

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 et animation de la technique ECAP par
Solid Works et Deformed 3D**

KHERBOUCHE Sid Ali

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	B.GUERGUEB	Docteur ENP
Promoteur	M.M.BOUABDALLAH,	Professeur ENP
Invité	M .O. DEJMA,	Doctorant ENP

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 et animation de la technique ECAP par
Solid Works et Deform 3D**

KHERBOUCHE Sid Ali

Sous la direction du Professeur M. Mabrouk BOUABDALLAH
Présenté et soutenue publiquement le (29/06/2017)

Composition du Jury :

Président	H.YOUSFI	Professeur ENP
Examineur	B.GUERGUEB	Docteur ENP
Promoteur	M.M.BOUABDALLAH,	Professeur ENP
Invité	M .O. DEJMA,	Doctorant ENP

Dédicace

À mes très chers parents ;

À mon frère ;

À toute ma famille ;

À tous mes camarades et collègues ;

À tous ceux qui me sont chers

Je dédie ce travail.

KHERBOUCHE Sid Ali

Remerciement

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

Nous tenons à remercier nos deux promoteurs Pr. M.BOUABDALLAH et Mr. Oussama DJEMA pour avoir accepté de nous encadrer et de nous soutenir durant les moments difficiles de l'élaboration de ce projet.

Nous remercions monsieur H.YOUSFI d'avoir accepté de présider le jury de notre soutenance.

Nous remercions monsieur B.GUERGUEB d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nos remerciements 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 nos vifs remerciements et notre profonde gratitude.

ملخص

هذا العمل هو وصف لتقنية ECAP باستخدام برنامج Solid Works وبرنامج Deformed 3D هذا الأسلوب من البلاستيك شديد تشوه، ويحسن الخصائص المختلفة لسبائك الألومنيوم (6063 مع اضافة الفضة). لهذا قمنا باستخدام هذه البرمجيات لأنها يمكن أن تفسر حقا ظاهرة ونرى التغيير الهيكلي بين عينات مشوهة وغير مشوهة ورؤية الرسم التوضيحي الموجود في هذه الذاكرة ومحاكاة كثافة تشوه في مناطق مختلفة من العينة المعالجة.

كلمات البحث: 6063 سبائك الألومنيوم (Ag)، التشديد تشوه البلاستيك (SPD)، ECAP، Solid Works، Deformed 3D

Abstract

This work is a description of ECAP experience and animation using software Solid Works and Deform 3D software. This method of severe plastic deformation, improves different properties of our Aluminum alloy (6063 with addition of Silver). For this, we have based on the two software because they can really explain the phenomenon occurred and to see the structural change between the deformed and non-deformed samples. The illustrations found in this brief are simulated deformation density in the different zones of the sample treated.

Key words: Aluminum alloys 6063, Severe Plastic Deformation (SPD), Equal Channel Angular pressing, Solid Works, Deformed 3D.

Résumé

Ce travail est une description de l'expérience et de l'animation ECAP à l'aide du logiciel Solid Works et du logiciel 3D déformé. Cette méthode de déformation plastique sévère, améliore les différentes propriétés de notre alliage d'aluminium (6063 avec addition d'argent). Pour cela, nous avons basé sur les deux logiciels car ils peuvent vraiment expliquer le phénomène et voir le changement structurel entre les échantillons déformés et non déformés. Les illustrations trouvées dans ce mémoire sont des densités de déformation simulées dans les différentes zones de l'échantillon traité.

Mots clés : Alliages d'aluminium 6063, Argent (Ag), Déformation Plastique Sévère (SPD), Equal Channel Angular pressing, Solid Works, Deformed 3D.

Table des matières

Liste des figures

Introduction générale 9

CHAPITRE 1 : DÉFORMATION SÉVÈRE

Introduction 12

1.1 Déformation plastique des métaux 12

1.1.1 Le glissement 12

1.1.2 Le maillage 12

1.2 Déformations plastiques sévères 12

1.3 Les principales techniques de déformation plastique sévères 13

1.3.1 Torsion haute pression (HPT) 14

1.3.2 Laminage accumulé ou ARB (Accumulated Roll Bonding) 14

Conclusion 16

CHAPITRE 2: EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING (ECAP)

Introduction 18

2.1 Principe du procédé ECAP 18

2.2 Paramètres fondamentaux du procédé ECAP 19

2.3 Les routes ou passages successifs 20

2.4 Paramètres expérimentaux du procédé ECAP 20

2.5 L'angle du canal ϕ et de l'angle de courbure Ψ 21

2.6 Avantage d'ECAP 21

Conclusion 22

CHAPITRE 3 : LOGICIELS UTILISÉS

Introduction 24

3.1 La présentation des logiciels utilisés : 24

3.1.1 Solid Works : 24

3.1.2 Le concept du logiciel : 26

3.1.3 Modélisation 3D : 26

3.1.4 Intention de conception : 27

3.1.5 Méthode de conception : 27

3.2 Deform 3D : 29

Conclusion : 31

CHAPITRE 4 : SIMULATION ET ANIMATION DE LA TECHNIQUE ECAP

4.1	Introduction :.....	33
4.2	La description de la manipulation effectuée :.....	33
4.3	La matrice de déformation :.....	35
4.4	Simulation de la méthode ECAP par Deformed 3D :.....	38
	Conclusion :	41
	Conclusion générale :.....	43
	Référence Bibliographique.....	45

Liste des figures

Figure 1.1: Schéma de principe du procédé Torsion haute pression	14
Figure 1.2: Schéma de principe du laminage accumulé ou ARB	15
Figure 2.1: Représentation schématique du procédé ECAE.....	18
Figure 2.2: Schéma de principe du procédé d'Extrusion Coudée à Aires Égales	19
Figure 2.3: Schémas des routes ou rotations successives possibles entre chaque nouveau passage à travers le dispositif ECAP	20
Figure 3.1: l'interface d'entrée du logiciel Solid Works.	24
Figure 3.2: l'interface d'entrée du logiciel Solid Works pour le choix de travail.	25
Figure 3.3: l'interface de travail pour la réalisation des pièces 3d.	25
Figure 3.4 : a) Pièce 3D Solid Works, b) Assemblage 3D Solid Works	26
Figure 3.5: la réalisation d'une esquisse	28
Figure 3.6: la réalisation d'une fonction.....	28
Figure 3.7: la réalisation d'un assemblage	29
Figure 3.8: L'interface du logiciel Deform 3D.....	30
Figure 3.9: simulation du laminage par le logiciel Deform 3D.....	30
Figure 4.1 : la partie fonctionnelle de la presse réalisée par Solid Works.....	33
Figure 4.2: La partie de manipulation de la presse réalisée par Solid Works.....	34
Figure 4.3: La réalisation de l'assemblage de la presse avec le logiciel Solid Works...	35
Figure 4.4: la matrice de déformation conçue à l'aide du logiciel Solid Works.....	36
Figure 4.5: Vue intérieure de la matrice de déformation.....	36
Figure 4.6: Système de bridage pour une meilleure fixation renfort-matrice.....	37
Figure 4.7: l'assemblage du système de déformation	37
Figure 4.8: la manipulation d'ECAP en cours d'exécution.	38
Figure 4.9: L'éprouvette avant déformation.....	39
Figure 4.10 : L'éprouvette à l'entrée de l'angle et la formation de la première zone morte.	39
Figure 4.11: Début de déformation de l'éprouvette.....	40
Figure 4.12: les zones les plus déformées.	40
Figure 4.13: la déformation totale de l'éprouvette et la formation des deux zones mortes dans les deux extrémités.	41

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Les matériaux en général et les métaux en particulier prennent une place importante dans tout développement industriel ou progrès technologique. Vu les exigences de l'industrie moderne, nombreux programmes de recherches sont en route pour le développement d'autres matériaux plus performants et moins coûteux tels que les composites, les céramiques, les polymères...etc., mais les alliages métalliques occupent toujours une place importante, car les caractéristiques de ces derniers s'améliorent de jour en jour grâce aux recherches.

L'aluminium a connu un développement spectaculaire depuis sa naissance en 1854 symbolisée par la présentation à l'Académie des Sciences, par le chimiste français Sainte-Claire Deville, d'un petit lingot réalisé par voie chimique. Mais le véritable début du développement industriel de l'aluminium et ses alliages se produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux États-Unis. L'aluminium est aujourd'hui le **premier métal non ferreux** ; en tonnage, il a supplanté l'étain dans les années 1920, le plomb dans les années 1940, le zinc puis le cuivre dans les années 1950.

Il est bien admis que les propriétés des alliages d'aluminium sont déterminées essentiellement par la microstructure des produits correspondants. Bien qu'actuellement encore toutes les interactions entre la microstructure et les propriétés ne soient pas parfaitement connues, les résultats des nombreuses et importantes recherches effectuées ces dernières années ont permis d'améliorer considérablement nos connaissances à cet égard, si bien qu'aujourd'hui on peut considérer que les ingénieurs disposent des éléments suffisants pour obtenir la microstructure optimale nécessaire pour une application donnée.

Afin d'augmenter la dureté des métaux, et ainsi leur résistance à l'écoulement et leur résistance ultime, plusieurs mécanismes tels l'écrouissage, la précipitation et la transformation de phase sont couramment utilisés. Le mécanisme d'affinement des grains a pour effet d'augmenter la densité des joints de grains et ainsi bloquer le mouvement des dislocations. Ce principe est observé par la méthode de fabrication par déformation plastique sévère (SPD). Différentes méthodes de déformation plastique sévère ont été présentées avec l'équipement requis. Ensuite, des applications dans le domaine médical, la défense et des accessoires de sport et les avenues de recherche sont discutées. La diminution de la taille des grains des métaux et alliages métalliques tel que les alliages d'aluminium a un effet d'augmentation de la résistance mécanique sans diminuer les propriétés de ductilité comme c'est le cas lors de l'écrouissage. Cet avantage a amené à un très grand intérêt de fabriquer des métaux et alliages métalliques avec une taille des grains extrêmement fins (submicronique).

Les procédés de déformation plastique sévère (SPD) sont définis comme des procédés de déformation de métaux dans lesquels une forte contrainte plastique est imposée. L'objectif du processus SPD est de porter un changement au niveau de la microstructure du métal pour obtenir un métal déformé à grain ultra fin afin de produire des pièces légères avec une haute résistance pour assurer la sécurité et la fiabilité des pièces pour le bien de l'humanité. Dans les procédés classiques de déformation des métaux tels que le laminage, Forgeage et extrusion, la contrainte plastique imposée est généralement moins élevée que d'environ 2,0. Lorsque le roulement, le tirage et l'extrusion à plusieurs passages sont réalisés jusqu'à une contrainte plastique supérieure

INTRODUCTION GÉNÉRALE

à 2,0, l'épaisseur et le diamètre deviennent très minces et ne conviennent pas pour être utilisé pour les pièces de structure. Les principaux procédés SPD sont : L'extrusion angulaire à canal égal (ECAP), le laminage cumulatif (ARB) et la Torsion sous haute pression (HPT),

L'extrusion angulaire à canal égal (ECAP) ou l'extrusion (ECAE) est connu comme l'outil le plus efficace parmi les déformations plastique sévères existantes, pour obtenir des grains ultrafins et des propriétés mécaniques extraordinaires. Dans le pressage angulaire à canal égal (ECAP), le raffinement du grain est réalisé lors de multiples passes des éprouvettes à travers un canal d'angle Ψ et un angle de courbure d'angle φ . En changeant la trajectoire entre les passes, l'évolution de la microstructure et la texture s'est révélé très sensible à la rotation des éprouvettes ce qui nous amène à choisir un chemin entre les passes pour obtenir une microstructure homogène avec moins de textures.

Dans ce contexte, nous avons voulu étudier l'effet de l'hyper déformation ECAP sur quelques propriétés microstructuraux d'un alliage d'aluminium 6063. Pour cela, nous avons effectué une série d'expériences (la microscopie optique, la microdureté et la diffraction des rayons X) afin de caractériser le matériau à l'état initial et hyper déformé et de remonter aux informations qui nous intéressent. Nous montrons dans ce travail comment répond le matériau à l'ECAP en termes de changements tant au niveau de sa microstructure.

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

Dans la première partie, nous rappellerons quelques informations sur le matériau d'étude. Nous présentons aussi les déformations plastiques sévères, et plus précisément le procédé appelé ECAP.

Dans le deuxième partie, nous présentons le protocole expérimental suivi lors de l'hyper déformation. Nous présentons aussi les techniques expérimentales qui ont servi aux différentes caractérisations des échantillons.

