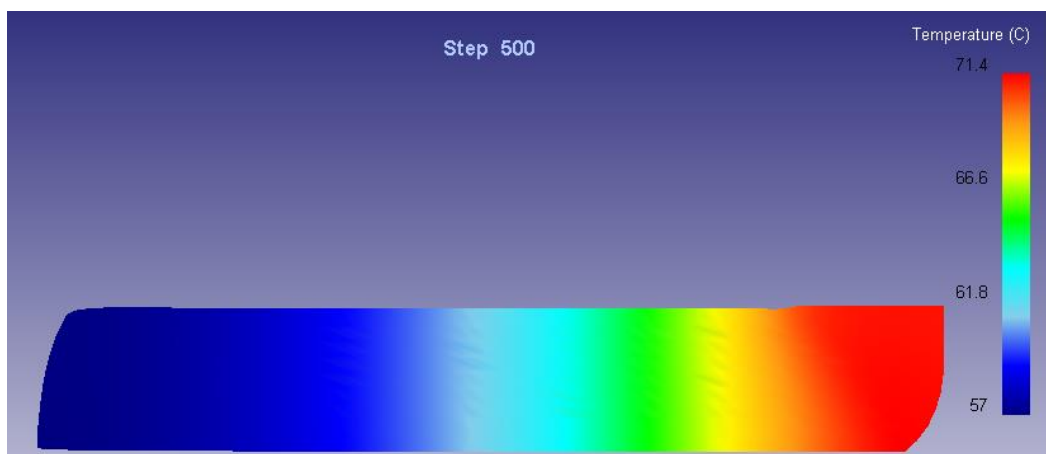
*Figure 3-21-Distribution de la température pour coefficient de frottement  $\mu=0.01$*



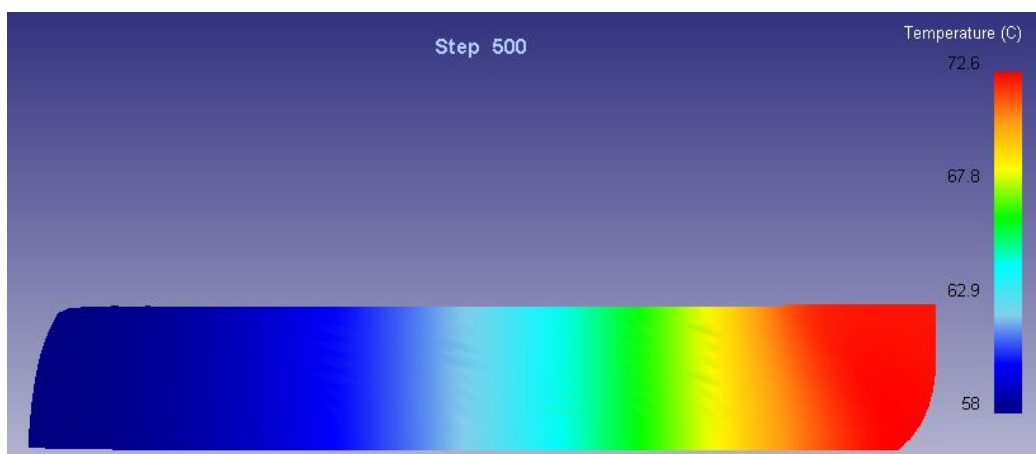
*Figure 3-22-Distribution de la température pour coefficient de frottement  $\mu=0.04$ .*



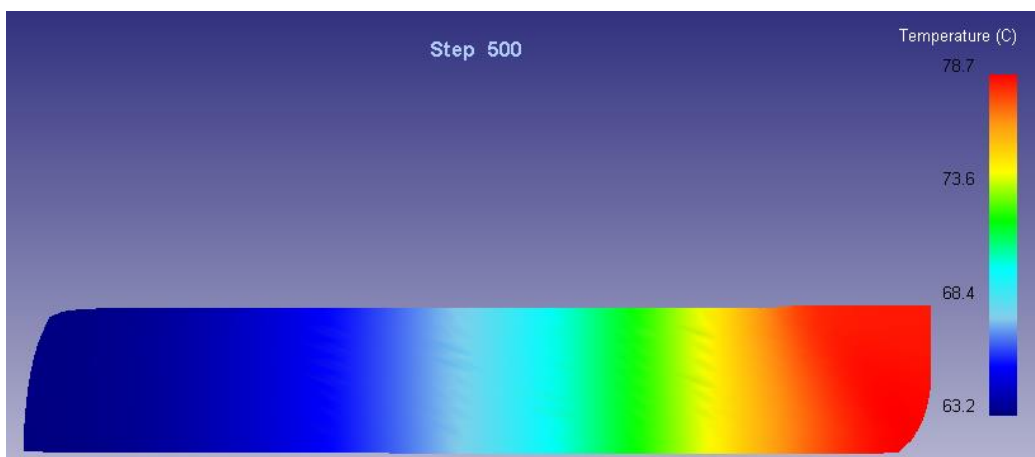
*Figure 3-23-Distribution de la température pour coefficient de frottement  $\mu=0.06$ .*



