

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel  
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل  
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département D'Électrotechnique

# Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

**Master en Electromécanique**

Option : Electromécanique

## Thème

**Simulation du formage électro-hydraulique de plaques avec  
COMSOL MULTIPHYSICS**

Par:

**Samir Achouche**

et

**Bachir Benalia**

Travail proposé et dirigé par :

**Dr / Ilhem Hafsaoui**

**Promotion 2021**

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel

PB 98, Ouled Aissa. 18000. Algérie. Tél : +213 34 50 11 89

<http://www.univ-jijel.dz>

## **Remerciements**

*Nous remercions Allah de nous avoir donné la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail.*

*Nous tenons à formuler notre gratitude à notre promoteur Madame «**Dr. Ilhem HAFSAOUI**» qui nous a honorés en dirigeant ce travail.*

*Nous la remercions vivement pour sa disponibilité et ses conseils judicieux.*

*Nous remercions nos familles pour leur soutien moral durant notre projet de fin d'étude.*

*Nous remercions également le président de jury et les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude au chef de département ainsi à tous les enseignants du département Electrotechnique*

## *Dédicaces*

*Mes parents qui me sont les plus chers au monde, dont l'amour et Les  
sacrifices n'ont pas cessé de combler ma vie ; Que Dieu les protège et  
les garde pour moi.*

*Mes frères et sœurs*

*Toute ma famille.*

*Touts les amis durant mes années d'études*

*Tous ceux que me sont chers*

*Nous dédions ce travail...*

*SAMIR*

*BACHIR*

Sommaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية .....	1
<b>République Algérienne Démocratique et Populaire.....</b>	<b>1</b>
Introduction générale	1
I. Aspects théoriques et industriels du formage Electrohydraulique	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Méthodes de formage à grandes vitesses.....	3
I.2.1 Contexte historique.....	3
I.2.2 Freins à l'industrialisation .....	4
I.2.3 Différents procédés de formage à grandes vitesses .....	5
I.3 Historique du FEH.....	8
I.4 Principe du FEH.....	8
I.5 Technologie du FEH .....	9
I.5.1 Commutation de puissance.....	9
I.5.2 Machines Electro- hydrauliques.....	10
I.5.3 Caractéristiques du processus.....	13
I.5.4 Démonstration de la cellule d'automatisation EHF.....	13
I.5.5 Amélioration de l'efficacité du FEH .....	14
I.6 Avantages et inconvénients du FEH .....	15
I.7 Applications du FEH.....	16
I.7.1 Industrie d'automobiles .....	17
I.7.2 Applications divers .....	17
I.8 Conclusion .....	19
II. Modélisation du formage électro-hydraulique	20
II.1 Introduction.....	20
II.2 Définitions .....	20
II.3 Influence des divers paramètres sur la déformation .....	21
II.4 Equation mécanique.....	22

## Sommaire

---

II.4.1	Équation d'équilibre .....	22
II.4.2	Relation déformation-déplacement.....	22
II.4.3	Relation contrainte-déformation .....	23
II.5	Equations de NAVIER-STOKES .....	24
II.5.1	Equation de conservation de la quantité de mouvement.....	24
II.5.2	Equation de conservation de masse ou équation de continuité .....	24
II.5.3	Modèles mathématiques pour les constantes physiques.....	24
II.6	Type de couplage et termes de couplage.....	25
II.7	Modèles numériques.....	25
II.7.1	Méthode des éléments finis .....	25
II.7.2	Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.....	26
II.7.3	Etapes d'élaboration du modèle numérique avec COMSOL.....	28
II.8	Conclusion .....	33
III.	Applications numériques : résultats et interprétations	34
III.1	Introduction.....	34
III.2	Simulation du FEH .....	34
III.3	Matériaux des plaques formées par FEH .....	34
III.4	Formage électro hydraulique libre de plaques en Aluminium.....	35
III.5	Comparaison de la formabilité de certains matériaux sous FEH libre .....	40
III.6	Formage électro hydraulique de plaques avec matrices .....	50
III.7	Evolution temporelle du FEH de plaques .....	52
	conclusion.....	53
	Conclusion générale	54

## Liste des figures

Figure I.1: système de FEM : placage de pièces plates .....	5
Figure I.2: système de formage explosif de pièces plates.....	6
Figure I.3: système de formage électrohydraulique [15].....	7
Figure I.4: schéma de principe du FEH.....	9
Figure I.5: Architecture schématique d'un générateur de hautes puissances pulsées .....	10
Figure I.6: Schéma en coupe d'une chambre EHF avec électrodes.....	10
Figure I.7: Chambre à eau pour l'EHF avec matrice conique .....	11
Figure I.8: Vue de deux électrodes dans la chambre de décharge .....	12
Figure I.9: Tests de durabilité sur électrodes .....	12
Figure I.10: Plaque d'immatriculation et cellule automatisée pour sa production .....	14
Figure I.11: Différentes pièces formées par FEH.....	16
Figure I.12: Extérieur et intérieur de la porte d'une voiture.....	17
Figure I.13 : Le tableau de bord entièrement formé par FEH .....	17
Figure I.14: Divers pièces produites par formage EH.....	19
Figure II.1 : relation contrainte-déformation selon la loi de HOOKE .....	21
Figure II.2 : Icône COMSOL MULTIPHYSICS .....	26
Figure II.3 : Etapes de modélisation par COMSOL MULTIPHYSICS.....	27
Figure II.4 : Création du modèle Comsol.....	27
Figure II.5 : Choix de la dimension .....	29
Figure II.6: Choix de Module physique et le type d'étude .....	29
Figure II.7: Construction de la géométrie.....	30
Figure II.8: Introduction des constantes .....	31
Figure II.9: Définition des paramètres des équations .....	31
Figure II.10: Introduction des conditions aux limites.....	31
Figure II.11: Maillage de la géométrie.....	32
Figure II.12: Visualisation des résultats .....	33
Figure III.1 : Système expérimental [36] .....	355
Figure III.2 : Maillage adopté de la première application .....	366
Figure III.3 : Déformation de la plaque en Aluminium- $P=10^4$ Pa .....	36
Figure III.4 : Déformation de la plaque en Aluminium- $P=2.10^4$ Pa .....	37
Figure III.5: Déformation de la plaque en Aluminium- $P=4.10^4$ Pa.....	37
Figure III.6 : Déformation de la plaque en Aluminium- $P=6.10^4$ Pa .....	38
Figure III.7 : Déformation de la plaque en Aluminium- $P=8.10^4$ Pa .....	38

## Liste des Figures

---

Figure III.8 : Déformation de la plaque en Aluminium- $P=10^5$ Pa .....	39
Figure III.9 : Déformation de la plaque en Aluminium avec différentes pressions.....	39
Figure III.10 : Déplacement maximal de la plaque Al en fonction de la pression appliquée .....	40
Figure III.11 : Déformation de la plaque en Cuivre - $P=10^4$ Pa .....	41
Figure III.12 : Déformation de la plaque en Cuivre - $P=2.10^4$ Pa .....	41
Figure III.13 : Déformation de la plaque en Cuivre - $P=4.10^4$ Pa .....	42
Figure III.14 : Déformation de la plaque en Cuivre - $P=6.10^4$ Pa .....	43
Figure III.15 : Déformation de la plaque en Cuivre - $P=8.10^4$ Pa .....	43
Figure III.16 : Déformation de la plaque en Cuivre - $P=10^5$ Pa .....	44
Figure III.17 : Déformation de la plaque en Cuivre avec différentes pressions .....	44
Figure III.18 : Déplacement maximal de la plaque Cu en fonction de la pression appliquée .....	45
Figure III.19 : Déformation de la plaque en Acier - $P=10^4$ Pa .....	45
Figure III.20 : Déformation de la plaque en Acier- $P=2.10^4$ Pa .....	46
Figure III.21 : Déformation de la plaque en Acier - $P=4.10^4$ Pa .....	46
Figure III.22 : Déformation de la plaque en Acier - $P=6.10^4$ Pa .....	46
Figure III.23 : Déformation de la plaque en Acier - $P=8.10^4$ Pa .....	47
Figure III.24 : Déformation de la plaque en Acier - $P=10^5$ Pa .....	48
Figure III.25 : Déformation de la plaque en Acier avec différentes pressions .....	48
Figure III.26 : Déplacement maximal de la plaque en Acier en fonction de la pression appliquée .	49
Figure III.27 : Déformation des différentes plaques -- $P=10^5$ Pa .....	49
Figure III.28 : Déformation de la plaque en Cu - matrice conique - $P=7.10^4$ Pa.....	50
Figure III.29 : Déformation de la plaque en Al - matrice conique - $P=6.10^4$ Pa.....	50
Figure III.30 : Déformation de la plaque en Cu - matrice tronquée - $P=7.10^4$ Pa.....	51
Figure III.31 : Déformation de la plaque en Al - matrice tronquée - $P=6.10^4$ Pa.....	51
Figure III.32 : Distances entre plaques et matrices au niveau de l'extrémité [36] .....	52
Figure III.33: Variation temporelle de la pression considérée numériquement.....	53
Figure III.34: Evolution temporelle de la déformation de la plaque sous pression variable .....	53

## **Liste des tableaux**

Tableau III.1 : Paramètres physiques des matériaux étudiés .....	34
--	----

# Introduction générale

Le formage est de donner une forme ou un modèle, de prendre une forme définitive. Avec les premiers pas de l'homme sur terre, il a toujours formé des éléments et matériaux, d'une manière ou d'une autre pour son profit pour former un matériau, quelques équipements sont habituellement nécessaires [1]. Les techniques de formage à grande vitesse peuvent être pratiquement utilisées dans le formage des métaux et cela ajoute de la flexibilité au processus. Les opérations de formage à grande vitesse sont considérées comme des opérations où les vitesses de pièce à former dépassent typiquement 100 m/s. Les techniques à grande vitesse fournissent des méthodes robustes pour accomplir le formage des métaux qui est assez difficile de manière classique. Cependant, vue l'efficacité de ces méthodes, la simplicité et la rapidité des systèmes de fabrication, un intérêt particulier des industriels s'est tourné vers ces méthodes à grande vitesse. Celles-ci sont basées principalement sur la source d'énergie utilisée pour obtenir de grandes vitesses. Les plus courantes sont : le formage explosif, le formage électromagnétique et le formage électro-hydraulique [1].

Le formage électro-hydraulique (FEH) est un processus de formage à vitesse de déformation élevée qui implique la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique dans un milieu liquide. Si au début, les problèmes traités étaient réduits à une forme simple pour permettre d'obtenir une solution analytique, l'évolution des moyens informatiques et les méthodes numériques ont permis de se rapprocher des phénomènes réels et d'élargir la variété des problèmes susceptibles d'être résolus [2] [3].

Le but de notre travail est donc de mettre en place un modèle numérique, intégrant un couplage fort électro-hydraulique et mécanique, afin de simuler des systèmes de formage électro-hydraulique, d'étudier et d'analyser le comportement mécanique des pièces déformées par ce processus.

Notre travail se démarque par le choix de systèmes de FEH purement industriels, focalisation sur des études paramétriques pour analyser l'effet de certains facteurs des installations de FEH.

D'autre part, la comparaison des résultats expérimentaux et ceux obtenus par notre modélisation, permet de conclure que ces derniers sont en bonne concordance. Dans le but de présenter ce travail on a divisé ce mémoire en trois chapitres.

## **Introduction Générale**

---

En premier lieu, les aspects théoriques et industriels du formage électro-hydraulique sont présentés.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des modèles mathématiques qui régissent les phénomènes mis en jeu lors du processus : les phénomènes hydrauliques et mécaniques.