Dans le troisième partie nous présentons une description de la manipulation de la méthode ECAP par deux logiciels Solid Works et Deform 3D et d'expliquer le phénomène les résultats obtenus et évolution de microdureté.

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

CHAPITRE 1 :

DÉFORMATION SÉVÈRE

Introduction

Il est bien connu que la diminution de la taille des grains des métaux et alliages métalliques à un effet d'augmentation de la résistance mécanique sans diminuer les propriétés de ductilité comme c'est le cas de l'écroutissage. Cet avantage a amené à un très grand intérêt de fabriquer des métaux et alliages métalliques avec une taille des grains extrêmement fine.

Les procédés thermomécaniques classiques (laminage, extrusion, étirage, recuit, homogénéisation, etc.) sont utilisés pour contrôler la taille des grains des alliages commerciaux en fonction de leur application spécifique. Parce que ces procédures classiques ne peuvent pas être utilisées pour produire des matériaux avec des tailles de grains submicroniques car il existe invariablement une limite inférieure, l'attention des chercheurs a été orientée vers le développement de nouvelles techniques qui pourront être utilisées pour la fabrication de matériaux à grains très fins (**UFG**) ayant des tailles de grains dans le domaine submicronique.

Au regard des techniques permettant d'affiner la microstructure, les procédés à grandes déformations plastiques (Sever Plastic Déformation **SPD**) sont particulièrement attractifs. L'affinement de grains est possible pour des matériaux massifs qui permettraient des applications industrielles. Les tailles de grains obtenus avec ces procédés sont comprises entre 200 μm et 1 nm [1].

1.1 Déformation plastique des métaux

Il est maintenant bien établi que la déformation plastique des cristaux métalliques est produite sous l'action des contraintes externes, cette déformation est un phénomène qui se manifeste sous deux formes principales : le glissement et le maclage [2].

1.1.1 Le glissement

Le passage d'une dislocation dans le cristal ne laisse aucune trace ; le cisaillement étant une période du réseau, celui-ci est reconstitué sans perturbation de là-dérrière la dislocation [2].

1.1.2 Le maclage

Au contraire, le maclage est un mode de déformation qui s'accompagne d'une modification cristalline en volume. Il peut se décrire comme un cisaillement homogène d'une partie du cristal située entre deux plans d'accolement ou plans de macles. La partie maclée est globalement basculée et amenée dans une position symétrique de celle de la matrice par rapport à un plan de macle qui joue le rôle de plan miroir [2].

1.2 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 [4, 5].

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 μm [4, 5].

Dans cette section, nous présenterons la déformation plastique sévère en exposant le principe physique s'y rattachant, en introduisant les différentes méthodes et équipements utilisés dans le domaine ainsi qu'en élaborant sur certaines particularités du procédé.

La déformation plastique sévère « **SPD** » peut être décrite comme un procédé mécanique selon lequel le matériau subit une déformation plastique importante entraînant l'affinement des grains constituant sa microstructure. De cet affinement découlera une augmentation de la résistance mécanique du matériau déformé [5]. Cette relation entre l'augmentation de la limite d'écoulement d'un matériau et l'affinement de ses grains peut être décrite par l'équation de Hall-Petch :

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-1/2} \quad (1.1)$$

Selon cette relation, la limite d'écoulement σ_y d'un matériau est fonction de la taille de ses grains, et augmente avec la racine carrée de la diminution de la taille du grain d . Cette relation prend aussi en paramètre la contrainte de friction σ_0 et une constante propre au matériau K_y [3].

1.3 Les principales techniques de déformation plastique sévères

Il existe un grand nombre de techniques de déformation plastique sévères. Elles sont le plus souvent dérivées des techniques traditionnelles de déformation comme le laminage ou l'extrusion. On peut citer :

- L'ARB (Accumulative Roll Bonding),
- Le CCB (Continuous Cyclic Bending),
- Le CGP (Constrained Groove Pressing) qui est dérivée du laminage,
- Le CCDC (Cyclic Channel Die Compression) qui s'inspire de la déformation par compression tandis que
- L'ECAP (Equal Channel Angular Pressing)
- Le CEC (Cyclic Extrusion Compression) ou le TE (Twist Extrusion) sont des dérivées de l'extrusion.
- Seule la torsion sous pression intense (HPT ; High Pressure Torsion) ne provient pas de l'adaptation d'un procédé industriel existant.

Les techniques ECAP et HPT sont les deux techniques sur lesquelles le plus grand nombre d'études existe [6].

NB : Nous nous intéresserons à techniques les plus utilisées (ECAP, HPT et ARB).

1.3.1 Torsion haute pression (HPT)

Les principes du traitement HPT sont représentés schématiquement sur la **Figure I.1**. L'échantillon, dans forme d'un petit disque, est situé entre deux enclumes où elle est soumise à une compression par une pression appliquée, P, de plusieurs GPa. Le disque est soumis à une contrainte de torsion qui est imposée par la rotation de l'enclume inférieure, soit à température ambiante, soit à une température élevée [8].

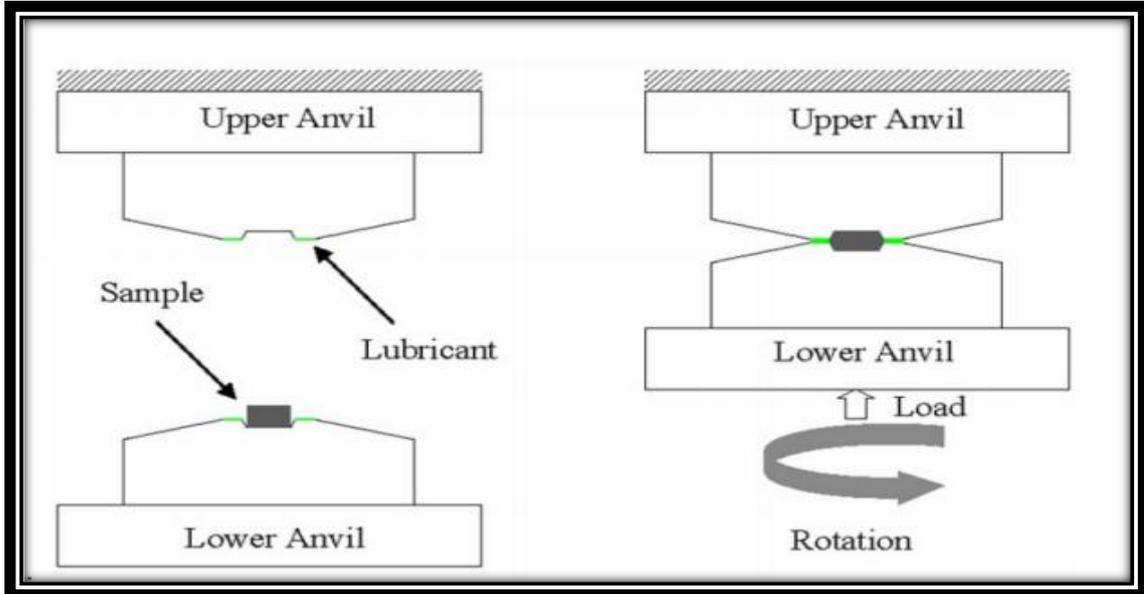


Figure 1.1: Schéma de principe du procédé Torsion haute pression [8].

La déformation équivalente de Von Mises ϵ_{eq} est donnée par la relation suivante :

$$\epsilon_{eq} = \frac{2\pi Nr}{h\sqrt{3}} \quad (1.2)$$

Où N est le nombre de tours, r et h représentent le rayon et l'épaisseur du disque respectivement [8].

1.3.2 Laminage accumulé ou ARB (Accumulated Roll Bonding)

Le Co-tréfilage avec ré-empilement (ou Accumulative Roll-Bonding, ARB), développé par Saito et al, est basé sur le principe du laminage : une tôle laminée est coupée suivant sa longueur, empilée puis ré-laminée (**Figure 1.2**) [7].

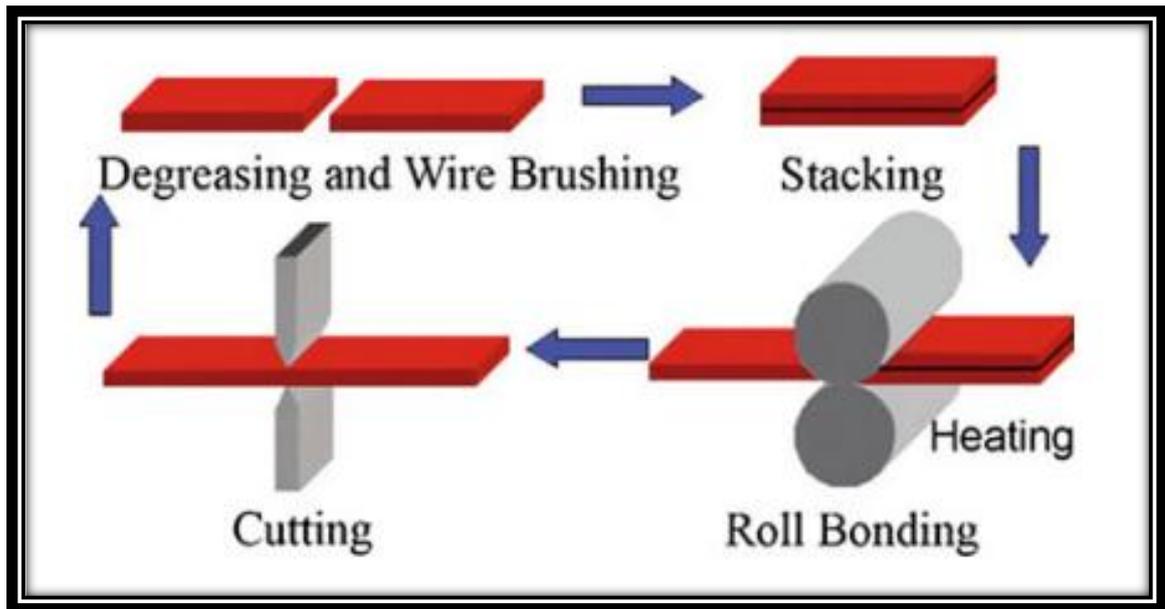


Figure 1.2: Schéma de principe du laminage accumulé ou ARB [7].

Le procédé peut être reproduit autant de fois que nécessaire et donc conduire à de très importantes déformations plastiques. Conformément à l'hypothèse habituellement formulées en laminage, on se place dans le cas de la déformation plane [5, 7].

La déformation équivalente après N cycles vaut :

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln(r), r = 1 - \frac{t}{t_0} = 1 - \frac{1}{2^n} \quad (1.3)$$

Où t_0 est l'épaisseur initiale des feuilles empilées, t l'épaisseur après le roulage et r la réduction de l'épaisseur par cycle.

L'épaisseur de cet empilement est de plusieurs centaines de μm (entre 1 mm et 300 μm), sa largeur est le plus souvent de 20 μm tandis que sa longueur peut atteindre plusieurs centaines de μm (le plus souvent entre 20 et 300 μm). Le matériau est déformé par laminage jusqu'à obtenir une épaisseur de feuille comprise entre 100 et 200 μm [6].

NB : pour la technique ECAP, elle sera développée dans le chapitre 2

Conclusion

En conclusion, le procédé SPD permet l'amélioration des propriétés mécaniques de pièces métalliques en affinant la taille des grains. Le procédé s'appuie sur la loi de Hall Petch mettant en relation le diamètre des grains et la résistance mécanique du matériau. Les principaux procédés SPD ainsi que leurs mécanismes de durcissement ont été exposés.

Ensuite, les principaux avantages des différents procédés SPD ont été revus. Certains d'eux se démarquent telle la méthode HPT qui permet d'améliorer les propriétés magnétiques des matériaux et le processus ARB permettant de fabriquer des pièces composites à matrice métallique. De plus, la méthode ECAE permet de réaliser le travail à froid sans réduction de l'aire de la section transversale de la pièce ainsi que d'obtenir des grains équi-axes.

L'utilisation de matériaux transformés par le procédé SPD est présentement limitée en raison d'un manque de connaissance sur le procédé et sur les propriétés obtenues de façon industrielle entre autres pour des pièces de grande taille. Les principales applications du procédé SPD sont présentement observées pour des boulons, des implants dentaires, des plaques de protection balistiques et des accessoires de sport

**CHAPITRE 2: 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.

2.1 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 Φ avec le canal d'introduction (**Figure 2.1**). 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 Φ . 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 [4, 9].