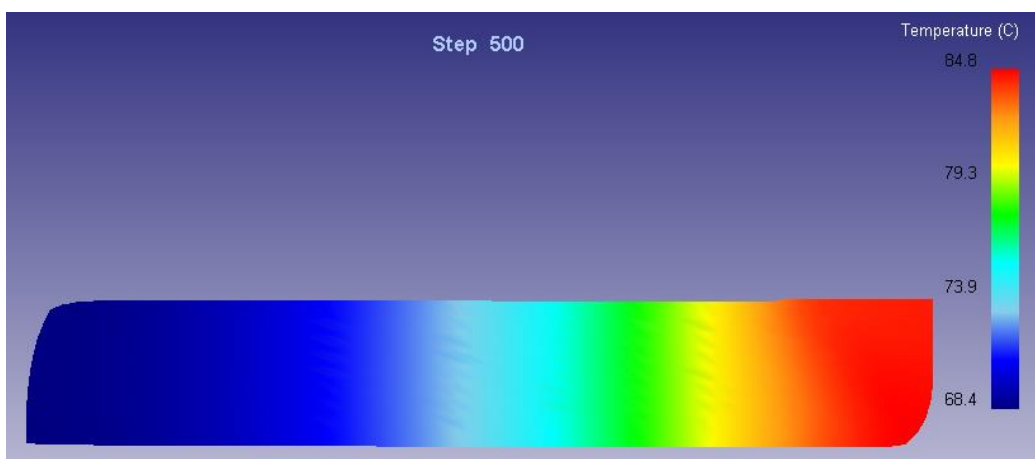
*Figure 3-24-Distribution de la température pour coefficient de frottement  $\mu=0.08$ .*



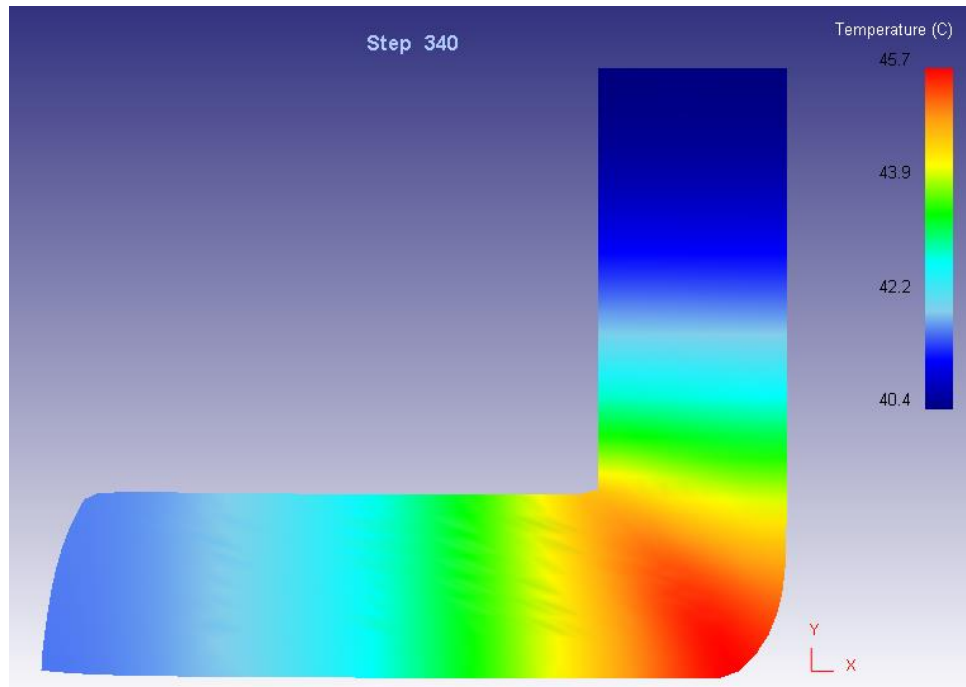
*Figure 3-25-Distribution de la température pour coefficient de frottement  $\mu=0.1$ .*



*Figure 3-26-Distribution de la température pour coefficient de frottement  $\mu=0.2$ .*



*Figure 3-27-Distribution de la température pour coefficient de frottement  $\mu=0.3$ .*



*Figure 3-28-Distribution de la température pour coefficient de frottement  $\mu=0.01$ .*

Comme on peut le voir, la répartition de la température dans l'échantillon n'est pas uniforme. La température maximale se situe dans la zone d'intersection des deux canaux. En outre, la température diminue avec une augmentation de distance de la zone de déformation. La comparaison montre que la distribution de la température dans l'échantillon ne change pas avec la modification du frottement entre les échantillons et le canal de matrice. Seule la température de l'échantillon est affectée par le coefficient de frottement est augmentée.

En augmentant le coefficient de frottement, la température de différentes régions de l'échantillon est augmentée.

Le frottement n'a aucun effet sur le modèle des changements de température au centre de l'échantillon. Ainsi, avec le mouvement de la partie centrale de l'échantillon dans la filière vers la zone de déformation, la température augmente graduellement et atteint la température maximale dans la zone de déformation.

Après la déformation, la température de l'échantillon diminue graduellement en raison du transfert de chaleur de l'échantillon à la matrice. Comme on le voit, en augmentant le frottement, la température centrale de l'échantillon augmente.