Dans le troisième chapitre, nous analysons les résultats des applications simulées.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives envisagées

**Chapitre I**

**Aspects théoriques et industriels du  
formage Electrohydraulique**

## **I. Aspects théoriques et industriels du formage Electrohydraulique**

### Introduction

Le formage électrohydraulique est un processus de formage à vitesse de déformation élevée qui implique la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique dans un milieu liquide. Le processus de formage est très rapide et ne dure pas plus de 200 $\mu$ s et a une vitesse formage approximative de 300 m /s. La décharge d'une étincelle électrique dans un liquide produit des ondes de choc et pressions qui peuvent être utilisées pour le formage du métal. Une batterie de condensateurs délivre une impulsion de courant élevé sur deux électrodes, qui sont placées à une courte distance l'une de l'autre lorsqu'elles sont immergées dans un fluide (eau ou huile). L'arc électrique ou la décharge vaporise rapidement le fluide environnant créant une onde de choc. La pièce à usiner, qui est maintenue en contact avec le fluide, se déforme. Le formage électro-hydraulique est une variante du plus ancien, plus générale méthode de formage explosif. La différence fondamentale entre ces deux techniques est la source d'énergie.

L'aspect majeur du FEH est l'effet électro hydraulique observé au cours du processus [4][5]. Les principaux avantages de ce processus de formage est le taux de déformation élevé, d'où l'augmentation de la formabilité du métal, le froissement réduit, l'impact à haute pression pour imposer les détails de surface, retour élastique réduit et coût de fabrication réduit.

### Méthodes de formage à grandes vitesses

#### **I.1.1 Contexte historique**

Les principes physiques des hautes puissances pulsées sont bien connus depuis le XIXème siècle. Cependant, et malgré le fait que les applications de mise en forme aient été imaginées relativement tôt, les procédés de mise en forme par HPP sont encore marginaux dans l'industrie. L'utilisation des champs magnétiques pour déformer des objets métalliques de façon permanente n'a pu être envisagée que lorsque l'on a été capable de créer des champs magnétiques suffisamment intenses. Une des premières mentions de tels champs magnétiques est donnée par [6]. Il a fallu attendre les années 1950 pour que de premières applications industrielles soient introduites. Le procédé de magnétoformage a été développé essentiellement aux Etats-Unis, et utilisé par des sociétés telles que General

## **Chapitre I : Aspects théoriques et industriels du formage Electrohydraulique**

---

Dynamics [7] , NASA, Boeing, Diversico Industries [8], ou encore chez General Motors [9].

De même, les premiers exemples d'application du formage électrohydraulique datent des années 1960-1970.

L'ex-URSS s'est fortement intéressée au formage électrohydraulique. Les travaux de Yutkin [10] sont une référence dans le domaine.

Aux Etats-Unis, on note son utilisation par quelques sociétés, principalement dans l'industrie aéronautique, de l'énergie ou de l'armement, par exemple : General Electric, Chrysler-Missile Division, Diversico Industries [8].

En Europe, quelques applications industrielles ont été notées, comme par exemple Vickers Limite au Royaume-Uni [8]

Jusqu'alors le FEH est resté essentiellement, expérimental. Il a cependant, vu son développement relancé par l'utilisation, de plus en plus soutenue, de l'Aluminium, notamment dans l'industrie automobile. Dans ce cadre, la simulation numérique devrait lui faire bénéficier d'un regain d'intérêt imposant et pourrait participer à faciliter son expansion.

### **I.1.2 Freins à l'industrialisation**

Malgré l'enthousiasme des années 1960-1970, le développement des procédés HPP est resté limité. Le nombre de publications relatives aux procédés HPP au fur et à mesure des années, est très évocateur. Certaines contraintes technologiques ont fortement limité l'expansion industrielle du FEH. La gestion de l'eau (fermeture de la chambre de décharge, remplissage, vidange, ouverture), ou la durée de vie limitée des électrodes ont rendu difficile l'automatisation du procédé [11] [12]. Pour les deux procédés de formage à grande vitesse, à savoir le formage électromagnétique (FEM) et le FEH, l'approche empirique engendrait des délais de mise au point incompatibles avec les exigences de réactivité de l'industrie. L'absence de simulation numérique rendait très difficile la compréhension des phénomènes multi physiques, et donc la prédictibilité de ces procédés. Toutefois, ces dernières décennies, l'industrie a porté un intérêt nouveau au magnétoformage et au formage électro-hydraulique. Les avancées technologiques ont rendu disponibles des générateurs plus puissants, moins encombrants, et des commutateurs de hautes tensions de longue durée de vie et de haute fiabilité. En outre, le développement de codes de calcul scientifiques et les performances croissantes des calculateurs ont offert un puissant outil d'aide à la conception qui a favorisé l'intérêt pour le magnétoformage et le formage

électrohydraulique. Grâce à une meilleure compréhension des phénomènes, la prédictibilité des procédés a été considérablement améliorée et est devenue compatible avec un contexte industriel.

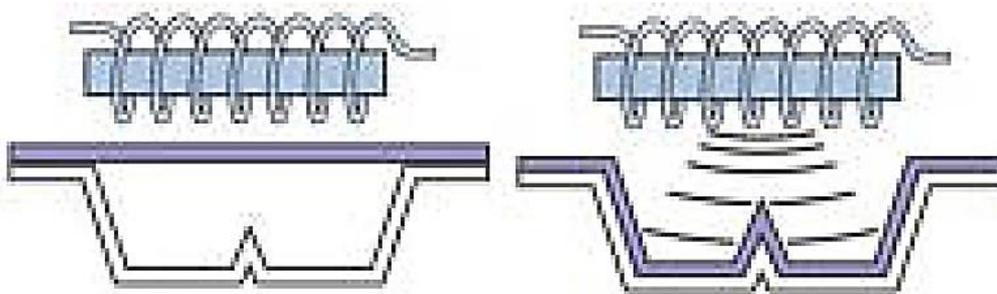
### I.1.3 Différents procédés de formage à grandes vitesses

Le formage à haute énergie est extrêmement rapide (de l'ordre de quelques microsecondes). A la fin de l'opération, le produit plastiquement déformé est soit librement déformé ou plaqué très énergiquement contre la matrice. Parmi les méthodes de formage à grandes vitesses, nous distinguons le FEM, le formage explosif et le FEH.

#### *Formage électromagnétique (FEM)*

Dans le cas du FEM ou le magnétoformage, le circuit de décharge est un système comprenant : Un inducteur (ou bobine) et la pièce à former. En outre, un concentrateur de champ (conformateur de champ) peut être ajouté entre l'inducteur et la pièce. On peut ajouter à ces dispositifs des matrices définissant la forme finale. Le procédé de magnétoformage est applicable à tout métal suffisamment conducteur de l'électricité. Un état de l'art très général sur le procédé de magnétoformage a été publié par [13]. La décharge du courant impulsionnel dans l'inducteur crée un champ magnétique, dont les variations provoquent l'apparition de courants induits dans la pièce. Des forces ultra-puissantes répulsives de Lorentz sont alors générées, qui dépassent facilement la limite d'élasticité du matériau de la pièce et provoquant ainsi une déformation permanente de celle-ci.

Suivant la configuration géométrique de l'installation, la mise en forme de pièces peut être soit par compression, expansion, emboutissage ou par placage contre une matrice de forme désirée. Le formage magnétique par placage est illustré sur la Figure I.1.



**Figure I.1: système de FEM : placage de pièces plates**

### Formage par explosion

La charge explosive, placée dans l'eau au-dessus du plan, est mise à feu. Une onde de choc se propage alors dans l'eau et provoque le formage dans un temps très court.

Un procédé général de formage explosif est illustré sur la figure (I.2). Une plaque métallique est maintenue en place par un support de flan, et sont en contact avec une matrice métallique. Après la détonation, une onde de choc, générée dans l'eau, est propagée vers la plaque métallique, puis frappée dessus. Cette plaque est donc déformée par ces chargements et entre en collision avec la matrice. A la fin, la surface déformée de la plaque métallique finit par épouser la forme de la matrice.

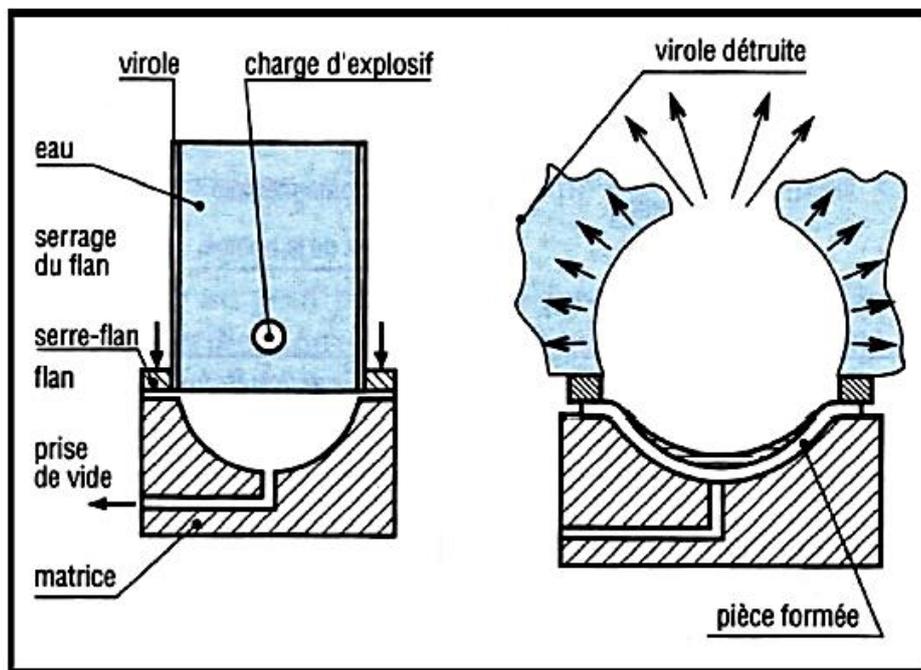


Figure I.2: système de formage explosif de pièces plates

Pendant la formation de l'explosif, l'onde de choc est déclenchée par un explosif détonant. Ici, on peut faire la différence entre l'opération de contact et l'opération d'écartement. Dans l'opération de contact, la surface de la pièce est recouverte d'explosif et l'onde de détonation accélère directement la pièce. En revanche, dans l'opération à distance, la pièce et la matrice sont positionnées dans un milieu de travail et l'explosif est allumé à une certaine distance de la pièce, ce qui déclenche une onde de choc qui traverse le milieu de travail avant d'accélérer la pièce. Dans l'opération à distance, les pressions de pointe sont généralement plus faibles que dans le cas de l'opération de contact. La raison en

## Chapitre I : Aspects théoriques et industriels du formage Electrohydraulique

est que le frottement, la conduction thermique et la dilatation entraînent une dissipation fractionnaire de l'énergie de détonation.[14]

### Formage électro-hydraulique (FEH)

Pour le formage électro-hydraulique, la décharge électrique est réalisée entre deux électrodes plongées dans l'eau, dans une enceinte, appelée chambre de décharge. Cette décharge électrique est suffisamment intense, pour qu'un claquage (ou rupture diélectrique) est obtenu. Celui-ci crée un canal conducteur entre les deux électrodes, permettant ainsi la fermeture du circuit électrique. L'amorçage de l'arc est capable de générer une onde de pression très intense dans l'eau, pouvant évoluer en un front de choc. La propagation de cette onde de pression dans la chambre de décharge, ses réflexions contre les parois et ses combinaisons successives sont utilisées pour déformer la pièce dans une matrice. En un sens, le formage électro-hydraulique est relativement proche du formage par explosif, connu auparavant. Par rapport au magnétoformage, le formage électro-hydraulique s'applique davantage au formage de pièces de grandes dimensions ou, à l'inverse à de petites dimensions (relativement au magnétoformage), et à des matériaux non nécessairement bons conducteurs de l'électricité.[14]

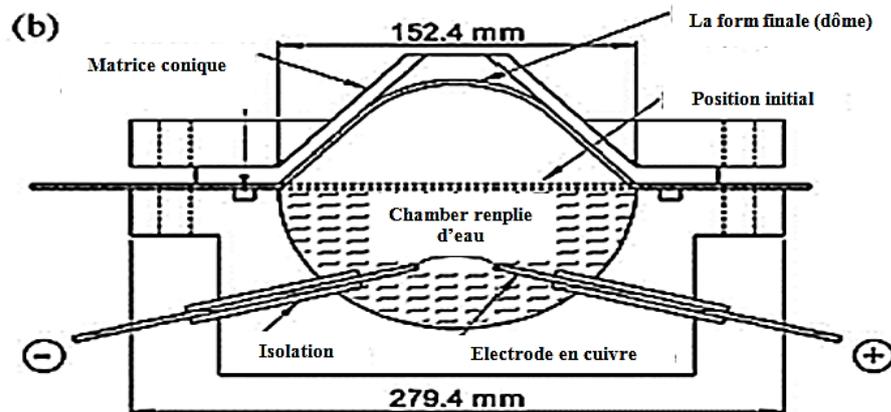


Figure I.3: système de formage électrohydraulique [15]

### Historique du FEH

Le développement initial de la technologie EHF a commencé en Russie dans le début des années 1950 par Yutkin [16], Bruno [17], et Davies-Austin [18], qui ont passé en revue les premières applications et résultats sur l'EHF.