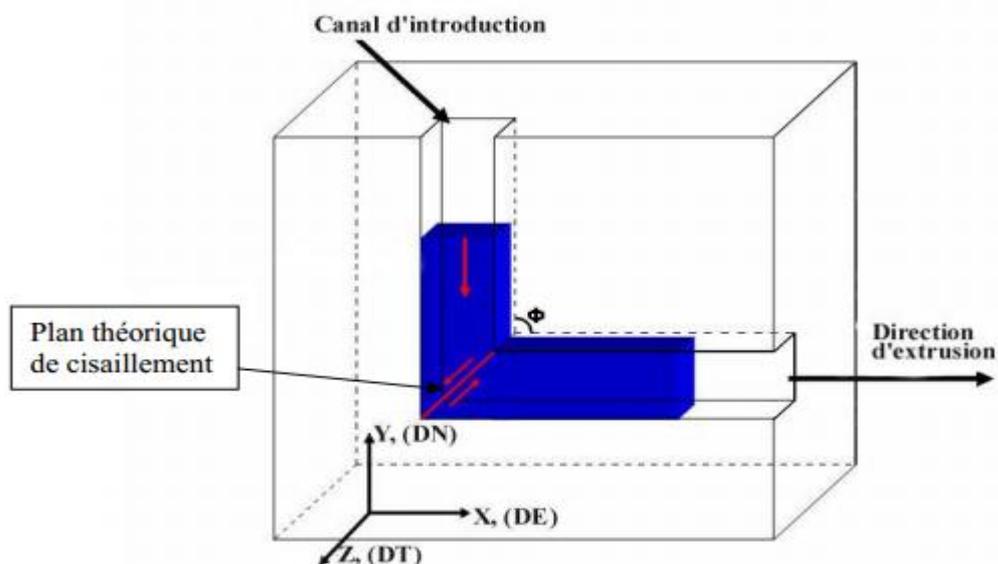


Figure 2.1: Représentation schématique du procédé ECAE [2].

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 [2, 4].

2.2 Paramètres fondamentaux du procédé ECAP

L'ECAP est un procédé de mise en forme caractérisé par quelques paramètres fondamentaux comme la déformation imposée après chaque passage dans le coude ainsi que le cisaillement et le changement de chemins de déformation pendant chaque route. Ces différents paramètres définissent la nature de l'extrusion par ECAP et sont influencés principalement par deux paramètres caractérisant la géométrie du coude ECAP, l'angle d'intersection des deux canaux et l'angle de courbure fait par ces deux canaux [2].

Ces Différents processus définissent de manière unique la nature précise de l'opération de pressage. Tous ces paramètres jouent un rôle essentiel dans la détermination La nature de la structure UFG introduite par ECAP [4].

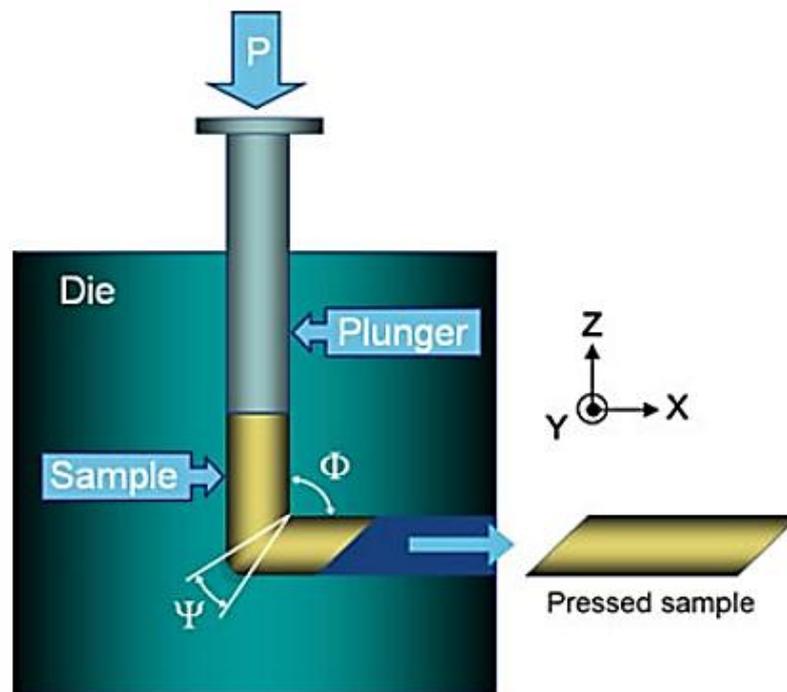


Figure 2.2: Schéma de principe du procédé d'Extrusion Coudeée à Aires Égales [7].

2.3 Les routes ou passages successifs

Afin d'étudier les modifications micro-structurelles produites lors des passages successifs à travers le système, quatre routes ou rotations, illustrées ci-dessous sur la **Figure 2.3**, sont principalement utilisées [10].

- La route **A** consisté en un simple enchaînement de passages, sans la moindre rotation du matériau entre chaque extrusion ;
- La route **B_A** impose une rotation du barreau de 90° dans le sens des aiguilles d'une montre puis de 90° dans le sens inverse successivement ;
- La route **B_C** est une rotation de 90° mais toujours dans le même sens entre chaque passage ;
- La route **C** consiste en une rotation de 180° du matériau [10].

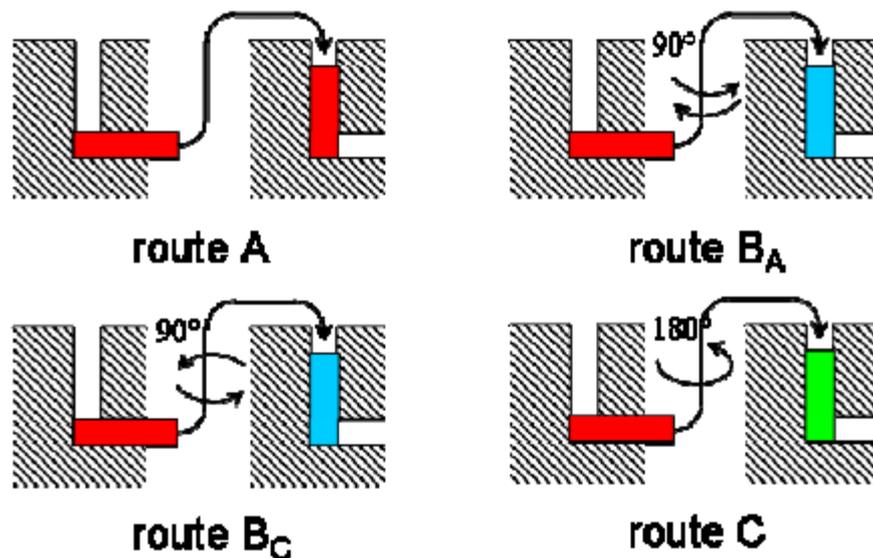


Figure 2.3: Schémas des routes ou rotations successives possibles entre chaque nouveau passage à travers le dispositif ECAP [10].

2.4 Paramètres expérimentaux du procédé ECAP

Lorsque les matériaux sont traités à l'aide d'ECAP, plusieurs facteurs différents influent sur la viabilité et les caractéristiques microstructurales des billettes sous pression. Ces facteurs se répartissent en trois catégories distinctes. Tout d'abord, il existe des facteurs directement associés à l'installation ECAP expérimentale, telles que les valeurs des angles dans la matrice entre les deux parties du canal et à l'arc de courbure externe où les canaux se croisent. Deuxièmement, il existe des facteurs expérimentaux liés aux régimes de traitement où un contrôle peut être exercé par l'expérimentateur, y compris, par exemple, la vitesse de pressage, la température de l'opération de pressage et la présence ou l'absence de contre-pression [4].

2.5 L'angle du canal Φ et de l'angle de courbure Ψ

L'influence de la géométrie du coude par les deux angles Φ et Ψ a été présentée avant donc on n'insiste pas sur ces deux paramètres. Il est quand même important de préciser que le consensus général dans la littérature est que le coude à $\Phi=90^\circ$ avec un petit arc de courbure ou voir même sans courbure (angle $0^\circ \leq \Psi < 20^\circ$), est le meilleur compromis entre taux de déformation imposé et la pression nécessaire pour pousser l'échantillon dans le coude sans provoquer sa fissuration [4].

2.6 Avantage d'ECAP

Comparé aux autres techniques de déformation plastique sévère, l'ECAP est spécialement attractif grâce à plusieurs avantages dont les plus importants sont :

- Grâce au fait que les deux canaux du coude ont la même section transversale, les échantillons peuvent être extrudés de façon répétitive afin d'atteindre des taux de déformation exceptionnellement élevés ;
- Différentes routes peuvent être utilisées pour contrôler l'évolution de la texture et de la microstructure pendant la déformation ;
- Après plusieurs passages dans le coude, pour atteindre le taux de déformation désiré, les échantillons gardent une homogénéité raisonnable sur la plupart de la longueur du barreau extrudé ;
- Ce procédé peut être appliqué à des billettes assez grandes de telle façon qu'il existe un réel potentiel de produire des matériaux qui pourront être utilisés dans un large domaine d'applications ;
- L'extrusion par ECAP nécessite des procédures assez simples qui peuvent facilement être exécutées sur un grand nombre d'alliages et le matériel nécessaire pour faire du ECAP est facilement trouvable dans la plupart des laboratoires ;
- L'ECAP peut être développé et appliqué à des matériaux ayant différentes structures cristallines ainsi qu'à une grande variété de matériaux : des alliages durcis par précipitation, des intermétalliques, des matériaux composites, etc. ;
- Le procédé peut être conçu pour des grandes échelles et il existe du potentiel pour qu'un jour l'ECAP soit utilisé dans les procédés industriels de traitement des matériaux.
- Production de graines ultrafines équi-axes (UFG) ont été obtenus par exemple Taille des grains inférieure à $1 \mu\text{m}$.
- Les propriétés insolites apparaissent comme élevées : Résistance à la traction, ductilité et possibilité d'obtenir une super-plastie à basse température.
- Capacité de contrôler les propriétés cristallographiques et texture mécanique pendant l'ECAE multi-passe par rotation judicieuse de la pièce à usiner entre passes.

- Déformations uniformes et unidirectionnelles peut être produit sous un niveau relativement faible de pression et charge pour les produits massifs.
- Formation de microstructures complexes : Textures équi-axes, lamelles et fibreuses.
- Augmentation de la dureté.
- Réalisation de la consolidation en poudre.

Ces différentes caractéristiques attractives ont mené dans les dernières années a beaucoup d'études expérimentales et théoriques qui ont amélioré la compréhension des phénomènes ayant lieu pendant la déformation par ECAP.

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 3 :

LOGICIELS UTILISÉS

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une animation d'un essai ECAP par « SOLIDWORKS » et une simulation de la même technique à l'aide d'un autre logiciel qui s'appelle « DEFORM 3D ».

3.1 La présentation des logiciels utilisés :

3.1.1 Solid Works :

Le logiciel de CAO Solid Works est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises [11].



Figure 3.1: l'interface d'entrée du logiciel Solid Works.