La **figure 3.29** montre l'influence du frottement sur l'évolution de température et la température maximale au centre de l'échantillon. Comme on le voit, la quantité d'élévation de la température dans l'échantillon augmente avec l'augmentation du frottement entre l'échantillon et la paroi du canal de la filière.

Avec une augmentation de la contrainte d'écoulement, la température de déformation augmente. La température du matériau à une chaleur de déformation constante augmente en diminuant la valeur de la capacité calorifique spécifique.

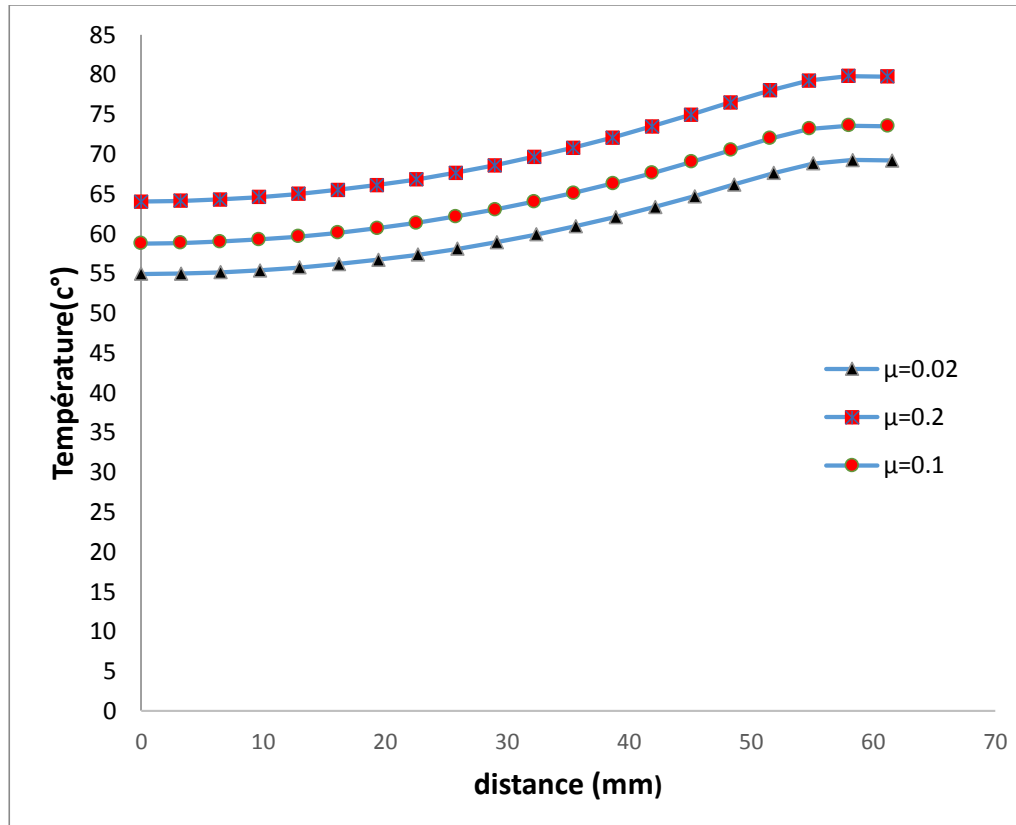


Figure 3-29- L'influence du frottement sur l'évolution de température.

### 3.6. Influence de la vitesse de pressage sur l'homogénéité des déformations

Dans la pratique, le procédé ECAP est généralement mené dans de grandes presses hydrauliques qui ont des vitesses de pressage relativement élevées dans la gamme de 1 à 25 mm\*s<sup>-1</sup>.

Il est donc intéressant d'étudier l'influence de la vitesse de pressage sur la distribution de la déformation par FEM.

Dans les **Figures 3-30-...-34** la distribution de la déformation effective dans la section longitudinale de la pièce dans une matrice avec  $\phi=90^0$  et  $\Psi=20^0$ , avec des vitesses de pressage de 1 ; 5 ; 10 ; 15 et 20 mm\*s<sup>-1</sup> ( $\mu=0.1$  ;  $T_0=20\text{ C}^0$ ).

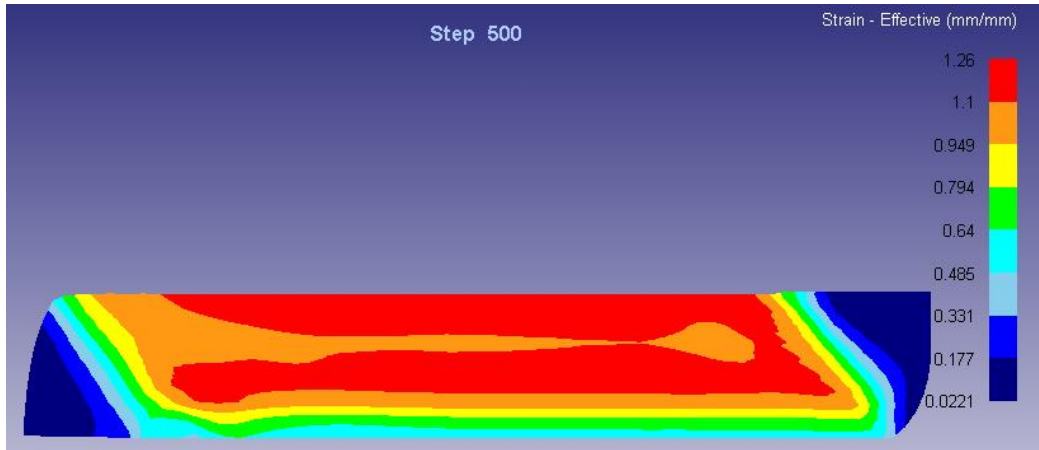


Figure 3-30-Distribution de déformation effective pour une valeur de vitesse  $v=1\text{mm.s-1}$ .