## Chapitre I : Aspects théoriques et industriels du formage Electrohydraulique

---

Au début, la plupart des efforts ont été consacrés au formage de pièces la formation de faible volume à petit prix. Bruno [17] a décrit un certain nombre d'exemples industriels où les machines d'EHF, stockant entre 36kJ et 172kJ étaient employées. Cependant, en raison de la nécessité de remplir la chambre de liquide au début de chaque cycle de formage et de l'évacuer à la fin, les temps de cycle pour EHF ont été traditionnellement dans la gamme de plusieurs minutes.

Sanford [18] a décrit une technologie hybride où l'hydroformage statique a été utilisé pour embosser, initialement la tôle dans la cavité de la chambre, puis cette étape a été suivie par l'EHF qui, grâce à des niveaux de pression plus élevés, remplit les détails de la cavité de la matrice mais avec un temps de cycle de 10 minutes. Plus récemment, Balanethiram et Daehn [20] ont signalé une amélioration de formage par rapport aux techniques conventionnelles, dans le cas de mise en forme par EHF avec matrice conique : la déformation maximale a été multipliée par un facteur de 2,5 pour le cuivre et par 5 pour AA6061-T4.

Des tentatives très limitées ont été faites pour simuler le FEH. Golovashchenko et Mamutov [21], ont présenté les résultats d'emboutissage de plaques dans une matrice ronde ouverte. Vohnut [22] et al ont rapporté des résultats de décharge impulsionnelle, dans un volume fermé, en supposant une énergie équivalente au formage explosif. L'objectif du projet est de développer la technologie de FEH, permettant de gagner en poids et en cout, dans la production industrielle de voitures. Ces travaux antérieurs ont essayé d'établir les avantages de l'EHF, en démontrant sa capacité à former des pièces à retour élastique réduit et avec le maximum de détails des matrices. Enfin, il est nécessaire d'établir les outils prédictifs nécessaires pour concevoir correctement les pièces et l'outillage du FEH.

### Principe du FEH

L'effet électro-hydraulique est créé via une onde de choc générée par la décharge de condensateurs haute tension, à travers une paire d'électrodes dans une chambre remplie d'un fluide. L'onde de choc dans le liquide, se propage vers la pièce et provoque sa déformation en une cavité de matrice unilatérale (Figure I.4).

En effet, l'onde de choc fait passer simultanément la pièce métallique à former d'un état solide à un état viscoplastique et la projette sur la matrice, ce qui permet le formage à froid et à très grande vitesse de pièces complexes. Toutes ces opérations ne prennent que

## Chapitre I : Aspects théoriques et industriels du formage Electrohydraulique

quelques millisecondes. La durée totale du cycle dépend exclusivement du temps de chargement et de déchargement du système.

Le fluide environnant est constitué par de l'eau parce que, dans l'air, l'onde de choc est accompagnée d'une forte augmentation de température. Dans l'eau cette augmentation reste faible en raison de l'incompressibilité de ce fluide. La matière à former est placée sur une matrice dans laquelle le vide est réalisé [23].

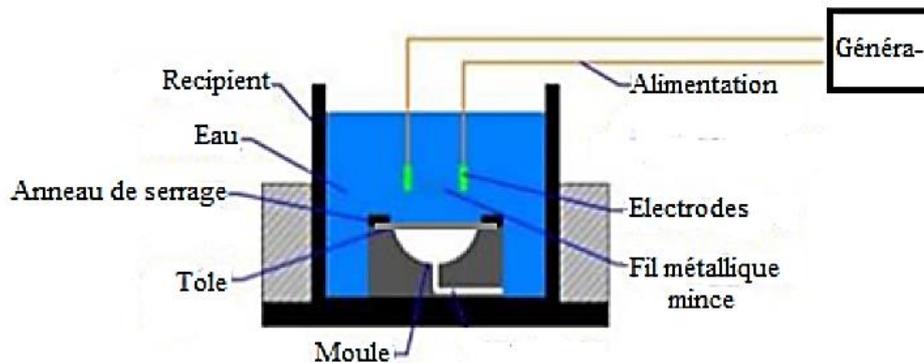


Figure I.4: schéma de principe du FEH

### Technologie du FEH

#### I.1.4 Commutation de puissance

Deux technologies sont classiquement utilisées pour effectuer la commutation d'énergie entre les capacités et le système de décharge:

➤ Le premier système, appelé éclateur, consiste à rapprocher les deux électrodes, l'une de l'autre pour provoquer entre elles un arc électrique, le plus souvent dans un vide primaire. Cette technologie a un temps de décharge de l'ordre de la milliseconde et ne permet pas d'obtenir une bonne reproductibilité des décharges du fait de l'usure progressive des électrodes lors des tirs successifs (fusion locale lors du passage d'un courant intense).

➤ Le deuxième système, c'est la technologie de type ignitron. Il s'agit d'un composant électronique de puissance qui permet le passage d'un courant de 100kA en quelques microsecondes [23].

### I.1.5 Machines Electro- hydrauliques

Les machines du FEH présentent des éléments mécaniques et électroniques :

- Un générateur, batterie de condensateurs et contacteur, qui accumule l'énergie électrique nécessaire et assure l'amorçage de la décharge (Figure I.5).
- Deux électrodes entre lesquelles l'arc jaillit (Figure I.6).
- Cuvette avec accessoires et fluide (chambre de décharge et matrice) (Figure I.6-7).
- Une pièce (plaque ou tube) à déformer en matériaux conducteurs (Aluminium, Cuivre, acier etc...).

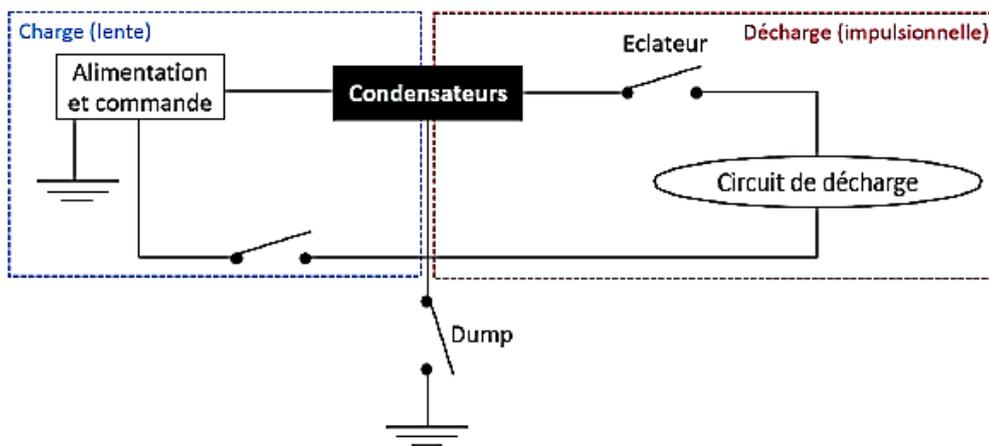


Figure I.5: Architecture schématique d'un générateur de hautes puissances pulsées

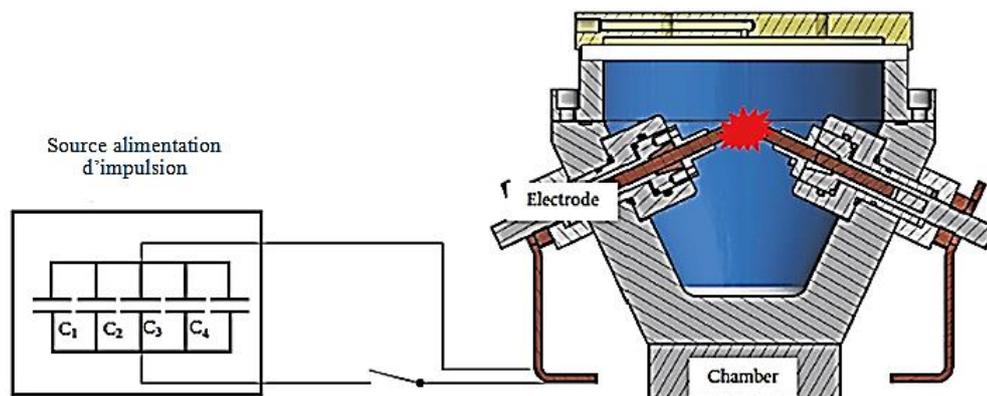
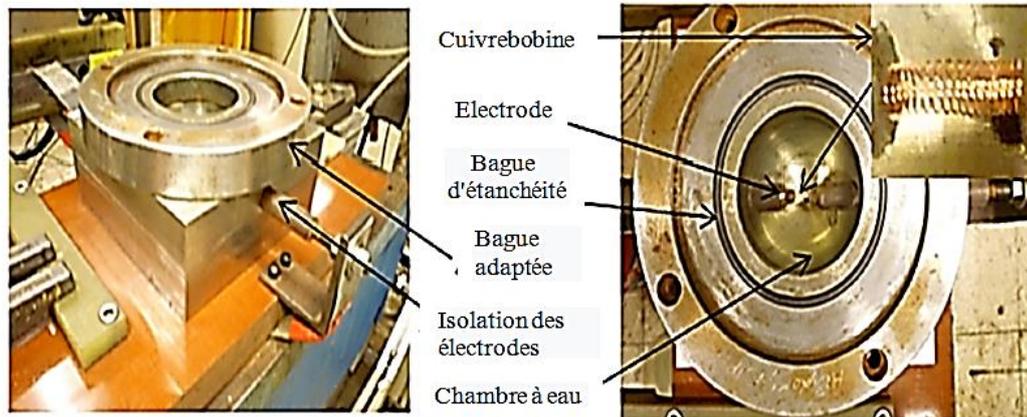


Figure I.6: Schéma en coupe d'une chambre EHF avec électrodes



**Figure I.7: Chambre à eau pour l'EHF avec matrice conique**

### *Générateurs*

Ce sont des machines capables de délivrer des impulsions électriques de plusieurs centaines de kilo ampères sous des tensions de plusieurs kilovolts et d'une durée supérieure à une centaine de microsecondes, avec des cadences de production industrielle. Ces impulsions électriques sont obtenues par la décharge de condensateurs. Les condensateurs du générateur d'impulsion sont au préalable chargés. Puis, un interrupteur de haut courant est fermé permettant ainsi aux condensateurs de se décharger sinusoïdalement ce qui crée un courant alternatif dans la bobine.

Un générateur est composé d'un circuit de commande qui délivre une tension primaire augmentant progressivement jusqu'à la valeur désirée. Le circuit de décharge d'un générateur d'impulsions électriques est du type résonnant, les capacités sont fixées par le constructeur et par conséquent, la bobine créatrice de champ, que l'on adopte, définit la fréquence d'oscillation et le courant dans le circuit.

### *Electrodes*

Parmi les principaux composants, les électrodes sont le cœur du système et doivent supporter les environnements les plus difficiles. Ils doivent fournir jusqu'à 100 kA en toute sécurité, dans et hors de la chambre, isoler la chambre des potentiels jusqu'à 15 kV et résister aux hautes densités d'énergie, températures et pressions générées par la décharge.

Certaines contraintes technologiques ont fortement limité l'expansion industrielle du formage électro-hydraulique, parmi ses contraintes, la durée de vie limitée des électrodes à cause de l'érosion ont rendu difficile l'automatisation du procédé [24].