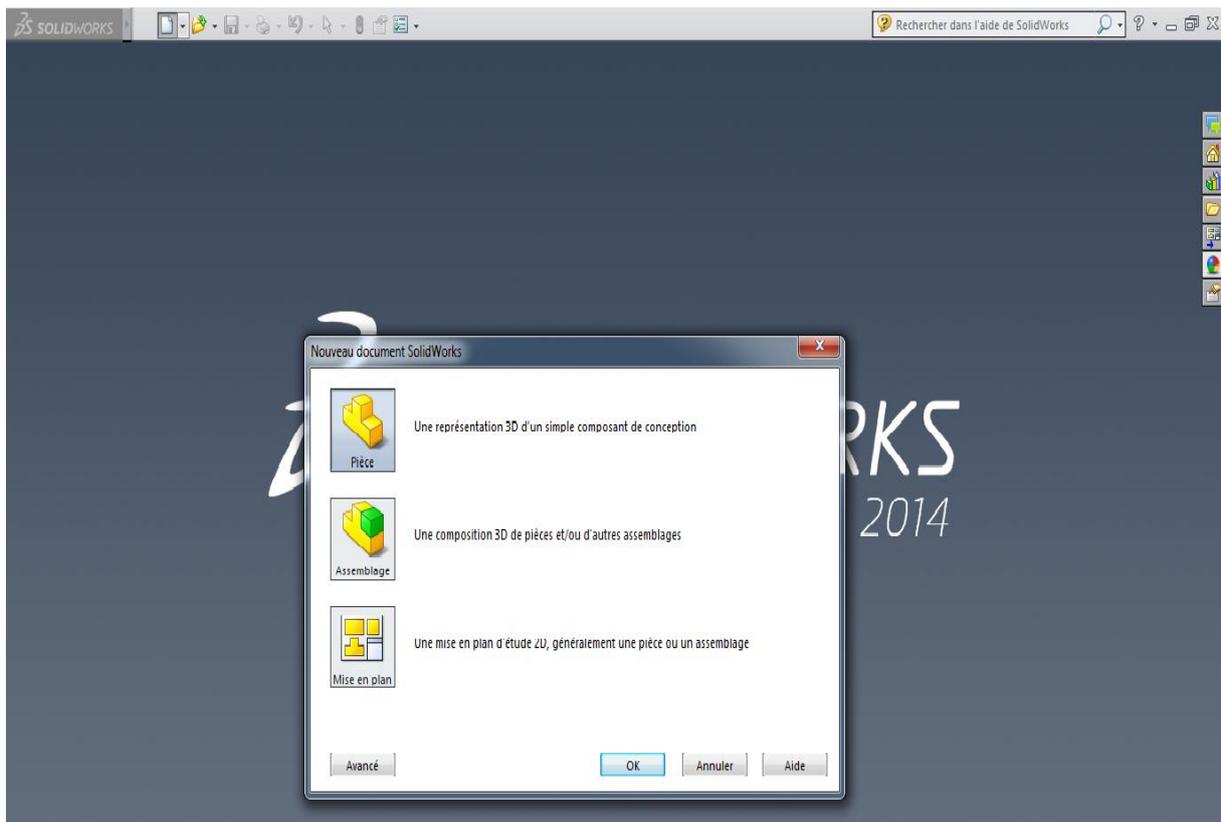


Figure 3.2: l'interface d'entrée du logiciel Solid Works pour le choix de travail.

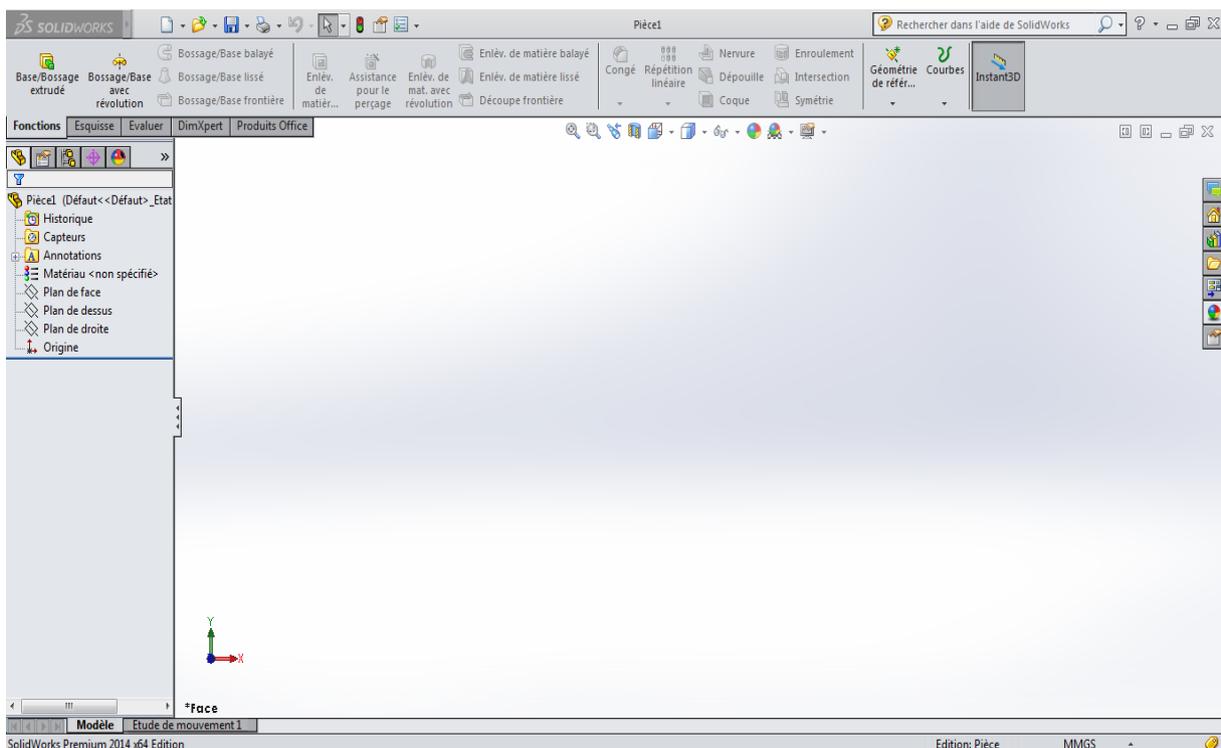


Figure 3.3: l'interface de travail pour la réalisation des pièces 3d.

3.1.2 Le concept du logiciel :

Les pièces constituent les éléments de base du logiciel SOLIDWORKS. Les assemblages contiennent des pièces ou d'autres assemblages, appelés des sous-assemblages.

Un modèle SOLIDWORKS est constitué de géométrie 3D qui définit ses arêtes, faces et surfaces. Le logiciel SOLIDWORKS vous permet de concevoir rapidement des modèles précis. Les modèles SOLIDWORKS sont :

- basés sur la modélisation 3D
- basés sur les composants [11].

3.1.3 Modélisation 3D :

Solid Works adopte l'approche de modélisation 3D. Lorsque vous concevez une pièce, vous créez un modèle 3D, de l'esquisse initiale au résultat final. A partir de ce modèle, vous pouvez créer des mises en plan 2D ou contraindre des composants constitués de pièces ou de sous-assemblages afin de créer des assemblages 3D. Vous pouvez aussi créer des mises en plan 2D d'assemblages 3D.

Un modèle conçu à l'aide de Solid Works peut être visualisé dans ses trois dimensions, c'est-à-dire dans son aspect final après fabrication [11].



Figure 3.4 : a) Pièce 3D Solid Works, b) Assemblage 3D Solid Works [11].

3.1.4 Intention de conception :

L'intention de conception décrit la façon dont vous souhaitez faire réagir votre modèle à tout changement que vous souhaitez y apporter. L'intention de conception est avant tout une question de planification. L'approche adoptée pour créer le modèle détermine comment les changements y seront reflétés. Plus l'exécution de la conception respecte votre intention de conception, plus le modèle sera optimisé. Plusieurs facteurs interviennent dans le processus de conception :

- **Besoins actuels** : Il est nécessaire de comprendre la finalité du modèle pour mieux le concevoir.
- **Considérations futures** : Anticipez sur les exigences éventuelles pour réduire au minimum les efforts de reconception lorsque vous modifiez le modèle. Le processus de conception passe par les étapes suivantes :
 - Identification des besoins
 - Conceptualisation du modèle sur la base des besoins identifiés
 - Développement du modèle sur la base des concepts élaborés
 - Analyse des résultats du développement du modèle
 - Edition du modèle si nécessaire [11].

3.1.5 Méthode de conception :

Une fois les besoins identifiés et les concepts appropriés élaborés, vous pouvez développer le modèle en procédant comme suit :

- **Esquisses**. Créez les esquisses et choisissez les réglages relatifs à la cotation, à application des relations, etc.
- **Fonctions**. Sélectionnez les fonctions appropriées, déterminez les meilleures onctions à appliquer, choisissez l'ordre selon lequel vous souhaitez les appliquer, etc.
- **Assemblages**. Si le modèle est un assemblage, sélectionnez les composants à contraindre, les types de contraintes à appliquer, etc [12].

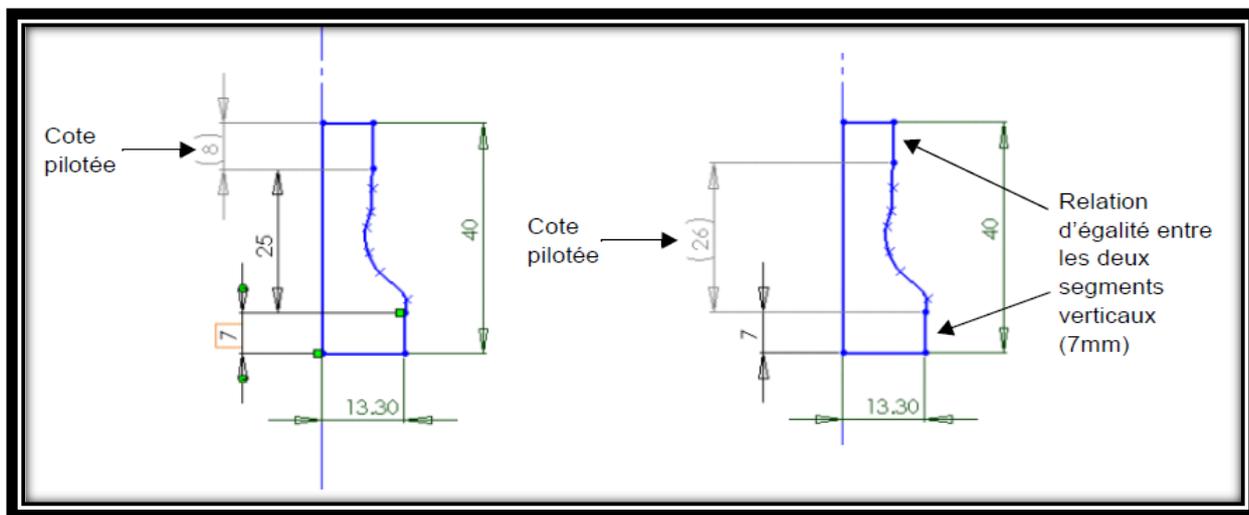


Figure 3.5: la réalisation d'une esquisse [12].

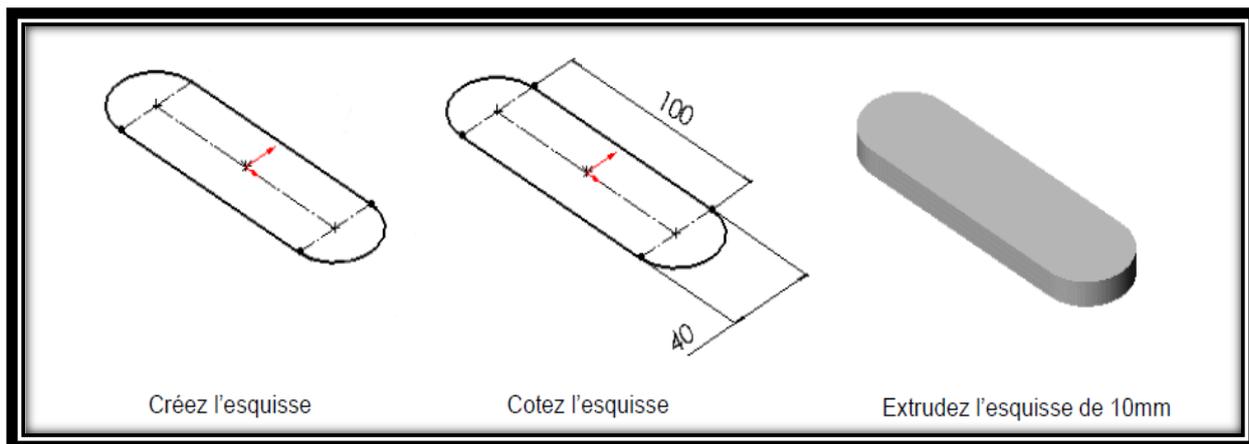


Figure 3.6: la réalisation d'une fonction [12].