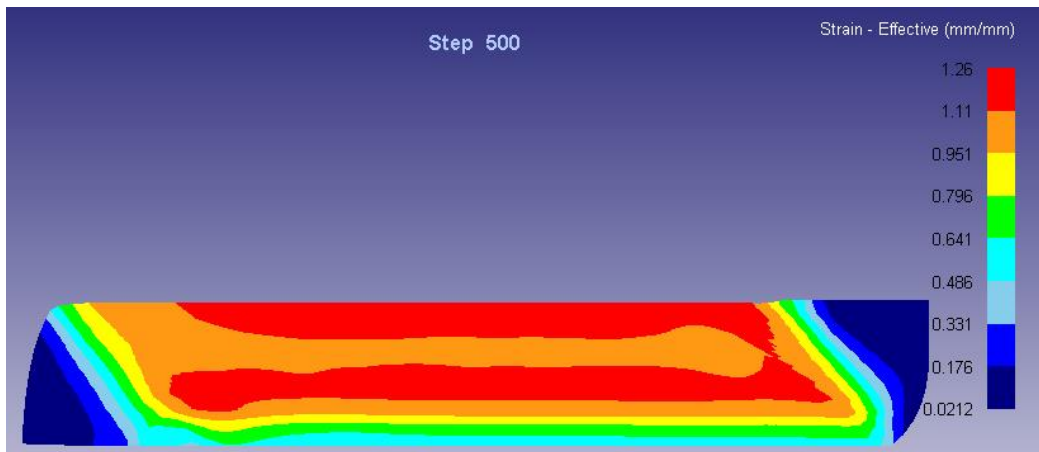


Figure 3-31-Distribution de déformation effective pour une valeur de vitesse  $v=5\text{mm.s-1}$ .

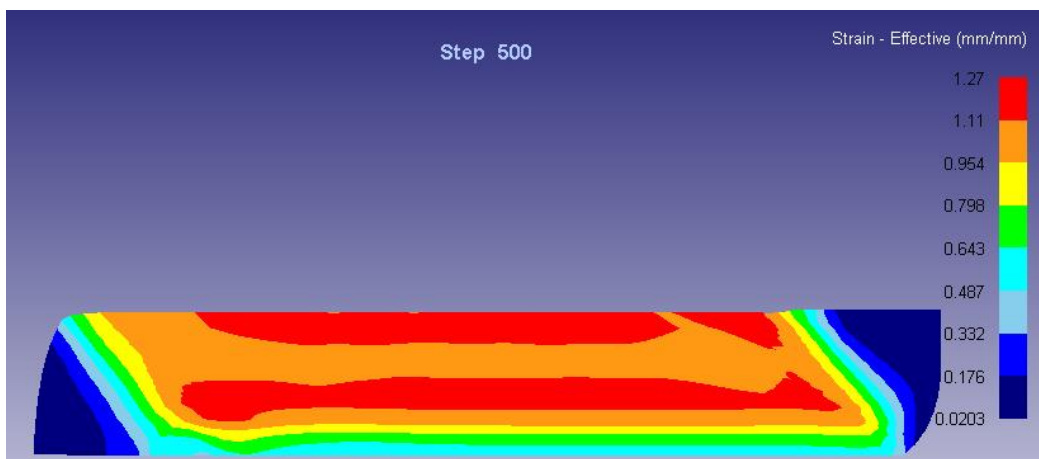
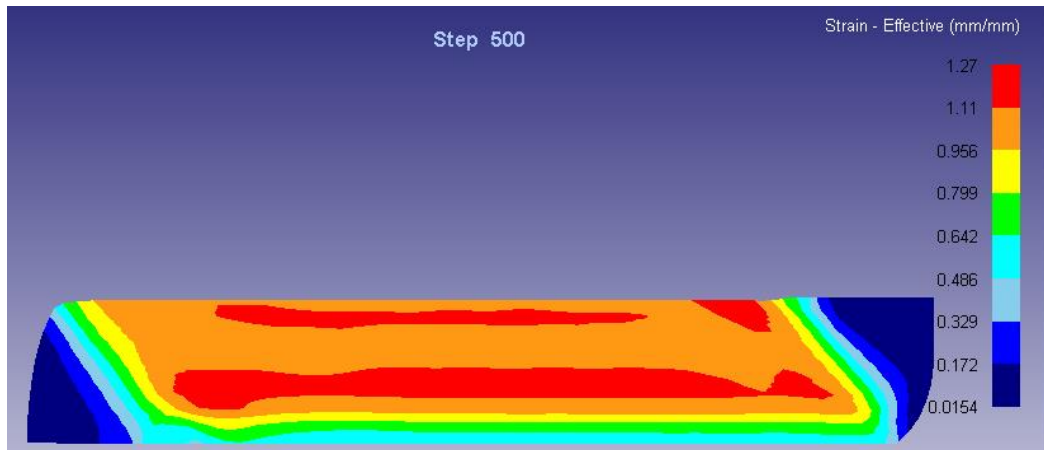
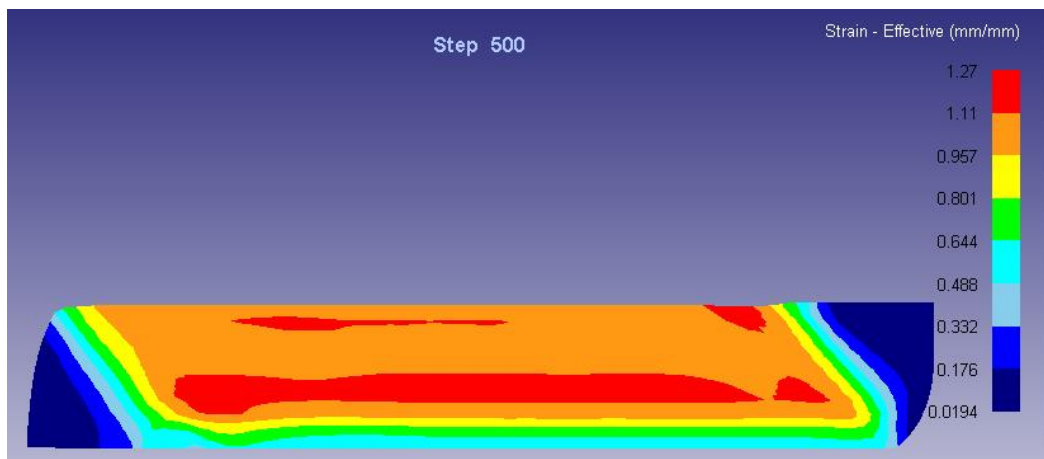