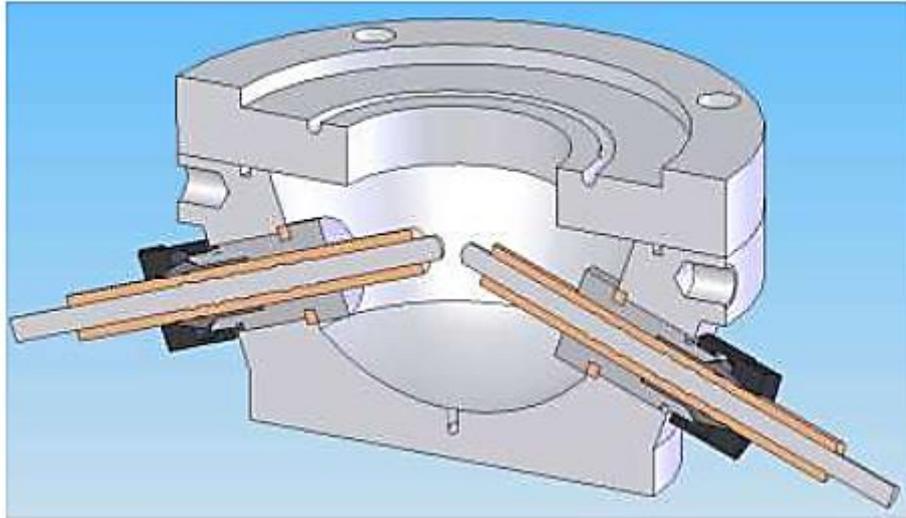


Figure I.8: Vue de deux électrodes dans la chambre de décharge

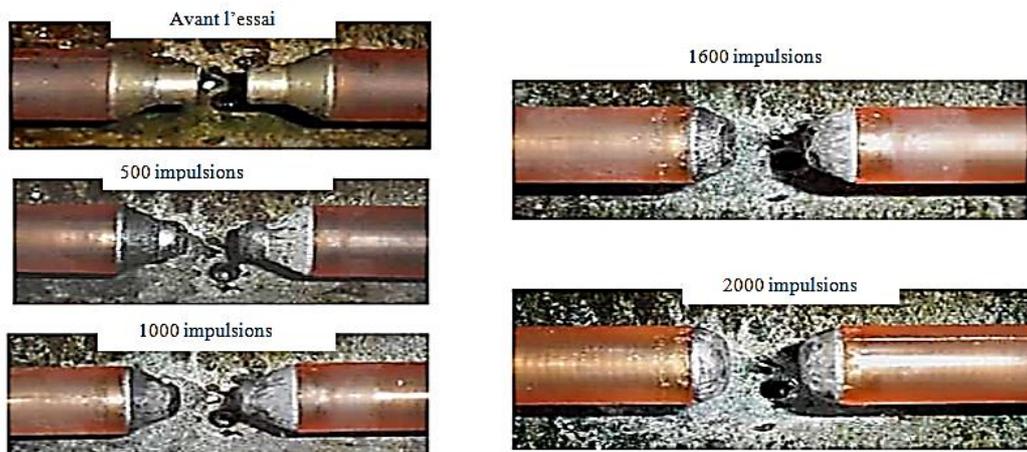


Figure I.9: Tests de durabilité sur électrodes

### *Distance inter-électrodes*

La distance entre les électrodes est réglée à l'aide de la vis micrométrique. Le point zéro (point de contact des électrodes) est déterminé électriquement. Les électrodes étant en court-circuit, elles sont écartées progressivement jusqu'à atteindre une position dans laquelle le système se comporte électriquement comme un circuit ouvert. C'est le point référence « zéro » à partir duquel nous fixons la distance  $d$ . L'erreur lors de cette manipulation est au maximum de  $5\mu\text{m}$ .

### *Propriétés souhaitées pour la matrice*

- **Rigidité** : pour conserver la forme de l'empreinte et pour résister à l'érosion.
- **Stabilité thermique** : pour éviter la formation de fissure au contact du métal chaud.

- **Perméabilité** : pour permettre à l'air chaud et aux gaz de filtrer.
- **Réutilisabilité du moule**

### I.1.6 Caractéristiques du processus

- Condensateur utilisé : l'énergie de l'impulsion de pression dépend de la taille du condensateur.
- Milieu de transfert : Selon la littérature, les milieux les plus courants sont : l'eau, l'huile et l'air. Wenzel et al [21] ont étudié trois types de milieux différents (eau, huile et air) et le résultat a montré que l'eau était le meilleur et l'huile le plus mauvais.
- vide: la cavité de la filière doit être mise sous vide pour éviter un échauffement adiabatique de l'ouvrage dû à une compression brutale de l'air [26].
- Propriétés des matériaux en ce qui concerne l'application de taux de déformation élevés.

### I.1.7 Démonstration de la cellule d'automatisation EHF

La cellule entièrement automatisée a été créée pour démontrer la possibilité d'utiliser l'EHF à Cadences de fabrication industrielle. Plusieurs tâches ont été accomplies pour surmonter différents défis, pour augmenter la robustesse et diminuer le temps de cycle.

La tâche principale, qui a nécessité plusieurs itérations au cours du développement global, était d'intégrer tous les composants dans un système automatisé et d'établir un contrôle à distance via Ethernet et rétroaction à l'aide de divers capteurs.

L'humidité qui monte pendant le fonctionnement continu, augmente le risque d'arc interne ou de décharge imprévue. Résoudre ce problème nécessitait une réorganisation des composants dans l'espace et l'établissement d'une ventilation adéquate.

L'isolation électrique et la mise à la terre du générateur d'impulsions électriques a été amélioré pour augmenter la robustesse et la sécurité électrique.

Le remplissage de la chambre avec l'eau et l'évacuation de l'eau après les rejets est le principal facteur qui ralentit la productivité d'EHF.

Pour résoudre ce problème, les systèmes de manipulation de fluides personnalisés (FHS) ont été conçus, fabriqués et intégrés à la cellule. Le nouveau FHS a augmenté les débits de vidange et le remplissage des fluides sur un ordre de grandeur de 26 à 380 litres/min. FHS aussi intègre la fonctionnalité haute pression pour augmenter le taux de production d'EHF et le formage hybride ( l'EHF combiné à l'hydroformage traditionnel de la plaque).

Le diaphragme de la chambre a été introduit pour garantir que le fluide propre était toujours en contact avec la pièce et s'assurer que les produits d'érosion des électrodes étaient confinés à la région autour des électrodes (Figure I.10) [24].



**Figure I.10: Plaque d'immatriculation et cellule automatisée pour sa production**

### I.1.8 Amélioration de l'efficacité du FEH

Dans certains cas, notamment lorsque les pièces à former sont particulièrement profondes, on réalise plusieurs décharges électriques successives. Afin de réduire le nombre de décharges électriques successives nécessaires et ainsi limiter le temps de formage d'une pièce, il a été proposé de réaliser une étape de préformage hydraulique avant le formage électro-hydraulique de la pièce. Pour se faire, on remplit la cavité avec du liquide sous pression, lorsque la pression du liquide est suffisante, la pièce se déforme partiellement contre le moule. Ensuite, des décharges électriques sont générées pour provoquer des ondes de choc et compléter le formage de la pièce jusqu'à atteindre la forme voulue.

Le préformage de la pièce par application d'une pression quasi-statique permet de favoriser l'avancement du flan de matière dans le moule, donc de réduire la déformation de la matière à réaliser par formage électro-hydraulique et donc de réduire le temps de formage.

Le système de vide a été développé pour éliminer l'air de la chambre, afin d'augmenter l'efficacité du processus, aussi de la zone entre la pièce et la matrice pour éliminer la compression de l'air tout en formant les moindres détails de la matrice [25].

### Avantages et inconvénients du FEH

Le formage électro-hydraulique présente, en regard de la plupart des procédés de formage conventionnels, certains avantages :

- L'absence de poinçon est intéressante financièrement : seule une matrice doit être usinée.
- Certains défauts de surface peuvent être évités, car seule une face de la pièce est en contact avec une matrice.
- Les grandes vitesses de déformation peuvent permettre de mettre en forme certains matériaux difficiles à former en conditions standard (les limites de formage peuvent être augmentées). Cela peut aussi permettre de supprimer des traitements thermiques intermédiaires.
- Les conditions d'impact permettent de réaliser de fins détails, de façon similaire à de l'estampage voire à de la gravure.
- Le retour élastique peut être réduit.
- Différentes opérations peuvent être combinées en une seule : formage et assemblage, ou formage et découpe.
- La consommation énergétique est réduite.
- Minimisation des déchets en fin de formage.
- Une manipulation plus sûre que les matières explosives.
- Plus approprié si la taille de travail est petite à moyenne.
- Des plaques minces peuvent être formées avec de plus petites quantités d'énergie.
- Le processus ne dépend pas des propriétés électriques du matériau de travail.
- Permet un formage extrêmement profond.
- Coût d'outillage réduit, ainsi peu d'opérations secondaires.
- Formage mâle ou femelle possible (formage positif et formage négatif)
- Micro détails facilement formés.
- Le formage électro-hydraulique permet même de former les matériaux plastiques, contrairement au magnétoformage qui impose l'usage de matériaux bons conducteurs électriques.

Le formage électro-hydraulique a également quelques inconvénients, dont on peut citer :

## Chapitre I : Aspects théoriques et industriels du formage Electrohydraulique

- Le fluide dans la cuve doit généralement être vidangé et remplacé à chaque cycle de travail.
- Le besoin de vide rend l'équipement plus compliqué.
- la tension de décharge doit être correctement contrôlée pour assurer que la pièce déformée épouse la surface de la matrice sans fracture.
- Chaque décharge des électrodes entraîne la formation d'impuretés dans l'eau, pouvant créer des défauts de surface de la pièce formée dans le processus.
- Le volume de fluide dans la cuve a tendance à être assez important.
- Certaines contraintes technologiques ont fortement limité l'expansion industrielle du FEH (gestion de l'eau, fermeture de la chambre de décharge, remplissage, vidange, ouverture et la durée de vie limitée des électrodes) ont rendu difficile l'automatisation du procédé [26].

### Applications du FEH

- Dans le secteur automobile comme les composants intérieurs d'une porte de voiture.
- Dans la construction navale à partir de grandes plaques.
- construction de tubes épais.
- sertissage de bandes métalliques.
- Formage de dômes elliptiques utilisés dans les applications spatiales.
- Équipements miniatures et fantaisie ayant un profil compliqué pour l'industrie électronique [26].

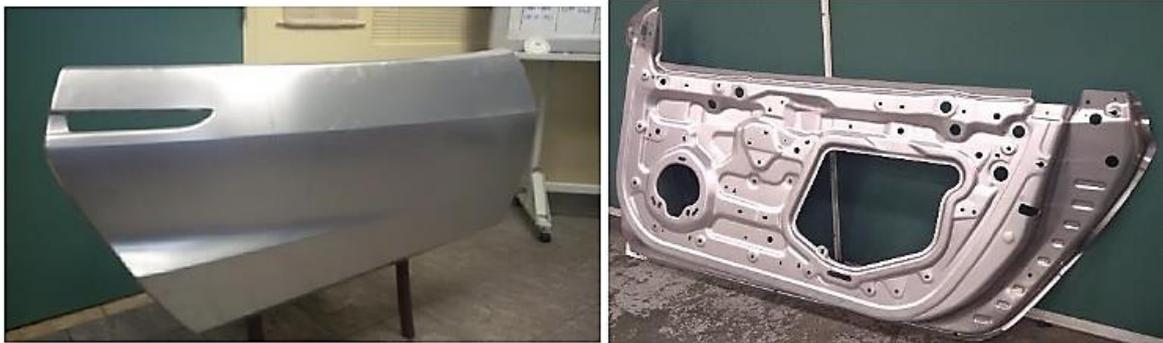


(a) Industries aérospatiales (b) Industries d'automobiles (c) pièces divers

**Figure I.11: Différentes pièces formées par FEH**

### I.1.9 Industrie d'automobiles

Dans l'industrie automobile, le FEH est de plus en plus utilisé, à cause de son coût d'outillage plus faible et son degré de formabilité plus élevé que les autres technologies conventionnelles. Ce procédé est particulièrement utilisé pour la construction des panneaux de carrosserie en Aluminium, qui sont extrêmement difficiles à former avec l'estampage conventionnel.



