

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme  
**d'ingénieur d'état en génie des Matériaux**

INTITULÉ:

---

**Analyse par éléments finis des paramètres de l'ECAP sur  
l'homogénéité de la déformation dans une matrice modifiée  
pour l'alliage d'aluminium 6063**

---

**Hicham MZOURI**

Sous la direction de :

**Prof. Mabrouk BOUABDALLAH**

Présenté et soutenu publiquement le: 20/06/2018 à 14:00.

**Composition du Jury:**

President	A. KASSER	M.C.A	ENP, Alger
Encadreur	M. BOUABDALLAH	Prof.	ENP, Alger
Co-encadreur	O.DJEMA	Ph.D Student	ENP, Alger
Examineur	H. YOUSFI	Prof.	ENP, Alger
Examineur	A. SAHLI	Chercheur	CRND, Alger

**ENP 2018**



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme  
**d'ingénieur d'état en génie des Matériaux**

INTITULÉ:

---

**Analyse par éléments finis des paramètres de l'ECAP sur  
l'homogénéité de la déformation dans une matrice modifiée  
pour l'alliage d'aluminium 6063**

---

**Hicham MZOURI**

Sous la direction de :

**Prof. Mabrouk BOUABDALLAH**

Présenté et soutenu publiquement le: 20/06/2018 à 14:00.

**Composition du Jury:**

President	A. KASSER	M.C.A	ENP, Alger
Encadreur	M. BOUABDALLAH	Prof.	ENP, Alger
Co-encadreur	O.DJEMA	Ph.D Student	ENP, Alger
Examineur	H. YOUSFI	Prof.	ENP, Alger
Examineur	A. SAHLI	Chercheur	CRND, Alger

**ENP 2018**

# Dédicaces

*“ À mes parents pour leur amour,  
à ma famille pour leur soutien,  
à mes amis pour leur aide,  
et à mes professeurs pour leurs conseils”*

---

Hicham MZOURI

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

## Remerciements

*“Tout d’abord, je voudrais remercier Allah tout-puissant pour m’avoir donné la force, la connaissance, et la capacité d’entreprendre ce projet de fin d’études et de persévérer et de le compléter de manière satisfaisante.”*

*“Mes remerciements et ma gratitude les plus sincères vont surtout à mon promoteur **Pr. M. BOUABDALLAH** pour ses précieux conseils, ses conseils avisés et son suivi continu pendant toute la période d’accomplissement.”*

*“Je tiens à remercier **Oussama DJEMA** qui m’a généreusement donné ses connaissances dans le domaine de Sever Plastic Deformation, sa présence constante et sa contribution m’ont aidé à atteindre cette étape.”*

*“J’exprime ma gratitude à **Ettaieb MAAMERI** pour son soutien avec les données et l’expertise DEFORM, et je suis reconnaissant à **Omar KHERFI** pour ses conseils et son aide dans mes premiers pas avec L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X et pour **Zineddine BOUDEGNA** pour son soutien dans la réalisation du modèle.”*

*“Je tiens également à remercier **Mr. KASSER** pour avoir accepté d’être président du jury, car je suis reconnaissant à **Pr. YOUSFI** et **Mme. SAHLI** pour avoir accepté notre demande d’être parmi les membres du jury afin d’examiner ce travail et de contribuer à son évaluation et à son amélioration.”*

*“Enfin, je voudrais exprimer ma gratitude à tous les professeurs qui ont contribué à notre formation depuis ‘Prepa’ jusqu’à l’année dernière en métallurgie.”*

## ملخص -

هذا العمل يشمل دراسة وتحليل توزيع التشوه البلاستيكي وحجمه في قطعة من سبائك الألمنيوم 6063 بعد الضغط الزاوي متساوي القناة ECAP باستخدام برنامج العناصر المنتهية DEFORM. لقد قمنا بتغيير معاملات ECAP بما في ذلك زاوية القناة وزاوية الانحناء وسرعة الضغط ومعامل الاحتكاك ومسارات المعالجة وحتى تصميم القالب من أجل دراسة تأثيراتها على تجانس التشوه. وقد وجد أنه يمكن التقليل من عدم تجانس التشوه عن طريق اختيار دقيق للمعاملات المناسبة.

كلمات البحث: ECAP، FEM، عدم تجانس التشوه، التشوه الفعال، تعديل القالب، DEFORM.

## Abstract –

This work deals with the study and analysis of the plastic strain distribution and magnitude in 6063 Al workpiece after Equal Channel Angular Pressing (ECAP) using DEFORM a finite element software. We have varied the ECAP parameters including the channel angle, the curvature angle, the pressing speed, the friction coefficient, the processing routes, and even the die design in order to study their effects on the strain homogeneity. It has been found that the inhomogeneity of strain can be minimized by carefully choosing the appropriate die and processing parameters.

**Keywords:** ECAP, FEM, strain inhomogeneity, strain effective, modified die, DEFORM.

## Résumé -

Ce travail porte sur l'analyse de la distribution des déformations dans un alliage d'aluminium 6063 déformé sévèrement par la technique ECAP à l'aide de logiciel des éléments finis DEFORM. Pour cela, Nous avons testé plusieurs paramètres tel que l'angle du canal, l'angle de courbure, la vitesse de pressage, le coefficient de frottement, les différentes routes ainsi que le design de la matrice. Il a été constaté que l'inhomogénéité de la déformation peut être minimisée en choisissant soigneusement les paramètres de déformation appropriés.

Mots clés : ECAP, FEM, inhomogénéité du déformation, déformation efficace, matrice modifiée, DEFORM.

# Table des Matières

---

Dédicaces

Remerciements

Table des matières

List des figures

Abréviations

Liste des symboles

<b>Introduction Générale</b>	<b>12</b>
<b>1 Equal Channel Angular Pressing</b>	<b>15</b>
1.1 Introduction . . . . .	15
1.2 Principe conventionnel de l'ECAP . . . . .	15
1.2.1 La contrainte imposée dans ECAP . . . . .	17
1.2.2 Les routes de traitement dans ECAP . . . . .	20
1.2.3 Systèmes de glissement pour les différentes routes de traitement . . . . .	21
1.2.4 Les schémas de cisaillement associés à ECAP . . . . .	23
1.3 Traitement continu par ECAP . . . . .	24
1.3.1 Cisaillement continu en bandes confinées, ECAD et conspuration . . . . .	24
1.4 Segal's principal in ECAP . . . . .	28
1.4.1 Impact de la friction sur le processus ECAP . . . . .	28
1.4.2 Le design de la matrice et le traitement . . . . .	29
<b>2 Simulation de l'ECAP</b>	<b>32</b>
2.1 Introduction . . . . .	32
2.2 Présentation de DEFORM . . . . .	33
2.3 Les applications de DEFORM . . . . .	34
2.4 ECAP's die design . . . . .	35
2.4.1 Design de la matrice conventionnel de l'ECAP 2D/3D . . . . .	35
2.4.2 Nouvelle conception de matrice ECAP . . . . .	36
2.5 Les étapes des simulations ECAP . . . . .	37
2.5.1 Le choix de la géométrie et des types de problèmes . . . . .	37
2.5.2 Type de processus et calcul de la température . . . . .	38
2.5.3 Définition de la géométrie de la pièce . . . . .	39

2.5.4	Génération de maillage . . . . .	40
2.5.5	Choisir le matériau de notre pièce . . . . .	41
2.5.6	Définition de la géométrie des matrices . . . . .	42
2.5.7	Contrôle du mouvement . . . . .	43
2.5.8	Coefficient de friction . . . . .	43
2.5.9	Exécution de la simulation . . . . .	44
2.5.10	DEFORM-Post . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Résultats et discussions</b>	<b>47</b>
3.1	Introduction . . . . .	47
3.2	L'influence de l'angle de canal, $\phi$ . . . . .	47
3.3	L'influence de l'angle de courbure, $\psi$ . . . . .	50
3.4	L'influence de la vitesse de pressage . . . . .	54
3.5	L'influence du coefficient de frottement, $\mu$ . . . . .	56
3.6	L'influence de la matrice modifiée . . . . .	58
3.7	L'influence des routes de traitement . . . . .	61
3.7.1	Route A . . . . .	62
3.7.2	Route $B_A$ . . . . .	63
3.7.3	Route $B_C$ . . . . .	64
3.7.4	Route C . . . . .	65
3.7.5	Route E . . . . .	66
3.8	Discussion . . . . .	67
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>70</b>
	<b>References</b>	<b>72</b>

---



# Liste des Figures

---

1.1	Schéma d'un ECAP typique: les plans X, Y et Z désignent respectivement le plan transversal, le plan d'écoulement et le plan longitudinal[54]. . . . .	16
1.2	Le principe de l'ECAP montrant le plan de cisaillement à l'intérieur de la filière: les éléments numérotés 1 et 2 sont transposés par cisaillement comme indiqué dans la partie inférieure de l'illustration [38]. . . . .	16
1.3	Principe de l'ECAP où $\phi$ est l'angle d'intersection des deux canaux et $\psi$ est l'angle sous-tendu par l'arc de courbure au point d'intersection: (a) $\psi = 0$ , (b) $\psi = \pi - \phi$ , (c) une valeur arbitraire de $\psi$ comprise entre $\psi = 0$ et $\psi = \pi - \phi$ [106].	18
1.4	Variation de la déformation équivalente, $\varepsilon$ , avec l'angle de canal, $\phi$ , sur une plage angulaire de $\phi$ de $45^\circ$ à $180^\circ$ pour les valeurs de l'angle de l'arc de courbure, $psi$ , de $0^\circ$ à $90^\circ$ : les déformations sont montrées pour un seul passage où $N = 1$ [114]. . . . .	20
1.5	Les quatre routes fondamentales dans ECAP + la route E [37]. . . . .	21
1.6	Les systèmes de glissement visualisés sur les plans X, Y et Z pour les passes consécutives utilisant les routes de traitement A, $B_A$ , $B_C$ et C [45]. . . . .	22
1.7	Les distorsions introduites dans les éléments cubiques lorsqu'elles sont visualisées sur les plans X, Y et Z pour traiter les routes A, $B_A$ , $B_C$ et C en appuyant sur 1-8 passes [38]. . . . .	23
1.8	Les motifs de cisaillement sur les plans X, Y et Z pour traiter les routes A, $B_A$ , $B_C$ et C en appuyant sur 1, 2, 3 et 4 passes: les couleurs rouge, mauve, le vert et le bleu correspondent respectivement aux première, deuxième, troisième et quatrième passes [46]. . . . .	24
1.9	The principle of the DCAP process for use in continuous production [51]. . .	25
1.10	Le principe du processus consensuel [90] . . . . .	26
1.11	Une illustration schématique du processus ECAP-Conform [62]. . . . .	27
1.12	Une pièce Al en cours de traitement par ECAP-Conform: la flèche marque la transition vers une section rectangulaire [62]. . . . .	27
1.13	(a) Représentation schématique d'une filière conventionnelle 90 ECAP, qui (b) conduit à un frottement de contact sur toutes les surfaces externes de la pièce [68]. . . . .	29
1.14	Représentation schématique du principe de ECAP de Segal. L'utilisation de parois coulissantes et d'un curseur inférieur réduit considérablement les zones de frottement de contact, comme indiqué schématiquement en (b). [68] . . .	30
2.1	DEFORM intégré 2D / 3D Version 11. . . . .	33
2.2	Exemples d'application DEFORM dans la déformation (A) et le traitement thermique (B). . . . .	34

2.3	Design de la matrice d'ECAP en 2D (A) et 3D (B) utilisant SolidWorks. . . . .	35
2.4	Les nouvelles matrices de l'ECAP avec le mur glissant bas conçu en 2D (A) et 3D (B) en utilisant SolidWorks. . . . .	36
2.5	Les options des types de problèmes et des modèles guidés fournis par DEFORM. . . . .	37
2.6	Le type de géométrie de DEFORM et les choix de système d'unité pour le projet. . . . .	38
2.7	The DEFORM offered options in process type (A) and temperature calc. (B) . . . . .	39
2.8	Définir la géométrie de la pièce. . . . .	40
2.9	Le résultat du maillage sur la pièce dans 2D (A) et 3D (B). . . . .	41
2.10	Choisir l'alliage d'aluminium 6360 comme matériau de la pièce pour notre étude. . . . .	41
2.11	Matrices importées et assemblées ainsi que la pièce en 2D et 3D. . . . .	42
2.12	Contrôler la direction du mouvement et la vitesse du poinçon. . . . .	43
2.13	Coefficient de friction et contrôle du transfert de chaleur. . . . .	44
2.14	Execution de la simulation . . . . .	45
2.15	La fenêtre DEFORM Post 2D/3D . . . . .	45
3.1	Illustration schématique des matrices utilisées pour évaluer l'influence de l'angle de canal, $\phi$ : (A) 120°, (B) 90°, et (C) 60°. . . . .	48
3.2	La déformation moyenne efficace en fonction de l'angle de canal, $\phi$ . . . . .	49
3.3	L'indice d'inhomogénéité de la déformation en fonction de l'angle du canal, $\phi$ . . . . .	50
3.4	Illustration schématique des matrices utilisées pour évaluer l'influence de l'angle de courbure, $\psi$ : (A) 0°, (B) 8°, (C) 20°, (D) 37°, et (E) 90°. . . . .	52
3.5	La déformation moyenne efficace en fonction de l'angle de courbure, $\psi$ . . . . .	53
3.6	Le graphique illustre l'indice d'inhomogénéité de la déformation en fonction de l'angle de courbure, $\psi$ . . . . .	53
3.7	Filtrer la distribution effective sur la pièce après ECAP à passage unique avec des valeurs de vitesse de pressage. . . . .	54
3.8	La variation de l'indice d'homogénéité de la contrainte en fonction de la vitesse de pressage. . . . .	55
3.8	Répartition de la température dans la pièce pour les vitesses de pressage les plus lentes et les plus rapides: (A) 0.5 mm/s et (B) 20 mm/s. . . . .	56
3.9	Déformation efficace après la variation des coefficients de frottement $\mu$ : (A) 0.01, (B) 0.06, (C) 0.1, (D) 0.2, (E) 0.3, et (F) 0.6. . . . .	57
3.10	La variation de l'indice d'homogénéité de la déformation en fonction du coefficient de frottement, $\mu$ . . . . .	57
3.11	La distribution de la déformation efficace sur la pièce après ECAP passe unique à travers la matrice modifiée. . . . .	58
3.12	Comparaison de l'influence de la friction sur la déformation entre la matrice modifiée et la matrice conventionnelle $\mu$ : (A) 0.06, (B) 0.3, et (C) 0.6. . . . .	59
3.13	Comparaison de l'indice d'homogénéité de déformation entre la matrice conventionnelle et la matrice modifiée pour trois valeurs de coefficient de frottement $\mu$ . . . . .	60
3.14	Résultat post-traitement ECAP dans un environnement 3D via un die modifié. . . . .	61
3.15	Strain effective distribution on workpiece after 1st pass through modif. die. . . . .	62
3.16	Répartition des contraintes sur la pièce après 2, 4, 6, et 8 passes dans route A. . . . .	63
3.17	Répartition des contraintes sur la pièce après 2, 4, 6, et 8 passes dans route $B_A$ . . . . .	64
3.18	Répartition des contraintes sur la pièce après 2, 4, 6, et 8 passes dans route $B_C$ . . . . .	65

3.19 Répartition des contraintes sur la pièce après 2, 4, 6, et 8 passes dans route C.	66
3.20 Répartition des contraintes sur la pièce après 2, 4, 6, et 8 passes dans route E.	67
3.21 Les valeurs moyennes de déformation de la pièce à usiner ECAPED pour les routes: A, $B_A$ , $B_C$ , C, et E after 8 passes. . . . .	68
3.22 Les valeurs SII de la pièce ECAPed pour les routes: A, $B_A$ , $B_C$ , C, et E after 8 passes. . . . .	69

---

# Abréviations

<b>ECAP</b>	<b>E</b> qual <b>C</b> hannel <b>A</b> ngular <b>P</b> ressing
<b>ECAE</b>	<b>E</b> qual <b>C</b> hannel <b>A</b> ngular <b>E</b> xtrusion
<b>DCAP</b>	<b>D</b> issimilar <b>C</b> hannel <b>A</b> ngular <b>P</b> ressing
<b>ECAR</b>	<b>E</b> qual <b>C</b> hannel <b>A</b> ngular <b>R</b> olling
<b>SPD</b>	<b>S</b> evere <b>P</b> lastic <b>D</b> eformation
<b>HPT</b>	<b>H</b> igh- <b>P</b> ressure <b>T</b> orsion
<b>RCS</b>	<b>R</b> epetitive <b>C</b> orrugation and <b>S</b> traightening
<b>ARB</b>	<b>A</b> ccumulative <b>R</b> oll- <b>B</b> onding
<b>BP</b>	<b>B</b> ackpressure
<b>FSP</b>	<b>F</b> riction <b>S</b> tir <b>P</b> rocessing
<b>UFG</b>	<b>U</b> ltrafine <b>G</b> rained
<b>NC</b>	<b>N</b> anocrystalline
<b>FEM</b>	<b>F</b> init <b>E</b> lements <b>M</b> ethods
<b>SII</b>	<b>S</b> rain <b>I</b> nhomogeneity <b>I</b> ndex
<b>SEM</b>	<b>S</b> canning <b>E</b> lectron <b>M</b> icroscopy

# Liste des symboles

Symbole	Nom	Unité
$D$	distance	$m$
$l$	longueur	$m$
$h$	profondeur	$m$
$d$	diamètre	$m$
$S$	surface	$m^2$
$A$	zone	$m^2$
$t$	temps	$s$
$\phi$	angle de canal	$^\circ$
$\psi$	angle de coin	$^\circ$
$\mu$	coefficient de frottement	
$\varepsilon_p$	déformation plastique	
$\sigma$	contrainte	$MPa$

# Introduction Générale

La taille moyenne des grains du matériau joue généralement un rôle très important, et souvent dominant, dans la détermination des propriétés mécaniques et physiques de tous les matériaux cristallins. Ainsi, la force de tous les matériaux polycristallins est liée à la taille des grains,  $d$ , à travers l'équation de Hall-Petch qui indique que le rendement le stress,  $\sigma$ , est donné par:

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

où  $\sigma_0$  est appelé contrainte de frottement et  $k_y$  est une constante de rendement [1,2]. Il résulte de l'équation (1) que la résistance augmente avec la réduction de la granulométrie, ce qui a suscité un intérêt croissant pour la fabrication de matériaux de granulométrie extrêmement réduite.

Les tailles de grain des alliages commerciaux sont généralement adaptées à des applications spécifiques en utilisant des traitements thermomécaniques prédéterminés dans lesquels les alliages sont soumis à des régimes de température et d'essais mécaniques spécifiés. Cependant, ces procédures ne peuvent pas être utilisées pour produire des matériaux avec des granulométries sous-micrométriques car il existe invariablement une limite inférieure, de l'ordre de quelques micromètres, qui représente essentiellement la taille de grain minimale facilement atteinte en utilisant ces procédures. En conséquence, l'attention a été dirigée vers le développement de techniques nouvelles et différentes qui peuvent être utilisées pour fabriquer des matériaux à grains ultrafines avec des tailles de grains dans le domaine submicrométrique et nanométrique.

De nombreuses techniques de traitement SPD différentes ont été proposées, développées et évaluées. Ces techniques comprennent le pressage angulaire à canal égal (ECAP) [3,4-6], la torsion haute pression (HPT) [7-9], le forgeage multidirectionnel [10-12], l'extrusion par torsion [13,14], cyclique-extrusion-compression [15,16], extrusion réciproque [17,18], ondulation répétitive et redressage (RCS) [19,20], pressage de rainures contraint [21], laminage accumulatif (ARB) [23,24], le traitement par friction-agitation (FSP) [25,26] et le traitement par agitation par friction submergée [27]. Toutes ces procédures sont capables d'introduire une grande déformation plastique et un raffinement microstructural significatif dans les solides cristallins en vrac. Certaines de ces techniques, telles que ECAP, HPT, forgeage multidirectionnel et ARB, sont déjà des méthodes bien établies pour produire des matériaux UFG où, en fonction de la structure cristalline, les microstructures traitées ont des tailles de grains généralement comprises entre  $70 - 500nm$ . Les autres techniques sont actuellement en cours de développement à cet effet.

Parmi les diverses procédures mentionnées ci-dessus, le pressage angulaire à canal égal est une technique de traitement particulièrement attrayante pour plusieurs raisons. Tout

d'abord, il peut être appliqué à des billettes assez grandes pour qu'il y ait un potentiel de production de matériaux pouvant être utilisés dans une large gamme d'applications structurelles. Deuxièmement, il s'agit d'une procédure relativement simple qui est facilement réalisée sur une large gamme d'alliages et, à l'exception de la construction de la filière, le traitement par ECAP utilise un équipement facilement disponible dans la plupart des laboratoires. Troisièmement, une homogénéité raisonnable est atteinte à travers la plus grande partie de la billette pressée, à condition que les pressages soient poursuivis jusqu'à une contrainte suffisamment élevée. Quatrièmement, le procédé peut être mis à l'échelle pour le pressage d'échantillons relativement gros et il existe un potentiel de développement de l'ECAP à utiliser dans les procédés commerciaux de traitement des métaux. Ces différentes caractéristiques intéressantes ont conduit à de nombreuses études expérimentales et de nouveaux développements dans le traitement ECAP au cours de la dernière décennie.

La méthode des éléments finis (MEF) est l'une des méthodes numériques les plus importantes pouvant être utilisées pour expliquer le processus de déformation au cours du processus ECAP et des processus connexes. Ils incluent les analyses de déformation plastique des matériaux métalliques pendant l'ECAP, la sélection correcte du canal dans l'ECAP, la conception de la déformation plastique homogène pendant l'ECAP.

Il a été approuvé que la méthode des éléments finis (FEM) est une méthode appropriée pour l'analyse des processus ECAP. D'après nos résultats de simulation, nous avons pu découvrir qu'il existe des valeurs de paramètres optimales pour lesquelles l'inhomogénéité de déformation est minimale.

Dans ce projet, la simulation par éléments finis du processus ECAP est réalisée à l'aide du logiciel DEFORM où nous avons analysé l'influence de plusieurs paramètres de l'ECAP et d'une matrice modifiée sur l'amplitude et l'homogénéité de la déformation de la billette.

Nous avons considéré pour cette étude une billette en alliage d'aluminium 6063 avec une section carrée de 15 mm de côté et une longueur de 120 mm. Pour la plupart des cas, le coefficient de frottement a été estimé à 0,06 comme valeur moyenne pour un lubrifiant approprié. Et une vitesse de pression moyenne estimée à 1 mm.s<sup>-1</sup>. Les résultats présentés à la fois en 2D et en 3D sont très utiles pour comprendre l'effet des paramètres de l'ECAP sur les propriétés de la billette résultante.

Nous avons commencé cette thèse par une introduction générale où nous avons présenté un aperçu des déformations plastiques sévères, y compris le processus ECAP. Le cœur de la thèse s'articule autour de trois chapitres principaux:

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les détails historiques, théoriques et pratiques de l'ECAP, son développement d'état de l'art et ses principaux paramètres, ainsi que le principe de Segal.

Dans le deuxième chapitre, nous passons à la phase de simulation, où nous avons défini le logiciel DEFROM et ses avantages, la conception de notre matrice modifiée.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus; comme nous avons comparé et discuté les effets des différents paramètres et de la matrice modifiée sur l'ampleur de la déformation et l'homogénéité dans la pièce.

Finalement, cette thèse a été accomplie avec une conclusion générale qui résume les principaux résultats de ce travail, en plus d'autres perspectives à suivre et à réaliser.

# Chapitre 1



# Chapter 1

## Equal Channel Angular Pressing

### 1.1 Introduction

Le procédé de pressage angulaire à canal égal (ECAP), également appelé extrusion angulaire à canal égal (ECAE), a été introduit par Segal et ses collaborateurs dans les années 1970 et 1980 dans un institut de Minsk dans l'ex-Union soviétique [28]. L'objectif de base à ce moment-là était de développer un procédé de formage du métal où des contraintes élevées peuvent être introduites dans les billettes métalliques par simple cisaillement. Cependant, bien que l'objectif ait été atteint avec succès, le développement précoce de l'opération de pressage n'a reçu qu'une attention limitée de la part de la communauté scientifique. Cette situation a changé dans les années 1990 lorsque des rapports et des aperçus ont commencé à documenter la possibilité d'utiliser ECAP pour produire des métaux ultrafins et submicrométriques avec des propriétés nouvelles et uniques [29-31] et ces rapports ont suscité un intérêt intense et continu dans l'investigation scientifique, développer et, finalement, utiliser le procédé ECAP dans des applications industrielles. Cette section décrit les différents types d'ECAP qui ont été développés et appliqués dans la production de structures à grains ultrafines.

### 1.2 Principe conventionnel de l'ECAP

Un certain nombre de rapports décrivent le processus fondamental de l'écoulement des métaux au cours de l'ECAP [5,32-36] et, dans la pratique, le principe de l'ECAP est illustré schématiquement dans fig. 1.1 Pour la matrice montrée dans l'illustration, canal est courbé par un angle abrupt,  $\phi$ , égal à  $90^\circ$  et il y a un angle supplémentaire,  $\psi$ , égal à  $0^\circ$  in fig. 1.1, qui représente l'arc de courbure externe à l'intersection des deux canaux. L'échantillon, sous la forme d'une tige ou d'une barre, est usiné pour s'adapter à l'intérieur du canal et la matrice est placée sous une forme de presse de sorte que l'échantillon peut être pressé à travers la matrice en utilisant un piston. La nature de la déformation imposée est un simple cisaillement qui se produit lorsque l'échantillon traverse la matrice comme indiqué schématiquement dans fig. 1.2 pour la simplicité, l'angle de die dans fig. 1.2 est  $90^\circ$ , le plan de cisaillement théorique est représenté entre deux éléments adjacents dans l'échantillon numéroté 1 et 2, et ces éléments sont transposés par cisaillement comme représenté dans la

partie inférieure du diagramme [38]. Malgré l'introduction d'une contrainte intense lorsque l'échantillon passe à travers le plan de cisaillement, l'échantillon émerge finalement de la filière sans éprouver aucun changement dans la section transversale.

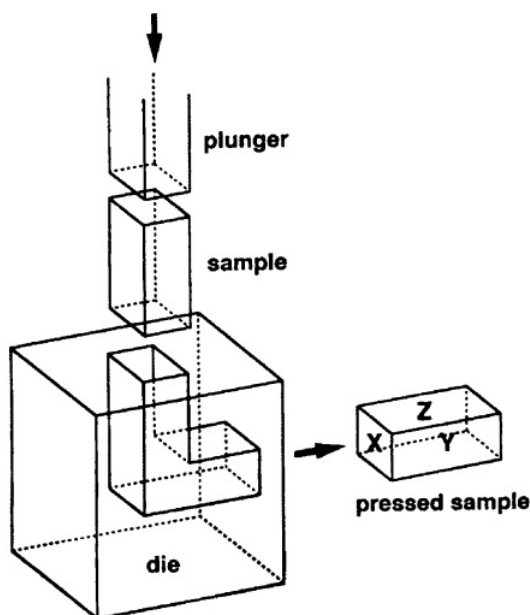


FIGURE 1.1: Schéma d'un ECAP typique: les plans X, Y et Z désignent respectivement le plan transversal, le plan d'écoulement et le plan longitudinal[54].

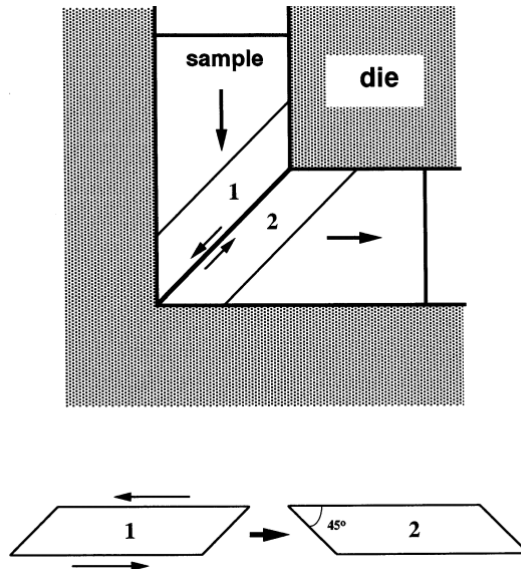


FIGURE 1.2: Le principe de l'ECAP montrant le plan de cisaillement à l'intérieur de la filière: les éléments numérotés 1 et 2 sont transposés par cisaillement comme indiqué dans la partie inférieure de l'illustration [38].

Ceci est illustré par l'échantillon pressé dans fig. 1.1. Trois plans orthogonaux distincts sont également définis dans fig. 1.1 où ces plans sont le plan X ou transversal perpendiculaire à la direction de l'écoulement, le Y ou plan d'écoulement parallèle à la face latérale au point de sortie de la matrice et le Z ou plan longitudinal parallèle à la surface supérieure au point de sortie de la matrice, respectivement. Comme indiqué dans la section 1, le maintien de la

même section transversale lors du traitement par ECAP, malgré l'introduction de souches très importantes, est la caractéristique importante du traitement SPD et c'est une caractéristique qui distingue ce type de traitement des métaux conventionnels. opérations de travail telles que le laminage, l'extrusion et le dessin.