Figure 3-32-Distribution de déformation effective pour une valeur de vitesse  $v=10\text{mm.s-1}$ .



*Figure 3-33-Distribution de déformation effective pour une valeur de vitesse  $v=15\text{mm.s}^{-1}$ .*



*Figure 3-34-Distribution de déformation effective pour une valeur de vitesse  $v=20\text{mm.s}^{-1}$ .*

La variation de la répartition de la déformation est faible et l'homogénéité des contraintes est illustrée aux Figures. Montre également peu de changement en changeant la vitesse de pressage. Les expériences modèles ont montré que les caractéristiques de cisaillement d'une pièce ne sont pas influencées de manière significative par la vitesse de pressage.

Les tests expérimentaux sur Ti montrent également que seules des différences microstructurales mineures sont présentes dans les échantillons ECAP lorsque les vitesses de pressage étaient variées [10].

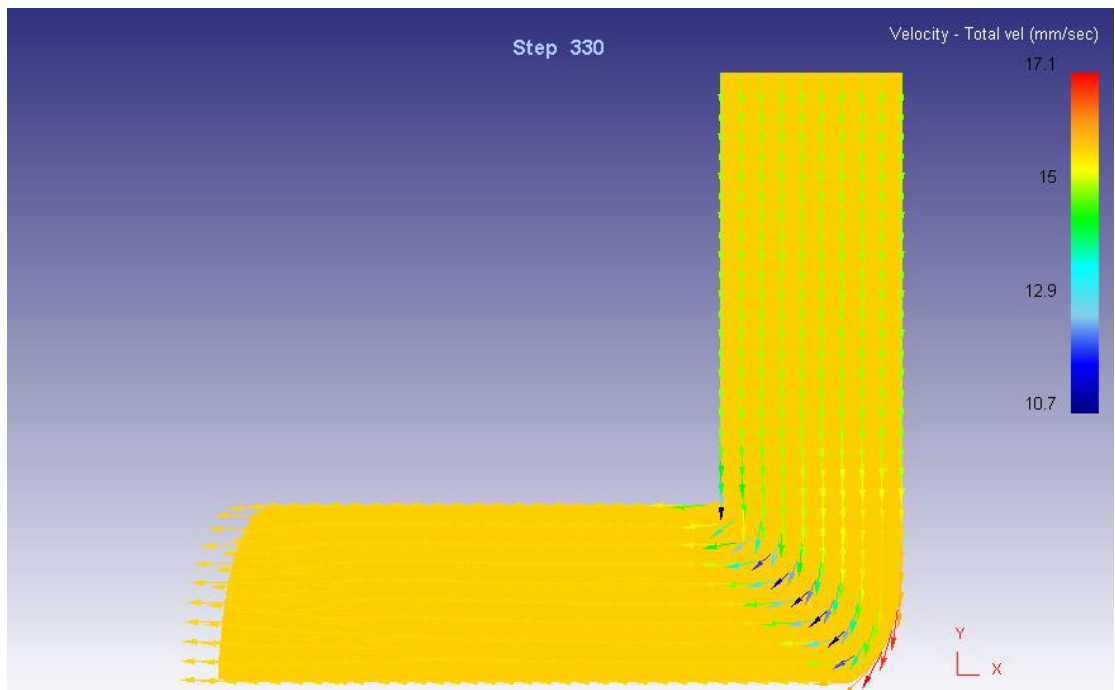
Dans la pratique, cependant, changer les vitesses de pressage peut produire certains problèmes pratiques. Tout d'abord, une vitesse de pressage élevée tend à générer plus de chaleur qui chauffe la pièce plus par rapport à un pressage plus lent

Cependant, l'influence sur la distribution de la déformation ou la microstructure résultante due à ce chauffage brutal n'est pas claire à l'heure actuelle.