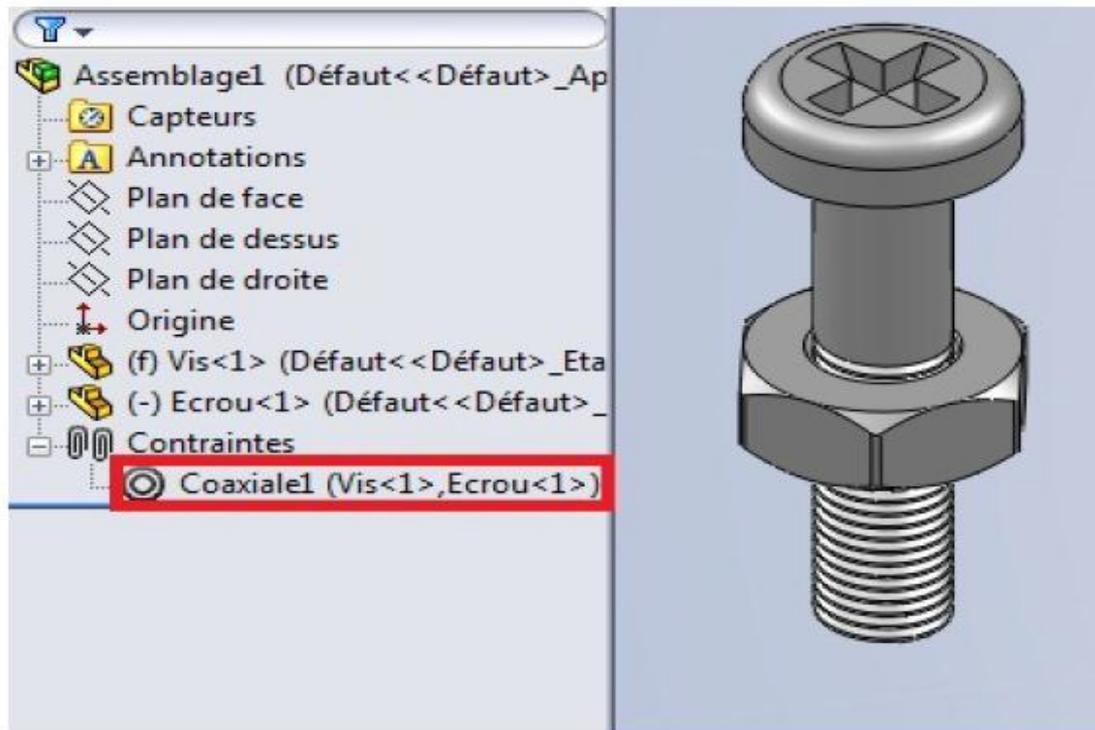


Figure 3.7: la réalisation d'un assemblage [13].

3.2 Deformed 3D :

Deform 3D est un puissant système de simulation de processus conçu pour analyser le flux tridimensionnel (3D) des processus complexes de formage de métaux. Deform 3D est un outil pratique et efficace pour prédire le flux de matériaux dans les opérations de formage industriel sans coût et délai d'essais. Les applications typiques incluent :

- Forgeage
- usinage
- laminage
- extrusion
- compactage

Deformed 3D est un «système ouvert» qui offre une flexibilité incroyable aux concepteurs et analystes travaillant sur une gamme d'applications, de développement et de recherche.

Le logiciel prend en charge les routines utilisateur et les variables définies par l'utilisateur. La capacité complexe du corps de déformation multiple avec un contact arbitraire permet aux utilisateurs de simuler l'assemblage mécanique et l'analyse du stress couplé.

Sur la base de la méthode des éléments finis, le logiciel s'est avéré être précis et robuste dans une application industrielle depuis plus de deux décennies. Le moteur de simulation est capable de prédire un flux important de matière de déformation et un comportement thermique avec une précision étonnante. DEFORM est le programme de simulation le plus utilisé au monde par les principaux instituts de recherche et les fabricants [14].

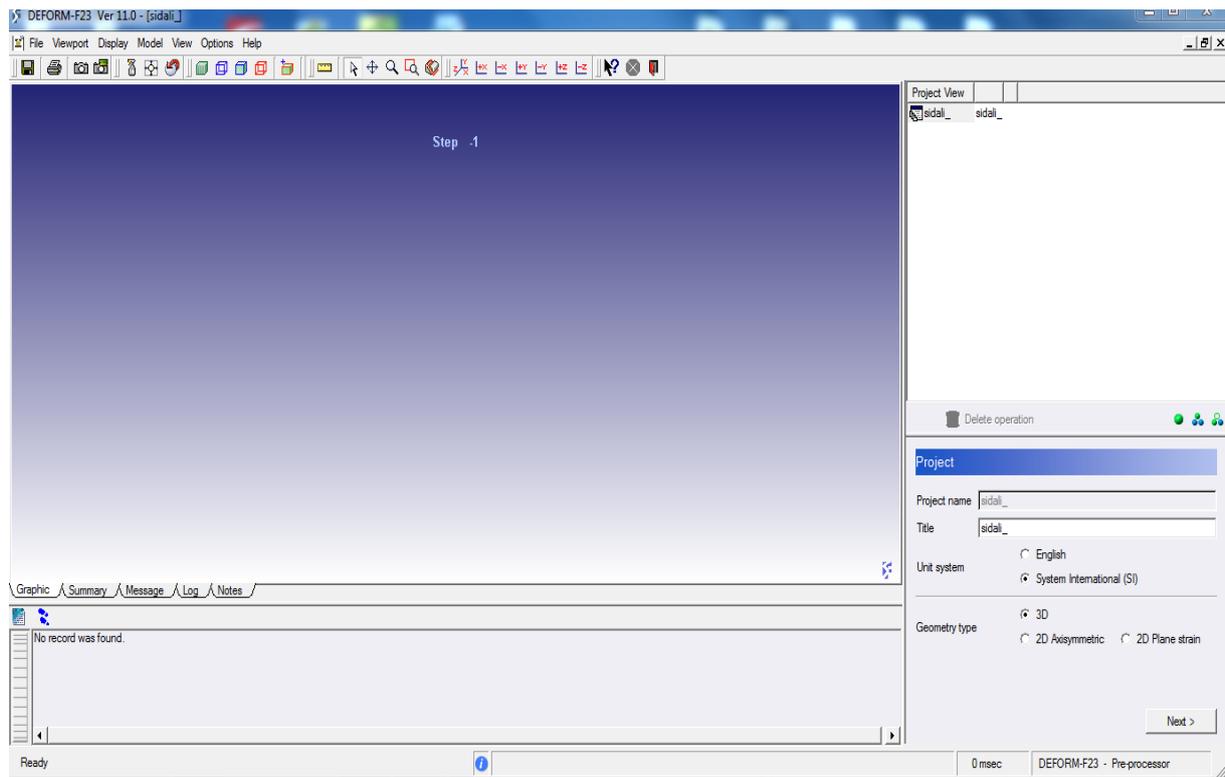


Figure 3.8: L'interface du logiciel Deformed 3D.

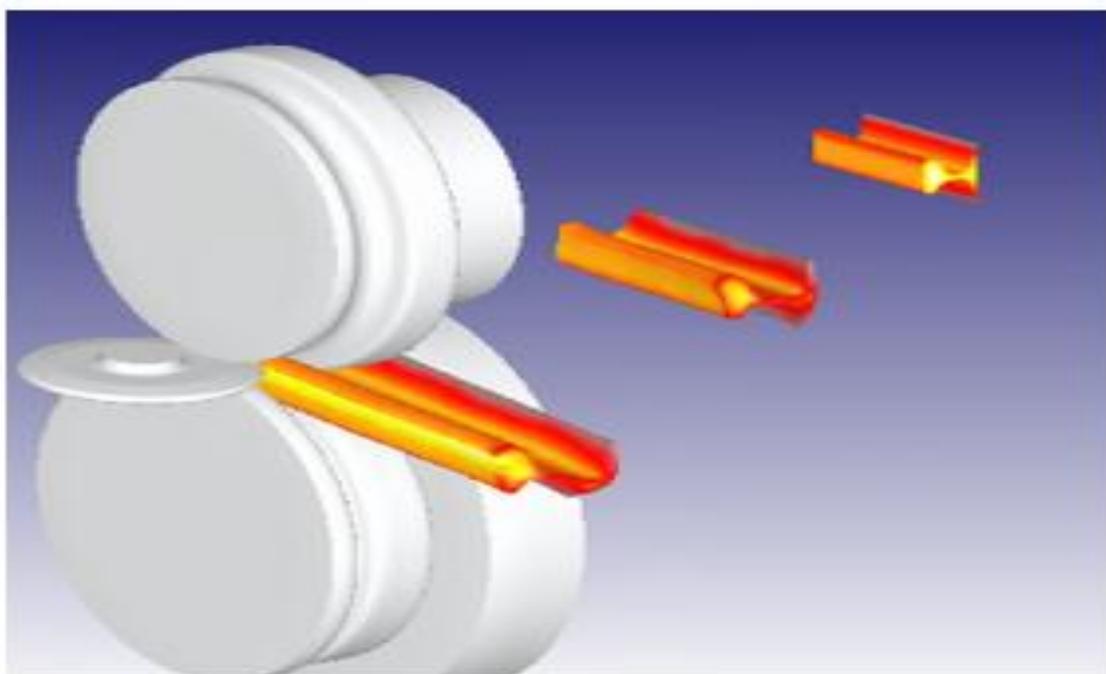


Figure 3.9: simulation du laminage par le logiciel Deform 3D [14].

Conclusion :

Dans ce chapitre j'ai évoqué deux logiciels afin de faire une animation de notre manipulation et une simulation sur l'ECAP lors du parcours de l'échantillon dans la matrice de déformation.

Nous avons opté sur les deux logiciels Solid Works et Deform 3D car ce sont deux logiciels qui peuvent mettre en évidence notre objectif de départ.

CHAPITRE 4 :
SIMULATION ET ANIMATION
DE LA TECHNIQUE ECAP

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons faire une description de la méthode ECAP par une animation à l'aide de logiciel d'animation Solid Works, déjà présenter dans le chapitre II et une simulation avec le logiciel Déformé 3D pour bien expliquer le phénomène qui se passe à l'intérieur de la matrice de déformation.

4.2 La description de la manipulation effectuée :

Durant nos essais, on a utilisé une presse à manipulation manuel, Elle est composée en deux parties :

- a) **La partie fonctionnelle** : cette partie est composée de deux parties, une partie supérieure mobile et une partie inférieure fixe (**Figure 4.1**).
- b) **La partie de manipulation** : elle représente le tableau de commande de la presse (**Figure 4.2**).

Cette presse est commandée manuellement à partir de la partie de manipulation elle peut exercer une force jusqu'à une force de 100 KN.

Pour une meilleure explication de l'expérience effectuée j'ai fait une conception de la manipulation à l'aide du logiciel Solid Works.