Puisque la section transversale reste inchangée, le même échantillon peut être pressé de manière répétée pour atteindre des déformations exceptionnellement élevées. Par exemple, l'utilisation de pressages répétitifs permet d'invoquer différents systèmes de glissement sur chaque passage consécutif en faisant simplement tourner les échantillons de différentes manières entre les différentes passes. Dans la pratique, de nombreuses études sur l'ECAP impliquent l'utilisation de barres à section transversale carrée et de filières à canaux carrés. Pour ces échantillons, il est commode de développer des routes de traitement dans lesquelles les billettes sont tournées par incréments de  $90^\circ$  entre chaque passe distincte. Les mêmes voies de traitement sont également facilement appliquées lorsque les échantillons sont sous la forme de barres à section transversale circulaire. Quatre voies de traitement fondamentales ont été identifiées dans ECAP: route A où l'échantillon est pressé de façon répétitive sans aucune rotation, route BA où l'échantillon est tourné de  $90^\circ$  dans des directions alternées entre des passes consécutives, route BC où l'échantillon est rotation dans le même sens de  $90^\circ$  entre chaque passage et la route C où l'échantillon est tourné de  $180^\circ$  entre les passages [39].

section Paramètres fondamentaux dans ECAP

La procédure ECAP est un procédé d'écoulement de métal fonctionnant en cisaillement simple et caractérisé par plusieurs paramètres fondamentaux tels que la contrainte imposée dans chaque passage séparé à travers la filière, les systèmes de glissement fonctionnant pendant l'opération de pressage et les schémas de cisaillement billettes. Pris ensemble, ces différents processus définissent uniquement la nature précise de l'opération de pressage. Tous ces paramètres jouent un rôle essentiel dans la détermination de la nature de la structure UFG introduite par l'ECAP.

### 1.2.1 La contrainte imposée dans ECAP

Une déformation abrupte est imposée à un échantillon dans chaque passage à travers une filière ECAP. L'amplitude de cette déformation peut être estimée en utilisant une approche analytique basée sur les différentes configurations de matrices illustrées schématiquement dans la représentation bidimensionnelle montrée dans fig. 1.3 [106], où  $\phi$  est l'angle de canal et le L'angle  $\psi$  représente l'angle associé à l'arc de courbure à l'intersection des deux parties du canal. Trois conditions sont montrées dans fig. 1.3 donc, fig. 1.3 (a) correspond à une situation limite où  $\psi = 0^\circ$ , fig. 1.3 (b) correspond à une seconde situation limite où  $\psi = (\pi - \phi)^\circ$  et fig. 1.3 (c) représente une condition intermédiaire où  $0^\circ < \psi < (\pi - \phi)^\circ$ . La contrainte est estimée en supposant un échantillon entièrement lubrifié de sorte que tous les effets de frottement peuvent être négligés.

Pour la situation où  $\psi = 0^\circ$  dans fig. 1.3 (a), un petit élément carré dans le canal d'entrée, étiqueté  $abcd$ , traverse le plan de cisaillement théorique et devient déformé dans le parallélogramme étiqueté  $a'b'c'd'$ . On peut montrer à partir des premiers principes que la contrainte de cisaillement,  $\gamma$ , est donnée par

$$\gamma = 2 \cot \left( \frac{\phi}{2} \right) \quad (1.1)$$

En utilisant la même approche pour fig. 1.3 (b), il s'ensuit que

$$\gamma = \phi \quad (1.2)$$

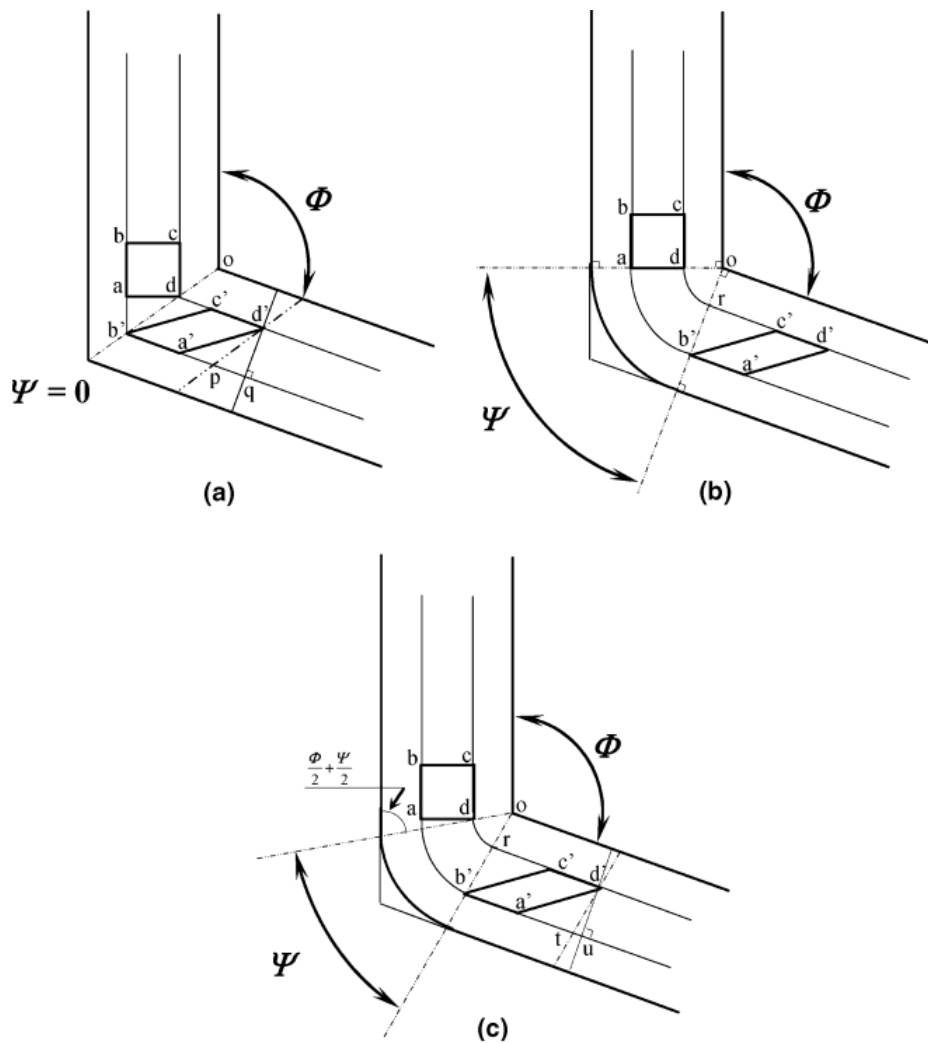


FIGURE 1.3: Principe de l'ECAP où  $\phi$  est l'angle d'intersection des deux canaux et  $\psi$  est l'angle sous-tendu par l'arc de courbure au point d'intersection: (a)  $\psi = 0$ , (b)  $\psi = \pi - \phi$ , (c) une valeur arbitraire de  $\psi$  comprise entre  $\psi = 0$  et  $\psi = \pi - \phi$ [106].

et une analyse similaire pour fig. 1.3 (c) conduit à la solution générale

$$\gamma = 2 \cot \left( \frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \quad (1.3)$$

Il résulte de l'inspection que la solution générale dans Eq. 1.3 se réduit à l'Eq. 1.1 quand  $\psi = 0^\circ$  et à Eq. 1.2 quand  $\psi = (\pi - \phi)^\circ$ . Enfin, la déformation équivalente après passage de N,  $\varepsilon_N$ , peut être exprimée sous une forme générale par la relation

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot \left( \frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2} \right) \right] \quad (1.4)$$

Eq.1.4 est compatible avec une estimation antérieure de la déformation où un dé a été analysé avec  $\psi = 0^{circ}$ , l'angle de canal  $\phi$  a été pris comme  $2\phi$  et la déformation après passage de N a été estimée comme [21]

$$\varepsilon_N = \frac{2N}{\sqrt{3}} \cot \phi \quad (1.5)$$

Eq.1.5 est également identique à la relation dérivée dans une analyse alternative [107]. Ainsi, toutes ces approches conduisent à des relations similaires pour la déformation équivalente mais Eq. 1.4 a l'avantage d'incorporer l'angle associé à l'arc de courbure,  $\phi$ . Eq. 1.4 est aussi raisonnablement cohérent avec les approches alternatives [108-110] et fournit une procédure simple et directe pour estimer la déformation pour n'importe quelle matrice ayant des valeurs différentes pour  $\phi$  et  $\psi$ .

Il existe des preuves expérimentales soutenant l'utilisation de l'Eq. 1.4 dans des expériences sur ECAP. Tout d'abord, des expériences de modèles ont été menées où des couches de plasticine colorée ont été pressées à travers une matrice en plexiglas et les mesures de la contrainte dans ces expériences ont révélé Excellent accord avec Eq. 1.4 dans les régions centrales des billettes bien qu'il y ait eu des déviations près des parois des cellules à cause des effets de frottement. Deuxièmement, des expériences de modèle ont été menées dans lesquelles deux demi-billettes d'aluminium pur, avec une grille rectangulaire régulière dessinée sur une de leurs interfaces communes, ont été pressées à travers une filière ayant  $\phi = 90^\circ$  et  $\psi = 0^\circ$  et la contrainte a été mesurée directement après le pressage. Le résultat montre un excellent accord avec Eq. 1.4 dans 85% de la billette, bien qu'il y ait eu une zone de déformation non uniforme au voisinage de la surface inférieure de la billette où la matière traversait le coin extérieur de la filière. L'expérience a montré que cette région de non-uniformité occupait seulement  $\sim 15\%$  de la superficie totale. Il est commode de préparer une représentation graphique de l'Eq. 1.4 car cela fournit une compréhension visuelle simple de la signification des angles de filière  $\phi$  et  $\psi$ . Ce type de tracé a été initialement construit pour des angles de die supérieurs et supérieurs à  $\phi = 90^\circ$ , mais l'approche a ensuite été étendue pour inclure des angles de die aussi petits que  $45^\circ$ : montré dans fig. 1.4 pour un seul passage avec  $N = 1$  où l'angle de canal  $\phi$  varie de  $45^\circ$  à  $180^\circ$  et l'arc de courbure varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  [43].

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de l'inspection de fig. 1.4. Premièrement, l'angle à l'arc de courbure,  $\psi$ , a un effet relativement mineur sur la déformation équivalente, sauf pour les angles de canal inférieurs à  $90^\circ$ . Deuxièmement, des déformations exceptionnellement élevées peuvent être obtenues en une seule passe en

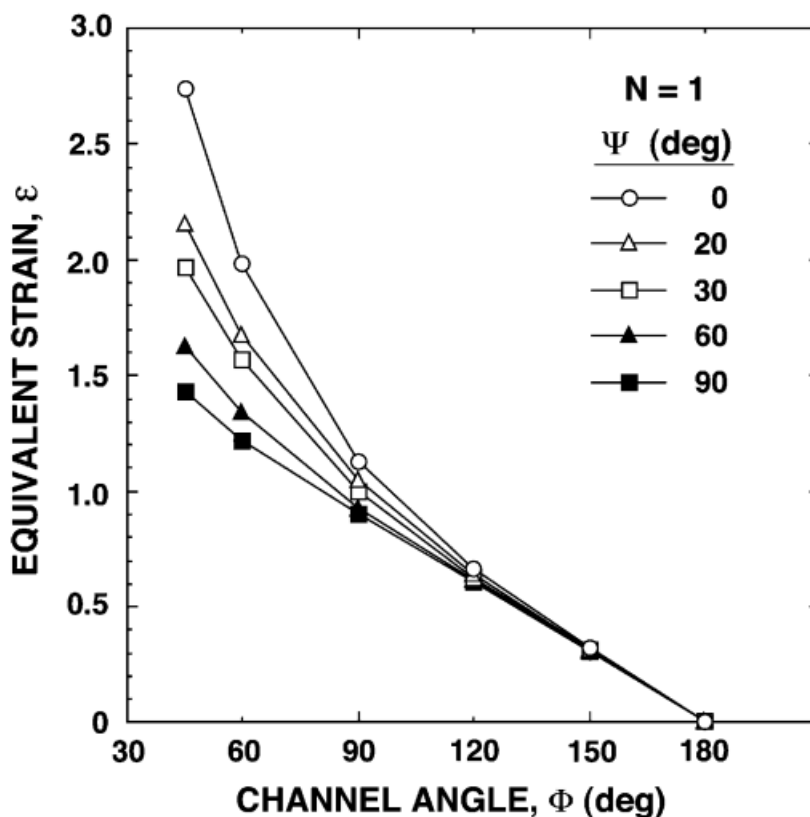


FIGURE 1.4: Variation de la déformation équivalente,  $\varepsilon$ , avec l'angle de canal,  $\phi$ , sur une plage angulaire de  $\phi$  de  $45^\circ$  à  $180^\circ$  pour les valeurs de l'angle de l'arc de courbure,  $\psi$ , de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ : les déformations sont montrées pour un seul passage où  $N = 1$  [114].

construisant une matrice avec des valeurs très faibles de  $\phi$  et  $\psi$ . Troisièmement, pour les matrices conventionnelles où l'angle de canal est généralement égal à  $90^\circ$ , la déformation équivalente est proche de  $\sim 1$  pour un seul passage et cette déformation est essentiellement indépendante de l'angle représentant l'arc de courbure,  $\psi$ .

## 1.2.2 Les routes de traitement dans ECAP

Il existe quatre voies de traitement de base dans ECAP et ces voies introduisent des systèmes de glissement différents pendant l'opération de pressage, de sorte qu'ils conduisent à des différences significatives dans les microstructures produites par ECAP. Les quatre routes de traitement différentes plus l'itinéraire E sont résumées schématiquement dans fig. 1.5 [37]: ainsi, dans l'itinéraire A l'échantillon est pressé sans rotation, dans l'itinéraire  $B_A$  l'échantillon est tourné par  $90^\circ$  dans des directions alternées entre des passes consécutives, dans la route  $B_C$  l'échantillon est tourné de  $90^\circ$  dans le même sens (sens horaire ou antihoraire) entre chaque passage, et dans la route C, l'échantillon est tourné de  $180^\circ$  entre les passages. Diverses combinaisons de ces routes sont également possibles, telles que combiner les routes  $B_C$  et C en alternant des rotations de  $90^\circ$  et  $180^\circ$  après chaque passage appelé route E mais, en pratique, les preuves expérimentales obtenues à ce jour suggèrent que ces combinaisons plus complexes ne conduisent à aucune amélioration supplémentaire des propriétés mécaniques des matériaux pressés. En conséquence, pour le

traitement simple des barres ou des tiges, l'attention est généralement consacrée exclusivement aux quatre voies de traitement délimitées dans fig. 1.5.

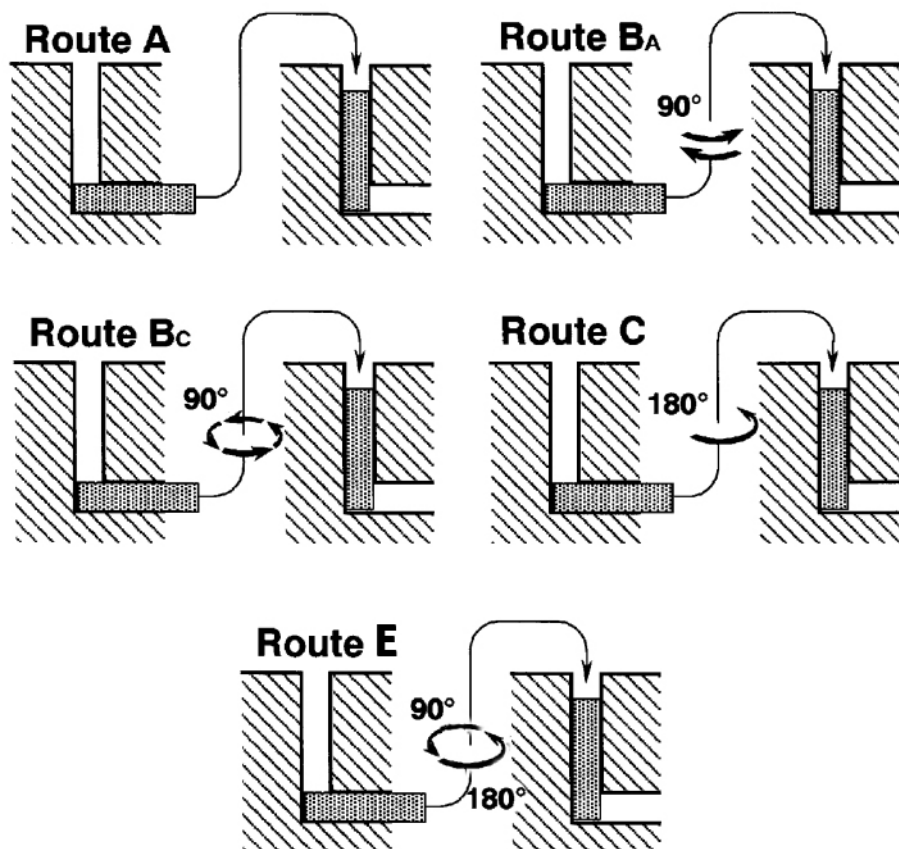


FIGURE 1.5: Les quatre routes fondamentales dans ECAP + la route E [37].

### 1.2.3 Systèmes de glissement pour les différentes routes de traitement

Les différents systèmes de glissement associés à ces différentes routes de traitement sont représentés schématiquement dans fig. 1.6 où les plans X, Y et Z correspondent aux trois plans orthogonaux montrés dans fig. 1.1 et le glissement est montré pour différents passages dans chaque voie de traitement: ainsi, les plans 1 à 4 correspondent aux 4 premiers passages de l'ECAP [44]. Dans la voie C, les cisaillements continuent sur le même plan dans chaque passage consécutif à travers la matrice mais la direction de cisaillement est inversée à chaque passage: ainsi, la route C est appelée processus de déformation redondante et la déformation est restaurée après chaque nombre pair de passes. Il est évident que la route B<sub>C</sub> est également un processus de déformation redondant parce que le glissement dans la première passe est annulé par glisser dans la troisième passe et glisser dans la deuxième passe est annulé par glisser dans la quatrième passe. Par contre, les routes A et B<sub>A</sub> ne sont pas des processus de déformation redondants et deux plans de cisaillement séparés se croisent à un angle de 90° dans la route A et quatre plans de cisaillement distincts se croisent à 120° dans la route B<sub>A</sub>. Dans les routes A et B<sub>A</sub>, il y a une accumulation cumulative de contraintes supplémentaires à chaque passage séparé à travers la matrice.

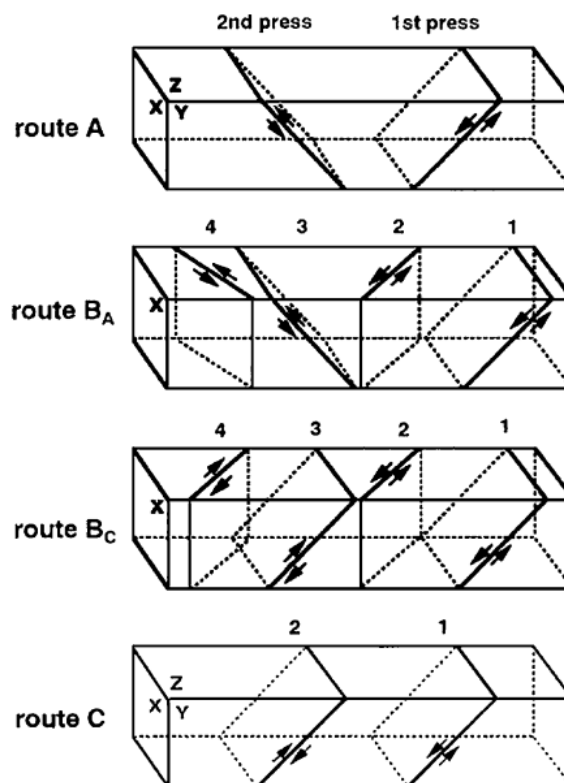


FIGURE 1.6: Les systèmes de glissement visualisés sur les plans X, Y et Z pour les passes consécutives utilisant les routes de traitement A,  $B_A$ ,  $B_C$  et C [45].

La direction de cisaillement est inversée à chaque passage: ainsi, la route C est appelée processus de déformation redondant et la déformation est restaurée après chaque nombre pair de passages. Il est évident que la route  $B_C$  est également un processus de déformation redondant parce que le glissement dans la première passe est annulé par glisser dans la troisième passe et glisser dans la deuxième passe est annulé par glisser dans la quatrième passe. En revanche, les routes A et  $B_A$  ne sont pas des processus de déformation redondants et deux plans de cisaillement séparés se croisent à un angle de  $90^\circ$  dans la route A et quatre plans de cisaillement distincts s'intersectent aux angles  $120^\circ$  dans la route  $B_A$ . Dans les routes A et  $B_A$ , il y a une accumulation cumulative de contraintes supplémentaires à chaque passage séparé à travers la matrice.

Les implications de ces systèmes de cisaillement sont illustrées dans fig. 1.7 où les quatre rangées principales correspondent aux quatre routes de traitement différentes et les illustrations représentent les distorsions macroscopiques introduites dans un élément cubique, comme vu sur les X, Y et Z avions, pour un maximum de 8 passages à travers la matrice [38]. Ainsi, pour chaque plan de coupe et chaque chemin de traitement, fig. 1.7 documente les distorsions visibles dans les faces de l'élément cubique. Il ressort de fig. 1.7 que l'élément cubique est restauré toutes les 2 passes en utilisant la route C et toutes les 4 passes en utilisant route  $B_C$  alors que les distorsions deviennent plus aiguës en utilisant les routes A et  $B_A$ . De plus, il n'y a pas de déformation de l'élément cubique sur le plan Z lors de l'utilisation des voies A et C. Les implications de ces distorsions sont examinées plus loin en examinant l'influence de la voie de traitement sur le développement d'une microstructure à grains ultrafines.



### 1.2.4 Les schémas de cisaillement associés à ECAP

Une approche intéressante dans l'examen des implications de l'ECAP est de considérer les schémas de cisaillement qui se développent sur chaque plan orthogonal pour chaque voie de traitement. Cette information est maintenant disponible aussi bien pour les routes de traitement en ECAP classique en utilisant des matrices  $90^\circ$  et  $120^\circ$  et pour le pressage d'échantillons de plaques où la rotation se fait autour des axes Y ou Z.

Route	Plane	Number of pressings								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
A	X									
	Y									
	Z									
B <sub>A</sub>	X									
	Y									
	Z									
B <sub>C</sub>	X									
	Y									
	Z									
C	X									
	Y									
	Z									

FIGURE 1.7: Les distorsions introduites dans les éléments cubiques lorsqu'elles sont visualisées sur les plans X, Y et Z pour traiter les routes A, B<sub>A</sub>, B<sub>C</sub> et C en appuyant sur 1-8 passes [38].

Figure 1.8 illustre les schémas de cisaillement pour l'ECAP conventionnel en utilisant une filière de  $90^\circ$  avec une rotation autour de l'axe X comme vu dans les quatre voies de traitement séparées [46]. La ligne supérieure dans creffig:shearplans montre le glissement visible sur les plans X, Y et Z après 1 passage (1p) et les lignes restantes montrent les modèles pour les routes A, B<sub>A</sub>, B<sub>C</sub> et C après 2 (2p), 3 (3p) et 4 (4p), respectivement: il est à noter que les lignes sont codées en couleur de sorte que les couleurs rouge, mauve, vert et bleu correspondent au premier, deuxième, troisième et quatrième passage, respectivement. Ces dessins démontrent qu'il existe une variation considérable dans la plage angulaire totale du glissement observée sur tout plan sélectionné pendant l'ECAP.

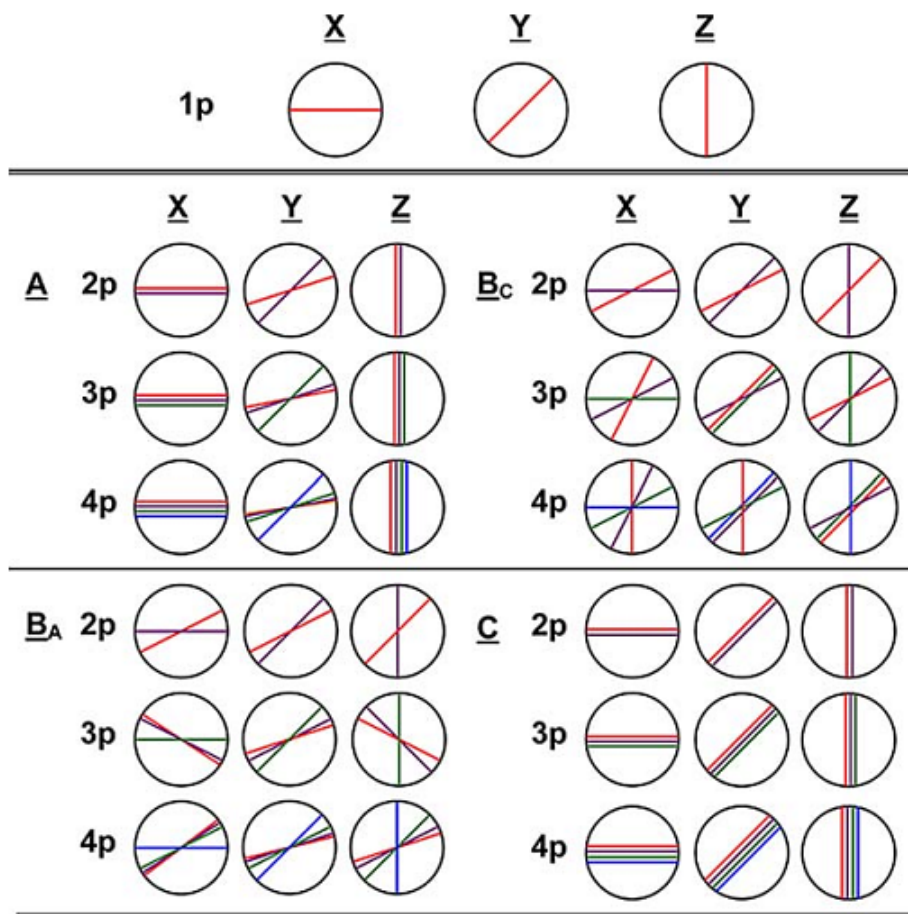


FIGURE 1.8: Les motifs de cisaillement sur les plans X, Y et Z pour traiter les routes A,  $B_A$ ,  $B_C$  et C en appuyant sur 1, 2, 3 et 4 passes: les couleurs rouge, mauve, le vert et le bleu correspondent respectivement aux première, deuxième, troisième et quatrième passes [46].

## 1.3 Traitement continu par ECAP

### 1.3.1 Cisaillement continu en bandes confinées, ECAD et conspiration

Le traitement par ECAP a attiré beaucoup d'attention car il produit des matériaux ultrafines avec des propriétés physiques et mécaniques uniques et ces matériaux peuvent avoir des applications importantes dans l'industrie. Néanmoins, le procédé ECAP tel qu'il est actuellement utilisé dans le laboratoire demande beaucoup de travail, car il nécessite beaucoup d'efforts manuels pour ajouter et retirer les billettes des matrices conventionnelles. En conséquence, il est maintenant reconnu que toute application industrielle étendue nécessitera le développement d'une certaine forme de technique de traitement en continu qui peut être utilisée efficacement dans la production de volumes relativement importants de matériau. Des progrès initiaux ont été réalisés dans le développement de procédures ECAP continues pour le traitement de longues bandes de métal.

Tout d'abord, un processus a été développé en utilisant une installation de roulement combinée avec les principes de l'ECAP [47-53]. Ce procédé était appelé cisaillement en bandes confinées continues (C2S2) [47,48], pressage angulaire à canaux dissemblables (DCAP) [49,51,52] et laminage angulaire à canal égal (ECAR) [50,53] et les principes du processus sont illustrés schématiquement dans fig. 1.9 [51]. Ainsi, le matériau est sous la forme d'une bande mince et il est introduit dans l'installation entre deux rouleaux, extrudé légèrement pour réduire l'épaisseur de 1,55 à 1,45 mm, puis il s'écoule dans le canal de sortie où l'épaisseur d'origine de 1,55 mm est restaurée. La terminologie DCAP se pose donc en raison de la faible différence d'épaisseur associée au passage dans le canal de sortie. Deuxièmement, l'étirage angulaire à canal égal (ECAD) a été proposé comme voie

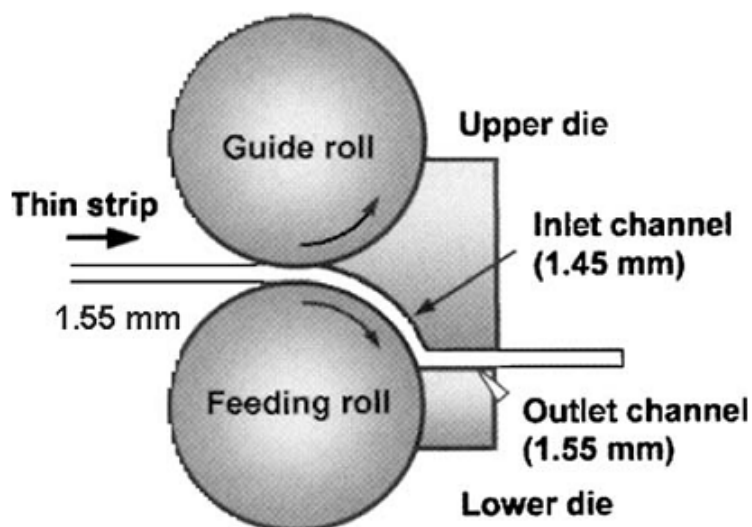


FIGURE 1.9: The principle of the DCAP process for use in continuous production [51].

potentielle pour le traitement des échantillons de barres [54,55] mais des calculs ultérieurs, combinés à des expériences, ont démontré que ECAD entraînait une réduction de la section transversale de l'échantillon par  $> 15\%$  de sorte qu'il ne peut pas être utilisé efficacement pour le traitement multi-passe [56].