**Figure I.12: Extérieur et intérieur de la porte d'une voiture**



**Figure I.13 : Le tableau de bord entièrement formé par FEH**

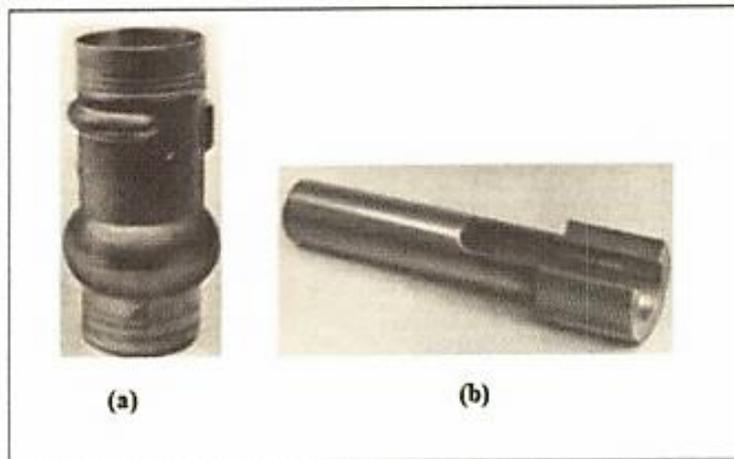
### I.1.10 Applications divers

Il existe de nombreux produits construits par le processus de FEH comme les portes en métal, les bureaux métalliques, les boîtes, les tôles de toit.



Figure I.14: Quelques produits de formage électro-hydraulique





**Figure I.15: Divers pièces produites par FEH**

### Conclusion

Nous avons vu dans le premier chapitre, les méthodes de formage à grande vitesse en particulier, la méthode de formage électro-hydraulique, qui représente le sujet de notre étude.

Une vue générale sur les aspects théoriques et industriels de ce procédé a été faite : Après un bref historique, nous avons abordé tous les détails technologiques de ce processus ainsi que ses avantages, ses inconvénients, ses applications, particulièrement ses applications industrielles.

Dans le chapitre suivant, et dans le but de modélisation et simulation du procédé, nous allons présenter les modèles mathématiques nécessaires, en décrivant les équations régissant les phénomènes mis en jeu lors de ce processus.

## **Chapitre II**

# **Modélisation du formage électro-hydraulique**

## II. Modélisation du formage électro-hydraulique

### Introduction

Comme il a été déjà mentionné, le FEH est un processus complexe, provoquant la déformation plastique d'une pièce, résultant de l'onde de choc de décharge à travers des électrodes plongées dans l'eau. Lorsque l'énergie électrique stockée est soudainement libérée par des commutateurs électroniques à grande vitesse et des électrodes immergées dans l'eau, une onde de choc mécanique intense est créée : C'est ce qui est appelé effet électrohydraulique, c'est un moyen facile de convertir l'énergie électrique en une force motrice.

La simulation numérique offre une compréhension meilleure des phénomènes physiques et du comportement lors des processus de FEH. Par conséquent, elle permet l'optimisation et la prédiction des paramètres nécessaires pour le formage des pièces et donc l'amélioration de l'efficacité du processus.

Notre objectif est de développer un modèle simple mais précis qui peut simuler le processus de formage par impulsion électro-hydraulique d'une plaque. Nous avons choisi de développer un modèle élément finis couplant les problèmes hydraulique et mécanique, mis en jeu lors de ce processus. Notre modèle numérique a été développé sous l'environnement du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.

### Définitions

- **Déformation** : C'est la modification que subit un corps sous l'effet d'une force.
- **Élasticité** : Propriété qu'a un corps, après avoir été déformé par une charge, de reprendre sa forme initiale lorsque la charge est enlevée.
- **Limite élastique** : C'est la contrainte maximum que peut supporter un matériau sans danger de déformation permanente.
- **Module de Young** : C'est la constante de proportionnalité entre la contrainte qu'un matériau subit et sa déformation unitaire. C'est une constante propre à chaque matériau.
- **Plasticité** : Propriété qu'a un corps de conserver les déformations produites par une charge lorsque celle-ci est enlevée. La déformation plastique se produit quand la contrainte dépasse la limite d'élasticité.

## Chapitre II : Modélisation du formage électro-hydraulique

• **Loi de Hooke** : Lorsqu'on charge un matériau, si la contrainte produite demeure inférieure à sa limite élastique, sa déformation est proportionnelle à la contrainte qu'il subit (Figure II.1).

$$\sigma = E \varepsilon \left[ \frac{N}{m^2} \right] \text{ Ou } [Pa] \quad (01)$$

Où **E** : est le module d'élasticité ou module de Young [Pa]

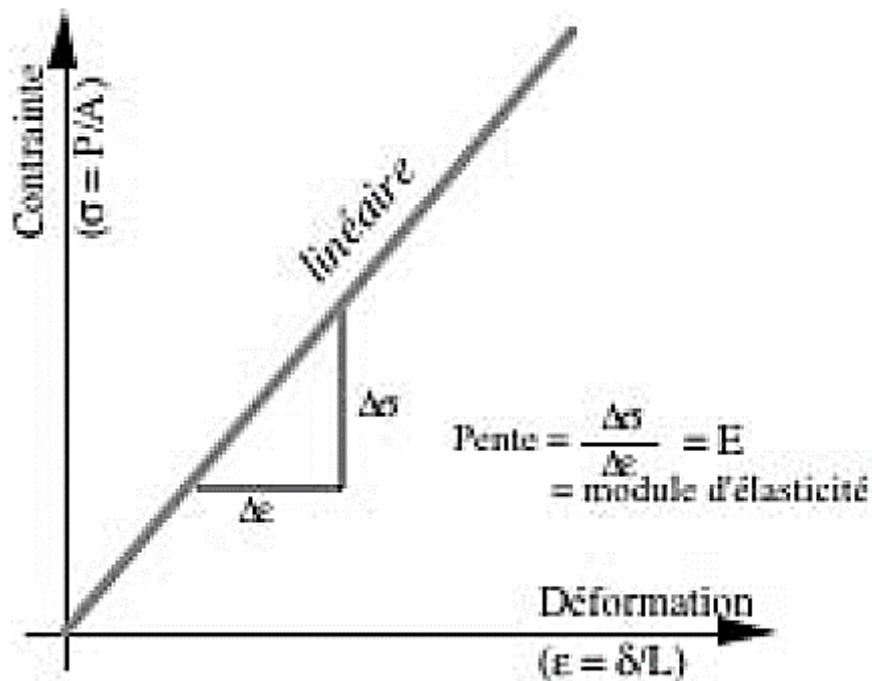


Figure II.1 : relation contrainte-déformation selon la loi de HOOKE

### Influence des divers paramètres sur la déformation

Les différents paramètres affectant la déformation des pièces avec le FEH sont :

- ✓ Résistivité de la pièce
- ✓ Densité de décharge
- ✓ Intensité du courant de décharge
- ✓ Epaisseur de la pièce
- ✓ Fréquence de travail
- ✓ Ductilité du métal de la pièce
- ✓ Position des électrodes

### Equation mécanique

#### II.1.1 Équation d'équilibre

L'équation fondamentale régissant la déformation de tout matériau isotrope est donnée par l'équation d'équilibre, appelée en 3D, la seconde loi de Newton [27] :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - \text{div} [\sigma] = \vec{F} \quad (02)$$

Avec :

$\vec{u}$  : Le champ de déplacement (u, v, w).

$\sigma$  : Le tenseur de contraintes.

$\vec{F}$  : Le vecteur de charge.

$\rho$  : La masse volumique.

#### II.1.2 Relation déformation-déplacement

En tout point, la déformation  $\varepsilon$  est complètement définie, en 2D, par les composantes (u, v) et leurs dérivées. Elle est formée par 3 composantes :

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_p \quad (03)$$

Avec :

$\varepsilon_{el}$  : La déformation élastique.

$\varepsilon_{th}$  : La déformation thermique donné par :  $\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref})$ .

$\alpha$  : Le coefficient d'expansion thermique.

$\varepsilon_p$  : La déformation plastique.

T : Température.

$T_{ref}$  : Température de référence (ambiante).

Dans notre modélisation des systèmes de FEH, la déformation thermique n'est pas considérée.

Les composantes de la déformation sont :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (04)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (05)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (06)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \quad (07)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{yz} \quad (08)$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \gamma_{xz} \quad (09)$$

### II.1.3 Relation contrainte-déformation

La contrainte dans un matériau est décrite par le tenseur symétrique :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

Avec :

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (11)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} \quad (12)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (13)$$

Pour le comportement mécanique des matériaux, il existe deux cas : le comportement élasto-plastique et le comportement isotrope. Dans notre cas, nous avons utilisé le cas isotrope :

$$\sigma = D\varepsilon_{el} + \sigma_0$$

Avec la matrice D est donnée par:

$$D^{-1} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Et :

$$\sigma = D_d \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{z0} \\ \varepsilon_{xy0} \\ \varepsilon_{yz0} \\ \varepsilon_{xz0} \end{bmatrix} + \sigma_0 \quad (15)$$

Avec

$$D_d = G \begin{bmatrix} 4/3 & -2/3 & -2/3 & 0 & 0 & 0 \\ -2/3 & 4/3 & -2/3 & 0 & 0 & 0 \\ -2/3 & -2/3 & 4/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

### Equations de NAVIER-STOKES

Les équations qui régissent le mouvement de tout fluide sont l'équation de la conservation de la quantité de mouvement et l'équation de la conservation de la masse.

#### II.1.4 Equation de conservation de la quantité de mouvement

En régime stationnaire, et dans le cas d'un fluide Newtonien (contrainte de cisaillement proportionnelle au gradient de vitesse), incompressible (densité constante) [28][29], l'équation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\rho(\vec{V} \cdot \overrightarrow{grad})\vec{V} = \vec{F} - \overrightarrow{grad} P + \eta \Delta \vec{V} + \frac{1}{3} \eta \overrightarrow{grad}(\text{div} \vec{V}) \quad (17)$$

Avec :

$\rho$  : Masse volumique du fluide [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

$\eta$  : Viscosité dynamique du fluide [ $\text{kg}/\text{ms}$ ].

P : Pression [Pa].

F : Densité de force volumique [ $\text{N}/\text{m}^3$ ].

V : Vecteur de vitesse [m/s].

#### II.1.5 Equation de conservation de masse ou équation de continuité

Dans le cas général, cette équation s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (18)$$

Dans le cas d'un fluide incompressible et en régime stationnaire, elle se réduit à :

$$\text{div} \vec{V} = 0 \quad (19)$$

Le système (20) formé par ces deux équations représente l'équation d'écoulement :

$$\begin{cases} \rho(\vec{V} \cdot \overrightarrow{grad})\vec{V} = \vec{F} - \overrightarrow{grad} P + \eta \Delta \vec{V} + \frac{1}{3} \eta \overrightarrow{grad}(\text{div} \vec{V}) \\ \text{div} \vec{V} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

### II.1.6 Modèles mathématiques pour les constantes physiques

Dans la formulation de l'équation de Navier-Stokes, les paramètres physiques introduits sont supposés constants.

- **La densité  $\rho$**

Dans l'équation de Navier stokes, nous supposons que l'écoulement du liquide est incompressible, ce qui permet de considérer la densité constante dans tout le domaine d'étude (le liquide satisfait l'approximation Boussinesq) [28] [29].

- **La viscosité  $\eta$**

Dans notre étude, nous considérons le régime laminaire de l'écoulement de l'eau, donc  $\eta$  est supposée aussi constante [30].

#### Type de couplage et termes de couplage

Comme il a été déjà mentionné, il est nécessaire de coupler l'équation mécanique et celle de Navier stokes pour modéliser le processus de FEM. Théoriquement, il existe deux types de couplages : le couplage faible et le couplage fort. Ce dernier est celui adopté dans notre travail de simulation, puisque le logiciel utilisé le permet : les différentes équations sont résolues simultanément.