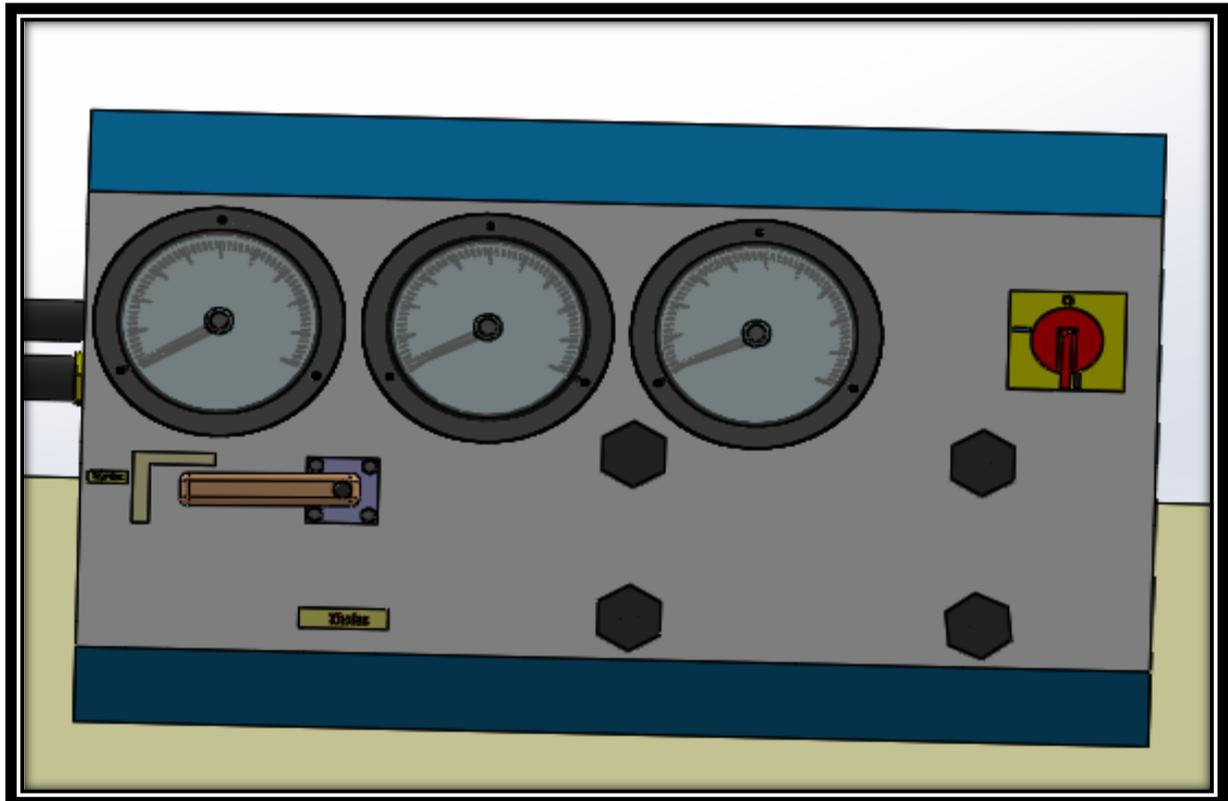


Figure 4.1 : la partie fonctionnelle de la presse réalisée par Solid Works

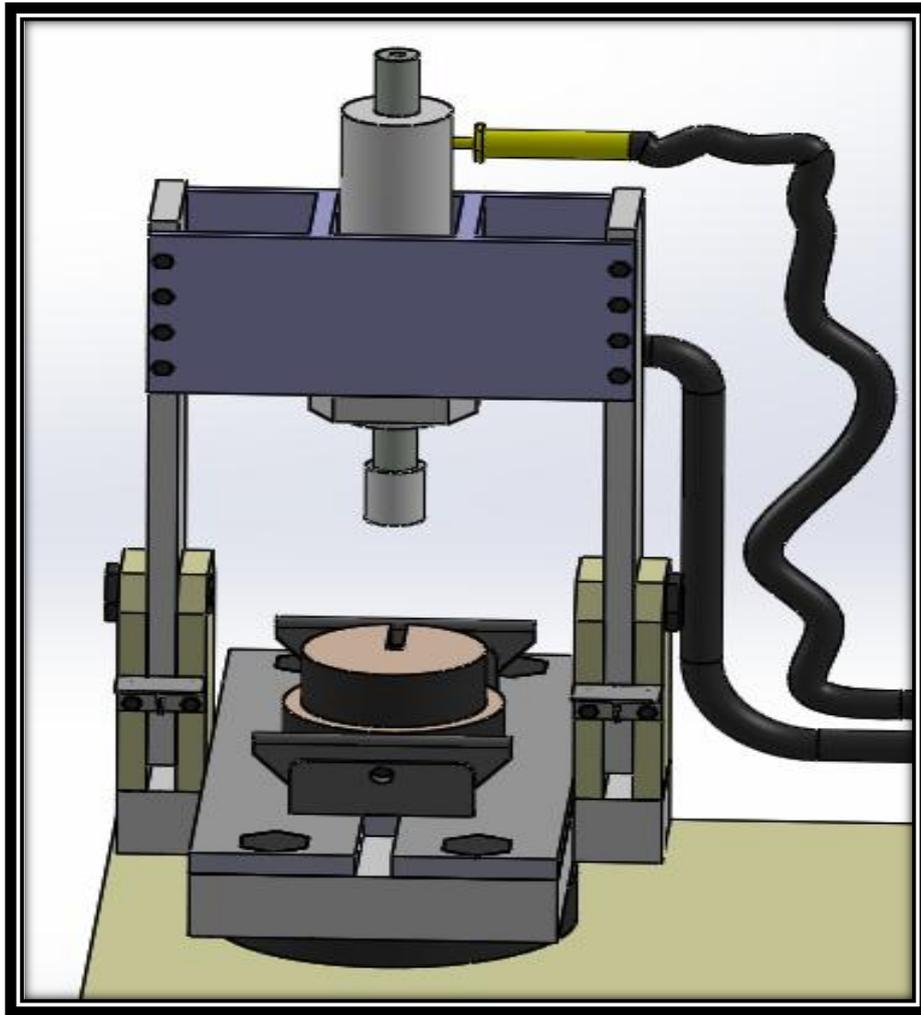


Figure 4.2: La partie de manipulation de la presse réalisée par Solid Works.

Après avoir montré les deux parties de notre presse qui sont réalisées par Solid Works, maintenant je vais détailler les différentes parties pour le fonctionnement de la presse :

1. Le bouton d'allumage.
2. La manette de manipulation
3. Le bras de changement d'orientation de piston (Mode : Traction, compression)
4. Le tableau de bord de manipulation
5. Les câbles de liaisons
6. Le vérin
7. Le piston de pression
8. Le support
9. La table

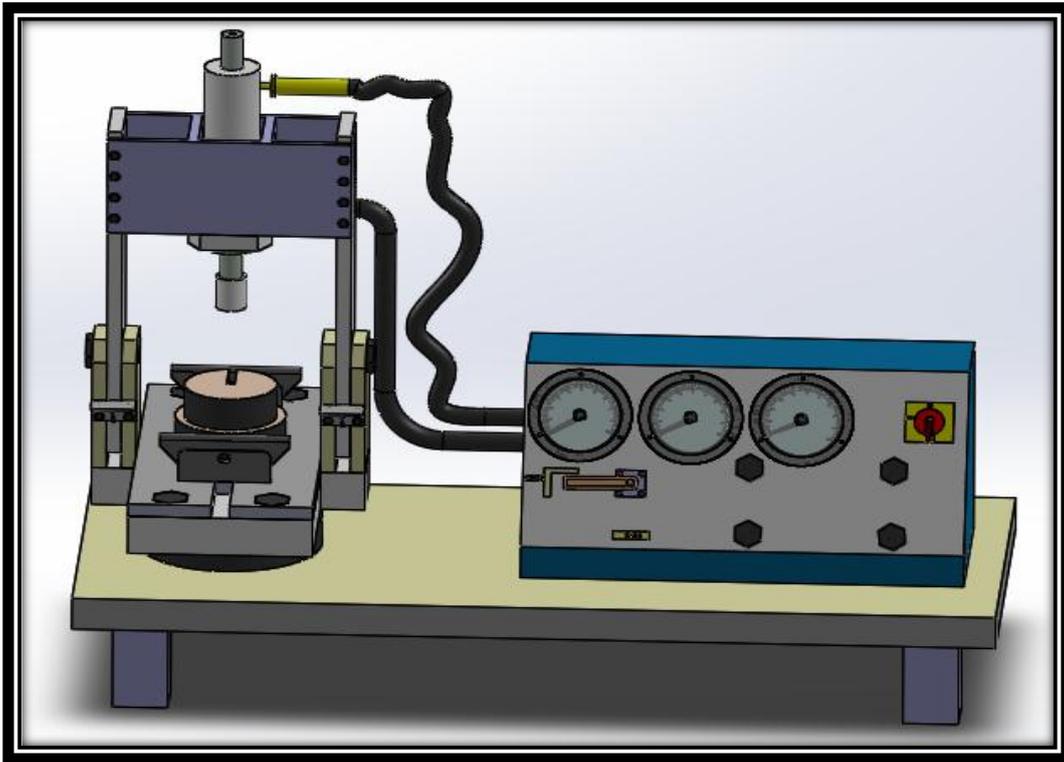


Figure 4.3: La réalisation de l'assemblage de la presse avec le logiciel Solid Works.

4.3 La matrice de déformation :

Nous avons réalisé la matrice de déformation à l'aide de Solid Works, avec l'angle de Canal choisi est de 90° et un angle de courbure de 20° pour notre étude. Elle est réalisé par un acier très dure (nuance Z200) afin supporter a la charge appliquée par la presse et aux contraintes intérieures effectuées sur les parois de la matrice durant notre processus de déformation

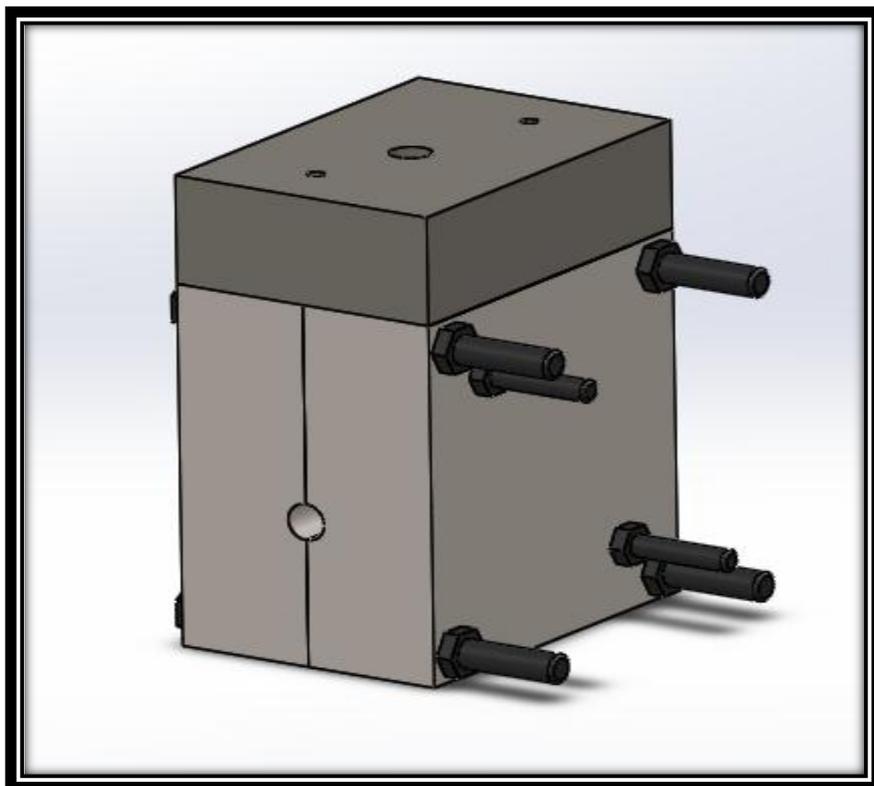


Figure 4.4: la matrice de déformation conçue à l'aide du logiciel Solid Works.

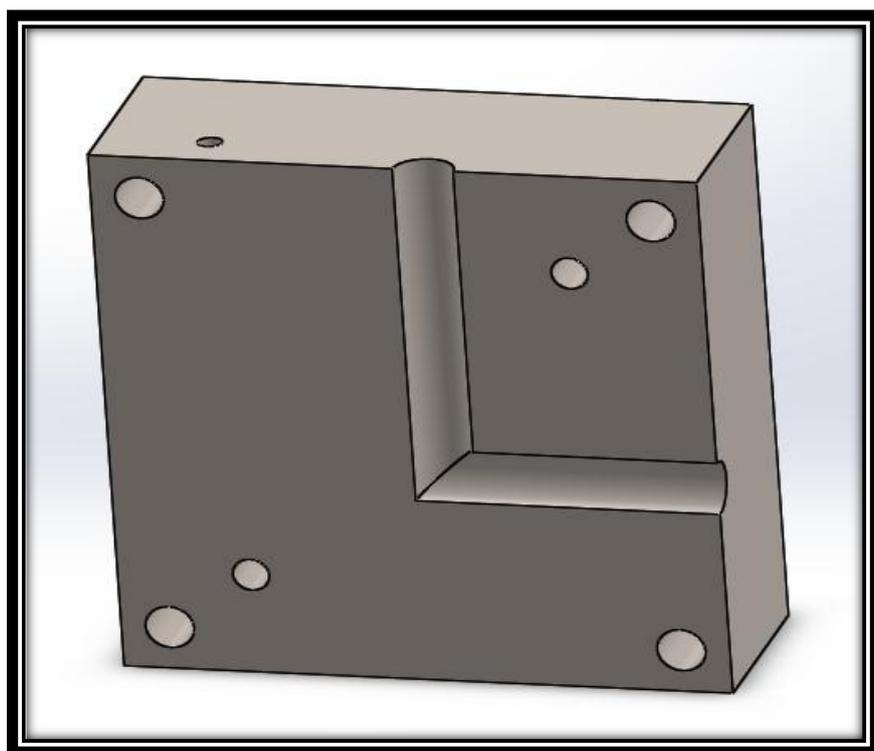


Figure 4.5: Vue intérieure de la matrice de déformation.

Après avoir effectué notre expérience avec la matrice présentée dans la **figure 2.4**, nous avons eu des problèmes des répulsions entre la matrice et la pièce renfort vu es forte pression appliqué. On a opté pour une solution pour la résolution de notre système par la conception d'un système dit le système de bridage pour une meilleur fixation et assurée la continuité du bloc.