Troisièmement, on a proposé la méthode consécutive pour l'utilisation de bandes métalliques [57-59] et ce procédé, qui utilise un laminoir continu, est illustré schématiquement dans fig. 1.10 [59]. Dans cette procédure, le matériau est introduit dans le broyeur entre les rouleaux satellites et un grand rouleau central et tous ces rouleaux tournent à la même vitesse périphérique afin de générer une grande force d'extrusion. La bande passe entre les rouleaux et finit par passer du moulin à travers une butée où elle est déplacée d'un angle  $\phi$ . Des expériences détaillées utilisant des bandes d'aluminium de pureté commerciale ont montré que les conditions optimales étaient atteintes pour l'ECAP lorsque l'angle dans la culée était donné par  $\phi = 65^\circ$  [59].

#### subsection Le processus ECAP-Conform

Le procédé d'extrusion conforme a été développé il y a plus de 30 ans pour l'extrusion continue de produits en fil métallique [60, 61] mais très récemment il a été commodément combiné avec ECAP dans le procédé ECAP-Conform [62].

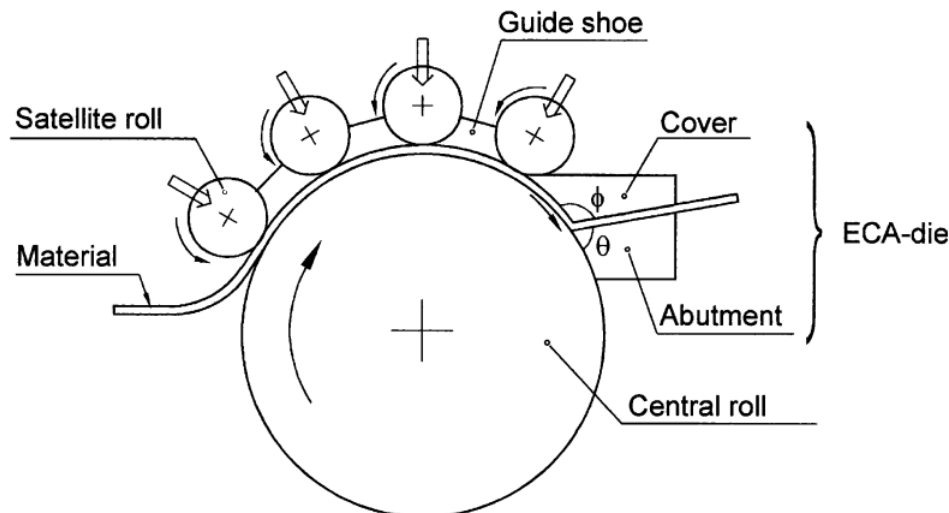


FIGURE 1.10: Le principe du processus consensuel [90]

Dans ce processus, le principe utilisé pour générer la force de frottement pour pousser une pièce à travers une puce ECAP est similaire au processus Conform [60], tandis que la conception d'une matrice ECAP modifiée est utilisée pour que la pièce puisse être répétée produire des structures UFG.

L'installation ECAP-Conform conçue et construite est illustrée schématiquement dans fig. 1.11 [62]. Comme représenté sur le schéma, un axe rotatif au centre contient une rainure et la pièce est introduite dans cette rainure. La pièce est entraînée vers l'avant par des forces de frottement sur les trois interfaces de contact avec la rainure de sorte que la pièce à usiner tourne avec l'arbre. Cependant, la pièce est contrainte à l'intérieur de la rainure par une matrice de contrainte stationnaire et cette matrice arrête également la pièce et la force à tourner à un angle par cisaillement comme dans un processus ECAP normal. Dans l'installation actuelle, l'angle est proche de  $90^\circ$  qui est l'angle d'intersection de canal le plus couramment utilisé dans ECAP. Cette configuration rend effectivement le processus ECAP continu. D'autres paramètres ECAP, tels que l'angle de la matrice et la vitesse de déformation, peuvent également être incorporés dans l'installation.

Dans des travaux récents [62], un fil d'Al long grossièrement commercial (99,95%), d'un diamètre de 3,4 mm et d'une longueur supérieure à 1 m, a été utilisé à température ambiante avec 1 à 4 passes en utilisant l'ECAP via route C dans laquelle l'échantillon a été tourné de  $180^\circ$  entre les passes ECAP. La taille de grain initiale du fil d'Al était  $\sim 5-7\mu\text{m}$ . fig. 1.12 montre une pièce Al à chaque étape du processus ECAP-Conform, à partir de la ration initiale

à la tige rectangulaire Al après le premier passage ECAP [62]. Comme indiqué, la section rectangulaire a été formée peu de temps après que le fil est entré dans la rainure (marquée par une flèche dans fig. 1.12). Le changement a été entraîné par la force de frottement entre la paroi de la rainure et la pièce Al. Ainsi, la force de frottement poussait le fil vers l'avant et déformait le fil pour le rendre conforme à la forme de la rainure. Après la modification de la section transversale du fil à la forme carrée, la force de frottement par unité de longueur de fil est devenue plus grande en raison de la plus grande zone de contact entre la rainure et le fil. Le frottement total La force a poussé le fil en avant de la rainure dans le canal de filière stationnaire qui a intersecté la rainure à un angle de  $90^\circ$ .

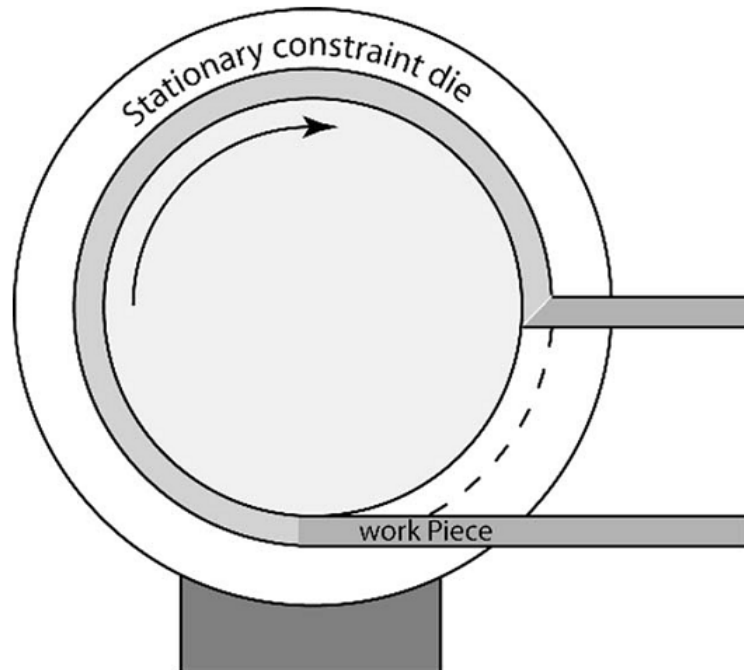


FIGURE 1.11: Une illustration schématique du processus ECAP-Conform [62].

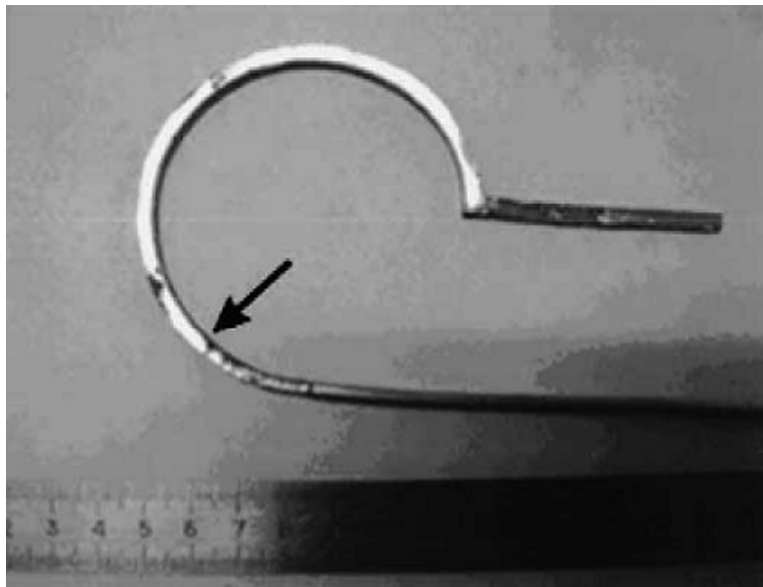


FIGURE 1.12: Une pièce Al en cours de traitement par ECAP-Conform: la flèche marque la transition vers une section rectangulaire [62].

## 1.4 Segal's principal in ECAP

### 1.4.1 Impact de la friction sur le processus ECAP

Des travaux récents [63] ont montré que le frottement de contact entre la billette et la filière ECAP joue un rôle important sur la déformation homogène: il faut réduire les frottements pour obtenir des conditions de traitement optimales, c'est-à-dire une déformation de cisaillement simple et intensive et une bonne qualité de surface de billettes. La géométrie de la zone de cisaillement, qui peut être caractérisée par un angle d'ouverture  $\psi$  (voir aussi la Fig. 1), est un autre détail crucial qui affecte l'uniformité des contraintes de cisaillement pendant l'ECAP et donc l'uniformité des microstructures résultantes et des propriétés macroscopiques. 1.13). Les très petits angles d'ouverture correspondent à une déformation de cisaillement pure idéale avec une distribution de contrainte entièrement homogène. L'homogénéité est cependant significativement réduite lorsque la zone de cisaillement présente une forme en éventail ( $\psi \gg 0^\circ$ ), [64] et des gradients peuvent être observés dans les distributions de déformation post-ECAP. Il convient de noter que les matériaux qui présentent un durcissement prononcé et / ou une sensibilité accrue à la vitesse de déformation a tendance à former de telles zones de cisaillement en forme de éventail même lorsque des matrices avec des angles vifs sont utilisées [65]. Comme le montrent les analyses expérimentales [66] et numériques [67], ce problème important, qui semble être intrinsèque au processus ECAP des matériaux conventionnels, peut être surmonté par l'application d'une contre-pression (BP). L'utilisation d'un second piston pour appliquer une force contre l'extrémité avant de la billette dans le canal de sortie limite le flux de matériau, conduit à une pression hydrostatique superposée dans la zone de cisaillement et réduit ainsi considérablement l'angle du ventilateur. Bien qu'ils soient en principe bien documentés, ces aspects techniques importants du traitement ECAP ont été largement ignorés par la majorité de la communauté scientifique jusqu'à présent.

Du point de vue d'une simple mise à l'échelle sans dimension du processus, on ne peut s'attendre à ce que des effets d'échelle importants puissent se produire pendant l'ECAP. Cependant, les matériaux d'ingénierie réels sont caractérisés par des échelles de longueur intrinsèques qui peuvent typiquement être directement liées à des caractéristiques microstructurales telles que la taille des grains. Même lorsque l'ECAP meurt et que les champs de contrainte et de déformation correspondants (y compris la taille et la forme en éventail de la zone de cisaillement) sont correctement dimensionnés et que les conditions de frottement sont similaires, le rapport entre l'échelle intrinsèque de microstructure et la caractéristique Les dimensions du processus ECAP changeront pendant la mise à l'échelle. Et comme la géométrie de la zone de cisaillement n'est pas (comme on le suppose souvent dans les modèles simples) un seul plan, l'histoire de la déformation subie par les grains individuels en traversant une zone de cisaillement en forme d'éventail est probablement différente. Les effets d'échelle peuvent donc être bien observés dans des conditions de traitement réalistes. Il y a clairement un besoin pour une étude expérimentale sur la mise à l'échelle de l'ECAP qui est axée sur les microstructures résultantes (et les propriétés mécaniques correspondantes) après le traitement.

### 1.4.2 Le design de la matrice et le traitement

L'ECAP conventionnel, utilisé par les groupes de recherche dans le passé, est réalisé avec une filière simple où les billettes lubrifiées sont traitées par un canal rigide, fig. 1.13. En conséquence, le frottement de contact est presque présent sur toute la surface la billette (représentée schématiquement dans fig. 1.13 b). Par conséquent, la partie de la force de pression nécessaire pour surmonter le frottement est augmentée avec l'augmentation de la longueur de la billette et / ou la diminution de la stabilité du lubrifiant. Ceci entraîne une augmentation des charges sur certaines parties de l'outil ECAP (par exemple, le plongeur) pendant le traitement avec une longueur (ou surface) croissante des billettes, en particulier lorsque des matériaux à haute résistance sont traités. D'après la littérature, on peut observer que les proportions des billettes (c'est-à-dire la longueur par diamètre) sont typiquement limitées à un maximum de  $\sim 10$  afin d'éviter de surcharger le piston, même si des lubrifiants de haute performance sont utilisés. Une réduction de la friction, au contraire, permettrait d'augmenter la longueur de la billette et donc d'améliorer l'efficacité de la production, en particulier si un traitement à passages multiples long est nécessaire.

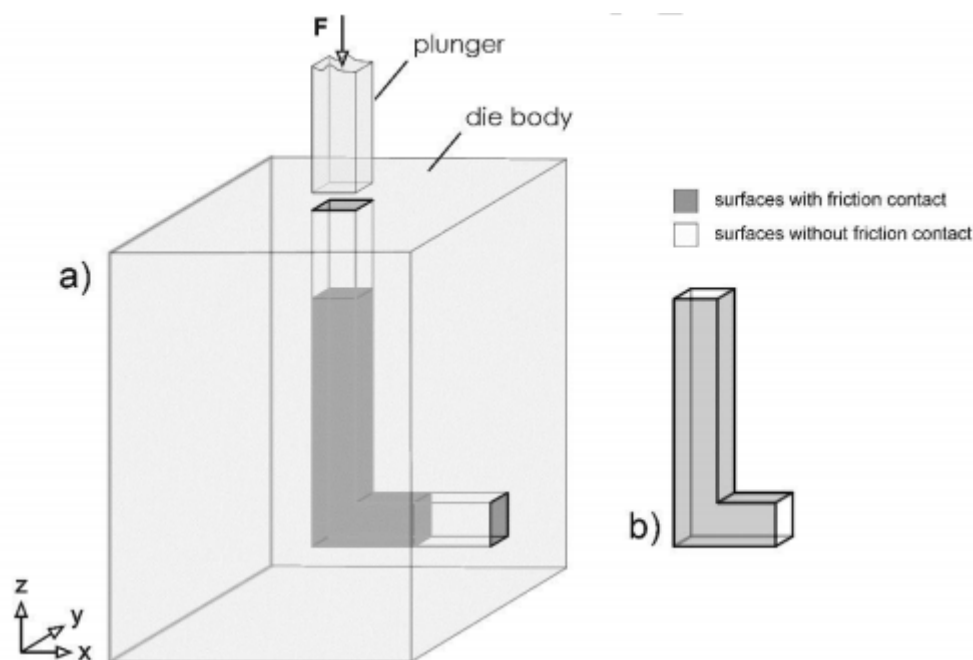


FIGURE 1.13: (a) Représentation schématique d'une filière conventionnelle 90° ECAP, qui (b) conduit à un frottement de contact sur toutes les surfaces externes de la pièce [68].

Récemment, un nombre croissant de groupes de recherche [63-68] ont commencé à effectuer des ECAP avec un contrôle basé sur la conception du frottement qui permet de traiter des billettes plus longues et améliore également la qualité de surface. Au meilleur de notre connaissance, tous ces concepts remontent aux idées de base de Segal [64] qui suggérait très tôt d'incorporer des parties coulissantes dans le corps de matrice. Ces pièces sont déplacées avec la même vitesse que la billette et ainsi guider le matériau à travers le canal. Figure 1.14 illustre la conception la plus réalisable avec des parois coulissantes avant et arrière dans la partie supérieure du canal. Dans la partie inférieure du canal, le matériau est pris en charge par un curseur inférieur situé entre les deux parois mobiles. Pendant le traitement ECAP, le piston applique la force sur la billette, ainsi que sur les deux parois coulissantes. Il convient de noter que la forme de la poutre en I de la section transversale

du plongeur conduit également à une résistance élevée contre le flambage. ECAP démarre dès que la pression du matériau, transmise à l'épaule du coulisseau inférieur dans la partie inférieure du canal, atteint une valeur critique. Le traitement est généralement arrêté dès que la billette est complètement enfoncée dans le canal de sortie. L'élimination de la moitié du frottement de contact dans la partie supérieure du canal et dans la zone la plus chargée au fond du matériau juste en dessous du plongeur (voir fig. 1.14 b) permet le traitement multipasse de longues billettes avec haute qualité de surface. Contrôler le mouvement du curseur inférieur fournit également les moyens pour l'application d'un BP bien défini. En ECAP classique, il peut être difficile de retirer la billette de la matrice après le traitement. Dans la conception de matrice améliorée, le curseur inférieur peut également être utilisé pour une éjection facile de la billette.

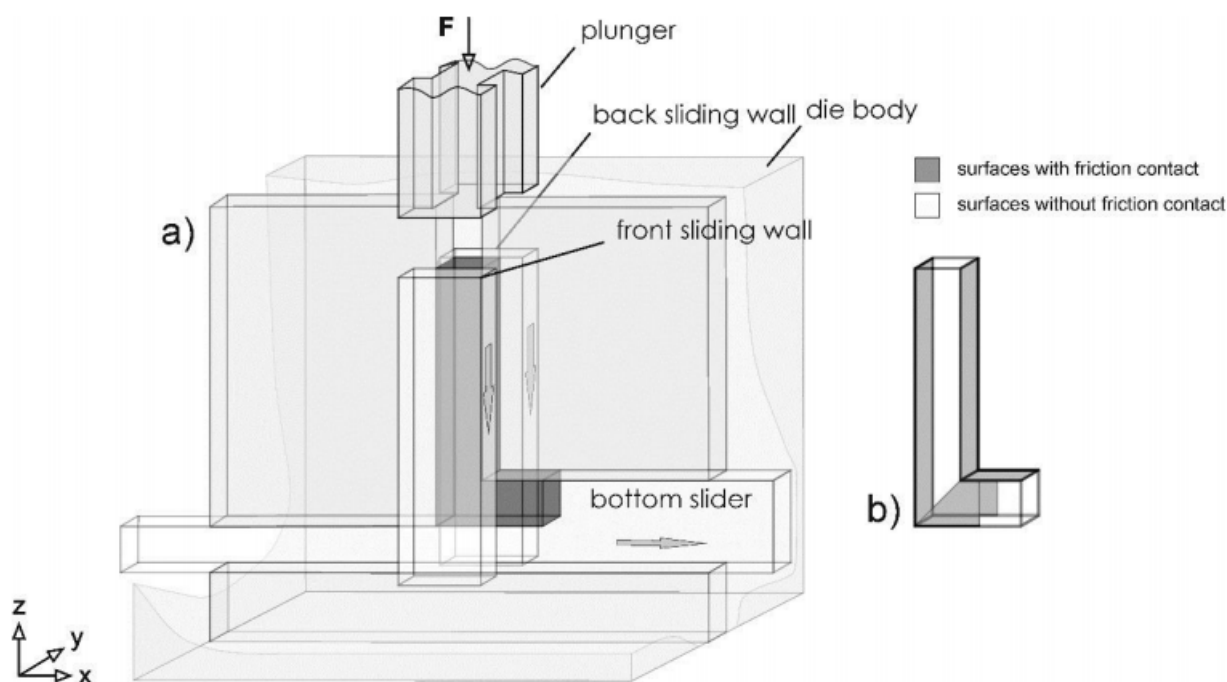


FIGURE 1.14: Représentation schématique du principe de ECAP de Segal. L'utilisation de parois coulissantes et d'un curseur inférieur réduit considérablement les zones de frottement de contact, comme indiqué schématiquement en (b). [68]

Nous notons enfin que le choix d'un lubrifiant approprié est crucial pour un ECAP réussi, même lorsque des matrices avec une réduction basée sur le design de la friction de contact sont utilisées. Ceci est particulièrement vrai pour le traitement de grandes billettes avec de grands rapports d'aspect où la stabilité du lubrifiant, en particulier dans l'interface entre les parties rigides de la filière et la billette, tend probablement à devenir critique en raison des trajectoires de descente plus longues.



# Chapitre 2

# Chapter 2

## Simulation de l'ECAP

### 2.1 Introduction

Au cours de la dernière décennie, l'acceptation industrielle de la modélisation du formage des métaux par la méthode des éléments finis (FEM) s'est accélérée si rapidement que ses applications industrielles sont devenues courantes au fur et à mesure que la technologie continue de se répandre.

L'avènement de la technologie de simulation dans le formage des métaux n'aurait pas pu arriver à un meilleur moment lorsque le matériel informatique a connu une réduction spectaculaire des prix et une augmentation rapide de la vitesse. Les PC sont devenus si puissants et abordables que leur popularité a dépassé celle des stations de travail. Le rêve de transporter un ordinateur portable avec une simulation fonctionnant à l'usine, à la salle de conférence ou à bord d'un avion s'est concrétisé.

Les formulations d'éléments finis pour différents modèles de matériaux sont devenues matures. L'approche lagrangienne mise à jour domine encore la plupart des applications de formation. Les éléments tétraédriques utilisant une formulation mixte et des éléments hexaèdres sont les plus appropriés pour une déformation plastique importante. L'utilisation plus large des éléments tétraédriques est soutenue par des générateurs de mailles, qui peuvent maintenant créer avec succès des maillages tétraédriques avec une grande complexité et un grand contraste dans la taille des éléments pour modéliser une variété de processus dans les industries de formage. Tous ces éléments ont amélioré la capacité d'analyser avec précision et efficacité des processus complexes de formation tridimensionnelle et ont ouvert des voies supplémentaires pour l'application de la simulation. Les programmes commerciaux intègrent la technologie des éléments finis dans des systèmes logiciels complets, complétés par des interfaces utilisateur graphiques améliorées, ce qui les rend très conviviaux et flexibles. Il n'est pas surprenant que de nombreux ingénieurs de formation et chercheurs trouvent ces outils essentiels.

De nouvelles applications par éléments finis à des processus de formage plus sophistiqués et compliqués sont continuellement explorées. Ces défis continus ont enrichi le répertoire de la technologie de simulation. Dans les sections suivantes, l'utilisation du logiciel DEFORM en tant qu'outil de conception et de simulation pour les applications de formation de pièces ECAP est présentée.

## 2.2 Présentation de DEFORM

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

- Réduire le besoin d'essais coûteux en atelier et la refonte de l'outillage et des processus.
- Améliorer la conception des outils et des matrices pour réduire les coûts de production et de matériaux.
- Raccourcir le délai de mise sur le marché d'un nouveau produit.



FIGURE 2.1: DEFORM intégré 2D / 3D Version 11.

Contrairement aux codes FEM à usage général, DEFORM est conçu pour la modélisation de la déformation. Une interface utilisateur graphique conviviale facilite la préparation et l'analyse des données 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 un système de remaillage entièrement automatique et optimisé, adapté aux grands problèmes de déformation. DEFORM-HT ajoute la capacité de modélisation des processus de traitement thermique, y compris la normalisation, le recuit, la trempe, la trempe, le vieillissement et la cémentation. DEFORM-HT peut prévoir la dureté, les contraintes résiduelles, la déformation par trempe et d'autres caractéristiques mécaniques et matérielles importantes pour ceux qui traitent la chaleur.

## 2.3 Les applications de DEFORM

Le système DEFORM a été initialement appliqué aux applications de forgeage à chaud dans les années 1980. Les applications couvrent toute la gamme de produits forgés. Les pièces axisymétriques (rondes) peuvent être simulées, y compris les disques de turbine, les brides, les tubes de refoulement, les arbres et autres applications de routine. Les applications tridimensionnelles comprennent les engrenages, les vilebrequins, les bielles, les pistons, les bras de commande, les chenilles, les chapes, les implants médicaux et plus encore. DEFORM améliore considérablement le temps et les coûts de développement.

**Formage à froid** Des applications telles que des fixations, des composants de paliers et des corps de bougies ont été signalées au début des années 1990. En raison de la nature précise du produit, même de très petits défauts peuvent être un problème sérieux et coûteux. De plus, les défaillances d'outils résultant d'une pression de formage élevée peuvent être analysées et éliminées en utilisant la puissante capacité d'analyse des contraintes de filière.

**Usinage** La simulation a été présentée pour la première fois lors d'une réunion du groupe d'utilisateurs DEFORM à la fin des années 1980 par un fabricant d'outils bien connu. Aujourd'hui, DEFORM-3D est l'outil de simulation standard, avec la possibilité de simuler le fraisage, le perçage et même le taraudage!

**roulage** Les applications vont du laminage de l'anneau au laminage de forme. Le formage orbital, le laminage de filets, le laminage à coins croisés et d'autres procédés sont également possibles.

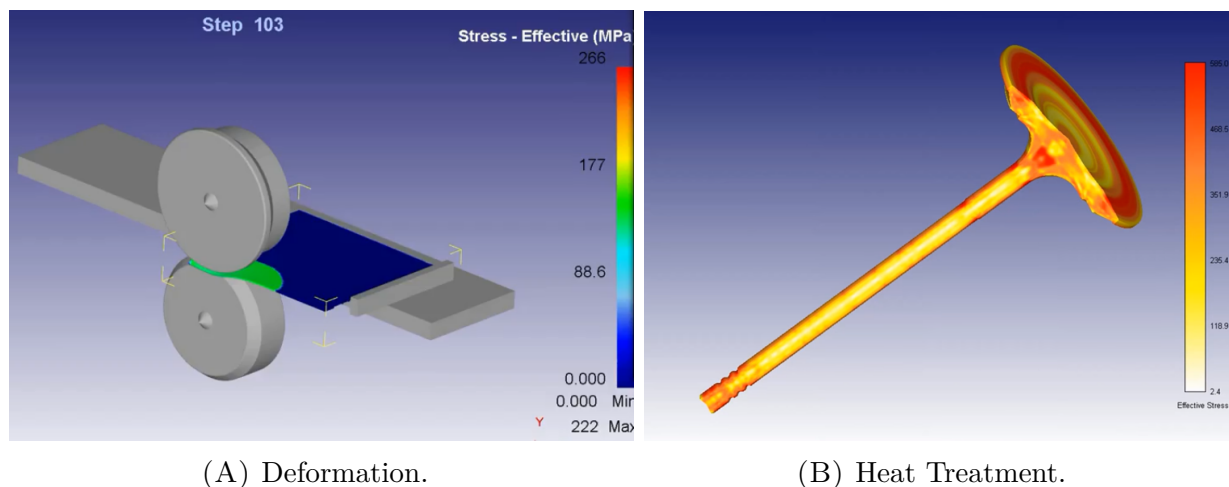


FIGURE 2.2: Exemples d'application DEFORM dans la déformation (A) et le traitement thermique (B).

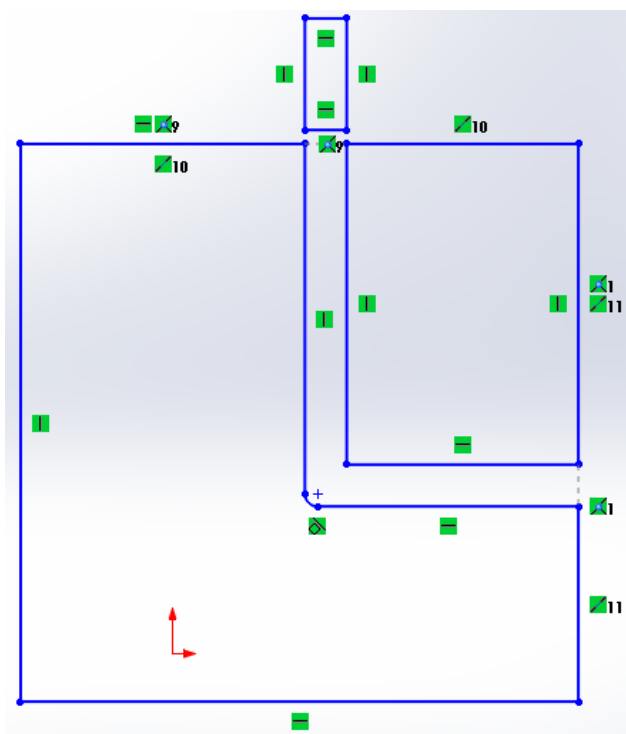
DEFORM a été un leader dans le traitement thermique et la simulation de microstructure au fil des ans. SFTC a été utilisé par des fabricants de premier plan dans l'aérospatiale, l'automobile, l'énergie et d'autres domaines. Des projets de recherche à travers le monde ont utilisé DEFORM comme solution préférée aux simulations de traitement thermique.