Deuxièmement, une vitesse de pressage lente fournit plus de temps pour l'évolution de la microstructure de la pièce à usiner.

Troisièmement, une vitesse de pressage très élevée peut fracturer une pièce prématurée si les angles du coin de la matrice sont tranchants tandis qu'une vitesse de pressage lente peut réduire cette possibilité.

En tant que vitesse est un paramètre de traitement qui est souvent négligé car les vitesses de pressage ne sont souvent pas facilement contrôlables dans plusieurs configurations ECAP.



*Figure 3-35-La vitesse de la pices au couer de deformation .*

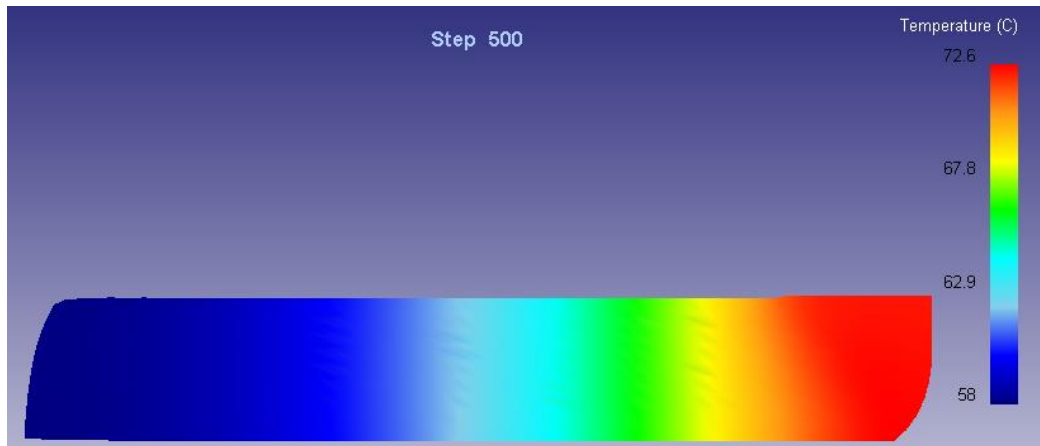
### 3.7. Influence de la vitesse de pressage sur la température de la pièce

La distribution de la température dans l'échantillon après déformation à différentes vitesses de poinçonnage est représentée sur les figures suivantes. Dans toutes les parties de l'échantillon, la température augmente avec l'augmentation de la vitesse de poinçonnage et impose donc une vitesse de déformation. L'augmentation de température est due à une augmentation de la production de chaleur de déformation au cours Le processus ECAP.

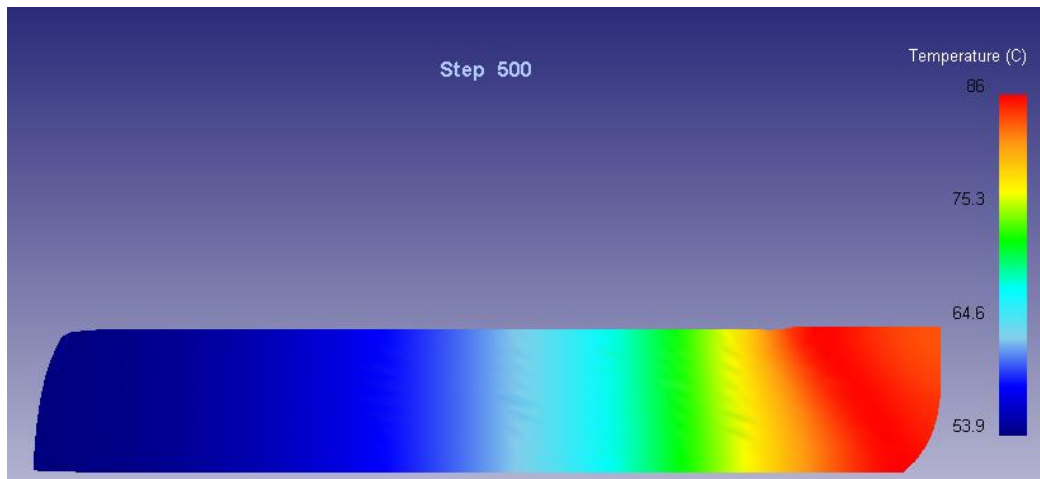


On observe que la vitesse du poinçon n'a eu aucun impact sur le modèle de distribution de la température de l'échantillon. L'effet de la vitesse de poinçonnage sur la variation de température à travers la ligne médiane de l'échantillon. Comme on peut le voir, à des vitesses de poinçonnage élevées, la température à l'axe de l'échantillon augmente brusquement et diminue