Les termes de couplage entre l'équation mécanique et celle d'écoulement sont représentés par la pression de la décharge électrique au niveau des électrodes dans l'eau.

#### Modèles numériques

### II.1.7 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis a été proposée par Richard Courant dans les années 1940. Durant les années 1950, des ingénieurs mécaniciens ont donné un essor considérable à cette méthode en démontrant son efficacité ce qui a été à l'origine de son universalité.

La méthode des éléments finis fait partie des outils mathématiques appliquées, en analyse numérique, elle est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Il s'agit de remplacer un problème compliqué pour lequel a priori on ne connaît pas de solution, par un problème plus simple que l'on peut résoudre [31].

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis [32] sont détaillées comme suit:

- Discrétisation du milieu en sous domaines (maillage).

- Formulation éléments finis de l'équation différentielle à résoudre (Formulation intégrale).
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème.
- Assemblage des matrices élémentaires.
- Prise en compte des conditions aux limites.
- Résolution du système d'équations.

### II.1.8 Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS

Le logiciel COMSOL Multiphysics est un outil de simulation numérique, basé sur la méthode des éléments finis, permettant de traiter de nombreux problèmes grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées.

Le logiciel Comsol Multiphysics et la société correspondante ont été créés en 1986 pour la première fois par des étudiants de Germund Dahlquist, dans la suite de son cours consacré à la simulation numérique à l'institut Royal de Technologie à Stockholm en Suède. La version initiale (avant 2005) de COMSOL Multiphysics s'appelait FEMLAB. Depuis 2005, plusieurs versions du logiciel ont été éditées. En 2015, ont édité la version 3.5 [33].

Il possède de plus un environnement graphique permettant de réaliser rapidement des figures relativement complexes (en 1D, 1D-axisymétrique, 2D, 2D-axisymétrique ou 3D). Par ailleurs, COMSOL Multiphysics possède un environnement de programmation dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits « solvers », pouvant être linéaires ou non, paramétriques ou encore dépendant du temps [34].



**Figure II.2 : Icone COMSOL MULTIPHYSICS**

C'est un logiciel multiplateforme : Windows, Mac, GNU-Linux et contient la plupart des équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algèbre-différentiels (EAD) sont également possibles. L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation sont [35] :

- Création du module Comsol,
- Choix de la dimension (1D, 2D, 2D axisymétrique, 3D),
- Choix des modèles physiques (électromagnétique, mécanique, transfert thermique...),
- Choix du type d'étude (stationnaire, temporelle, fréquentielle...),
- Définir la géométrie,
- Choix des propriétés matériaux,
- Conditions aux limites,
- Maillage,
- Résolution
- Exploitation des résultats.

Toute modélisation ou simulation par COMSOL suit des étapes caractéristiques (Figure II.3).

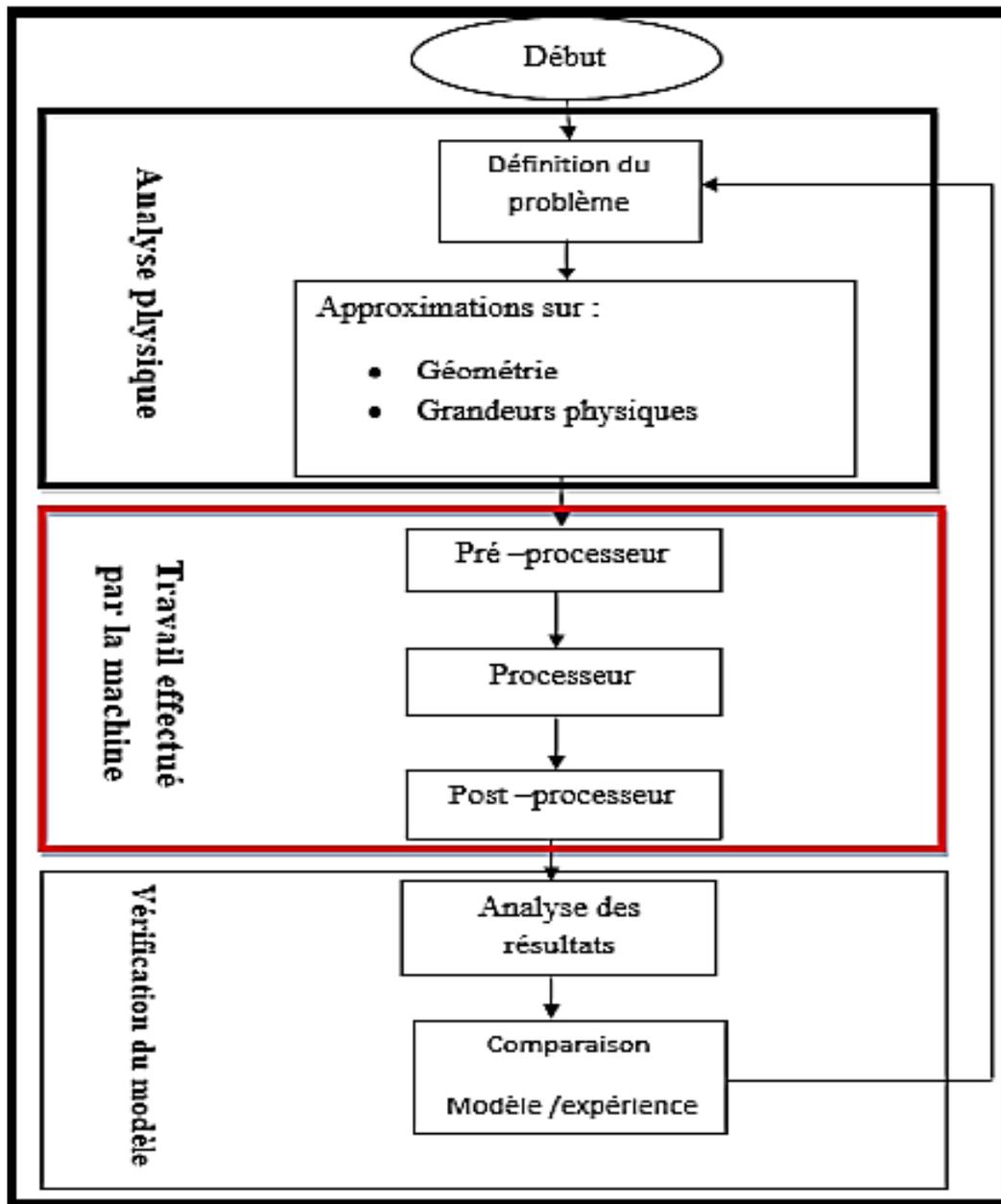


Figure II.3 : Etapes de modélisation par COMSOL MULTIPHYSICS

### II.1.9 Etapes d'élaboration du modèle numérique avec COMSOL

Les différentes étapes suivies avec le logiciel COMSOL sont :

- **Création d'un modèle Comsol :** la première étape est la création d'un nouveau modèle à l'aide du navigateur de modèles (Figure II.4).

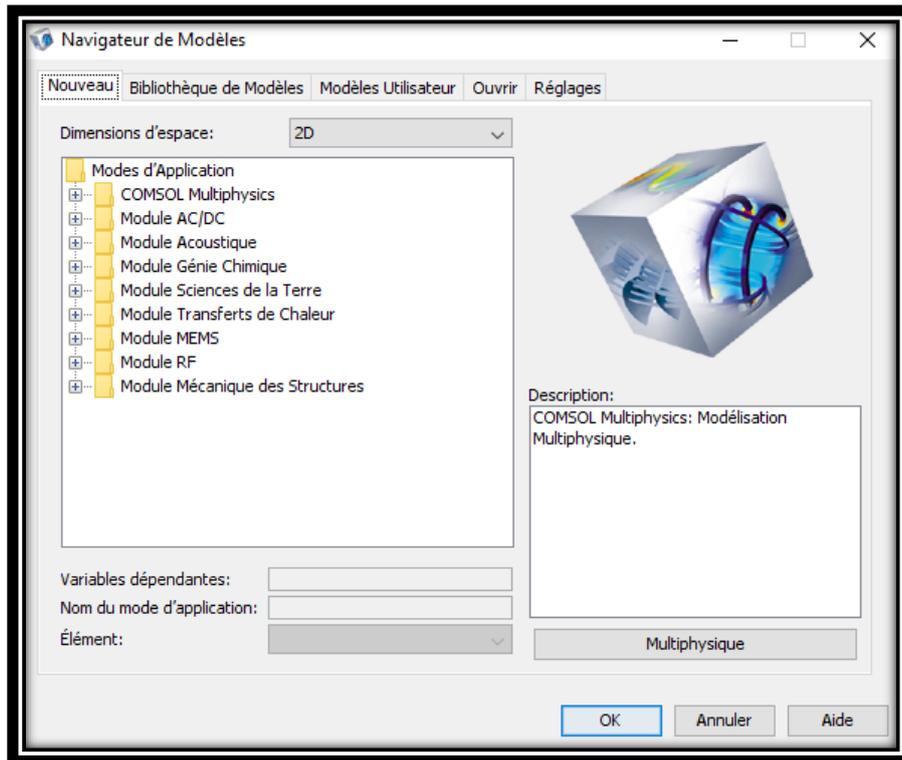


Figure II.4 : Création du modèle Comsol

- **Choix de la dimension** : dans cette étape la dimension est sélectionnée. Dans notre cas nous avons choisi 2D (Figure II.5).

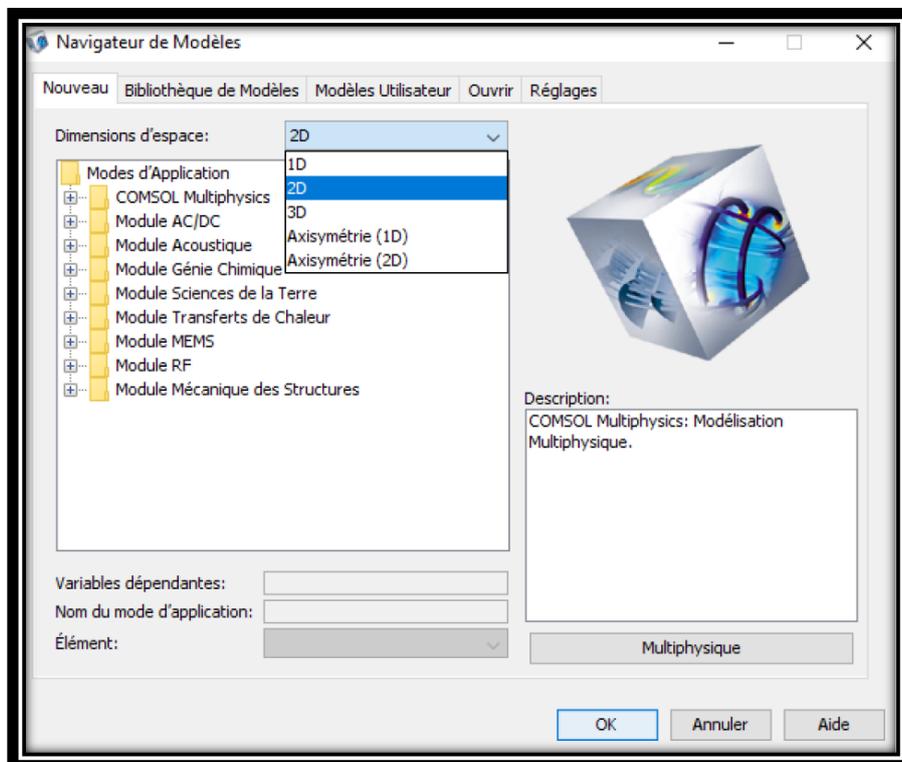


Figure II.5 : Choix de la dimension

## Chapitre II : Modélisation du formage électro-hydraulique

- **Choix des modules physiques:** après la sélection de la dimension, nous choisissons le module mécanique des structures (Figure II.6).
- **Choix du type d'étude :** L'étude stationnaire ou temporelle (Figure II.6).