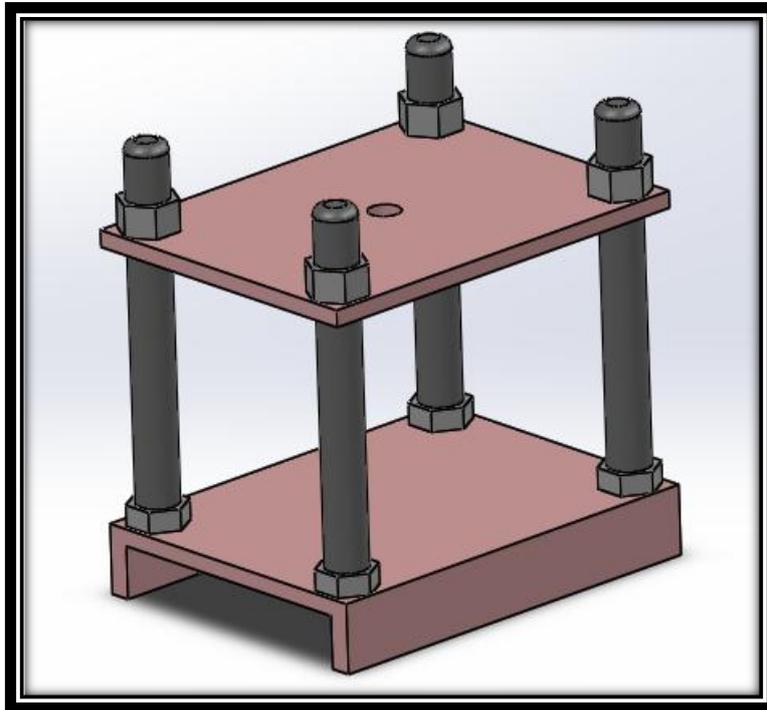


Figure 4.6: Système de bridage pour une meilleure fixation renfort-matrice.

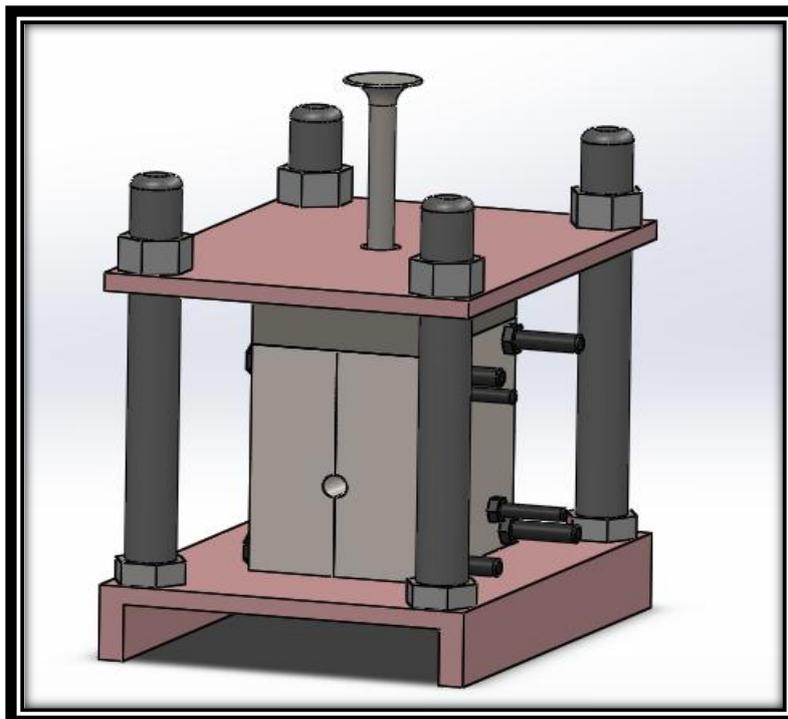


Figure 4.7: l'assemblage du système de déformation

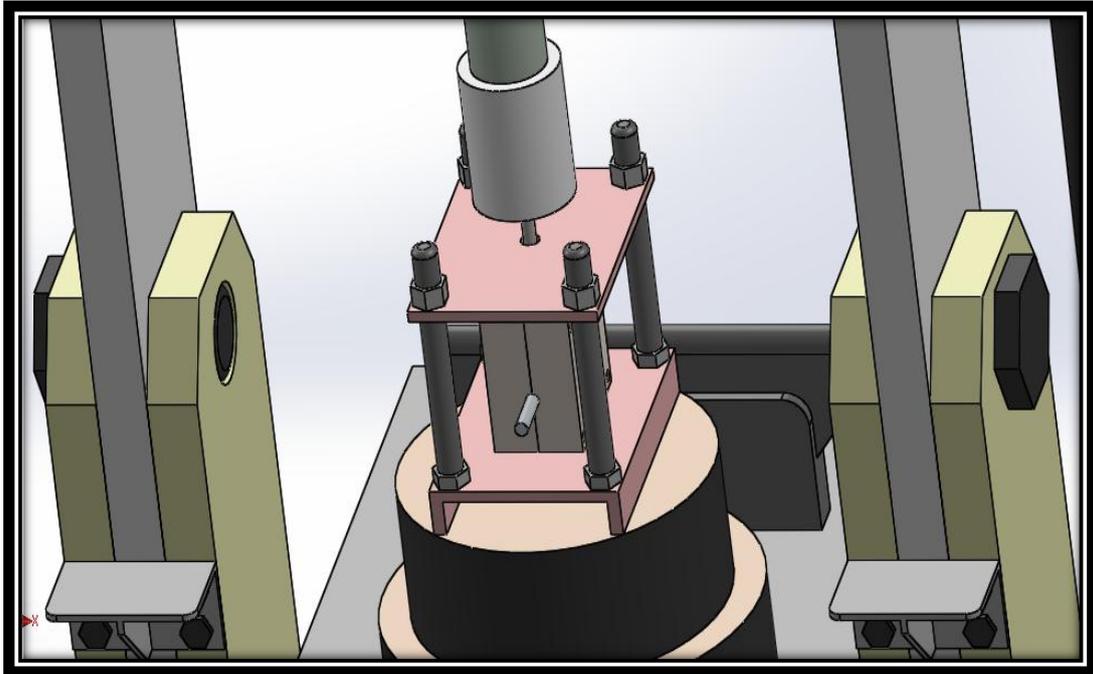


Figure 4.8: la manipulation d'ECAP en cours d'exécution.

4.4 Simulation de la méthode ECAP par Deform 3D :

Après avoir parlé sur l'expérimentale de la méthode, on passe maintenant au côté simulation et avoir une explication pour qui se passe à l'échantillon durant son parcours à l'intérieure de la matrice de déformation en suivant le chemin déjà montré.

La figure 4.10 montre bien le problème de la méthode ECAP, la formation de la zone morte, ce qui provoque une diminution de la longueur de l'éprouvette.

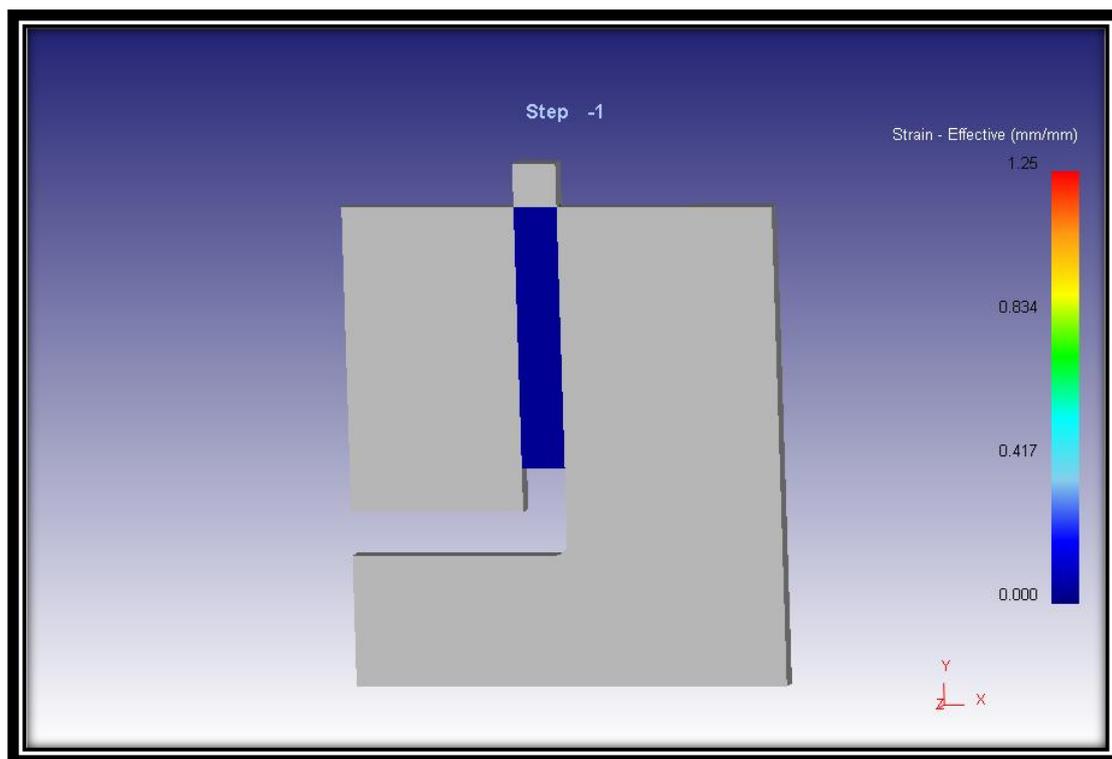


Figure 4.9: L'éprouvette avant déformation.

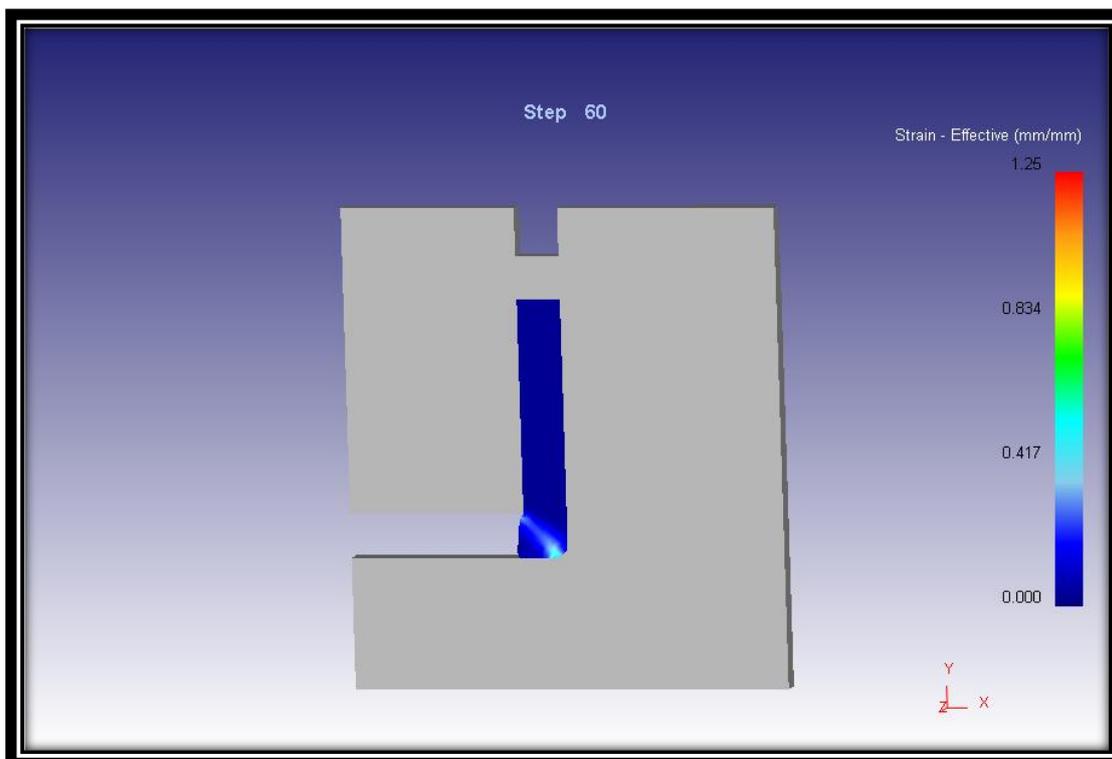


Figure 4.10 :L'éprouvette à l'entrée de l'angle et la formation de la première zone morte.