Les opérations de formage complexes telles que les rivets et les fixations précontraintes sont possibles dans les simulations 2D et 3D. L'assemblage mécanique nécessite un moteur FEM et un générateur de mailles robustes.

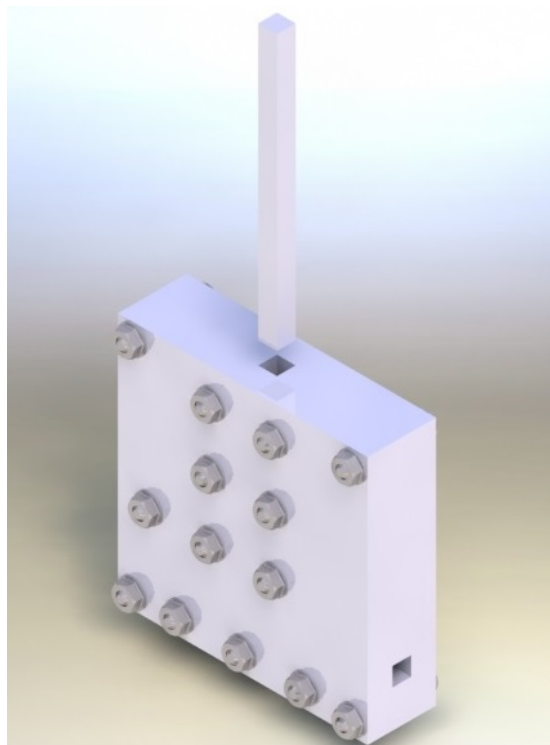
## 2.4 ECAP's die design

### 2.4.1 Design de la matrice conventionnel de l'ECAP 2D/3D

Afin de simuler la technique ECAP et d'étudier l'influence de ses différents paramètres sur l'amplitude et la répartition des contraintes sur la pièce, nous avons conçu la matrice et la pièce dans les deux environnements 2D et 3D, le DEFORM dispose d'un environnement de conception. limitée aux formes de matrices de base et il est relativement compliqué et long de concevoir la matrice sur DEFORM. Nous avons donc utilisé le puissant outil SolidWorks qui nous permet de concevoir et de modéliser facilement des formes compliquées.



(A) 2D die design.



(B) 3D die design.

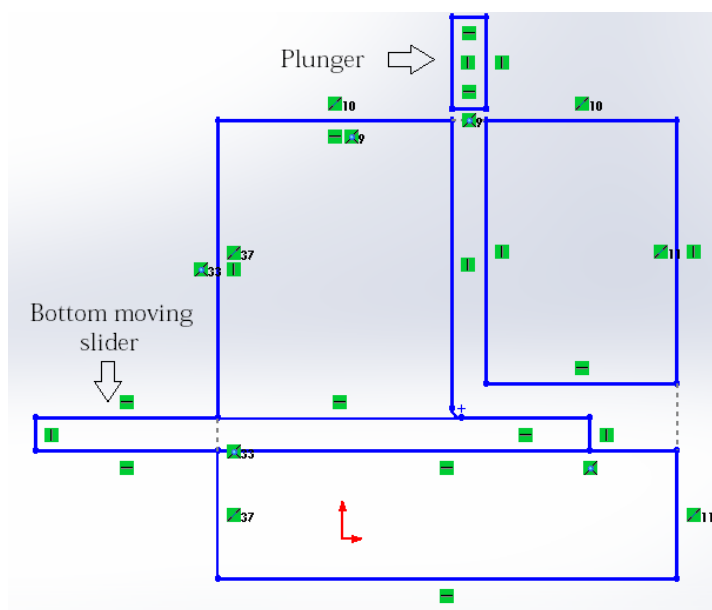
FIGURE 2.3: Design de la matrice d'ECAP en 2D (A) et 3D (B) utilisant SolidWorks.

Comme montré dans le fig. 2.3 nous avons conçu le die ECAP en 2D fig. 2.3 (A) et en 3D fig. 2.3 (B) environnements avec un angle de canal ECAP  $\phi = 90^\circ$  et un angle de courbure  $\psi = 20^\circ$ . ces matrices seront importées dans le logiciel DEFORM en objets au format .STL pour pouvoir procéder à la simulation.

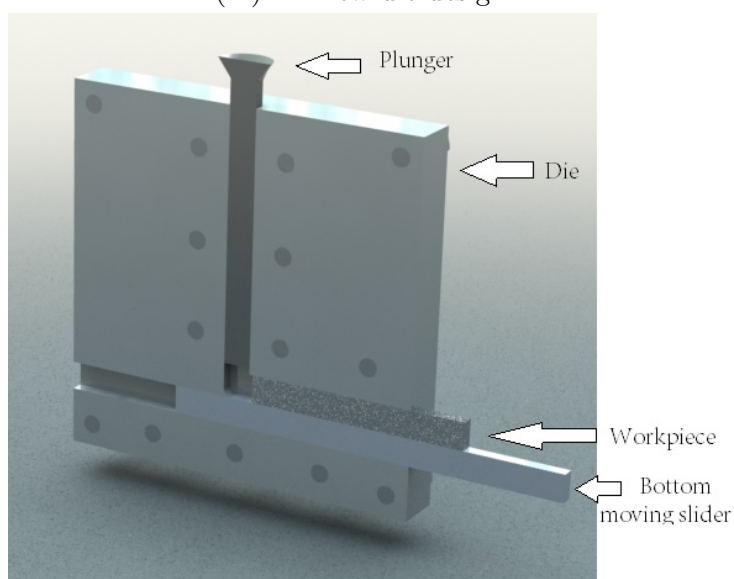
## 2.4.2 Nouvelle conception de matrice ECAP

Basé sur le principe du Segal détaillé dans le chapitre précédent, où ils suggéraient des changements dans l'ECAP meurent en ajoutant des murs coulissants; deux dans la partie supérieure gauche et droite, et un curseur inférieur fig. 1.14 dans le but de réduire le frottement sur la pièce pendant le travail ECAP.

Nous nous sommes inspirés de la conception suggérée à partir du principe fig. 1.14 de Segal, et nous avons créé une nouvelle conception de matrice ECAP afin de réduire le frottement et de diminuer les dommages et l'inhomogénéité de la pièce après le travail ECAP.



(A) 2D new die design.



(B) 3D new die design.

FIGURE 2.4: Les nouvelles matrices de l'ECAP avec le mur glissant bas conçu en 2D (A) et 3D (B) en utilisant SolidWorks.

Notre design, tel qu'illustré dans fig. 2.4 dans les deux formes 2D et 3D, a un curseur mobile qui facilite non seulement le mouvement de la pièce en glissant, mais il se déplace horizontalement à une vitesse constante et il est égal à dans la plupart des cas (généralement 1 mm/s en tant que plongeur), il permet à la pièce de se déplacer facilement à travers le bord des canaux (où les deux canaux se rejoignent) en guidant la pièce et en réduisant la friction dans cette zone. considéré plus élevé par rapport aux autres zones du piece.

## 2.5 Les étapes des simulations ECAP

L'approche générale pour faire une simulation dans DEFORM, comme la plupart des outils de simulation, est basée sur la définition de la géométrie des matrices et des pièces, le choix du matériau du dernier, le mouvement de chaque partie de la matrice, puis la simulation séquentielle que la pièce traverserait.

### 2.5.1 Le choix de la géométrie et des types de problèmes

DEFORM propose une gamme de gabarits guidés de simulation incluant le formage, le laminage, le laminage, l'extrusion, le découpage 2D/3D, etc. Afin de faciliter la simulation en nous guidant à travers des paramètres et des outils spécifiques au type de problème travaille sur.

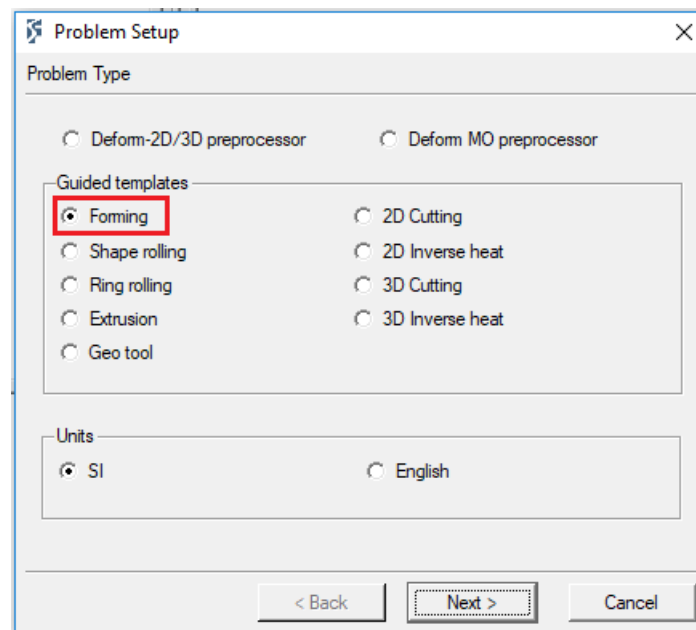


FIGURE 2.5: Les options des types de problèmes et des modèles guidés fournis par DEFORM.

Pour notre cas, nous choisirons le template guidé "Forming" comme montré dans fig. 2.5 car notre but est de simuler le travail ECAP et d'analyser l'impact de certains paramètres sur les propriétés de la pièce, et l'ECAP comme technique SPD est considéré comme un type de formation.

Les simulations DEFORM peuvent être exécutées comme des modèles bidimensionnels (2D) ou tridimensionnels (3D). En général, les modèles 2D sont plus petits, plus faciles à configurer et plus rapides à simuler que les modèles 3D. Souvent, lorsque le processus est relativement simple peut raisonnablement être représenté en 2D, alors nous ne devons pas passer à la simulation 3D. Cependant, les résultats d'une simulation 3D sont plus proches de la réalité que les résultats de la simulation 2D car ils offrent plus de possibilités de visualiser le phénomène étudié de manière plus claire et réaliste, avec des possibilités d'analyse des propriétés de surface et d'intérieur.

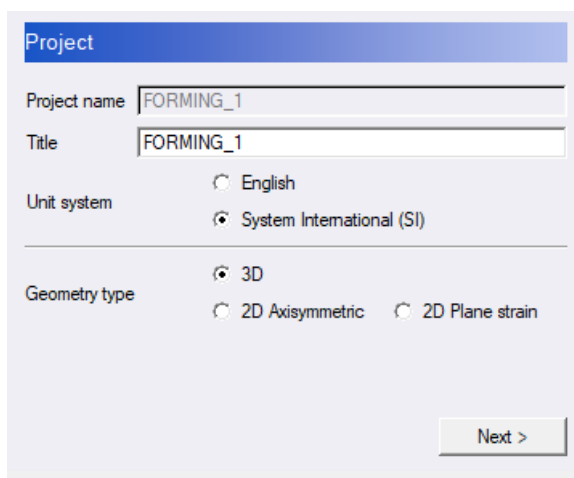


FIGURE 2.6: Le type de géométrie de DEFORM et les choix de système d'unité pour le projet.

Dans DEFORM il y a trois représentations géométriques de notre projet, une 3D et deux représentations 2D *cref fig: Geo*, donc pour la géométrie 2D on a les deux options suivantes:

**Axio-metric type:** l'objet en coupe par rapport à l'axe central. Par conséquent, le modèle exige que la géométrie de la déformation soit symétrique axialement et dans le premier quadrant et le quatrième quadrant ( $X > 0$ ). De plus, le système suppose que le flux dans chaque plan radial est identique. *fig. 2.6)*

**Plane strain type:** il suppose une géométrie pour avoir une profondeur de l'unité avec des faces limitées avant et arrière. La simulation suppose que les objets se comportent de manière identique dans toute section transversale donnée sur la largeur et la hauteur de l'objet. (*fig. 2.6)*

### 2.5.2 Type de processus et calcul de la température

Dans ce domaine, nous devons choisir si notre travail (dans le cas de la formation de caissons) va être froid ou chaud en formant *cref fig: Temp: A*, ou même le forgeage à chaud ou le transfert de chaleur, ce choix détermine le comportement thermique de notre processus de formation. Pour notre étude, nous prendrons en compte le facteur thermique pendant le processus ECAP, donc nous choisissons le formage à chaud.

Après cela, le logiciel nous donne la main pour choisir l'interactivité thermique entre la pièce et les matrices, c'est-à-dire décider si notre système est isotherme ou non, et si



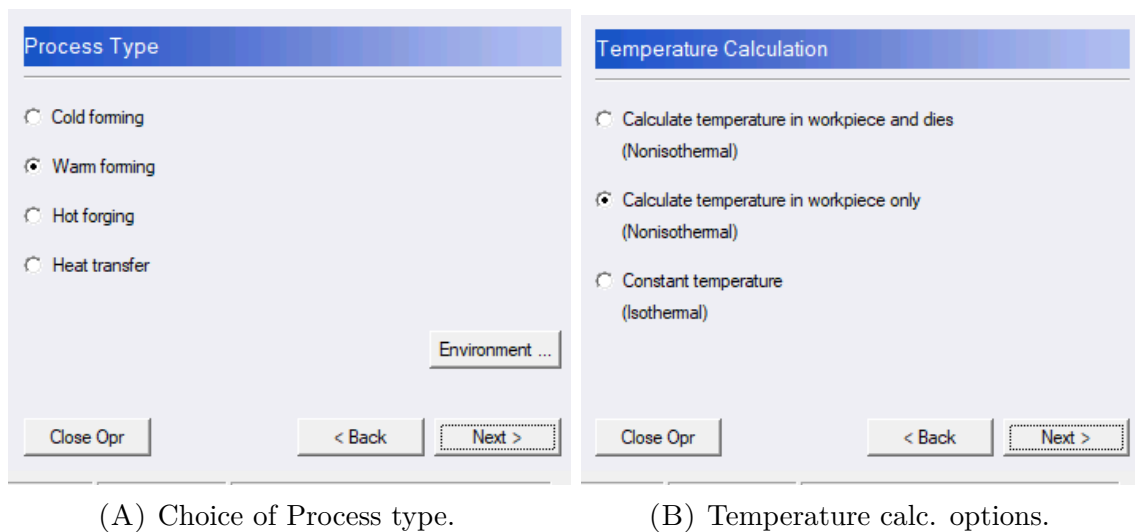


FIGURE 2.7: The DEFORM offered options in process type (A) and temperature calc. (B)

non-isotherme si calculer la température de la pièce et des matrices, ou la pièce seulement. (fig. 2.7B)

Dans notre étude, nous choisissons de suivre la température de la pièce pendant la déformation et nous négligeons le phénomène de transfert de chaleur entre la pièce et les matrices.

### 2.5.3 Définition de la géométrie de la pièce

La pièce à usiner et chaque pièce de travail ECAP doivent être identifiées comme un objet unique et avoir un numéro d'objet codé et un nom d'objet. Le nom de l'objet est une chaîne de 64 caractères maximum. Il est fortement recommandé de mettre un nom significatif (p. Ex. Poinçon, matrice, pièce à usiner).

Pour notre simulation, la pièce à usiner est un Cuboïde (de forme carrée) avec des sections transversales de  $15 \times 15 \text{ mm}^2$  et  $120 \text{ mm}$  de longueur comme suggéré dans la section principale du Segal au 1er chapitre.

DEFORM nous donne le choix d'importer une pièce déjà conçue ou de la définir ici fig. 2.8 quand la géométrie de notre pièce est primitive et pas compliquée à concevoir comme dans notre cas.

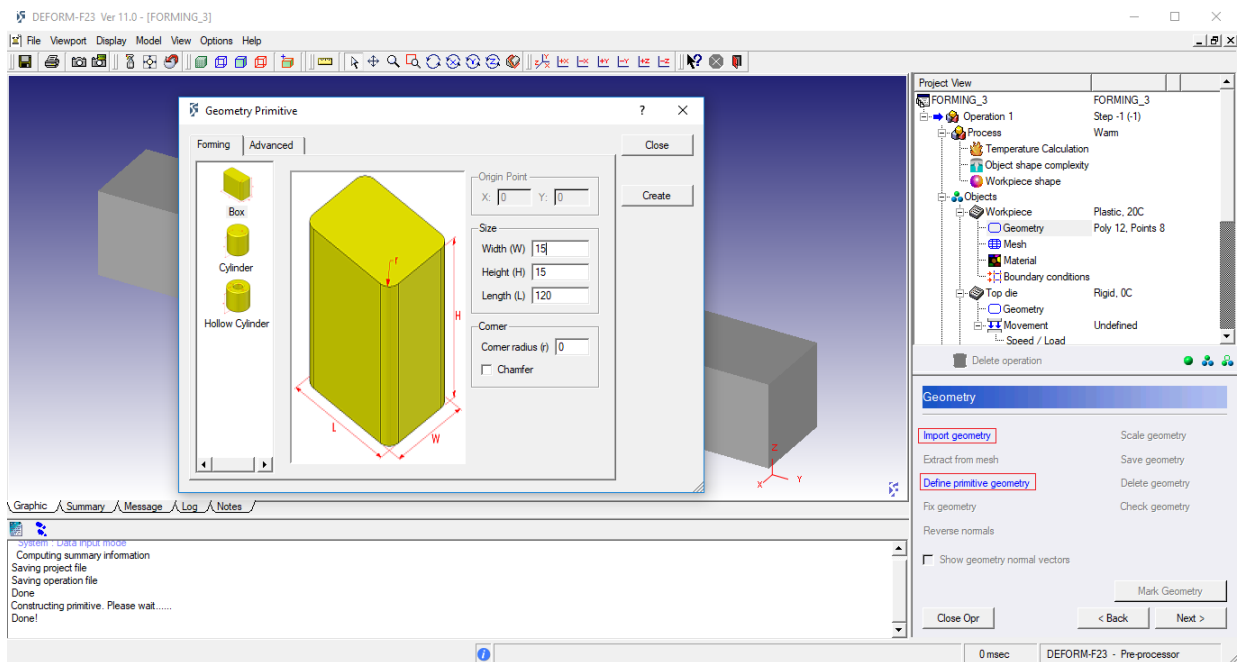


FIGURE 2.8: Définir la géométrie de la pièce.

### 2.5.4 Génération de maillage

La fenêtre Mesh Generation permet à l'utilisateur de générer un mesh pour l'objet courant (la pièce à usiner pour notre cas). L'utilisateur dispose de deux méthodes de contrôle de la densité du maillage:

- La méthode définie par le système utilise un système de pondération et des fenêtres affectées pour contrôler la taille des éléments lors de la génération initiale du maillage et des retransmissions automatiques subséquentes.
- Défini par l'utilisateur permet à l'utilisateur de spécifier certaines zones de l'objet densités d'éléments supérieurs par rapport aux autres zones de l'objet au cours de la génération de maillage initiale seulement.

Pour notre simulation, nous choisissons le maillage généré automatiquement afin de faciliter la simulation et d'obtenir de meilleurs résultats (fig. 2.9).

Pour qu'une simulation atteigne un niveau de précision élevé, il est important de comprendre les propriétés matérielles nécessaires pour spécifier un matériau DEFORM. Les propriétés physiques 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 complète de matériaux pour de nombreux alliages courants, notamment les aciers, les aluminures, le titane et les superalliages.

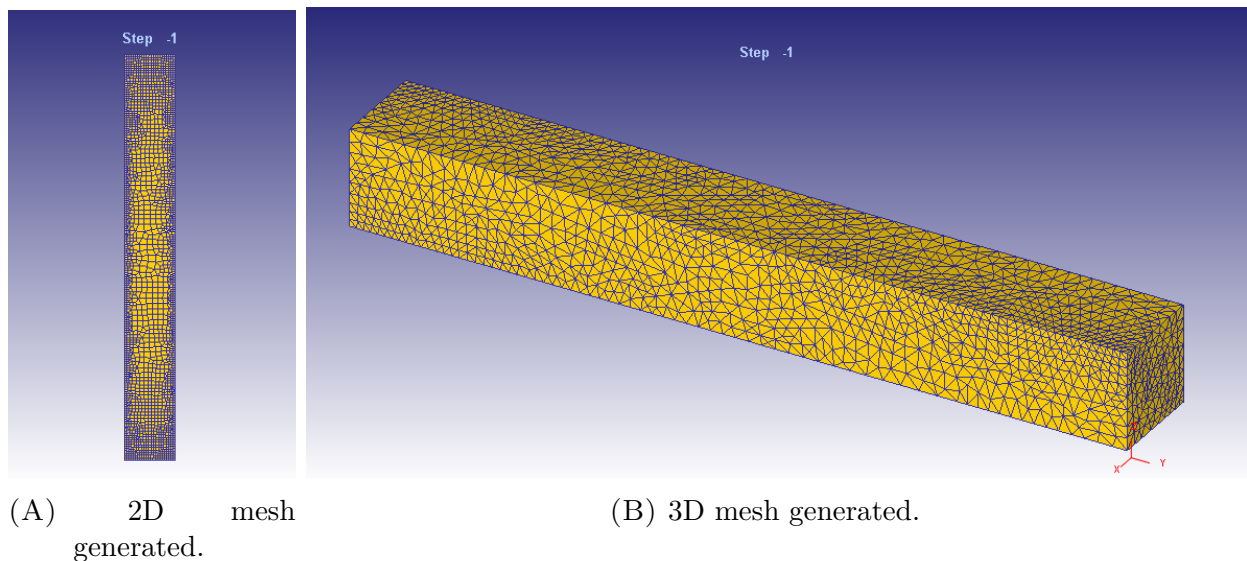


FIGURE 2.9: Le résultat du maillage sur la pièce dans 2D (A) et 3D (B).

### 2.5.5 Choisir le matériau de notre pièce

Pour qu'une simulation atteigne un niveau de précision élevé, nous devons spécifier le type de matériau que nous utilisons, car il est important de comprendre les propriétés et le comportement du matériau. Il existe une importante base de données de matériaux dans DEFORM pour de nombreux alliages courants tels que les aciers, les aluminures, le titane et les superalliages, car nous pouvons ajuster notre matériau s'il n'existe pas dans la base de données du logiciel. Pour notre cas, nous choisissons l'alliage d'aluminium 6063 (fig. 2.10).

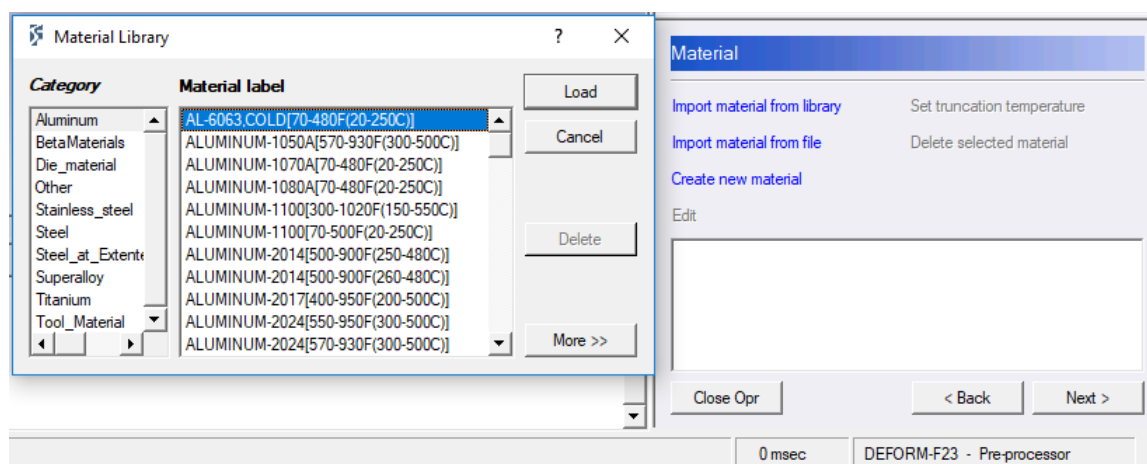
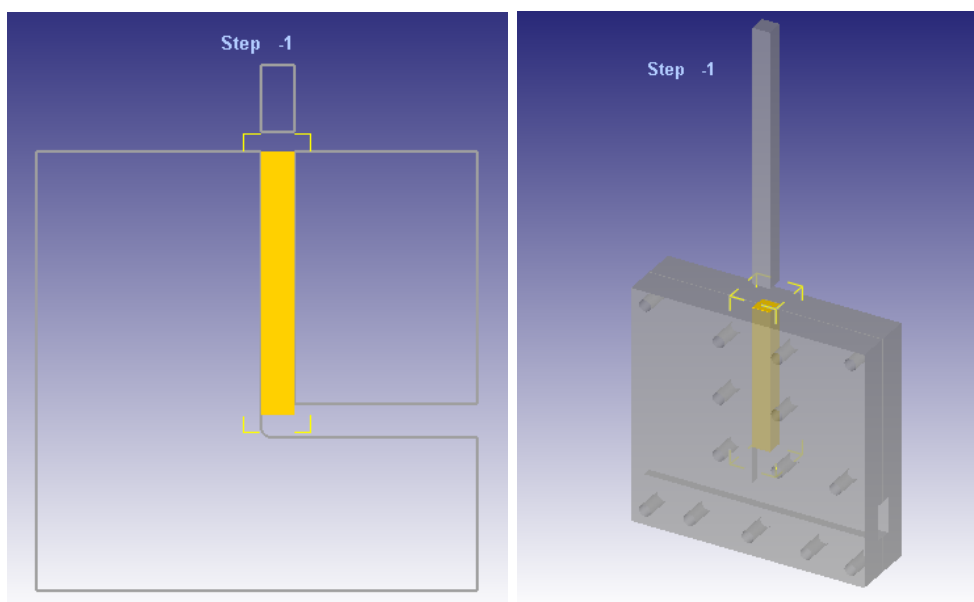


FIGURE 2.10: Choisir l'alliage d'aluminium 6360 comme matériau de la pièce pour notre étude.

### 2.5.6 Définition de la géométrie des matrices

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). Données de solution de déformation disponibles pour les objets rigides inclure la charge et la vitesse de l'objet. Le profil géométrique est utilisé pour toutes les analyses de déformations et le maillage de l'objet rigide est utilisé pour tous les calculs thermiques, de transformation et de diffusion.



(A) Dies + workpiece in 2D.

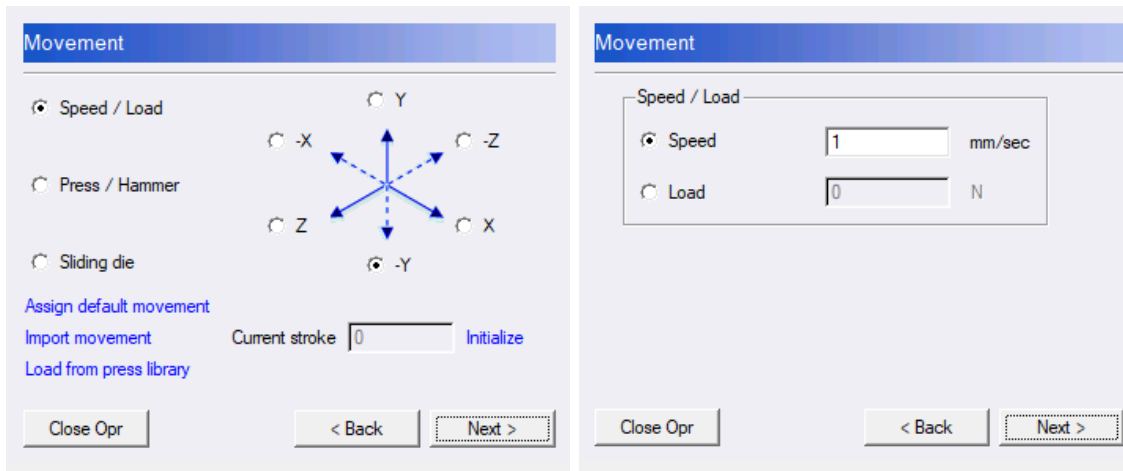
(B) Dies + workpiece in 3D.

FIGURE 2.11: Matrices importées et assemblées ainsi que la pièce en 2D et 3D.

Pour notre étude et simulation d'ECAP nous définissons pour définir les matrices, les matrices sont relativement complexes à concevoir sur le DEFORM (en particulier les matrices 3D), ainsi que montré dans fig. 2.3 nous avons utilisé SolidWorks pour les concevoir et enregistrer les dans le format .STL, puis nous les importons dans le DEFORM, pour les simulations 2D et 3D nous avons trois matrices: Bottom die, die 3, plus die die (le poinçon) fig. 2.11.

### 2.5.7 Contrôle du mouvement

Les contrôles de mouvement ou de mouvement peuvent être appliqués à des objets rigides (dans la simulation ECAP, c'est le poinçon) et aux nœuds avant de l'objet maillé (la pièce). La surface définie par ces nœuds peut être considérée comme une "surface rigide". Pendant 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 du poinçon. La vitesse peut être définie comme une constante, ou en fonction du temps ou de la course.



(A) Movement direction of the punch

(B) The speed of pressing

FIGURE 2.12: Contrôler la direction du mouvement et la vitesse du poinçon.