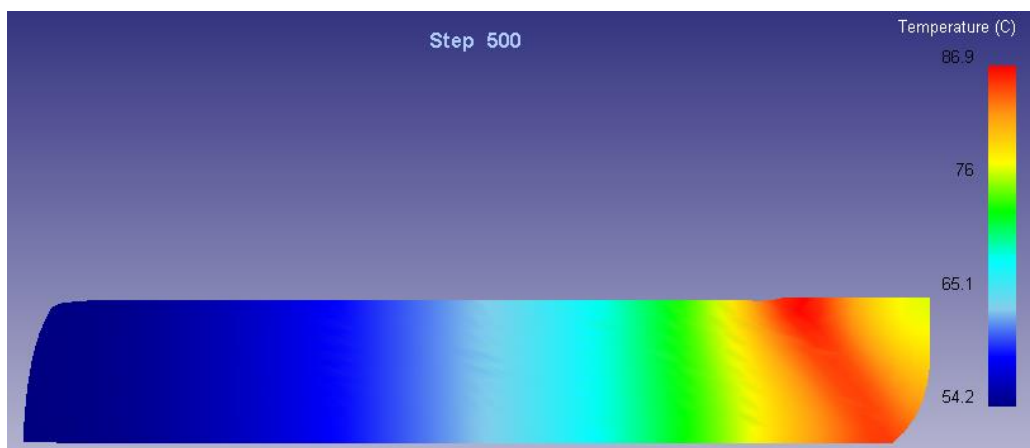
Après la déformation. À faible vitesse de perforation, l'augmentation et la diminution de la température se produisent progressivement.



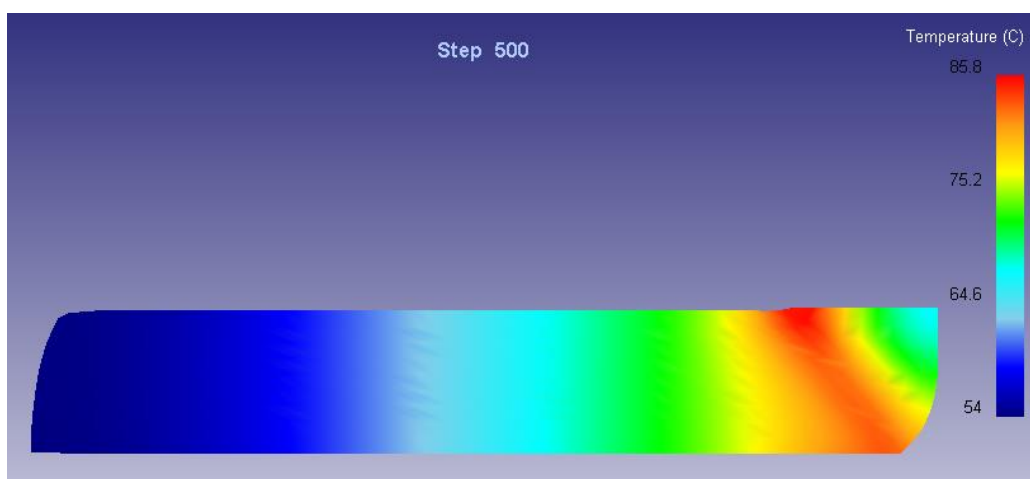
*Figure 3-36-Distribution de la température pour une valeur de vitesse  $v=1\text{mm.s}^{-1}$ .*



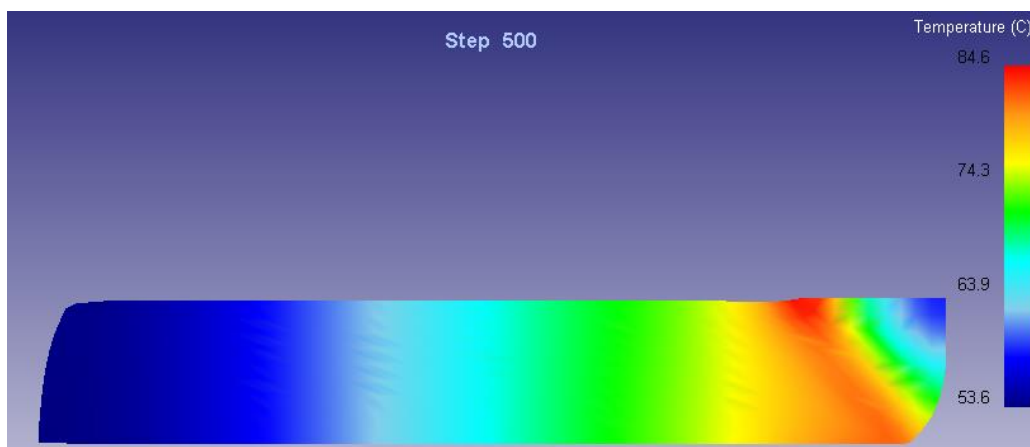
*Figure 3-37-Distribution de la température pour une valeur de vitesse  $v=5\text{mm.s}^{-1}$ .*



*Figure 3-38-Distrubition de la température pour une valeur de vitesse  $v=10$  mm.s-1.*



*Figure 3-39-Distrubition de la température pour une valeur de vitesse  $v=15$  mm.s-1.*



*Figure 3-40-Distrubition de la température pour une valeur de vitesse  $v=20$  mm.s-1.*

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'essentiel des résultats lors de nos simulations. On peut donc conclure que, on doit prendre en considération chaque paramètre lors de nos expériences, pour avoir une haute homogénéité de déformation.