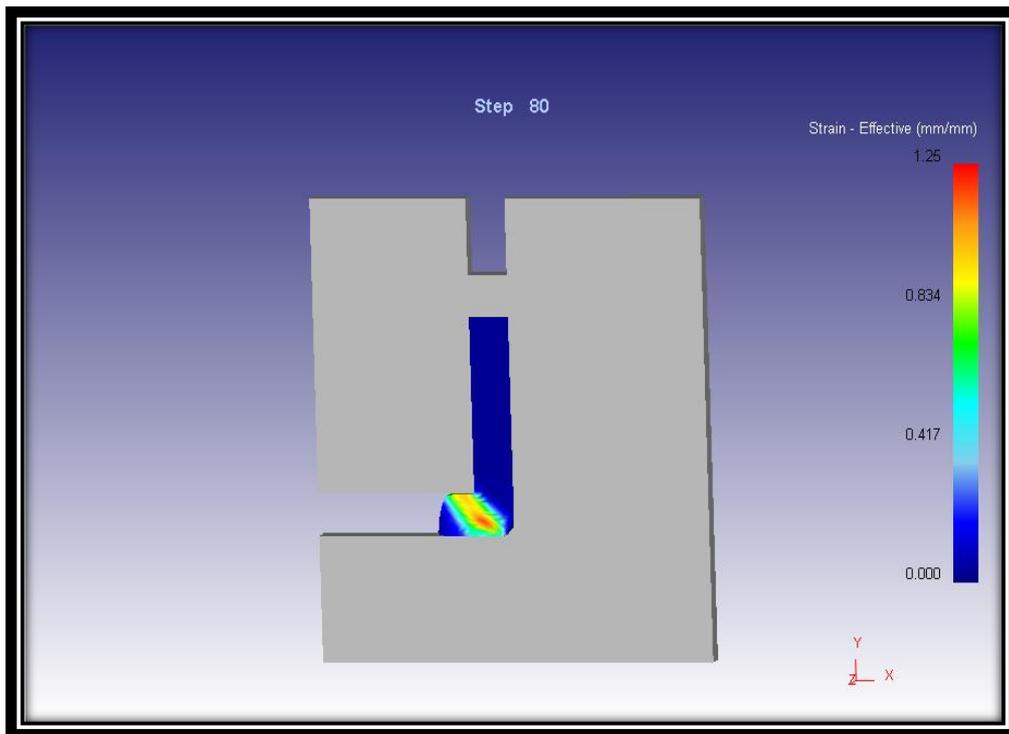


Figure 4.11: Début de déformation de l'éprouvette.

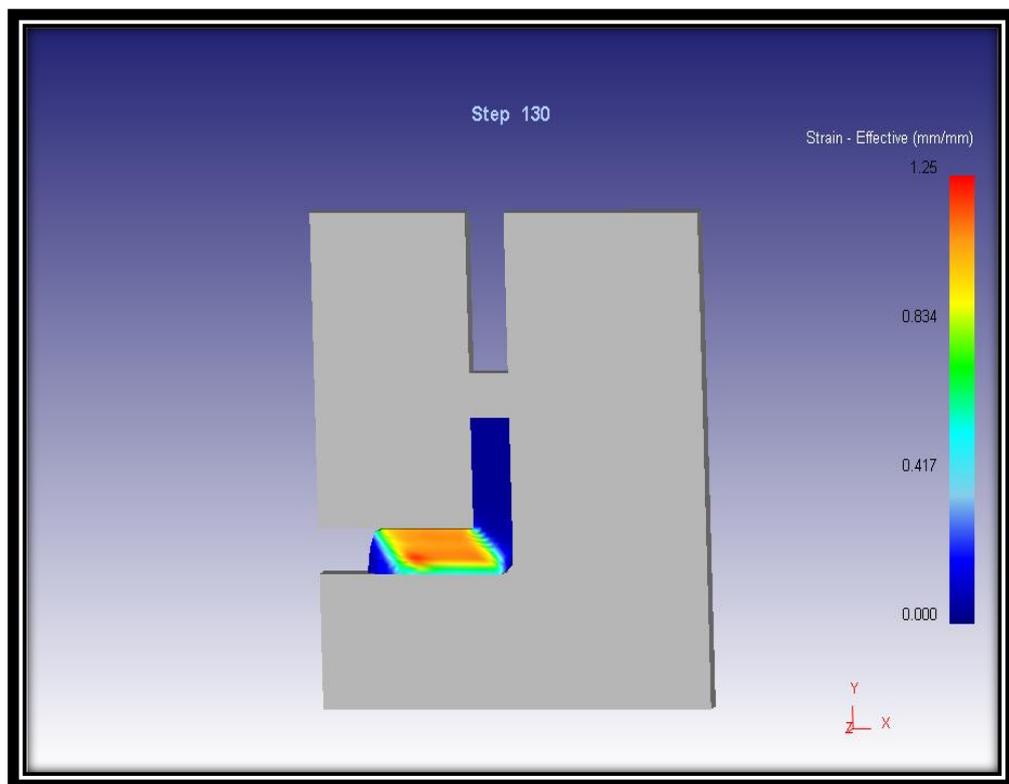


Figure 4.12: les zones les plus déformées.

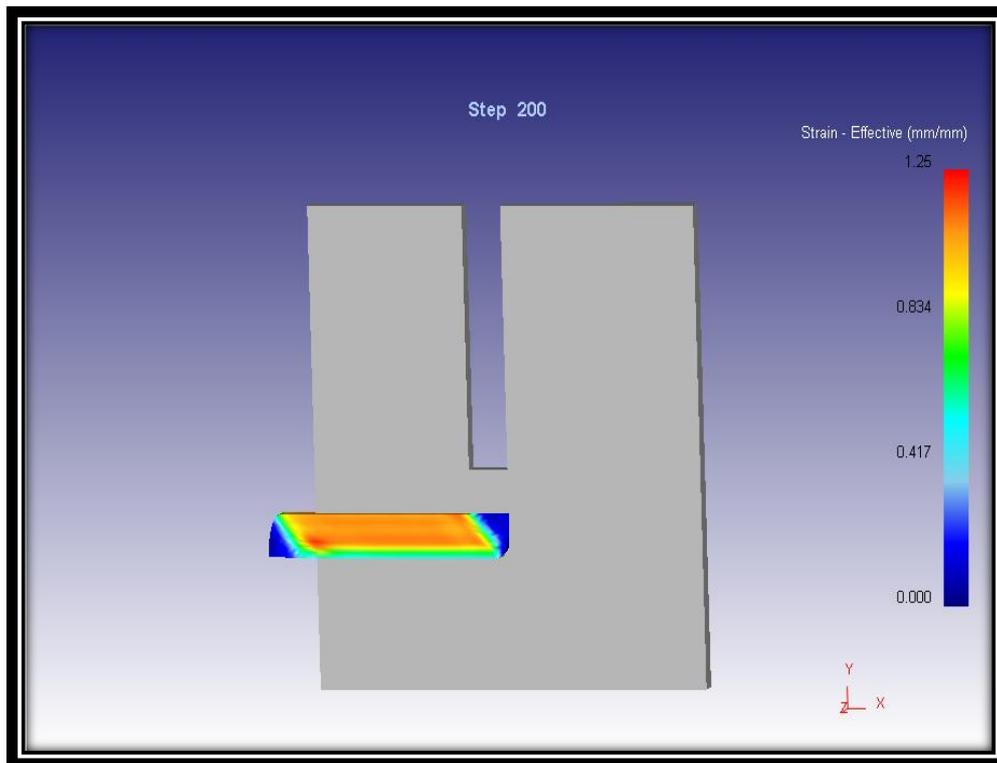


Figure 4.13: la déformation totale de l'éprouvette et la formation des deux zones mortes dans les deux extrémités.

La **figure 4.13** montre les zones les plus déformées selon le degré et la couleur, on voit bien que la partie du milieu de l'éprouvette, un peu loin des zones mortes, est la partie la plus sollicitée comme la couleur orange l'indique, elle explique une grande déformation qui a touché cette éprouvette durant sa première passe, on peut aussi remarquer l'homogénéité de la déformation de cette partie.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a réalisé une animation de notre manipulation ECAP pour bien expliquer notre expérience et une simulation pour voir le parcours de l'échantillon dans la matrice de déformation et les zones les plus sollicitées et connaître les défauts et les inconvénients de la méthode et cela en utilisant les deux logiciels Solid Works et Deform 3D car ce sont deux logiciels qui peuvent mettre en évidence mon objectif de départ.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale :

Dans ce travail, nous avons étudié la technique ECAP, un type particulier de déformations plastiques sévères, sur un alliage industriel des alliages d'aluminium 6063 modifié par l'argent. Nous nous sommes intéressés à l'étude des changements microstructuraux au cours de l'hyper déformation.

La route B_c est utilisée dans notre protocole expérimental de l'hyper déformation. Elle signifie qu'à chaque passe on tourne nos billettes autour de leur axe longitudinal d'un angle de 90° dans le sens des aiguilles de la montre entre deux passes successives. Ce choix se justifie par le fait que l'étude de ce matériau hyper déformé par ECAP est la première du genre, et que les différentes études faites dans cette méthode dans les laboratoires du monde par l'application d'autres types de routes par conséquent. Il serait bénéfique qu'on utilise une autre route différente à celle déjà prise et c'est pour cela qu'on a choisi la route B_c.

Pour bien expliquer et éclaircir notre travail, nous avons procédé à une animation par le logiciel Solid Works et à une simulation en 3D par le logiciel Deformed 3D afin de bien mettre en valeur le travail fait en réalité.

Les objectifs atteints de mon travail sont les suivantes :

- 1) Suivre le changement structural des éprouvettes au cours de la déformation par la simulation par le logiciel Deform 3D.
- 2) Comprendre le phénomène d'ECAP et la manipulation faite dans la réalité par une animation par le logiciel Solid Works.
- 3) La description du profil de la matrice de déformation.

Les résultats qu'on a pu obtenir sont en bon accord et le phénomène d'ECAP est bien décrit. On s'intéresse par la suite, en vue d'améliorer nos calculs et d'élargir notre étude et d'optimiser notre travail.

Perspectives :

- Faire une étude d'influence de l'angle de canal et de courbure sur les propriétés de notre alliage d'étude.
- Réaliser une simulation à différentes températures pour voir les différentes microstructures des billettes déformées.

Faire une simulation de la méthode d'ECAP en choisissant une autre route afin d'effectuer une comparaison des propriétés obtenues par les deux routes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Référence Bibliographique

- [1]. Pougis, Arnaud. « Affinement De Microstructures De Métaux Par Des Déformations Plastiques Extrêmes ». Thèse Doctorat. Université De Lorraine. 23 Septembre 2013.
- [2]. 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.
- [3]. William D. Callister, Jr. David G. Rethwisch. « Materials Science And Engineering An Introduction ». 9th Edition. United States America. (Pages 433-437).
- [4]. 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.
- [5]. 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
- [6]. Xavier Queleu. « Nanostructuration D'un Composite Cu-Fe Par Déformation Intense : Vers Un Mélange Forcé A L'échelle Atomique ». Science Des Matériaux [Cond-Mat. Mtrl-Sci]. Université De Rouen, 2008.
- [7]. Siret, Olivier. « Étude De La Soudabilité À Froid Des Alliages D'aluminium : Influence De La Sollicitation Mécanique Sur La Création Des Jonctions Métalliques ». École Nationale Supérieure Des Mines De Saint-Étienne : S.N., 12 Octobre 2010
- [8]. Aicha Loucif. «Microstructural Evolution In An Alsiing Alloy Subjected To Severe Plastic Deformation». Thèse Doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.27 Juin 2012.
- [9]. R.Z. Valiev And T.G. Langdon. « Developments In The Use Of Ecap Processing For Grain Refinement» Rev.Adv.Mater.Sci.13 (2006) 15-26
- [10]. 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.
- [11].1995-2013, Dassault Systèmes Solid Works Corporation, une société de Dassault Systèmes S.A. 175 Wyman Street, Waltham, Mass. 02451 USA. Tous droits réservés.
- [12]. Solid Works Corporation. »Introduction a Solid Works ». 1995-2002, 300 Baker Avenue.
- [13]. Romain Ginestou.» Apprenez à utiliser SolidWorks'. Licence Creative Commons BY-NC-SA 2.0.Dernière mise à jour le 8/10/2012
- [14]. <http://www.deform.com/products/deform-3d/>