Pour étudier l'influence de la vitesse de pressage sur la distribution de la déformation par FEM sur ECAP, on choisit une vitesse constante pour chaque simulation cref fig: Movement. Typiquement, les vitesses avant dans le coude sont dans la gamme de  $sim1 - 20mm/s$ .

### 2.5.8 Coefficient de friction

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 frottement sont soumis à un cisaillement constant, un frottement de Coulomb et une contrainte de cisaillement constante.

Le frottement de cisaillement constant est principalement utilisé pour former des simulations. La force de frottement dans le cisaillement constant est définie par relation:

$$f_s = m.k \quad (2.1)$$

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

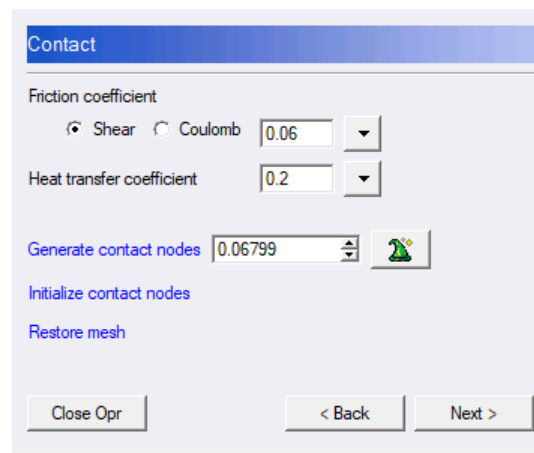


FIGURE 2.13: Coefficient de friction et contrôle du transfert de chaleur.

Le lubrifiant utilisé sur l'outillage joue un rôle important dans la quantité de frottement entre l'outil et la pièce. Le frottement affecte à son tour le flux de métal sur les surfaces de contact. Valeurs typiques (en cisaillement constant uniquement):

- (0.06-0.1) pour les procédés de formage à froid.
- (0.2) pour les procédés de formage à chaud.
- (0.2 to 0.3) pour les procédés de formage à chaud lubrifiés.
- (0.7-0.9) pour les surfaces non lubrifiées.

### 2.5.9 Exécution de la simulation

DEFORM est généralement exécuté en mode batch. Dans certains cas, il est souhaitable de regarder le comportement d'itération dans le fichier de messages pendant que la simulation est en cours d'exécution. (Par exemple, une simulation qui ne converge pas bien peut être arrêtée avant qu'elle ne traverse toutes les itérations). L'exécution de simulation interactive affiche les informations du fichier de message directement sur l'écran afin qu'il puisse être vu en temps réel comme indiqué dans fig. 2.14.

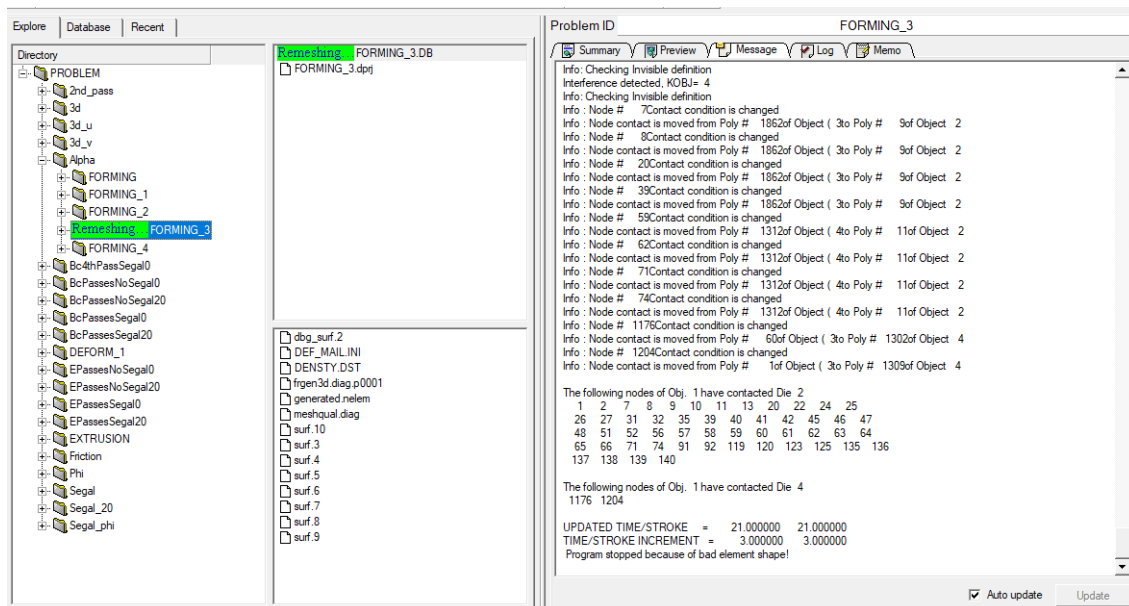


FIGURE 2.14: Execution de la simulation

## 2.5.10 DEFORM-Post

Le postprocesseur est utilisé pour afficher les données de simulation après l'exécution de la simulation. Le postprocesseur dispose d'une interface utilisateur graphique pour visualiser la géométrie, les données de champ telles que la déformation, la température et la contrainte, ainsi que d'autres données de simulation telles que les charges de matrices. Le post-processeur peut également être utilisé pour extraire des données graphiques ou numériques à utiliser dans d'autres applications. (fig. 2.15)

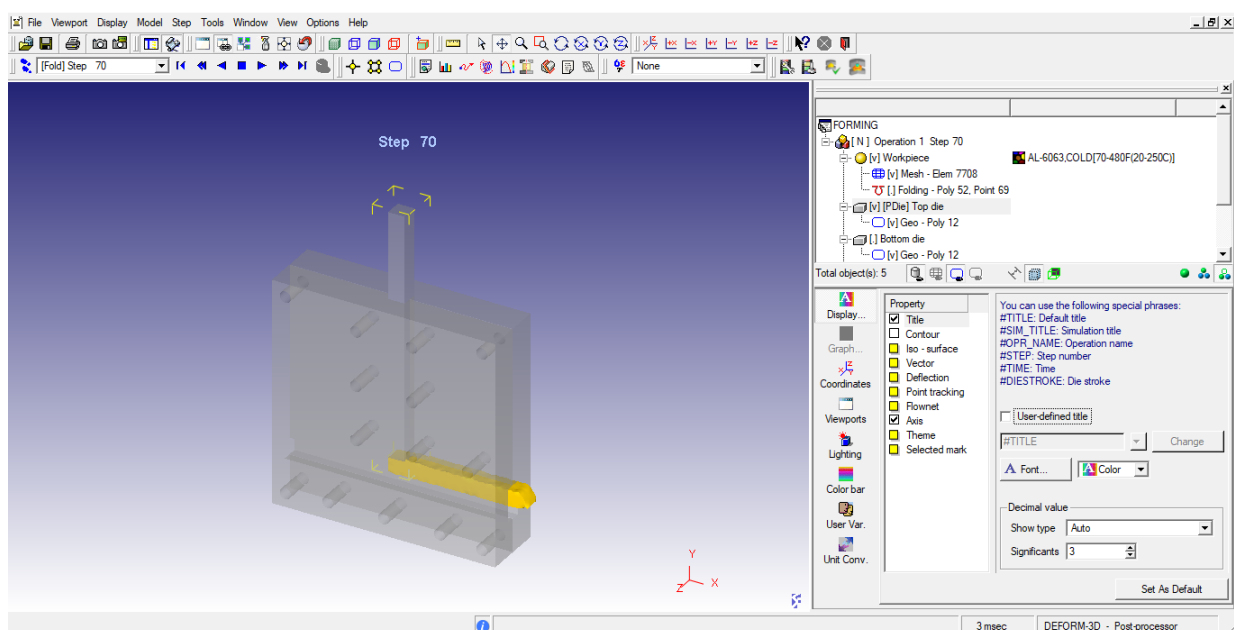


FIGURE 2.15: La fenêtre DEFORM Post 2D/3D

# Chapitre 3



# Chapter 3

## Résultats et discussions

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons d'abord analyser et discuter les résultats des simulations en 2D pour les paramètres multiples de l'ECAP incluant l'angle de canal  $\phi$ , l'angle de courbure  $\psi$ , la vitesse de pressage, le coefficient de frottement, etc.

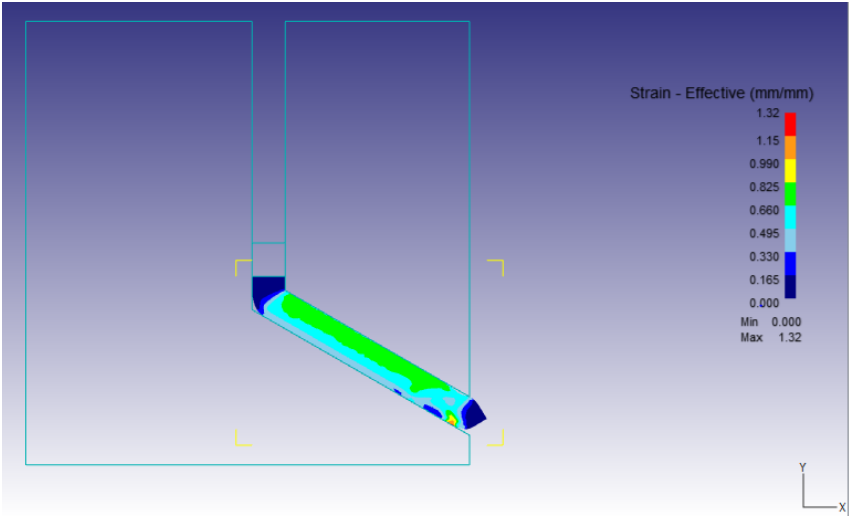
Comme nous allons simuler l'ECAP dans notre die modifié et comparer les résultats sur l'homogénéité de la déformation avec le dé ECAP régulier, nous appliquerons également la simulation ECAP multi-pass via différentes routes dans l'environnement 3D en mettant plus l'accent sur les routes  $B_c$  et  $E$ .

La pièce à usiner est un alliage d'aluminium 6063 de forme cuboïde (de forme carrée) avec des sections transversales de  $15 \times 15 \text{ mm}^2$  et  $120 \text{ mm}$  de longueur, et les simulations seront effectuées à température ambiante.

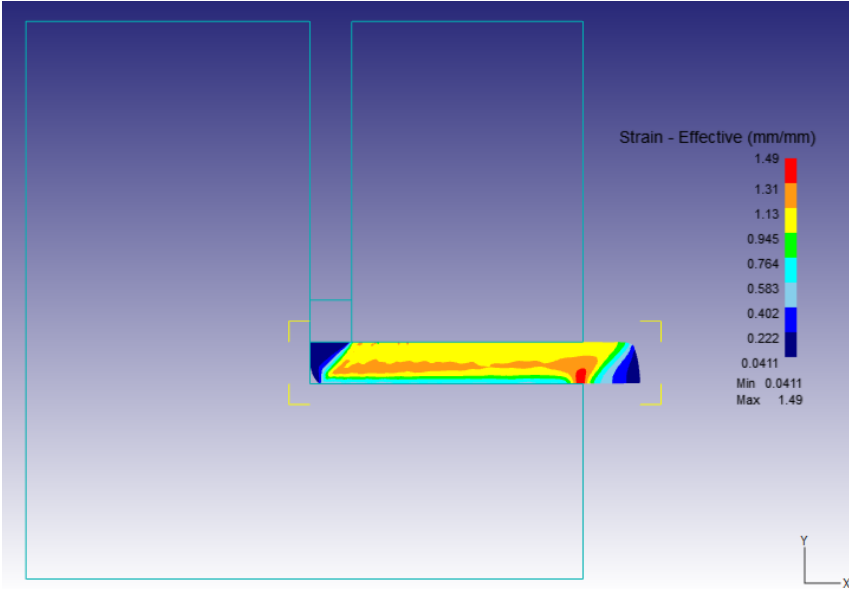
### 3.2 L'influence de l'angle de canal, $\phi$

L'angle de canal,  $\phi$ , est le facteur expérimental le plus important car il dicte la contrainte totale imposée à chaque passage, et influence ainsi directement la nature de la microstructure telle qu'elle est pressée. Néanmoins, malgré l'importance critique de cet angle, la plupart des expériences rapportées à ce jour utilisent des valeurs de  $\phi$  de  $90^\circ$  à  $120^\circ$  et il y a généralement peu ou pas de tentative de faire quelque chose comparaison entre les résultats obtenus lors de l'utilisation de matrices ayant des angles de canaux différents.

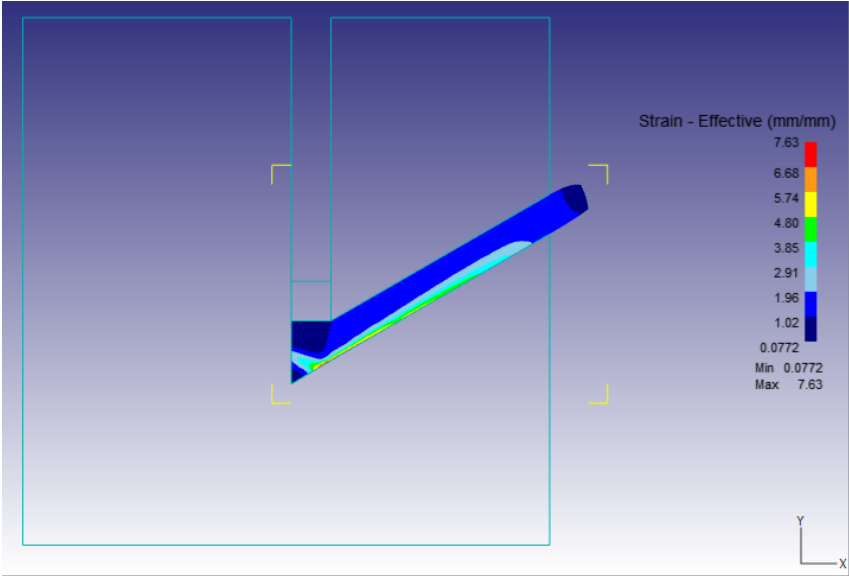
Notre simulation a été réalisée en utilisant trois matrices séparées ayant des angles de canal de  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ , et  $60^\circ$  étant donné que la contrainte imposée dans ECAP augmente avec l'angle de canal décroissant, nous avons pensé qu'il peut être avantageux d'effectuer les pressages en utilisant l'angle de canal qui est  $< 90^\circ$ , ces trois matrices sont illustrées schématiquement dans fig. 3.1 montrant la distribution de la déformation efficace sur la pièce après ECAP un seul passage. Le processus de simulation a été conduit à température ambiante et avec un angle de courbure  $\psi = 0^\circ$ , coefficient de frottement  $\mu = 0,06$ , et la vitesse de pressage  $v = 1 \text{ mm/s}$ .



(A)



(B)



(C)

FIGURE 3.1: Illustration schématique des matrices utilisées pour évaluer l'influence de l'angle de canal,  $\phi$ : (A)  $120^\circ$ , (B)  $90^\circ$ , et (C)  $60^\circ$ .

La distribution de la déformation effective dans la section longitudinale est montrée dans fig. 3.1. Les résultats révèlent que la partie médiane de la pièce ECAPed a des distributions de déformation relativement stables alors que les parties des extrémités ont une inhomogénéité de déformation significative.

La section de matériau à très faible déformation à l'avant de la pièce est due à la partie du matériau qui se trouve à l'extérieur de la zone de cisaillement depuis le début du processus ECAP. En ce qui concerne la partie finale, le matériau présente un taux de déformation très faible car il n'a pas encore traversé la zone de cisaillement à la fin du processus ECAP. Par conséquent, il est recommandé de jeter 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 une déformation constante dans le sens de la longueur.

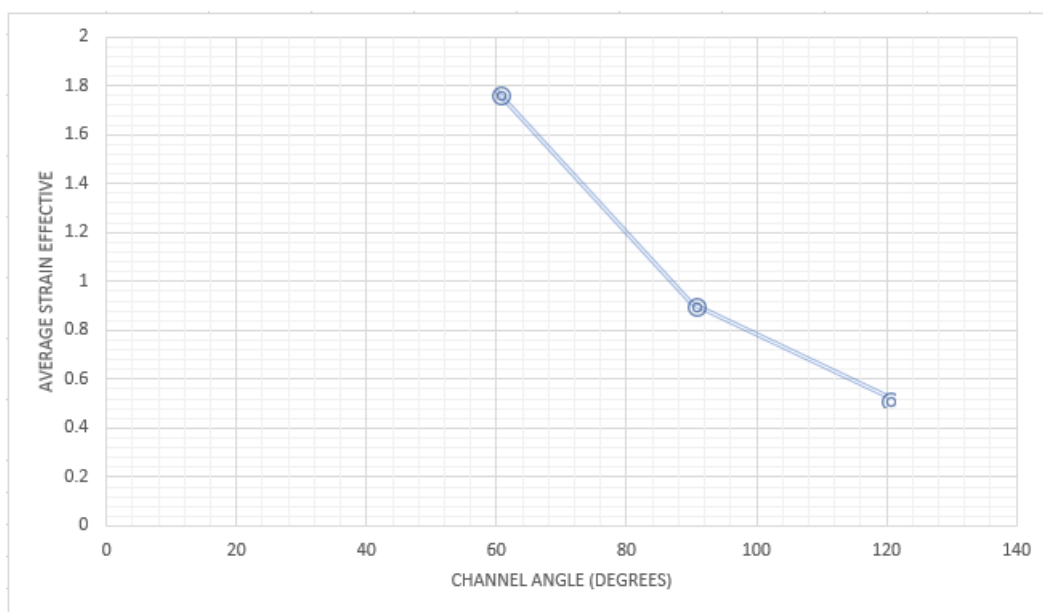


FIGURE 3.2: La déformation moyenne efficace en fonction de l'angle de canal,  $\phi$

Les simulations par éléments finis rigides-viscoplastiques 2D ont été réalisées à l'aide du logiciel DEFORM. Les distributions de déformations ont été mesurées le long de la direction transversale pour étudier l'homogénéité des échantillons pour l'ECAP en un seul passage. L'indice d'inhomogénéité de contrainte SII la direction transversale [5] a été calculée à partir de l'équation suivante:

$$SII = \frac{Max(\varepsilon_p) - Min(\varepsilon_p)}{Avg(\varepsilon_p)} \quad (3.1)$$

Où  $Max(\varepsilon_p)$ ,  $Min(\varepsilon_p)$ , et  $Avg(\varepsilon_p)$  désignent respectivement les déformations plastiques maximales, minimales et moyennes dans la direction transversale. le dernier est calculé à partir de l'équation suivante:

$$Avg(\varepsilon_p) = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n} \quad (3.2)$$

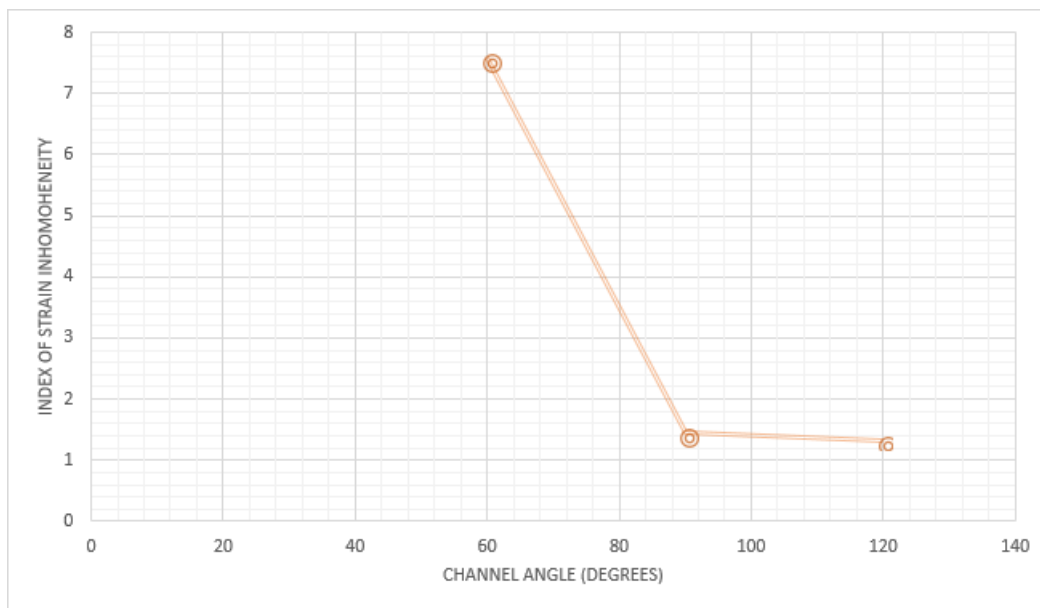


FIGURE 3.3: L'indice d'inhomogénéité de la déformation en fonction de l'angle du canal,  $\phi$

Les résultats de la simulation comme illustré dans fig. 3.1 ont montré que la déformation effective de la pièce ECAPed dans 120° die est plus homogène alors qu'elle varie de 0.00 à 1.32 après un seul passage, considéré comme faible comparé aux pièces de 90° et 60° ECAPed qui ont une tension efficace allant de 0,04 à 1,49 et de 0,08 à 7,63 respectivement. Bien que la pièce ECAPed dans une filière de 60° donne une déformation effective importante, son principal problème est l'inhomogénéité de la déformation qui était très élevée et concentrée dans la partie inférieure de la pièce. Ainsi le 90° die est considéré comme le plus performant pour notre matériel du fait qu'il combine à la fois des déformations moyennes plus élevées que 120° die fig. 3.2 et considérablement plus faibles indice d'inhomogénéité de contrainte supérieur à 60° die fig. 3.3.

Malgré l'efficacité des matrices ECAP avec des angles de canal de  $\phi = 90^\circ$ , il est important de reconnaître qu'il est expérimentalement plus facile de presser des billettes lorsqu'on utilise des matrices dont les angles dépassent 90°. Pour certains matériaux très durs ou avec des matériaux ayant une faible ductilité, ceci peut être une considération importante.

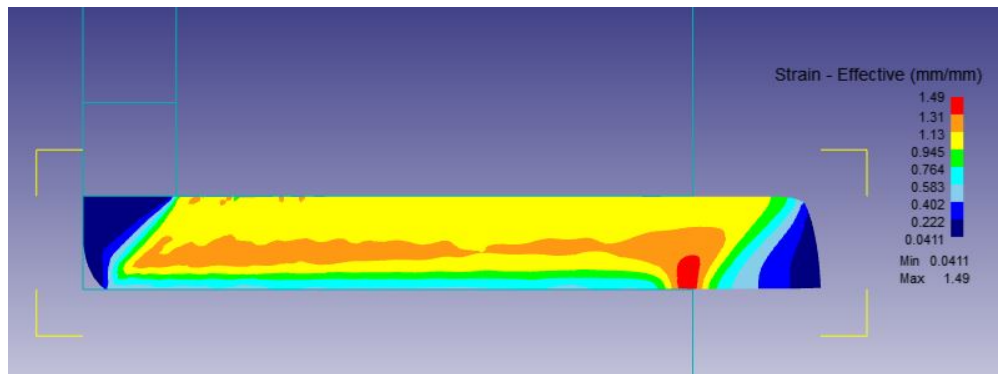
### 3.3 L'influence de l'angle de courbure, $\psi$

L'angle de courbure,  $\psi$ , désigne l'arc extérieur où les deux parties du canal se croisent à l'intérieur du dé. Cet angle joue seulement un rôle mineur dans la détermination de la contrainte imposée à l'échantillon. Néanmoins, il est important d'étudier l'influence de cet angle dans la production de matériaux à grains ultrafines.

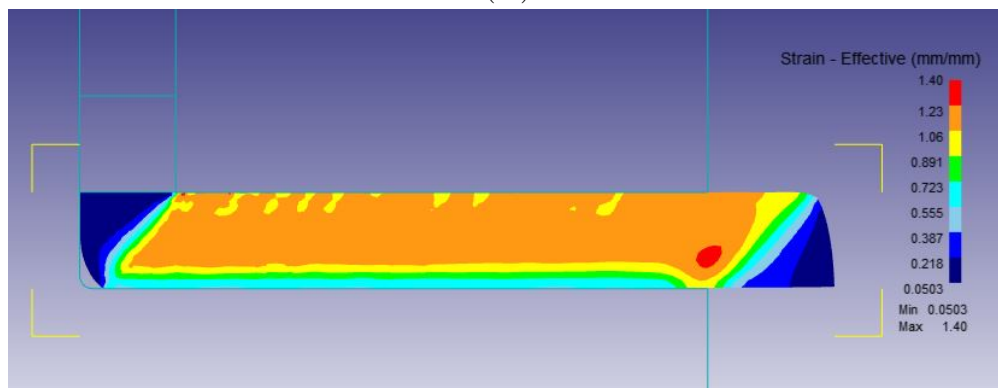
Il y a eu de nombreuses tentatives pour analyser la déformation survenant dans ECAP en utilisant la modélisation par éléments finis et beaucoup de ces analyses incorporent une évaluation de la signification de l'angle de courbure  $\psi$  [52]. Le rôle de cet angle est également important car, alors que les matrices en deux parties conventionnelles sont

facilement construites avec  $\psi = 0^\circ$ , toutes les matrices solides incorporeront nécessairement  $\psi > 0^\circ$ .

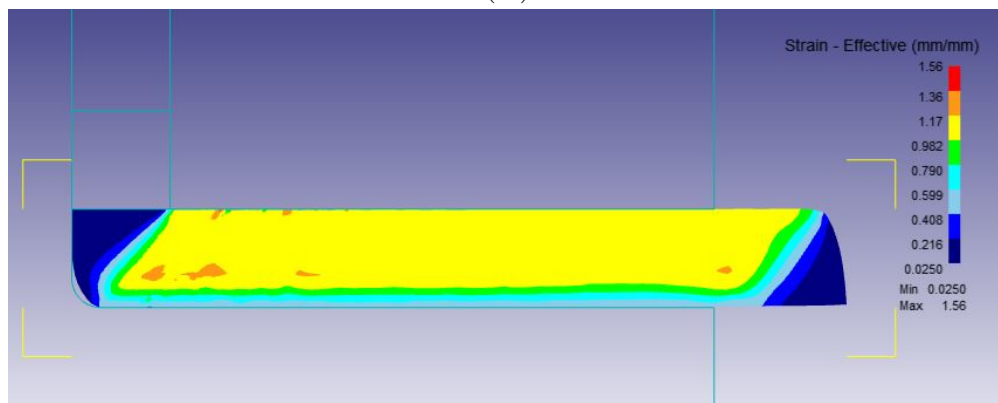
La signification de ces différences a été soigneusement étudiée en simulant ECAP à travers cinq matrices séparées avec  $\phi = 90^\circ$  et différents angles de courbure  $\psi$ :  $0^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $37^\circ$ , et  $90^\circ$  (fig. 3.4).