## CONCLUSION GÉNÉRAL

### Conclusion général

Dans la présente étude, l'effet des paramètres de déformation sur le comportement de l'écoulement et les variations de température pendant le pressage angulaire à canal égal était a étudié.

Les résultats sont résumés comme suit :

L'angle d'intersection du canal  $\phi$  a des effets significatifs sur la contrainte effective moyenne de la pièce ECAP. L'augmentation de la valeur de  $\phi$  diminue la déformation effective moyenne, ce qui entraîne une plus grande inhomogénéité dans la distribution des contraintes pour les sections longitudinales et transversales de la pièce lorsque  $\phi > 110$ . Une dent circulaire canalisée produit une meilleure homogénéité des contraintes dans la coupe longitudinale de la pièce à usiner.

La présence de frottement entre les surfaces de contact de la matrice et la pièce augmente l'homogénéité des contraintes. Cependant, des considérations pratiques sur la génération de chaleur, les dommages à la surface de la pièce et l'usure de la friction devraient conduire à l'utilisation de lubrifiants malgré l'amélioration de l'homogénéité des contraintes

Bien que la vitesse de pressage ait peu d'influence sur l'homogénéité efficace des contraintes et les déformations, les problèmes pratiques associés aux effets de chauffage et aux défaillances prématurées à des vitesses de pression très élevées devraient être pris en compte

À partir de la présente étude, l'inhomogénéité de la déformation peut être minimisée en choisissant soigneusement les paramètres de matrice et de traitement. Une pièce doit être d'au moins cinq fois sa largeur de longueur pour une région de contrainte suffisamment stable au milieu à développer et  $\phi$  doit être compris entre  $90^\circ$  et  $110^\circ$  u, avec  $\Psi \sim 20^\circ$ . Une vitesse de pressage pratique de 2 à 10 mm. S<sup>-1</sup> peut être utilisée avec des lubrifiants pour réduire le frottement. Un processus ECAP à passage unique ne peut pas produire l'homogénéité des contraintes dans la pièce à usiner. Par conséquent, la voie BC est préférée pour obtenir une homogénéité des contraintes avec un minimum de quatre passes.

Simulation par éléments finis 2D a été utilisée pour calculer l'élévation de température au cours de la déformation plastique sévère. Une bonne cohérence entre la simulation et les résultats expérimentaux a été observée.

On a constaté que la quantité d'augmentation de température augmentait avec l'augmentation de la résistance et du coefficient de durcissement par déformation du matériau.

## CONCLUSION GÉNÉRAL

---

Dans la simulation des résultats, il a été conclu que le coefficient de frottement et la vitesse de pressage ont une forte incidence sur l'élévation de température au cours de canal égal angulaire de pressage.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## Références Bibliographiques

[1]. Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon. « Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement ». 881–981, S.L.: Progress in Materials Science, 2006, Vol. 51.

[2]. Azushima, A., R. Kopp, A. Korhonen, D. Y. Yang, F. Micari, G. D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski Et A. Yanagida. 2008. « Severe Plastic Deformation (Spd) Processes For Metals ». Cirp Annals – Manufacturing Technology, Vol. 57, No 2, P. 716-735.2008.

[3]. R.Z. Valiev; T.G. Langdon. « Developments in the Use of Ecap Processing For Grain Refinement» Rev.Adv.Mater.Sci.13 (2006) 15-26.

[4]. Goran, Daniel. « Hétérogénéité De La Déformation Plastique Des Monocristaux De Nickel Déformés A Froid Par Ecae ». Thèse Doctorat. L’universite Paul Verlaine De Metz.28 Juin 2007.

[5]. Girard, Grégory. « Etude De Nouvelles Formes De Matériaux Basés Sur Le Magnésium Pour Le Stockage Réversible De Grandes Quantités D’hydrogène Effet D’addition D’éléments De Transition ». Thèse Doctorat. Université Joseph Fourier - Grenoble 1.19 Octobre 2009.

[6]. V.M. Segal. « Engineering And Commercialization Of Equal Channel Angular Extrusion (Ecae) ». Materials Science And Engineering A 386 (2004) 269–276

[7]. <http://www.deform.com/>. La date de consultation le 15/05/2017.

[8]. Nahed El Mahallawy, Farouk A. Shehata, Mohamed Abd El Hameed, Mohamed Ibrahim Abd El Aal, Hyoung Seop Kim « 3D FEM simulations for the homogeneity of plastic deformation in Al–Cu alloys during ECAP». Materials Science and Engineering A 527 (2010) 1404–1410. 10 October 2009.

[9].Basavaraj V Patil,Uday Chakkingal and T S Prasanna Kumar « INFLUENCE OF FRICTION IN EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING – A STUDY WITH SIMULATION» 13. –15. 5. 2008, Hradec nad Moravicí.

[10].M. Kamachi, M. Furukawa, Z. Horita and T. G. Langdon: Mater. Sci. Eng. A, 2003, A347, 223–230