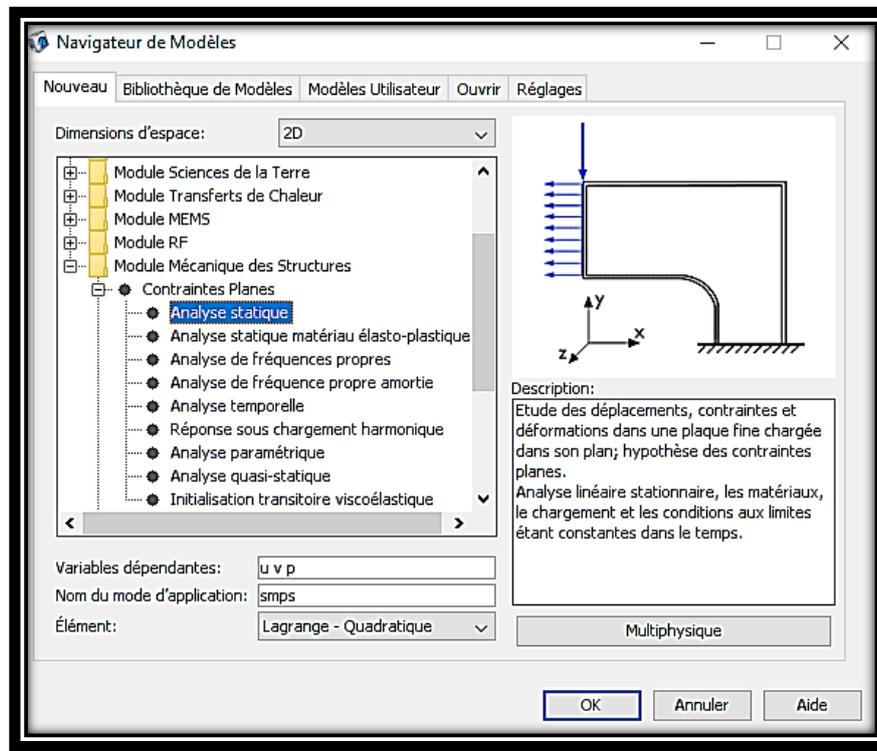


Figure II.6: Choix de Module physique et le type d'étude

- **Construction de la géométrie :** une fois le fichier Comsol est créé avec les équations, nous dessinons la géométrie du problème étudié (Figure II.7).

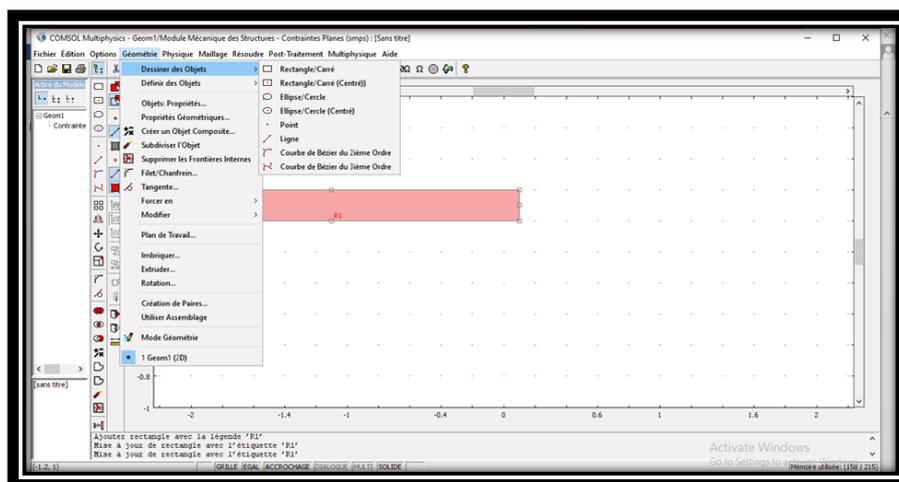


Figure II.7: Construction de la géométrie

## Chapitre II : Modélisation du formage électro-hydraulique

- **Introduction des constantes:** dans cette étape nous introduisons les paramètres du problème (définition des matériaux) (Figure II.8).

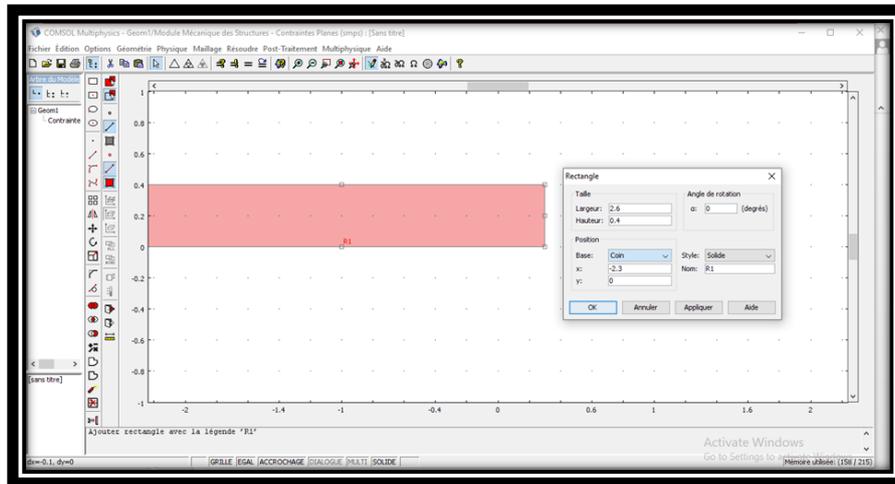


Figure II.8: Introduction des constantes

- **Définition des paramètres des équations :** dans cette étape nous avons adapté les équations selon le problème étudié (Figure. II.9).

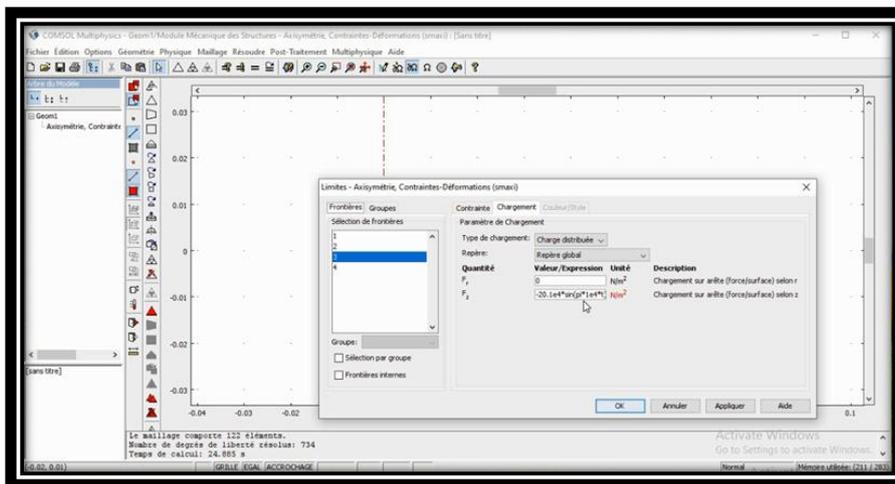


Figure II.9: Définition des paramètres des équations

- **Introduction des conditions aux limites :** une fois les équations sont définies, nous passons à l'introduction des conditions initiales et aux limites (Figure II.10).

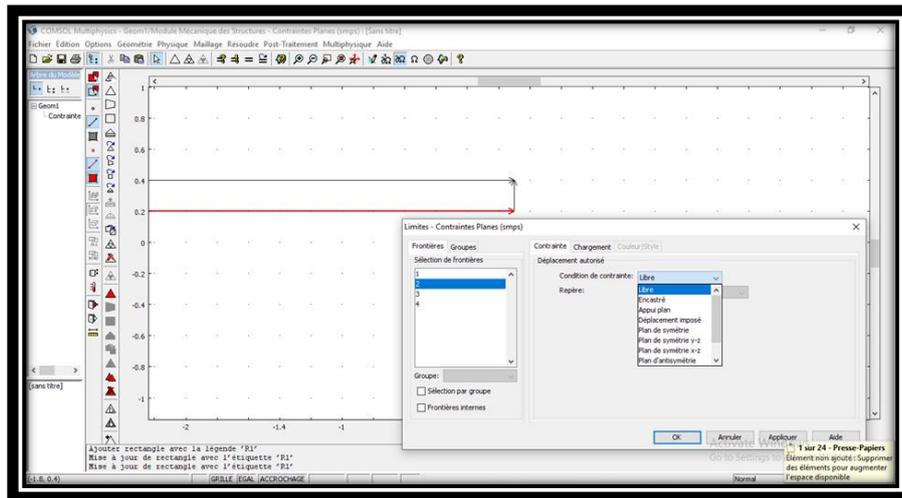


Figure II.10: Introduction des conditions aux limites

- **Maillage de la géométrie** : Comsol effectue un maillage adapté au problème étudié. L'utilisateur a la possibilité d'affiner le maillage complet ou dans certaines parties (Figure II.11).

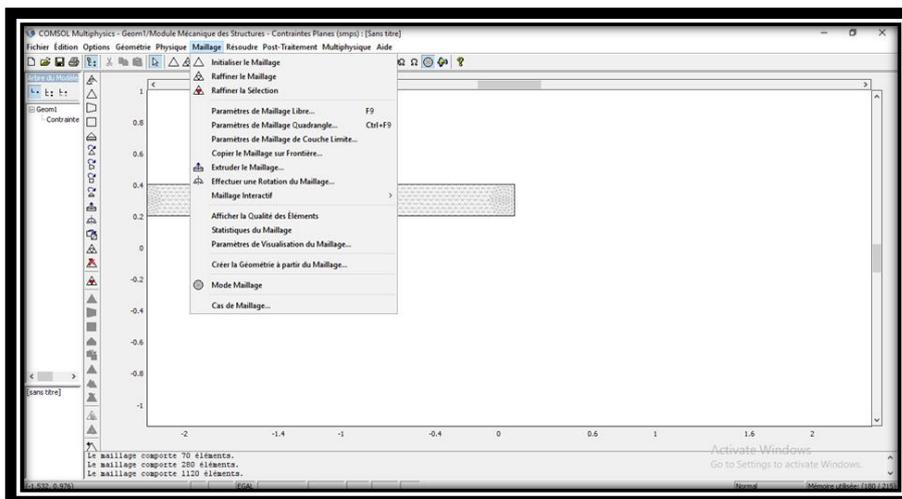


Figure II.11: Maillage de la géométrie

- **Résolution du problème physique**: une fois les étapes précédentes sont achevées, nous pouvons lancer le calcul pour obtenir les résultats (Figure II.12).
- **Exploitation des résultats** : Les résultats obtenus peuvent être visualisés par différentes figures (Figure II.12).

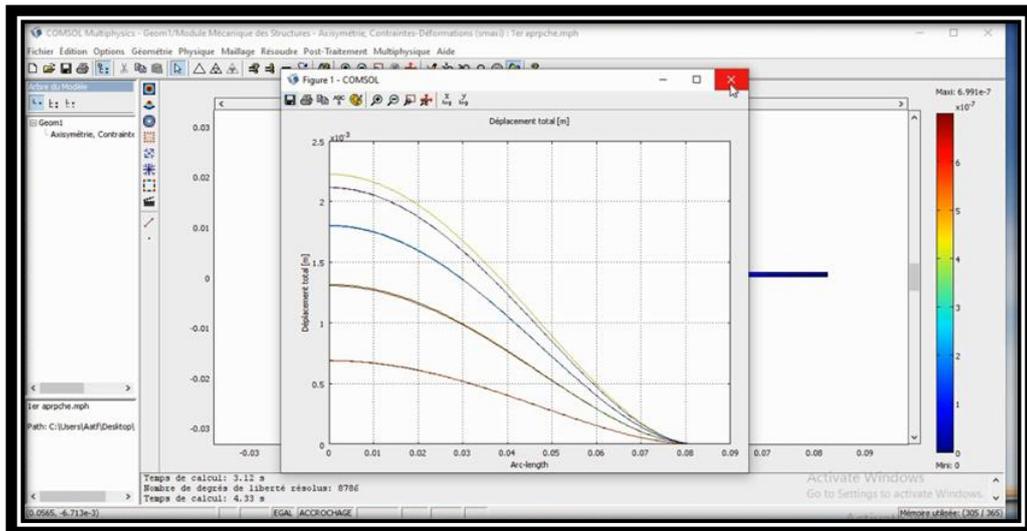


Figure II.12: Visualisation des résultats

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au développement et la présentation des modèles mathématiques et numériques concernant les phénomènes physiques, mis en jeu lors du processus de FEH. En outre, une présentation des étapes suivies par le logiciel COMSOL utilisé, a été faite.