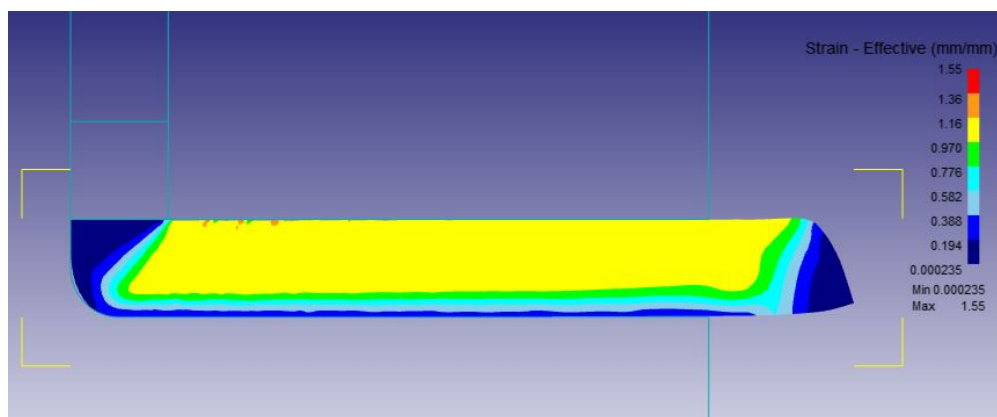
(A)



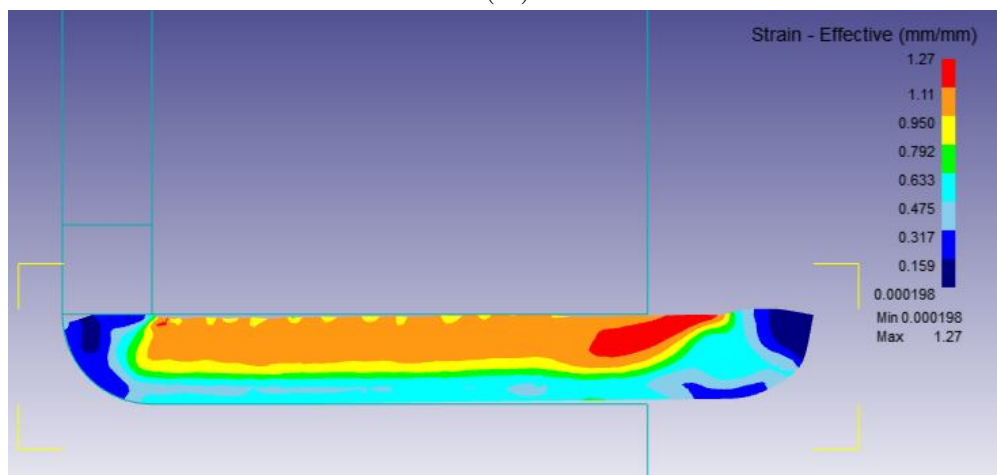
(B)



(C)



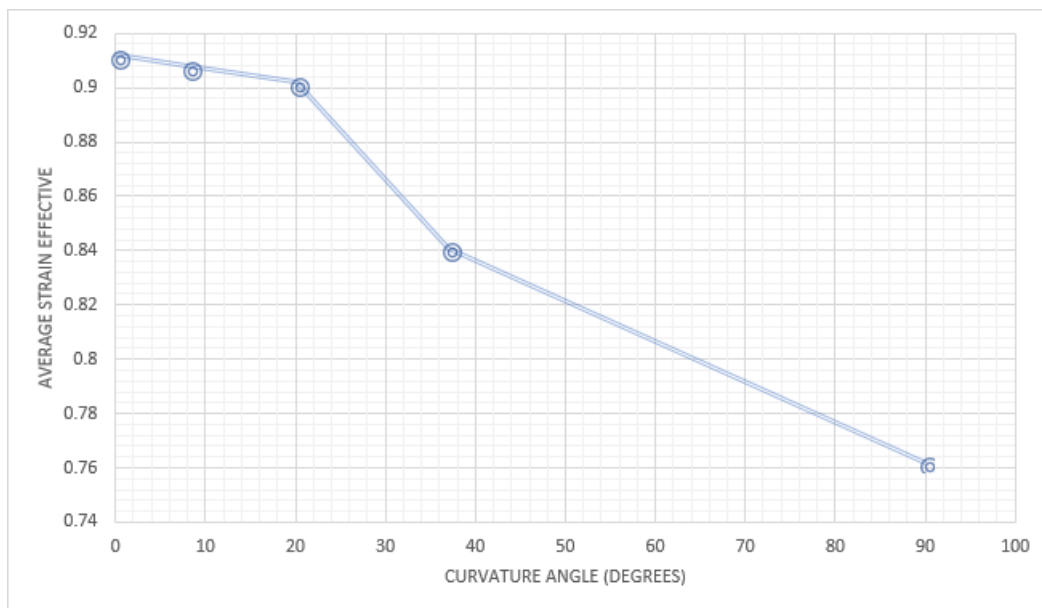
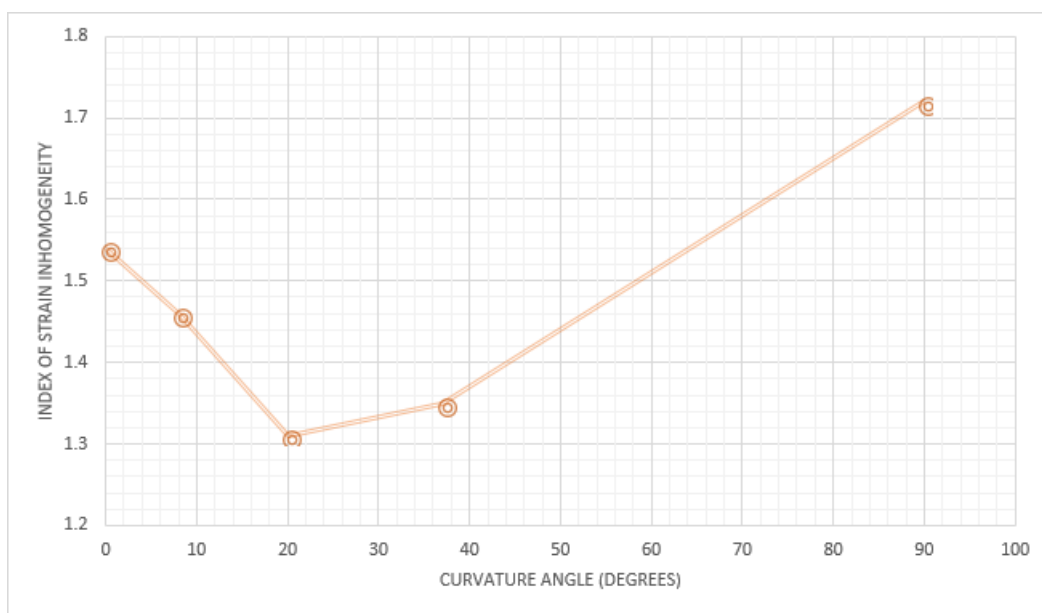
(D)



(E)

FIGURE 3.4: Illustration schématique des matrices utilisées pour évaluer l'influence de l'angle de courbure,  $\psi$ : (A)  $0^\circ$ , (B)  $8^\circ$ , (C)  $20^\circ$ , (D)  $37^\circ$ , et (E)  $90^\circ$ .

Nous pouvons observer que l'homogénéité de la déformation sur la pièce augmente avec  $\psi$  de  $0^\circ$  fig. 3.4A à  $8^\circ$  fig. 3.4B surtout dans la partie avant et la partie supérieure médiale, puis quand on remarque une homogénéité plus élevée avec l'autre dé avec  $\psi = 20^\circ$  fig. 3.4C où la partie médiane est presque parfaitement homogène avec relativement moins d'inhomogénéités dans les parties avant et terminales. La pièce ECAPed dans  $\psi = 37^\circ$  die fig. 3.4D a donné un résultat plus proche de l'homogénéité à la précédente, mais il a une inhomogénéité remarquable le long de la partie inférieure de la médiale partie de la pièce (illustrée en bleu) qui indique que cette zone n'a pas été déformée. Le dernier fig. 3.4E représente le résultat de la pièce ECAPed sous  $\psi = 90^\circ$  die, il montre une inhomogénéité très élevée dans la partie médiane et la partie avant de la billette, qui est dû principalement à l'endommagement de la pièce dans la zone supérieure en raison de son raclage avec le bord de la matrice, et presque la non-déformation de la zone inférieure.

FIGURE 3.5: La déformation moyenne efficace en fonction de l'angle de courbure,  $\psi$ .FIGURE 3.6: Le graphique illustre l'indice d'inhomogénéité de la déformation en fonction de l'angle de courbure,  $\psi$ .

Les deux graphes de fig. 3.5 et fig. 3.6 qui représentent la déformation moyenne effective et l'indice d'inhomogénéité de déformation en fonction de l'angle de courbure,  $\psi$ , prouvent respectivement notre observation et notre explication mentionnées au paragraphe précédent, Nous pouvons donc conclure que l'angle de courbure  $\psi = 20^\circ$  est l'angle optimal pour notre dé, car il recueille à la fois une moyenne efficace élevée (environ 0.9) fig. 3.5 et une distribution homogène sur la pièce comme indiqué par un indice d'inhomogénéité de déformation élevé (légèrement supérieur à 1,5) comme indiqué dans fig. 3.6.

### 3.4 L'influence de la vitesse de pressage

Le traitement par ECAP est habituellement effectué en utilisant des presses hydrauliques de grande capacité qui fonctionnent avec des vitesses de rams relativement élevées. Typiquement, les vitesses de pressage sont de l'ordre de  $\sim 1\text{-}20\text{ mm/s}$ . Néanmoins, il est possible de construire des matrices pour une utilisation dans des machines d'essai mécaniques classiques, ce qui permet d'étendre les vitesses de pressage sur une très large plage. C'est pourquoi nous trouvons intéressant d'analyser l'influence de la vitesse de pressage sur l'homogénéité de la déformation de la pièce ECAPed.

Pour ce cas nous avons utilisé un dé avec un angle de canal  $\phi = 90^\circ$  et un angle de courbure  $\psi = 20^\circ$ , alors nous avons varié la valeur de la vitesse de pressage à partir de  $0.1\text{ mm/s}$  jusqu'à  $20\text{ mm/s}$  en passant par différentes vitesses, y compris  $0.5\text{ mm/s}$ ,  $1\text{ mm/s}$ ,  $5\text{ mm/s}$ , et  $10\text{ mm/s}$ , pour suivre l'indice d'homogénéité de déformation pendant ces simulations ECAP en un seul passage fig. 3.7.

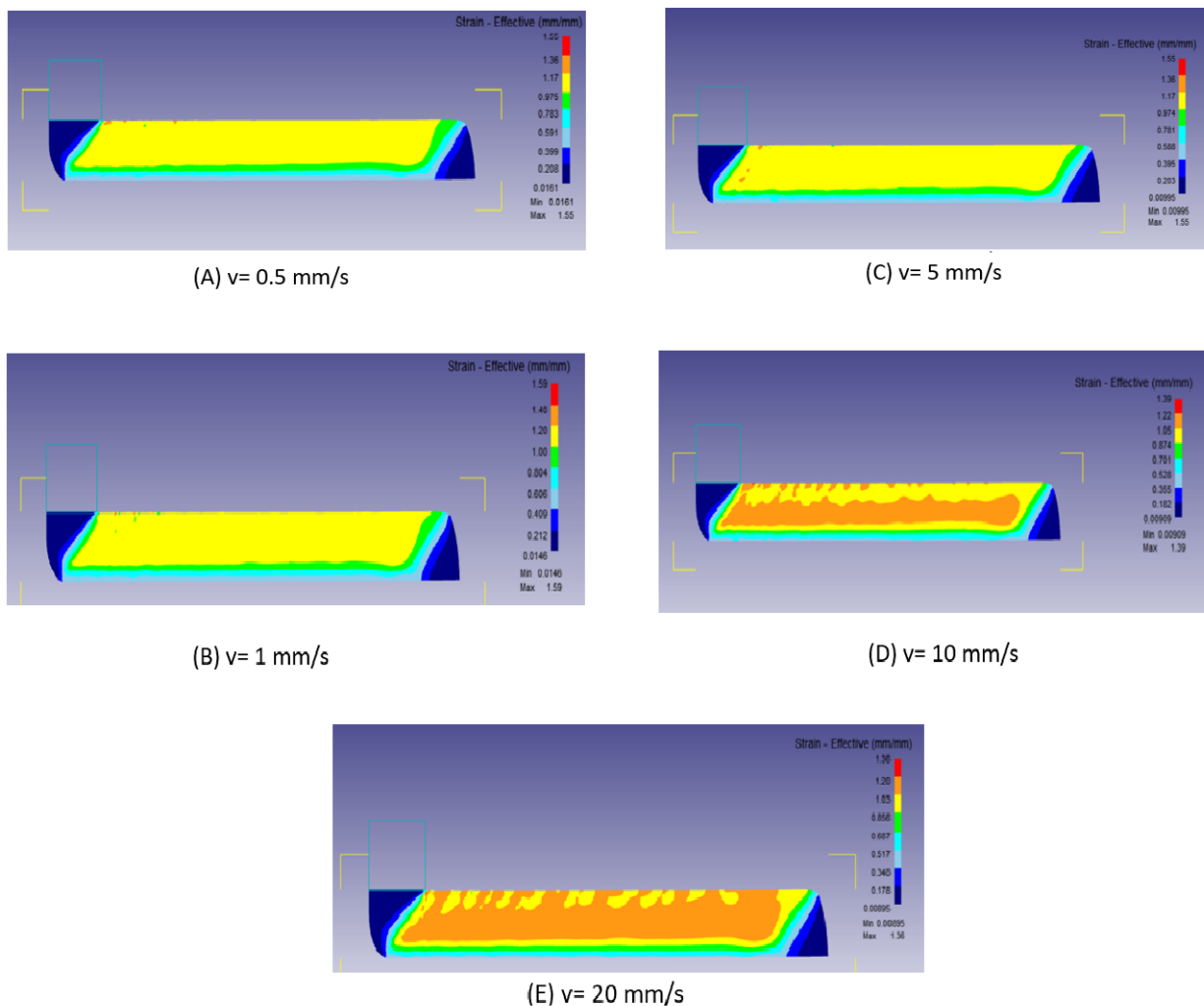


FIGURE 3.7: Filtrer la distribution effective sur la pièce après ECAP à passage unique avec des valeurs de vitesse de pressage.



D'après fig. 3.7, nous pouvons remarquer que lorsque nous avons pressé la pièce avec de faibles vitesses de pressage (0,5 mm/s et 1 mm/s), nous avons obtenu une répartition plus homogène de la déformation sur la partie médiane de la billette confirmée par de faibles valeurs de la déformation. Inhomogeneity Index comme indiqué dans le graphique fig. 3.8 où nous avons obtenu respectivement 1,31 et 1,324. Une fois que nous avons augmenté la vitesse de pressage à 5 mm/s, certaines inhomogénéités ont commencé à apparaître dans le côté gauche de la partie médiane de notre pièce et nous avons obtenu une valeur plus élevée du SII estimée à 1,36. L'inhomogénéité de la distribution des déformations augmente de façon remarquable avec la vitesse de pressage, comme on peut facilement le remarquer dans fig. 3.7 par l'apparition de la couleur orange principalement dans les parties médiane et supérieure de la région médiane de la billette, en tant que Résultat, nous avons obtenu des valeurs considérablement élevées du SII qui ont atteint respectivement 1,43 et 1,46. Ces résultats pourraient s'expliquer par des effets thermiques sur l'homogénéité de la déformation, puisqu'il y a un échauffement brusque des échantillons lors du pressage à la vitesse la plus rapide (atteint jusqu'à  $84\text{ }C^{circ}$  pour 20 mm/s) mais pas chauffage important à la vitesse de pressage la plus lente (maximum  $53\text{ }C^{\circ}$  pour 0,5 mm/s) comme indiqué dans cref Chaleur, alors que les alliages d'aluminium sont considérés comme sensibles à l'augmentation de la température.

Cependant, ces résultats ont démontré que la vitesse de pressage dans l'ECAP n'a pas une influence significative sur l'amplitude de la déformation et l'homogénéité de la déformation. Cependant, il est préférable d'appuyer sur des vitesses plus lentes pour éviter l'influence du chauffage.

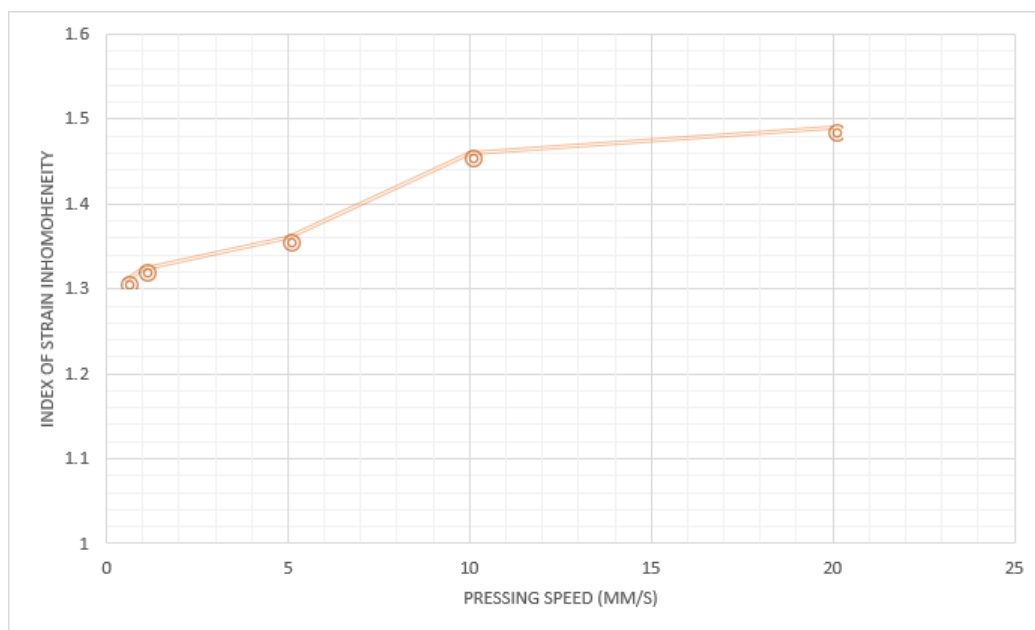


FIGURE 3.8: La variation de l'indice d'homogénéité de la contrainte en fonction de la vitesse de pressage.

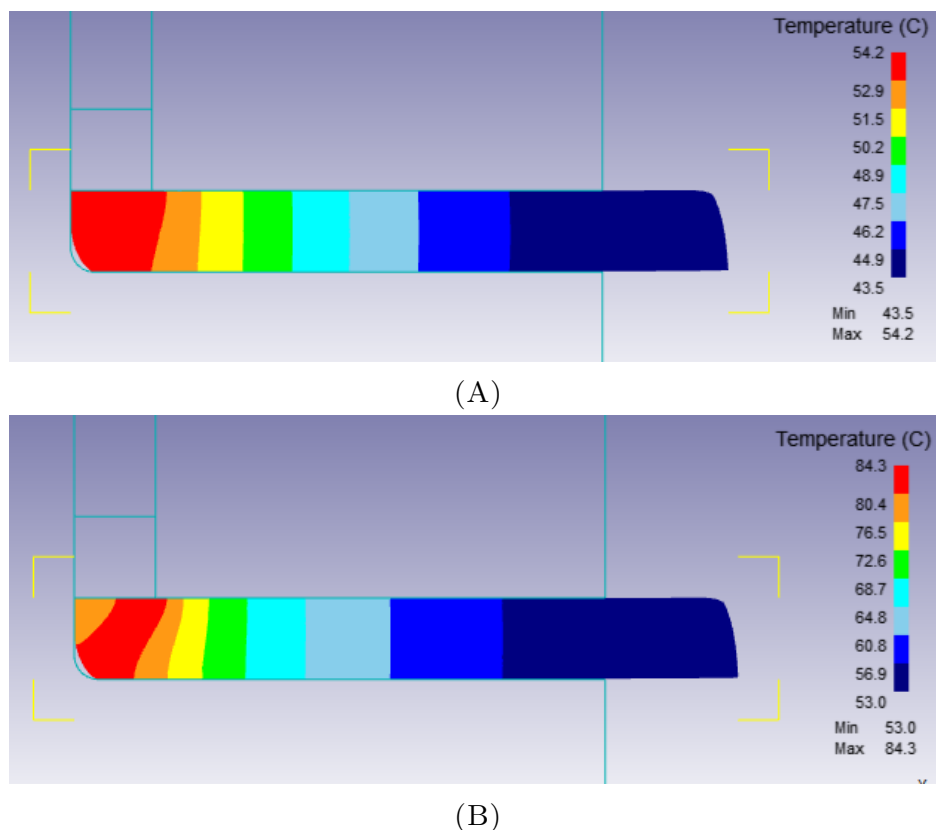


FIGURE 3.8: Répartition de la température dans la pièce pour les vitesses de pressage les plus lentes et les plus rapides: (A) 0.5 mm/s et (B) 20 mm/s.

### 3.5 L'influence du coefficient de frottement, $\mu$

Dans le processus ECAP à travers une filière classique, le frottement de contact est présent presque sur toute la surface de la pièce. Par conséquent, la partie de la force de pression nécessaire pour surmonter le frottement est augmentée avec l'augmentation de la longueur de la billette et / ou la diminution de la stabilité du lubrifiant.

Le coefficient de frottement est considéré comme un facteur important pour l'ECAP, en particulier lorsque nous passons au processus multi-passes où la billette se renforce après chaque passage. Cependant, nous visons à simuler l'influence du frottement sur l'inhomogénéité de la contrainte de notre billette après un passage. Pour ce faire, nous avons fait varier le coefficient de frottement de 0,01 à 0,6 afin de suivre son influence.

On observe à partir du fig. 3.9 que la distribution de la contrainte efficace a été affectée par la variation du coefficient de frottement. En fait, nous avons obtenu une contrainte plus homogène sur la pièce lorsque le coefficient était faible dans les deux cas (A) et (B). Nous avons commencé à remarquer plus d'inhomogénéité de la déformation dans la partie médiane de la billette en augmentant  $\mu$  à 0,1, en plus d'une zone non déformée apparue dans la partie médiane inférieure de la billette pour  $\mu = 0,2$  et  $0,3$ . La dernière sous-figure (F) qui correspond à la plus grande valeur du taux de frottement montre une surface inférieure de la billette fortement déformée en raison de son endommagement et de sa rayure avec la surface de la filière.

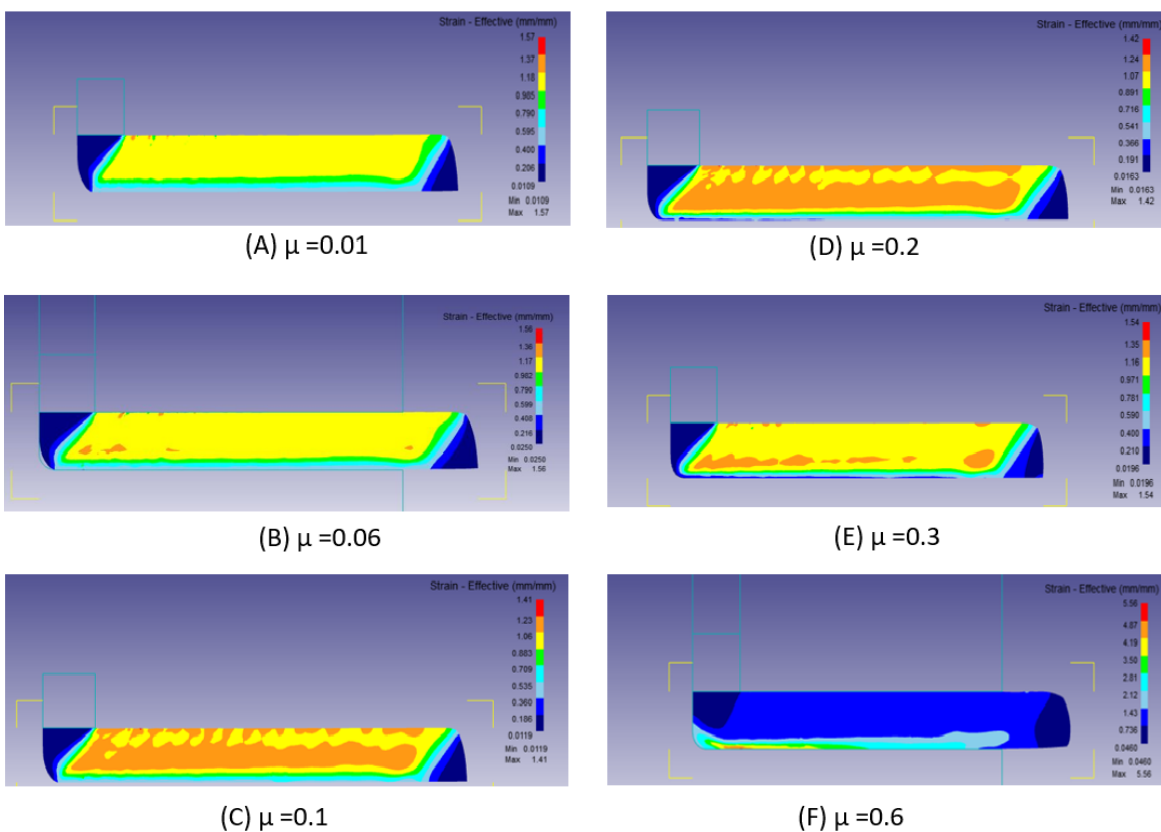


FIGURE 3.9: Déformation efficace après la variation des coefficients de frottement  $\mu$ : (A) 0.01, (B) 0.06, (C) 0.1, (D) 0.2, (E) 0.3, et (F) 0.6.

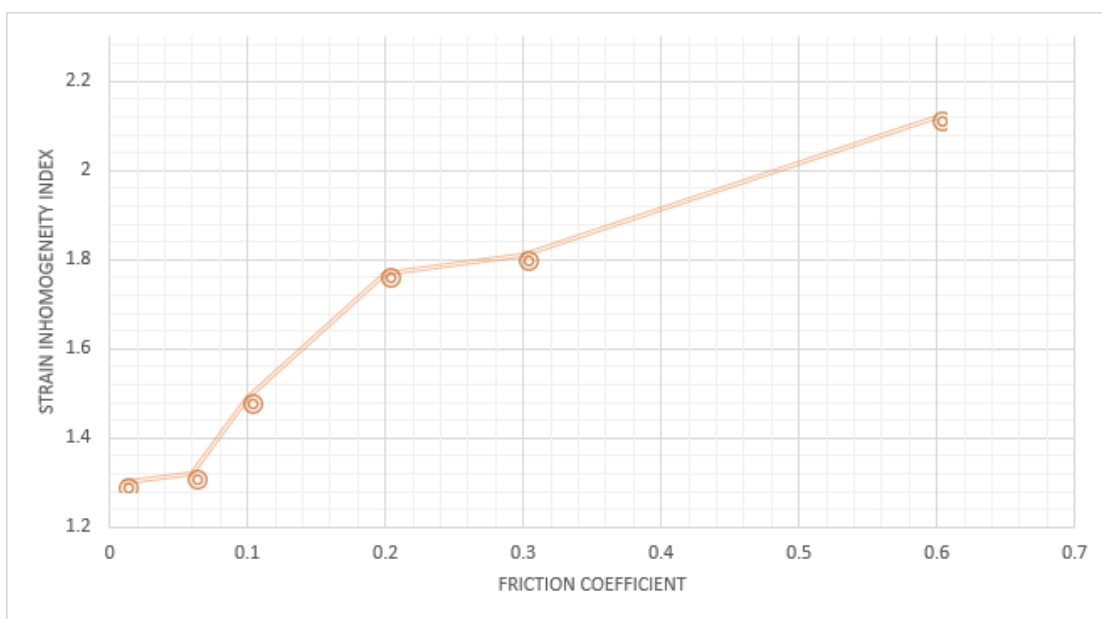


FIGURE 3.10: La variation de l'indice d'homogénéité de la déformation en fonction du coefficient de frottement,  $\mu$ .

### 3.6 L'influence de la matrice modifiée

Nous avons déjà introduit notre design de matrice modifié dans le chapitre 2 qui est caractérisé par le curseur de déplacement du bas qui se déplace avec la billette à la même vitesse que le piston.

Nous avons simulé la contrainte ECAP efficace dans la matrice modifiée, comme indiqué dans le fig. 3.11, nous avons obtenu une homogénéité presque parfaite de la déformation sur la billette. La valeur de déformation dans sa partie médiane est estimée à environ 1,2, ceci est dû au fait que le curseur mobile a aidé la pièce à se déplacer facilement à travers le bord des canaux et réduit le frottement dans cette zone considérée comme la plus élevée par rapport aux autres de la matrice.

L'année dernière, Ettaieb et Sidali ont travaillé sur l'ECAP classique dans nos laboratoires, ils ont été confrontés à des problèmes tels que le gonflement de la billette, une mauvaise lubrification, des dommages au piston et des boulons de fixation. la filière pendant l'ECAP. Tous ces problèmes étaient dus principalement au taux de frottement élevé dans la matrice. Par conséquent, ils ne pouvaient pas atteindre le nombre de passes souhaité, car la matrice ne supportait pas la contrainte croissante provoquée par la billette dans ces conditions.

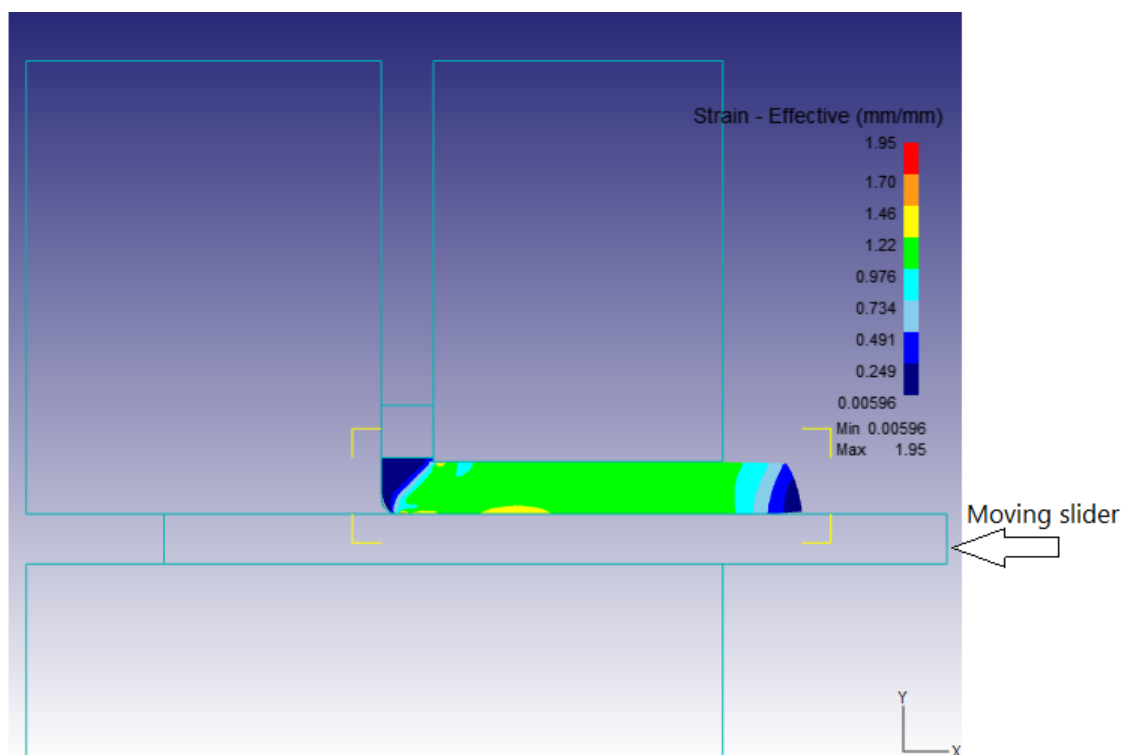


FIGURE 3.11: La distribution de la déformation efficace sur la pièce après ECAP passe unique à travers la matrice modifiée.

Pour confirmer que notre puce modifiée résoudrait les problèmes rencontrés l'année dernière, nous avons comparé l'influence du taux de frottement sur notre pièce entre la matrice ECAP conventionnelle et la matrice modifiée pour trois valeurs différentes du coefficient de frottement (Figure 3.12).

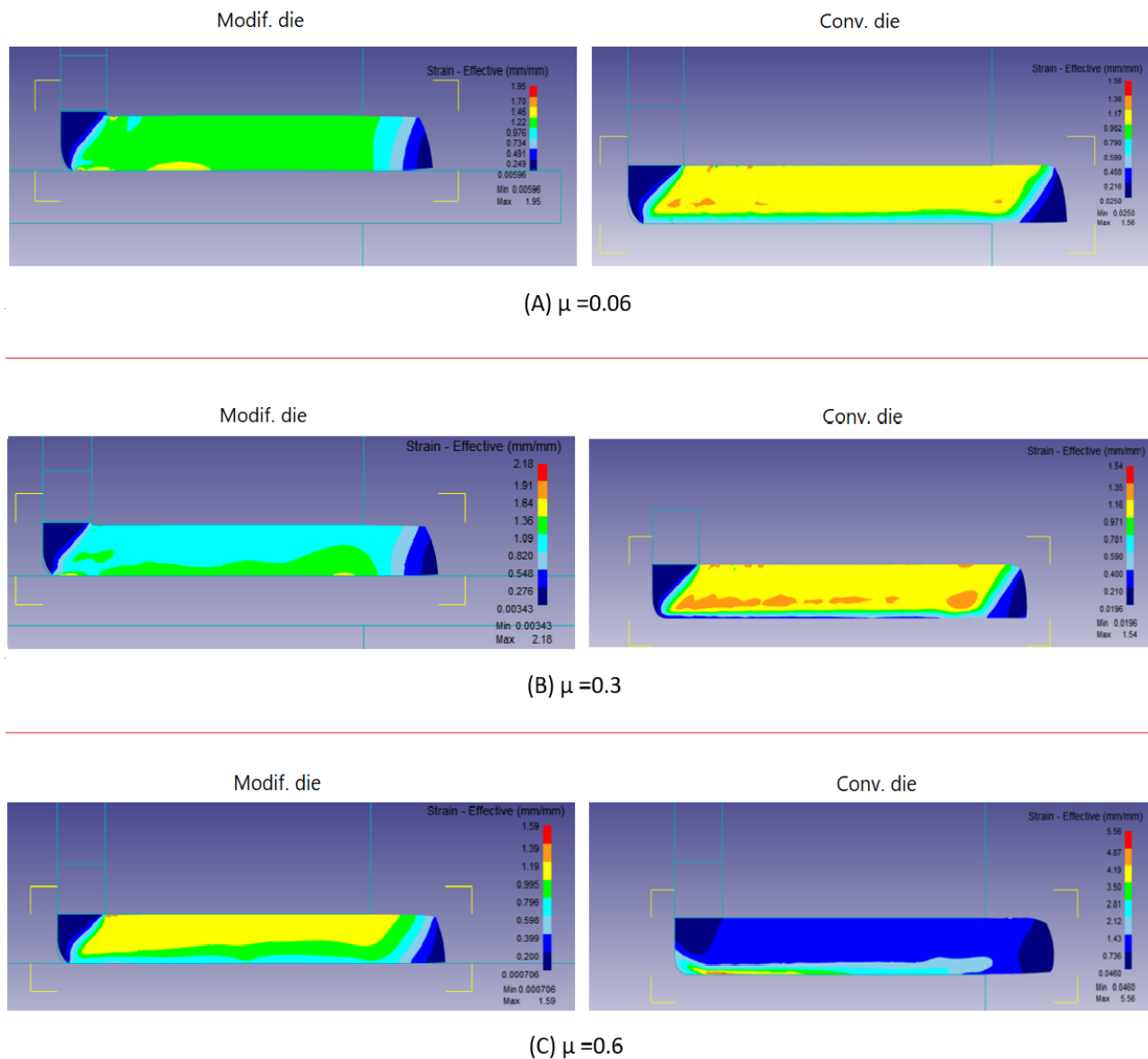


FIGURE 3.12: Comparaison de l'influence de la friction sur la déformation entre la matrice modifiée et la matrice conventionnelle  $\mu$ : (A) 0.06, (B) 0.3, et (C) 0.6.

- Pour  $\mu = 0.06$ ; nous voyons clairement l'inhomogénéité de la déformation sur la pièce à usiner pressée à travers la matrice conventionnelle en particulier en suivant l'axe Y où le fond de la partie médiane était moins déformé que la région supérieure. Alors que la

distribution de la déformation était presque parfaite sur la partie médiane de la pièce ECAPED à travers la matrice modifiée comme nous le voyons en couleur verte.

- Pour  $\mu = 0.3$ ; nous avons commencé à observer l'apparition de zones non déformées sur le fond de la billette en conv. en revanche, avec des inhomogénéités aléatoires sur son côté médian, on remarque peu d'inhomogénéités sans un fort contraste sur la billette pressée à travers la matrice modifiée.
- Pour  $\mu = 0.6$ ; une surface inférieure fortement endommagée de la billette en raison de son éraflure avec la surface de la filière classique, qui a provoqué un taux de déformation élevé dans cette zone. Cependant, nous avons encore une pièce plus homogène et moins endommagée de la matrice modifiée

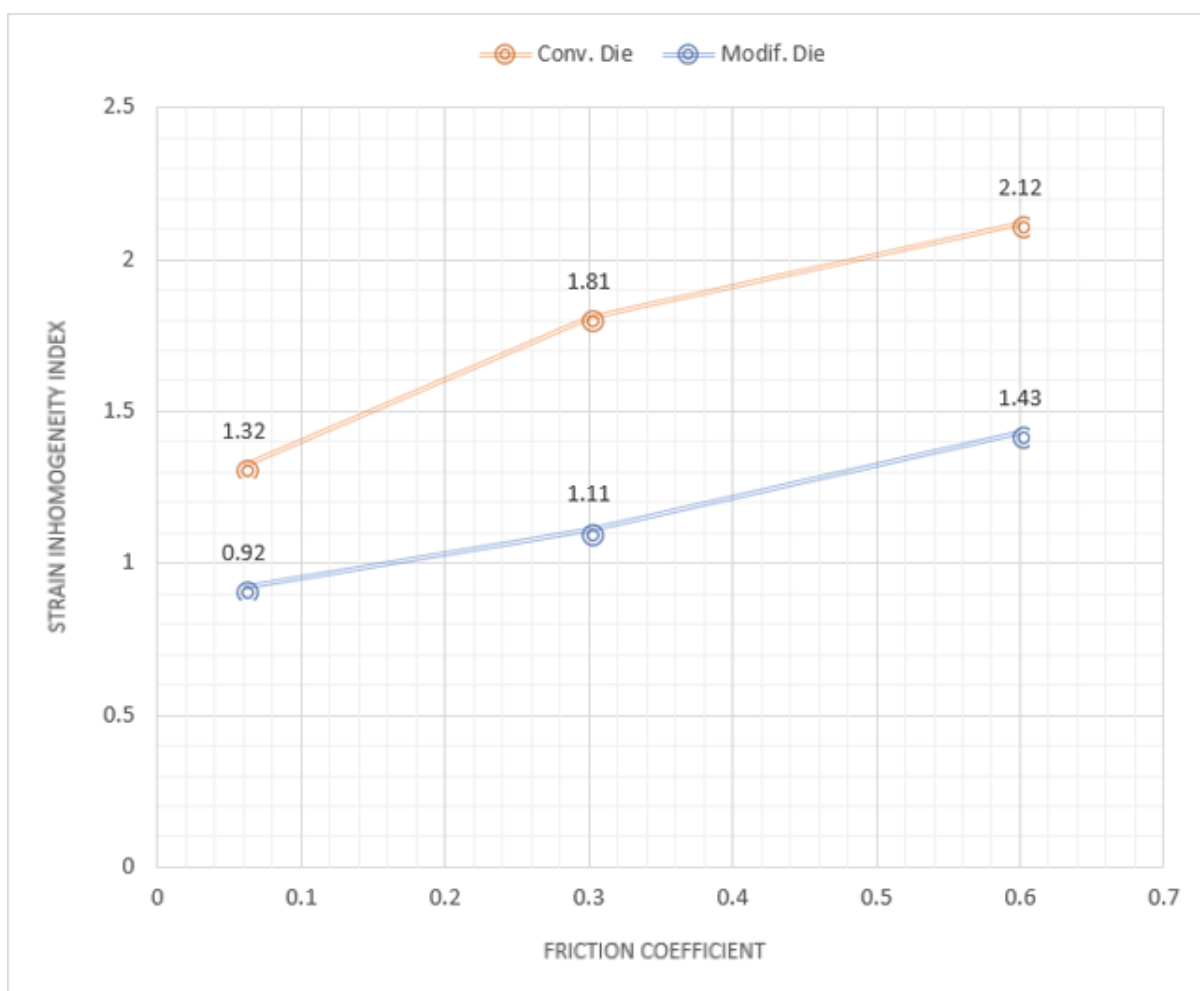


FIGURE 3.13: Comparaison de l'indice d'homogénéité de déformation entre la matrice conventionnelle et la matrice modifiée pour trois valeurs de coefficient de frottement  $\mu$ .

Les résultats de l'indice d'inhomogénéité de déformation montré dans fig. 3.10 confirment nos commentaires ci-dessus, donc le SII augmente avec le coefficient de frottement, et surtout nous pouvons clairement remarquer que les valeurs SII de la pièce ECAPed par la matrice modifiée ) étaient considérablement plus bas que ceux de la filière

conventionnelle (courbe rouge). Ainsi, nous pouvons conclure que la puce modifiée donne une plus grande homogénéité même lorsque le taux de frottement plus élevé.

### 3.7 L'influence des routes de traitement

Bien que la simulation 2D nous ait donné des résultats clairs et pertinents dans la simulation de différents paramètres de l'ECAP, elle n'a pas pu nous aider à simuler l'ECAP multipass à travers les différentes routes  $B_A$ ,  $B_C$ , C et E car ils nécessitent de faire tourner la pièce dans des angles spécifiques après chaque passage, ce qui n'est pas réalisable en 2D. Par conséquent, nous avons trouvé un besoin de passer à la simulation 3D afin de comparer l'influence de ces routes sur la pièce à usiner pressée à travers la matrice modifiée.

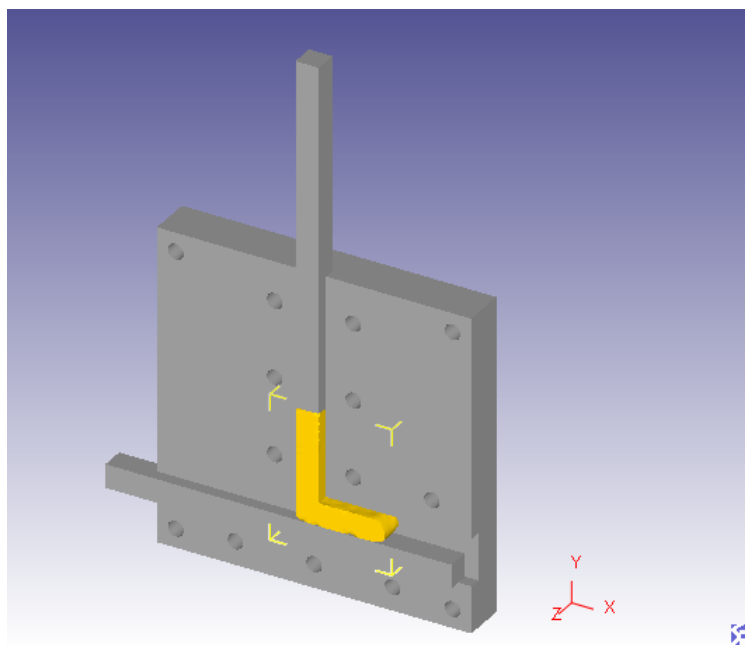


FIGURE 3.14: Résultat post-traitement ECAP dans un environnement 3D via un die modifié.

Figure 3.15 représente le résultat effectif de la traction du 1er passage ECAP de la billette à travers notre filière modifiée. Il est connu que le 1er passage de l'ECAP est commun entre les différentes routes, car à partir du 2ème passage les changements commencent à se produire.

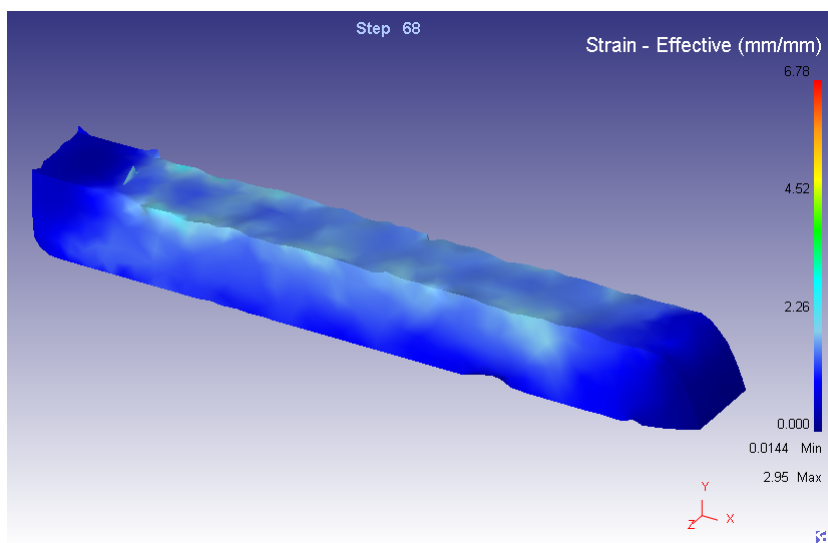


FIGURE 3.15: Strain effective distribution on workpiece after 1st pass through modif. die.

### 3.7.1 Route A

Comme indiqué dans Chapter 1, la route A consiste en une simple séquence de passes, sans aucune rotation de la pièce entre chaque extrusion. Ainsi, il représente le type le plus fondamental de processus multi-passe ECAP.

Figure 3.16 montre la distribution de la déformation après le traitement de 2, 4, 6 et 8 passages d'ECAP. Il a été observé que la déformation est plus concentrée dans la partie supérieure de la partie médiane de la pièce parce qu'elle est la plus proche de l'angle de cisaillement (le bord de la matrice). Après chaque passage, la partie supérieure a subi une déformation plus importante par rapport au reste de la pièce car elle était toujours introduite dans la même position. Ceci a conduit à un indice d'inhomogénéité de contrainte (fig. 3.22) significativement élevé, confirmant le manque d'homogénéité sur la billette résultante.

Malgré la grande inhomogénéité de la route A, nous avons pu obtenir une amplitude moyenne importante de la déformation qui atteignait environ 8,1 après 8 passages d'ECAP (fig. 3.21).



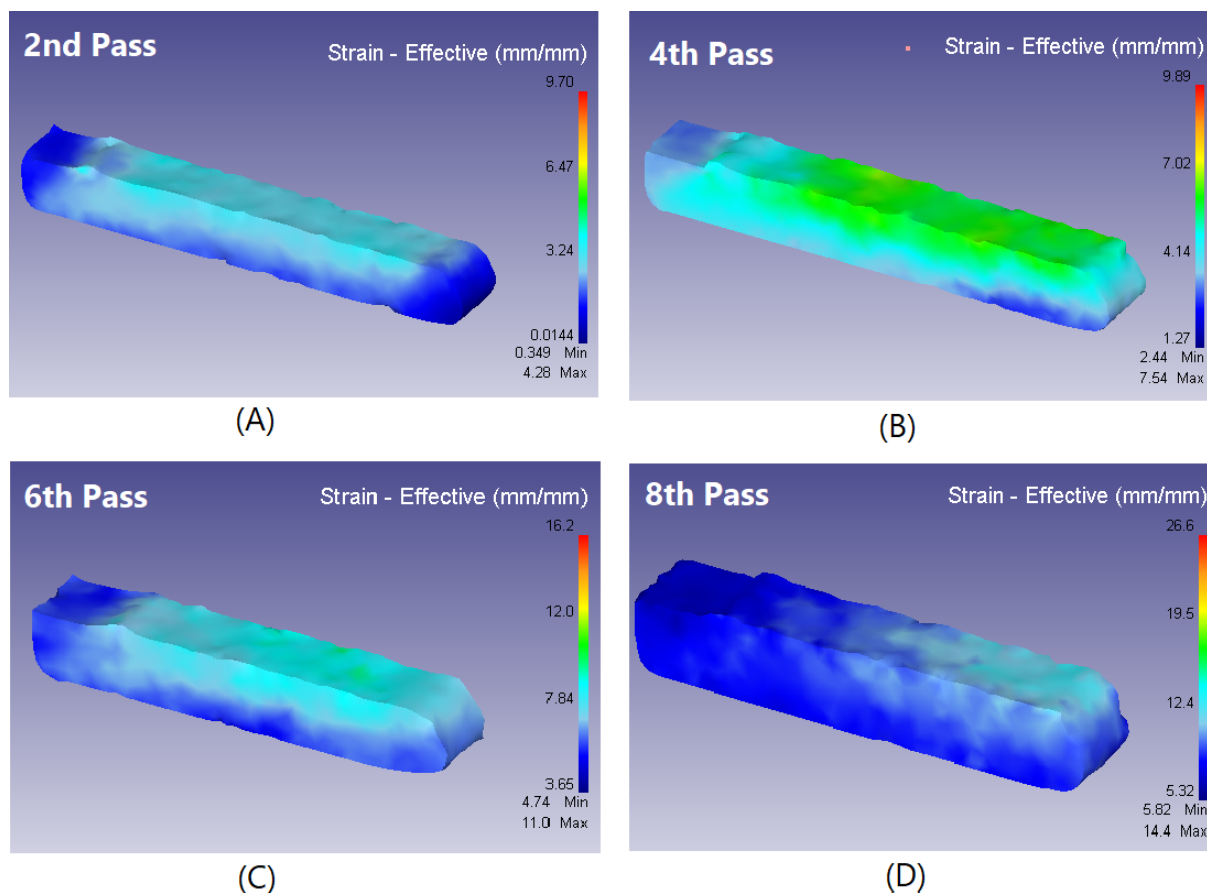


FIGURE 3.16: Répartition des contraintes sur la pièce après 2, 4, 6, et 8 passes dans route A.

### 3.7.2 Route $B_A$

La route  $B_A$  nécessite la rotation de la pièce avec un angle de  $90^\circ$  dans le sens des aiguilles d'une montre, puis dans la passe suivante, nous la faisons tourner avec  $90^\circ$  dans la direction opposée. Nous suivons cette règle entre chaque extrusion successivement jusqu'à atteindre le nombre de passes souhaité qui est de 8 pour notre cas.

Comme nous le voyons dans fig. 3.17; la distribution de la déformation est illustrée après le traitement de 2, 4, 6 et 8 passages d'ECAP. Après deux passages, les pièces travaillées possédaient une homogénéité de contrainte considérable. Cependant, à partir du 4ème passage, nous remarquons une forte concentration de déformation sur les deux faces de la pièce (les faces latérales et supérieures droites), en particulier dans le bord qui les relie, tandis que la magnitude de la déformation diminue en s'éloignant cette région. Cette inhomogénéité est due au fait que ces deux faces étaient les plus proches de l'angle de cisaillement après chaque passage alternativement. Ainsi, ils sont passés par une déformation plus élevée par rapport aux 2 faces restantes de la pièce.

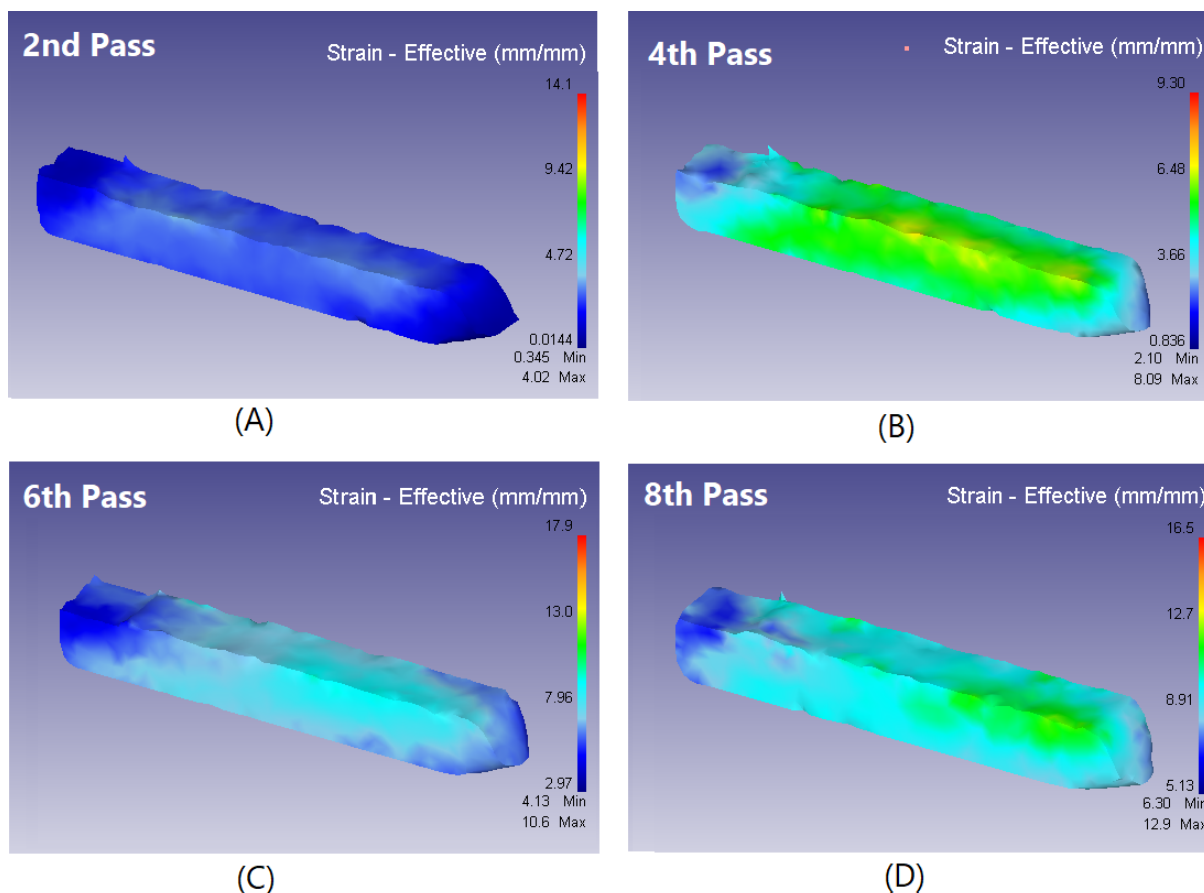


FIGURE 3.17: Répartition des contraintes sur la pièce après 2, 4, 6, et 8 passes dans route  $B_A$ .

### 3.7.3 Route $B_C$

Pour la route  $B_C$ , il est nécessaire de faire tourner la pièce avec un angle de  $90^{\text{circ}}$  dans le sens des aiguilles d'une montre après chaque passage.

La distribution des déformations, comme indiqué dans `cref RouteBc`, était similaire au résultat  $B_A$  car elles sont similaires à ce stade, puis lorsque nous avons passé au 4ème passage, nous avons obtenu une pièce presque parfaitement homogène couleur bleue uniforme sur la billette. Après 6 passages, nous avons pu observer l'apparition de certaines inhomogénéités dans la région médiale des faces supérieure et latérale, comme illustré en vert. La 8ème passe nous a donné une billette globale bien homogène avec des inhomogénéités concentrées dans ses extrémités.

D'après ce que nous avons vu dans `cref RouteBc` en plus de la contrainte moyenne effective et des valeurs SII représentées graphiquement dans fig. 3.21 et fig. 3.22 respectivement, la route  $B_C$  a donné des résultats adéquats en particulier pour 4 passes d'extrusion.

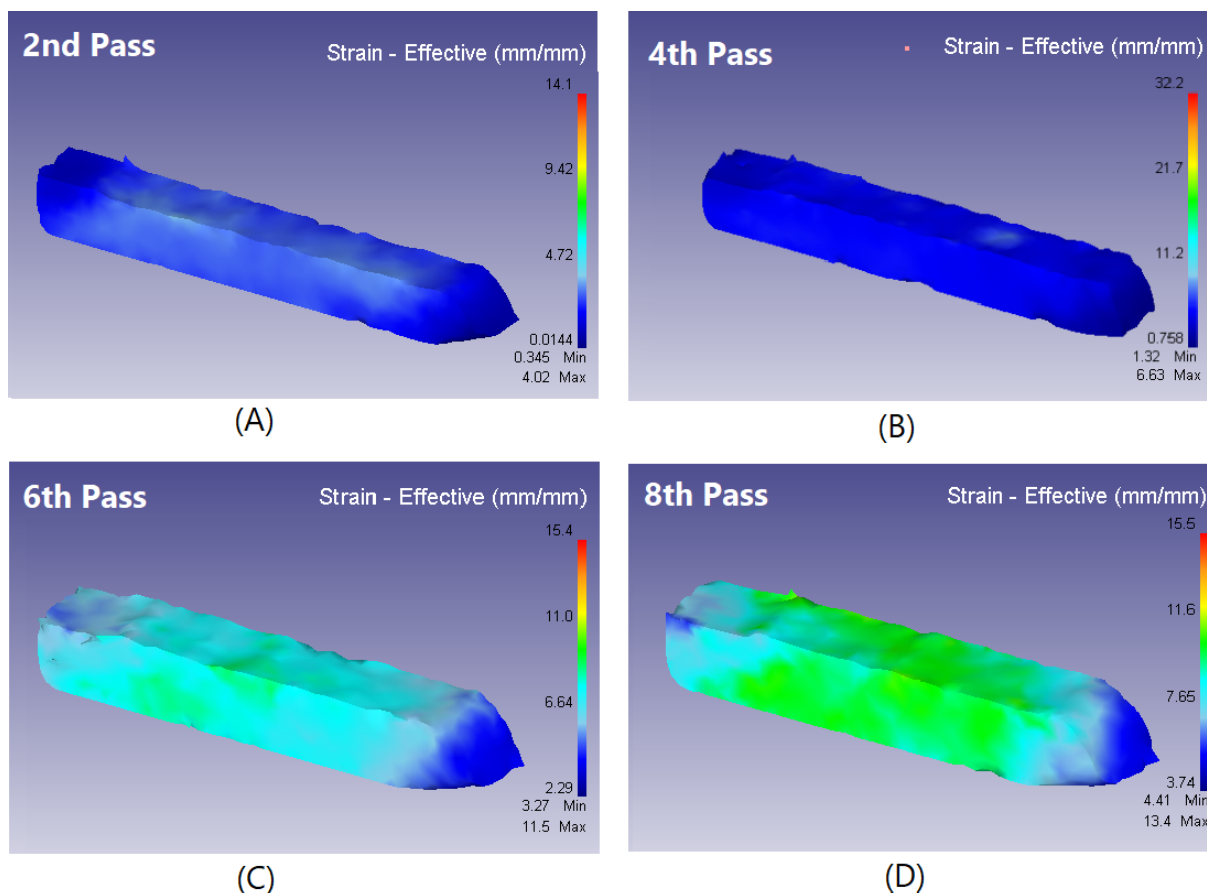


FIGURE 3.18: Répartition des contraintes sur la pièce après 2, 4, 6, et 8 passes dans route  $B_C$ .

### 3.7.4 Route C

La route C consiste à faire tourner la pièce après chaque passe avec un angle de  $180^\circ$  dans le sens des aiguilles d'une montre successivement.

Comme montré dans fig. 3.19 et confirmé dans fig. 3.22, la pièce extrudée par la route C après 2 passages a eu la plus grande homogénéité par rapport aux routes précédentes avec un indice d'inhomogénéité de contrainte atteint presque 0,87. à partir du 4ème passage, on peut voir clairement des inhomogénéités significatives dans les faces latérales de la pièce provoquées par la faible amplitude de déformation de ces faces par rapport aux faces supérieure et inférieure. Comme nous pouvons le constater dans fig. 3.22, la courbe de l'itinéraire C descend avec des passes paires (2, 4, 6 et 8) et des passes impaires (3, 5 et 7) dues à la compensation de l'amplitude de déformation du côté opposé après le passage de la paire.

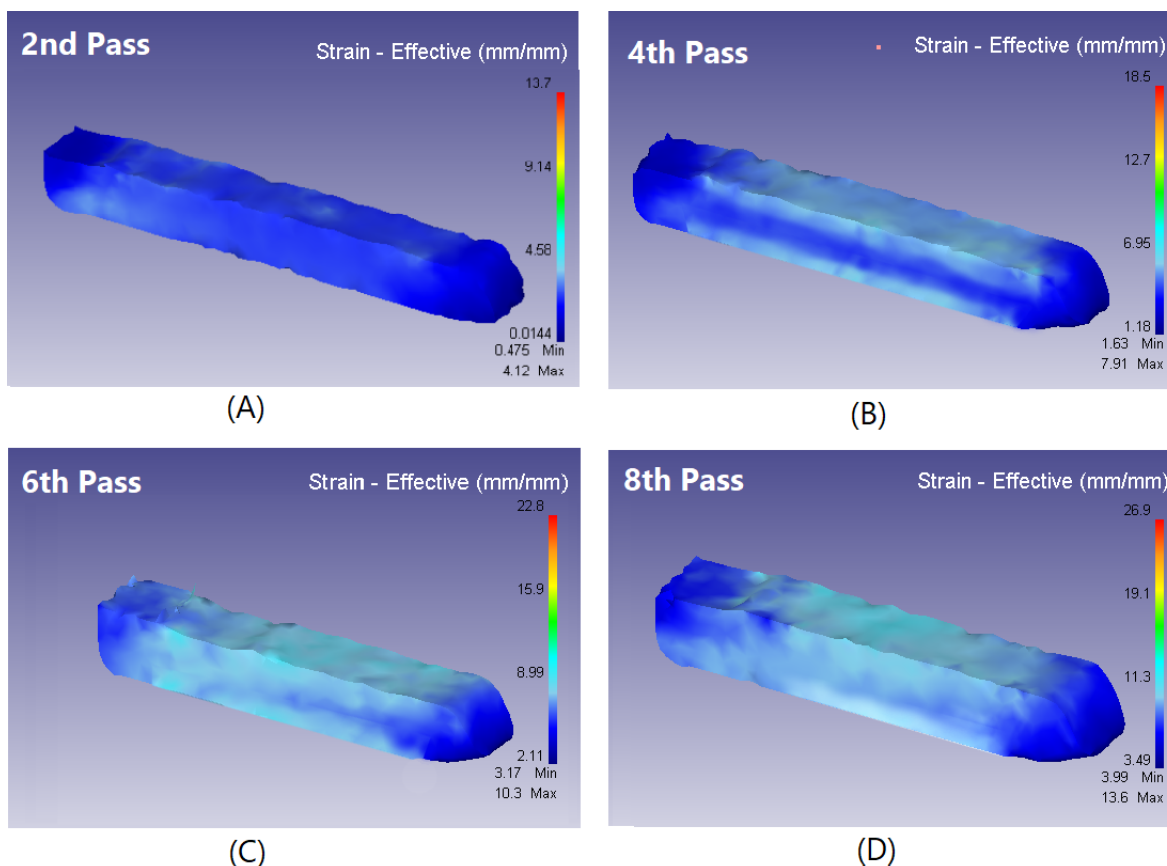


FIGURE 3.19: Répartition des contraintes sur la pièce après 2, 4, 6, et 8 passes dans route C.

### 3.7.5 Route E

La route E qui est une combinaison des deux routes  $B_C$  et C en alternant des rotations de  $90^\circ$  et  $180^\circ$  entre les passages. Cependant, la route E n'est pas aussi connue que les quatre routes fondamentales mentionnées ci-dessus.

Les distributions de déformation sur la pièce après 2, 4, 6 et 8 passes sont représentées dans fig. 3.20. Le résultat de la deuxième passe est similaire à  $B_C$  et  $B_A$  car ils ont traversé les mêmes conditions jusqu'à présent. Après le 4ème passage, nous voyons que l'homogénéité de la déformation est importante, car la valeur de la déformation effective est légèrement supérieure à celle des autres routes. Au 6ème passage, nous voyons une pièce très homogène, en particulier dans le 8ème passage où la partie médiane de la billette est presque parfaitement homogène (comme indiqué avec la même couleur).

Le graphe de fig. 3.20 indique que, à partir du 5ème passage, la route E a l'indice d'inhomogénéité de déformation le plus faible parmi les autres routes.

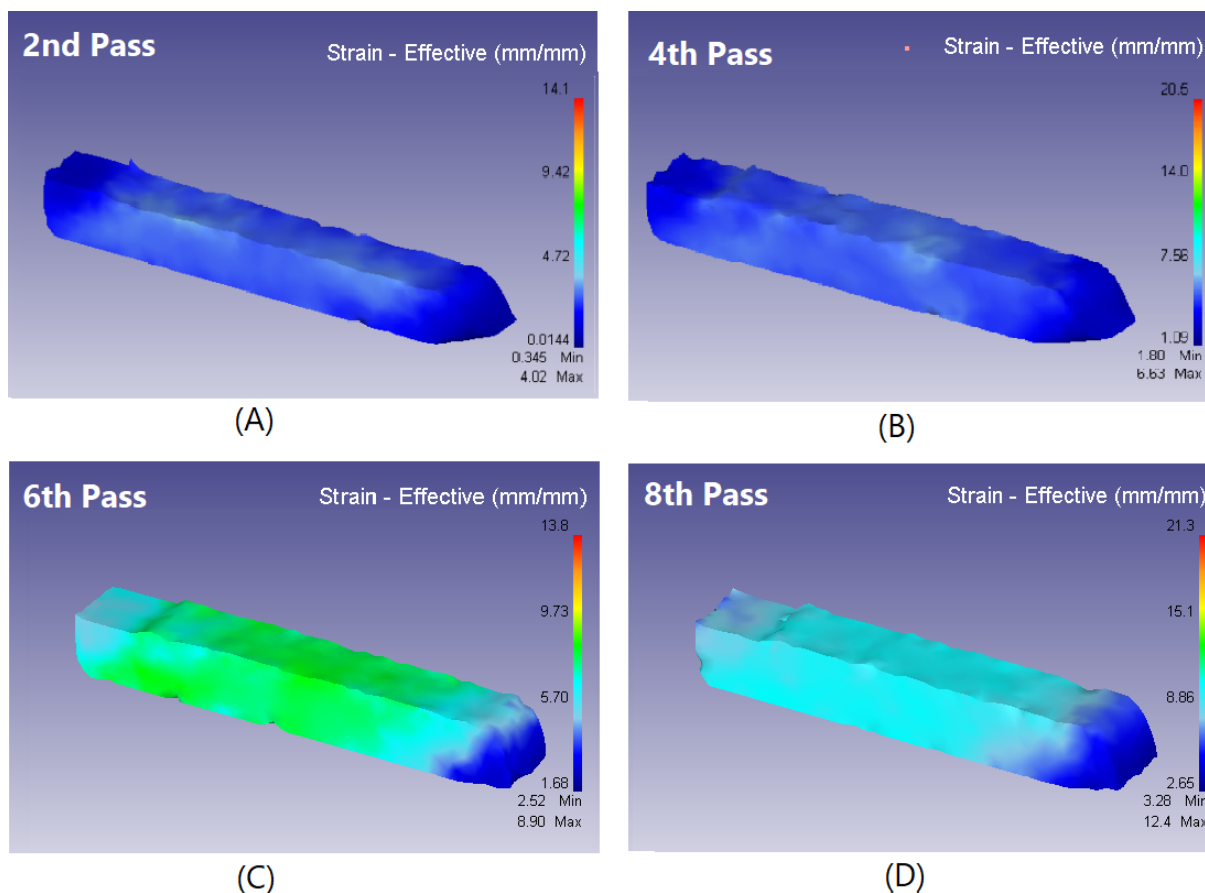


FIGURE 3.20: Répartition des contraintes sur la pièce après 2, 4, 6, et 8 passes dans route E.

### 3.8 Discussion

Dans cette étude, la simulation de multi-passes de ECAP à travers la matrice modifiée, nous avons pu atteindre les propriétés appropriées après 8 passages, alors que les précédents travaux de MAAMERI et KHERBOUCHE [69] pouvaient atteindre les propriétés optimales après seulement 4 passages, ceci explique ce fait que l'addition d'Ag à l'alliage 6063 Al avait influencé la propriété mécanique de l'alliage, ainsi il gagne plus de force.

Selon les résultats illustrés dans le graphique 3.21, les amplitudes moyennes de déformation augmentent en fonction d'une fonction linéaire avec un nombre de passages pour cinq voies de traitement, ce résultat est bien aligné et compatible avec ce qui a été trouvé dans [65]. D'autres travaux, Khalifa et al [66] ont effectué 12 passes dans un dé classique avec un angle de courbure  $\psi$  de  $37^\circ$ ; qui confirment le choix benifique de  $20^\circ$  comme angle de courbure.

En plus de cela, les amplitudes des contraintes sont proches et nous distinguons à peine les voies, ce qui a également été confirmé dans l'article [61] que les voies de traitement n'ont pas d'influence significative sur la déformation.

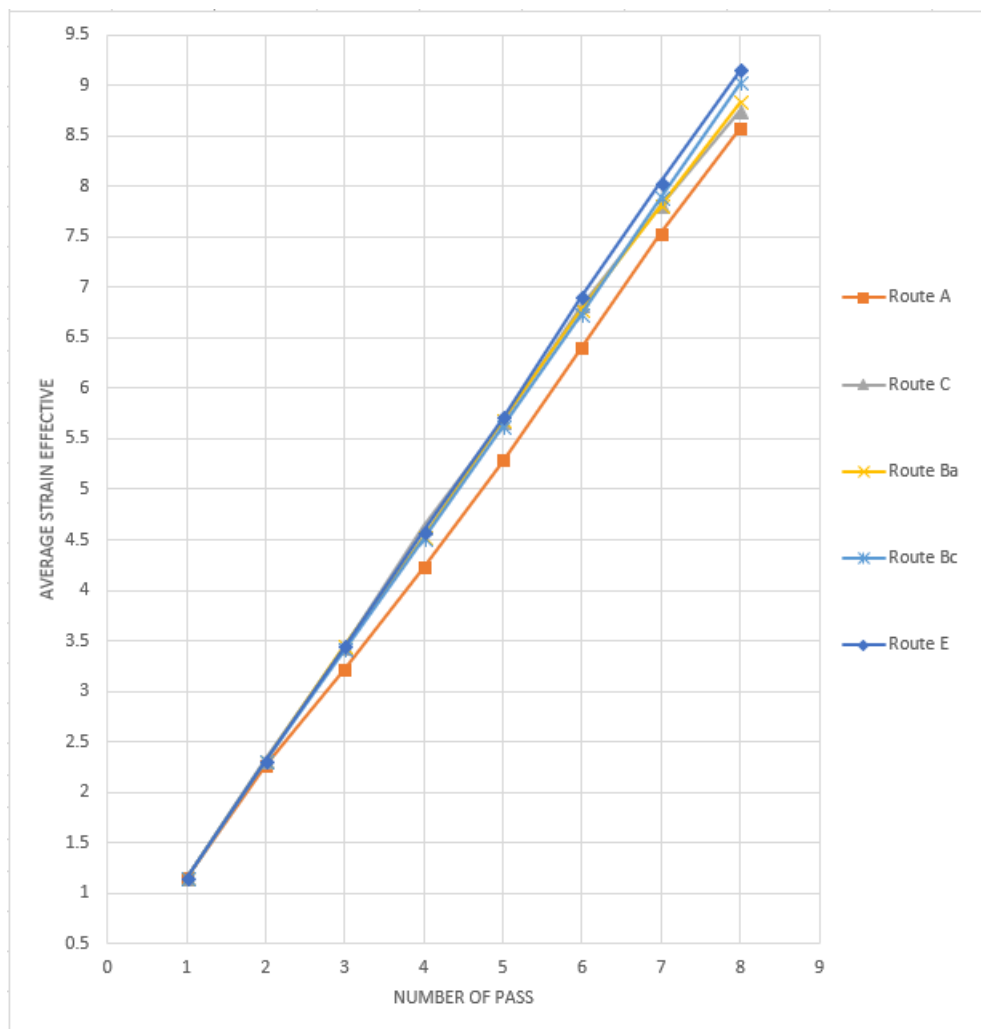


FIGURE 3.21: Les valeurs moyennes de déformation de la pièce à usiner ECAPED pour les routes: A,  $B_A$ ,  $B_C$ , C, et E after 8 passes.

Contrairement au graphique des amplitudes effectives moyennes de déformations discuté ci-dessus, nous pouvons différencier le graphe d'inhomogénéité d'indice de déformation en fonction du nombre de passes (fig. 3.22) entre les différentes routes de traitement.

Tout au long du fig. 3.22, nous pouvons voir que la route A a été distinguée avec un SII élevé, tandis que les 4 autres routes avaient des valeurs SII relativement proches. Ainsi, théoriquement parlant, il n'existe pas de route spécifique qui fonctionne le mieux tout le temps; la route C est adaptée pour 2 passages, la route  $B_C$  est le bon choix pour 4 passes ou plus, tandis que la route E fonctionne le mieux pour 5 passes et donne presque les mêmes résultats pour le reste des passes à 8 passes.

Cependant, quand il s'agit de pratiquer, nous avons généralement tendance à faire 4, 8, jusqu'à 12 passes. Dans ce cas, les routes Bc et E seraient les meilleures, c'est pourquoi la route Bc est la plus utilisée en recherche [36, 55-58], malgré le fait que la voie E soit récemment introduite dans les applications de recherche, elle a donné un résultat satisfaisant. et des résultats prometteurs comme confirmé également dans [53].

Pour conclure, nous pouvons dire que le traitement n'influence pas vraiment la magnitude de la déformation, mais qu'il a un impact relativement important sur la répartition de la déformation sur la pièce.

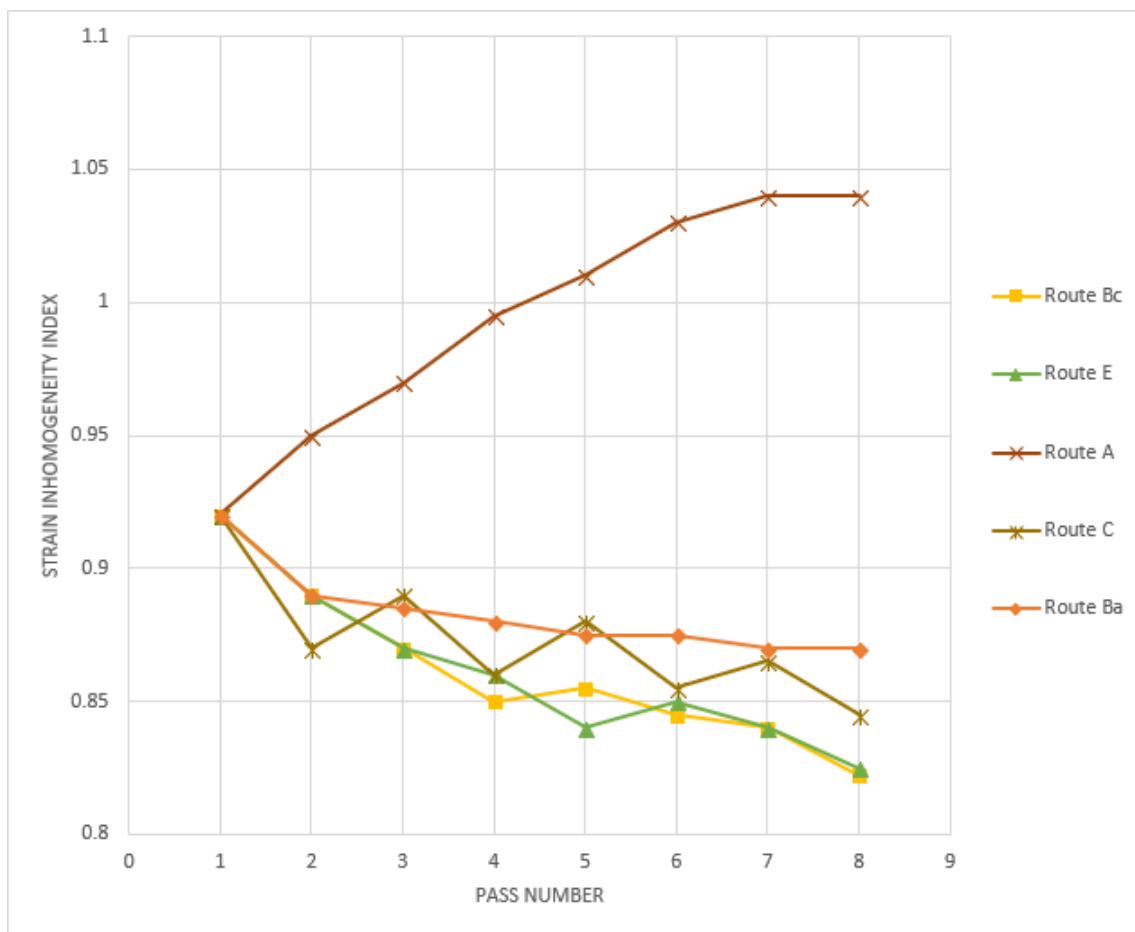


FIGURE 3.22: Les valeurs SII de la pièce ECAPed pour les routes: A,  $B_A$ ,  $B_C$ , C, et E after 8 passes.

# Conclusion générale et perspectives

Au cours des deux dernières décennies, le pressage angulaire à canal égal est passé d'une technique de traitement des métaux relativement mineure à une procédure bien établie et reconnue pour obtenir un affinement des grains très important dans une large gamme d'alliages métalliques. Depuis le milieu des années 1990, le traitement par l'ECAP a attiré l'attention des chercheurs de nombreux laboratoires différents et la procédure a connu un développement actif dans plusieurs domaines. Ces développements comprennent non seulement l'application de l'ECAP à de nombreux métaux et alliages différents, mais aussi l'établissement des principes de base de l'ECAP pour le raffinement microstructural.

À l'heure actuelle, l'ECAP est la plus développée de toutes les techniques de traitement SPD potentielles. En outre, les principes fondamentaux de l'ECAP, traitant de la mécanique du flux des métaux et de l'évolution microstructurale, fournissent des outils utiles pour le développement de nouvelles méthodes SPD et pour l'exploitation future de certaines techniques SPD existantes mais sous-développées.

La présente étude est un suivi de ce qui a été fait l'année dernière [], donc ce projet est basé sur les obstacles et les défis auxquels ils ont été confrontés, puis j'ai simulé l'influence des paramètres importants de ECAP incluant l'angle de canal  $\phi$ , l'angle de courbure  $\psi$ , la vitesse de pressage  $v$ , le coefficient de frottement  $\mu$  dans l'objectif de trouver les paramètres les plus performants, comme nous l'avons suggéré un nouveau design de matrice ECAP basé sur le principe de réduction le taux de frottement sur la zone d'intersection, car il a été découvert dans [segal] que le frottement élevé sur les surfaces de la pièce augmente l'inhomogénéité de la déformation.

Comme nous avons découvert que l'inhomogénéité de la déformation de notre alliage peut être minimisée en choisissant soigneusement la matrice et les paramètres de traitement. Ainsi, je suis sorti avec quelques recommandations pour l'ECAP et les paramètres pour faire le meilleur pour notre alliage 6063 Al pour les prochaines réalisations et perspectives; la longueur de la pièce doit être au moins cinq fois son bord pour une région de contrainte suffisamment stable au milieu pour être développée, l'angle de canal  $\phi$  doit être autour de  $90^{circ}$ , avec un angle de courbure  $\psi \sim 20^\circ$ , une vitesse de pressage pratique de 1 à 5 mm/s est recommandée avec des lubrifiants pour réduire les frottements, et pour les ECAP à passages multiples, nous recommandons de passer par les routes E ou Bc.

Comme la plupart des cas dans la recherche, ce travail serait suivi par une série d'autres études, recherches et travaux pour développer davantage la technique ECAP et atteindre les matériaux UFG désirés, ainsi nous sommes sortis avec une liste de perspectives à réaliser par le prochain promotions.



**Perspectives:**

- Réalisez des tests ECAP à travers la nouvelle conception de matrice avec les paramètres recommandés.
- Conduire ECAP multi-passes à travers les deux routes E et Bc à travers le dé modifié.
- Effectuer d'autres tests à différentes températures pour voir les différentes microstructures d'échantillons ECAPed.
- Caractérisation structurale des échantillons ECAPed.
- Effectuer ECAP à travers une nouvelle matrice avec les parois coulissantes avant et arrière comme suggéré dans [68].

# References

- [1] Hall EO. Proc Roy Soc B 1951;64:747.
- [2] Petch NJ. J Iron Steel Inst 1953;174:25.
- [3] Valiev RZ, Krasilnikov NA, Tsenev NK. Mater Sci Eng 1991;A137:35.
- [4] Segal VM, Reznikov VI, Drobyshevskiy AE, Kopylov VI. Russian Metall 1981;1:99.
- [5] Nahed EM, Farouk AS, Mohamed AEH, Mohamed IAEA, Hyoung SK « 3D FEM simulations for the homogeneity of plastic deformation in Al –Cu alloys during ECAP». Materials Sci. and Eng. A 527 (2010) 1404–1410. 10 October 2009.
- [6] Segal VM, Dobatkin SV, Valiev RZ, editors. Equal-channel angular pressing of metallic materials: Achievements and trends. Thematic issue, Part 1, Russian Metall, vol. 2004, no. 1, pp. 1–102 [translated from Metally 2004, no. 1, p. 3–119].
- [7] Smirnova NA, Levit VI, Pilyugin VI, Kuznetsov RI, Davydova LS, Sazonova VA. Fiz Met Metalloved 1986;61:1170.
- [8] Valiev RZ, Kaibyshev OA, Kuznetsov RI, Musalimov RSh, Tsenev NK. Proc USSR Acad Sci 1988;301:864.
- [9] Zhilyaev AP, Nurislamova GV, Kim BK, Baro MD, Szpunar JA, Langdon TG. Acta Mater 2003;51:753.
- [10] Salishchev GA, Valiahmetov OR, Galeev RM. J Mater Sci 1993;28:2898.
- [11] Valitov VA, Salishchev GA, Muhtarov ShH. Russian Metall 1994;3:127.
- [12] Sitdikov O, Sakai T, Miura H, Kaibyshev R. Mater Trans 2004;45:2232.
- [13] Beygelzimer Y, Varyukhin V, Orlov D, Synkov S, Spuskanyuk A, Pashinska Y. In: Zehetbauer MJ, Valiev RZ, editors. Nanomaterials by severe plastic deformation. Weinheim, Germany: Wiley–VCH Verlag; 2004. p. 511.
- [14] Varyutkhin VN, Synkov S, Orlov D. Mater Sci Forum 2006;503–504:335.
- [15] Richert J, Richert M. Aluminium 1986;62:604.
- [16] Richert M, Liu Q, Hansen N. Mater Sci Eng 1999;A260:275.
- [17] Chu HS, Liu KS, Yeh JW. Metall Mater Trans 2000;31A:2587.

- [18] Chu HS, Liu KS, Yeh JW. *Scripta Mater* 2001;45:541.
- [19] Huang JY, Zhu YT, Jiang H, Lowe TC. *Acta Mater* 2001;49:1497.
- [20] Zhu YT, Jiang H, Huang J, Lowe TC. *Metall Mater Trans* 2001;32A:1559.
- [21] Shin DH, Park JJ, Kim YS, Park KT. *Mater Sci Eng* 2002;A328:98.
- [22] Zhao X, Jing TF, Gao YW, Zhou JF, Wang W. *Mater Lett* 2004;58:2335.
- [23] Saito Y, Tsuji N, Utsunomiya H, Sakai T, Hong RG. *Scripta Mater* 1998;39:1221.
- [24] Saito Y, Utsunomiya H, Tsuji N, Sakai T. *Acta Mater* 1999;47:579. 972 R.Z. Valiev, T.G. Langdon / *Progress in Materials Science* 51 (2006) 881–981
- [25] Rhodes CG, Mahoney MW, Bingel WH, Bampton CC. *Scripta Mater* 1997;36:69.
- [26] Mishra RS, Ma ZY. *Mater Sci Eng* 2005;R50:1.
- [27] Hofmann DC, Vecchio KS. *Mater Sci Eng* 2005;A402:234.
- [28] Segal VM. USSR Patent No. 575892, 1977.
- [29] Valiev RZ, Tsenev NK. In: Langdon TG, Merchant HD, Morris JG, Zaidi MA, editors. *Hot deformation of aluminum alloys*. Warrendale (PA): The Minerals, Metals and Materials Society; 1991. p. 319.
- [30] Valiev RZ, Korznikov AV, Mulyukov RR. *Mater Sci Eng* 1993;A168:141.
- [32] Valiev RZ, editor. *Ultrafine-grained materials prepared by severe plastic deformation: Special issue*. *Annales de Chimie, Sci Mater* 1996;21:369.
- [33] Segal VM. *Mater Sci Eng* 1999;A271:322.
- [34] Furukawa M, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. *J Mater Sci* 2001;36:2835.
- [35] Segal VM. *Mater Sci Eng* 2002;A338:331.
- [36] Segal VM. *Mater Sci Eng* 2003;A345:36.
- [37] Segal VM. *Mater Sci Eng* 2004;A386:269.
- [38] Berbon PB, Furukawa M, Nemoto M, Langdon TG. *Metall Mater Trans* 1999;30A:1989.
- [39] Nakashima K, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. *Mater Sci Eng* 2000;A281:82.
- [40] Furukawa M, Iwahashi Y, Langdon TG. *Mater Sci Eng* 1998;A257:328.
- [41] Iwahashi Y, Wang J, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. *Scripta Mater* 1996;35:143.
- [42] Utyashev FZ, Enikeev FU, Latysh VV. *Ann Chim* 1996;21:379.
- [43] Furuno K, Akamatsu H, Oh-ishi K, Langdon TG. *Acta Mater* 2004;52:2497.
- [44] Nemoto M, Horita Z, Furukawa M, Langdon TG. *Metals Mater* 1998;4:1181.

- [45] Lee S, Langdon TG. *Mater Res Soc Symp Proc* 2000;601:359
- [46] Furukawa M, Horita Z, Langdon TG. *Mater Sci Eng* 2002;A332:97.
- [47] Lee JC, Seok HK, Han JH, Chung YH. *Mater Res Bull* 2001;36:997.
- [48] Han JH, Seok HK, Chung YH, Shin MC, Lee JC. *Mater Sci Eng* 2002;A323:342.
- [49] Lee JC, Seok HK, Suh JY, Han JH, Chung YH. *Metall Mater Trans* 2002;33A:665.
- [50] Nam CY, Han JH, Chung YH, Shin MC. *Mater Sci Eng* 2003;A347:253.
- [51] Lee JC, Suh JY, Ahn JP. *Metall Mater Trans* 2003;34A:625.
- [52] Suh JY, Han JH, Oh KH, Lee JC. *Scripta Mater* 2003;49:185.
- [53] Park JW, Kim JW, Chung YH. *Scripta Mater* 2004;51:181.
- [54] Chakkingal U, Suriadi AB, Thomsen PF. *Scripta Mater* 1998;39:677.
- [55] Chakkingal U, Suriadi AB, Thomsen PF. *Mater Sci Eng* 1999;A266:241.
- [56] Alkorta J, Rombouts M, J. *Scripta Mater* 2002;47:13.
- [57] Utsunomiya H, Saito Y, Hayashi T, Sakai T. *J Mater Eng Perform* 1997;6:319.
- [58] Saito Y, Utsunomiya H, Suzuki H, Sakai T. *Scripta Mater* 2000;42:1139.
- [59] Utsunomiya H, Hatsuda K, Sakai T, Saito Y. *Mater Sci Eng* 2004;A372:199.
- [60] Green D. *J Inst Metals* 1972;100:295.
- [61] Etherington C. *J Eng Indust* 1974;96:893.
- [62] Raab GJ, Valiev RZ, Lowe TC, Zhu YT. *Mater Sci Eng* 2004;A382:30
- [63] Segal, V.M., Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE). *Materials Science and Engineering A*, 2004. 386(1-2): p. 269-276.
- [64] Leo, P., et al., Properties and deformation behaviour of severe plastic deformed aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007. 182(1-3): p. 207-214.
- [65] Frint, P., et al., Microstructural Features and Mechanical Properties after Industrial Scale ECAP of an Al 6060 Alloy. *Materials Science Forum*, 2011. 667-669: p. 1153-1158.
- [66] Khalfa, P., et al., The role of Backpressure during large scale Equal-Channel Angular Pressing. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2012. 43: p. 668-672.
- [67] Kim, H.S., M.H. Seo, and S.I. Hong, On the die corner gap formation in equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A*, 2000. 291(1-2): p. 86-90.
- [68] Stephanie Frint, Matthias Hockauf, Philipp Frint, Martin F.-X. Wagner, Scaling up Segals principle of Equal-Channel Angular Pressing, 2016. 97: p. 502-511.
- [69] S.KHERBOUCHE, E.MAAMERI, Caractérisation microstructurale d'un alliage d'aluminium 6063 déformé sévèrement par la technique ECAP, 2017.