## **Chapitre III**

# **Applications numériques : résultats et interprétations**

### III. Applications numériques : résultats et interprétations

#### Introduction

Afin de vérifier la formabilité de pièces plates par le procédé d'électro hydroformage, il est important d'avoir un modèle de simulation. Ce chapitre décrit le développement d'un modèle numérique, éléments finis, utilisant le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS. Ce logiciel a été utilisé puisqu'il est un puissant outil de calcul permettant de tenir compte des non linéarités du processus et l'interaction entre les phénomènes de nature différentes.

Nous présentons aussi les résultats obtenus numériquement pour les applications d'EHF, qui sont ensuite validées avec ceux trouvés expérimentalement.

#### Simulation du FEH

Selon la recherche bibliographique, faites sur ce procédé de FEH, seulement quelques simulations numériques du FEH ont été publiées.

Dans ce travail, Le modèle de simulation du FEH, décrit l'effet de la décharge électrique au niveau des électrodes comme une pression générée au point milieu des électrodes.

L'énergie de la décharge électrique est supposée être transformée en pression dans l'eau, cette pression statique est égale à l'énergie électrique divisée par le volume du liquide. Dans notre cas, il est supposé que l'effet cinétique peut être négligé [36].

Deux applications ont été traitées, le FEH libre et le FEH avec matrices. De plus, une comparaison entre le comportement mécanique et la formabilité de différents matériaux a été abordée.

#### Matériaux des plaques formées par FEH

Les caractéristiques mécaniques (densité, module de Young et coefficient de poisson) des différents matériaux des plaques formées par FEH et étudiées dans notre modèle numérique, sont présentées dans le tableau III.1.

**Tableau III.1 : Paramètres physiques des matériaux étudiés**

N°	Matériau	Module de Young	Coefficient de Poisson	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]
1	Aluminium	70.10 <sup>9</sup>	0.33	2700
2	Cuivre	110.10 <sup>9</sup>	0.35	8700
3	Acier	200.10 <sup>9</sup>	0.33	7850

### Formage électro hydraulique libre de plaques en Aluminium

Le premier système concerne l'installation expérimentale illustrée dans la référence [36]. La chambre d'eau utilisée pour l'EHF est de largeur 200 mm et de profondeur 103 mm avec le point milieu d'électrodes est situé à 50 mm de la base de la chambre d'eau.

La plaque à déformer est considérée plate (200 mm x 1 mm) (Figure III.1).

Cette application concerne le FEH sans matrices, c'est-à-dire l'EHF libre, où la plaque est supposée se déformer librement. Elle est modélisée avec 23022 éléments triangulaires et 12037 noeuds (Fig. III.2).

En considérant plusieurs valeurs de pression au niveau du point de décharge ( $P=10^4$  -  $10^5$  Pa), nous avons analysé les formes de plaques, d'Aluminium, obtenues numériquement (Figures III. 3-9). Nous pouvons remarquer que l'emboutissage des plaques est fortement accentué par la valeur de la pression électrique considérée.

En effet, la figure III.9 montre différentes formes de plaques formées par FEH ; particulièrement pour les fortes valeurs de pressions.

D'autre part, le déplacement maximal des plaques en Aluminium est d'autant plus important que la pression est importante, il est quasiment proportionnel à la pression considérée (figure III.10).

Ces résultats sont proches de ceux trouvés expérimentalement par les travaux de Melander et al. [36].

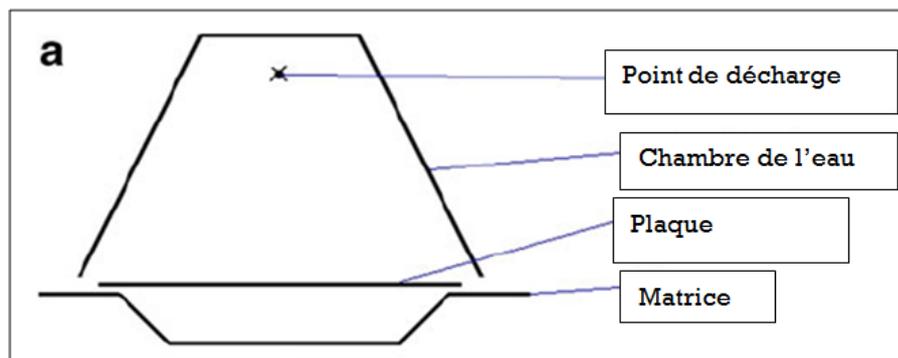


Figure III.1 : Système expérimental [36]

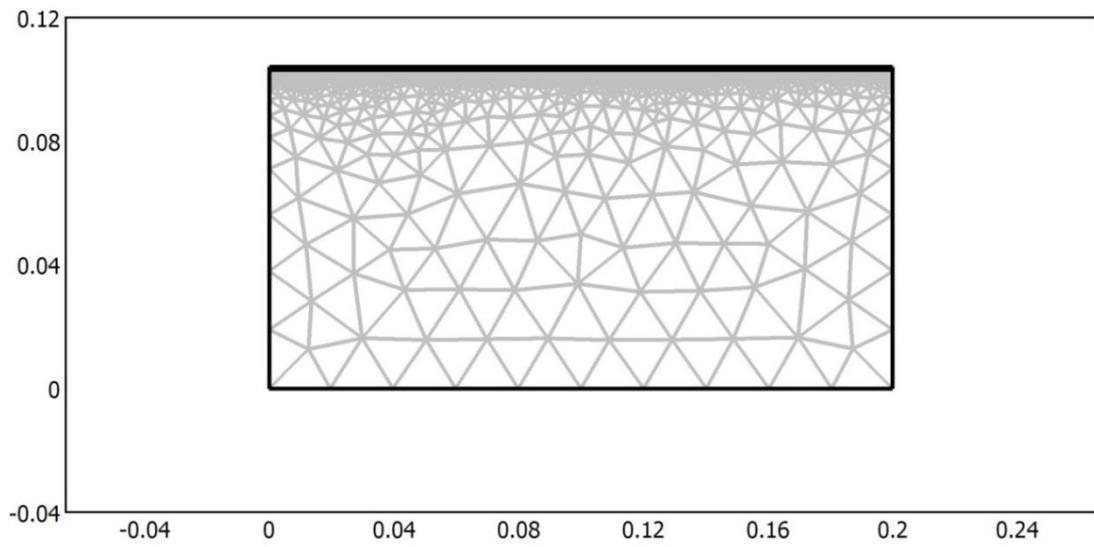


Figure III.2 : Maillage adopté de la première application

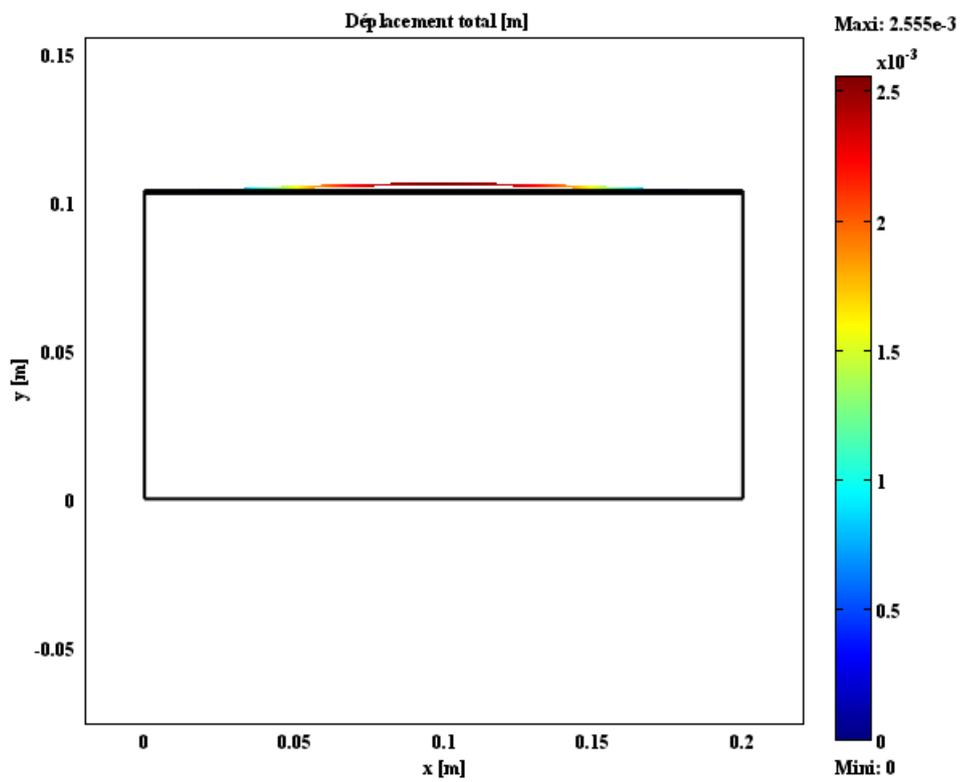


Figure III.3 : Déformation de la plaque en Aluminium- $P=10^4$  Pa

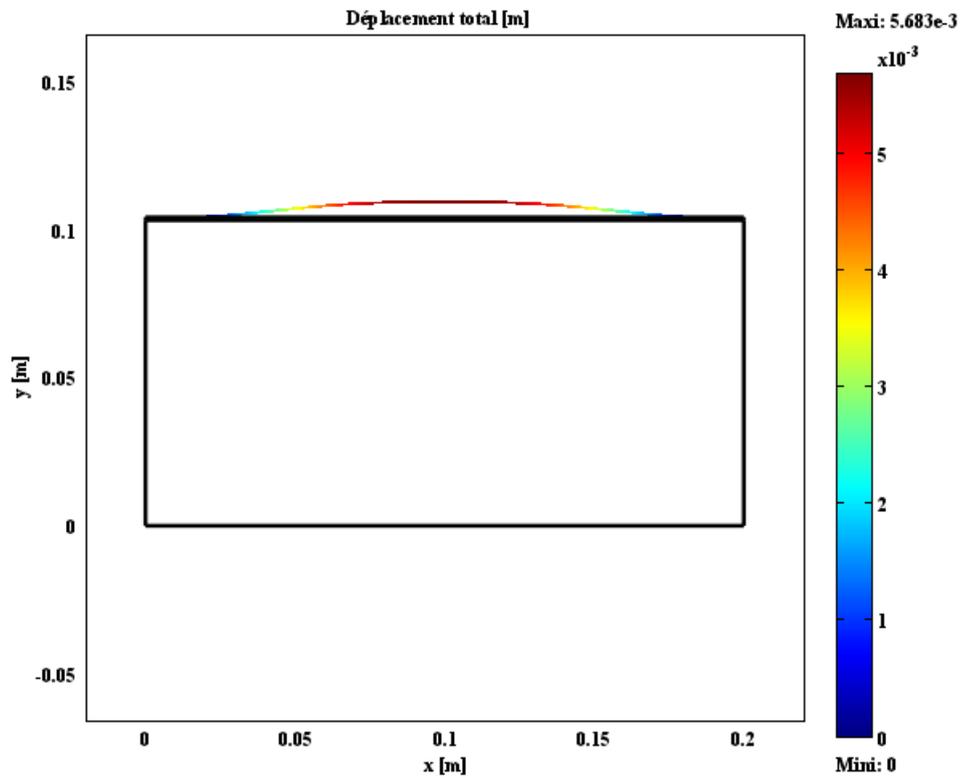


Figure III.4 : Déformation de la plaque en Aluminium- $P=2.10^4$  Pa

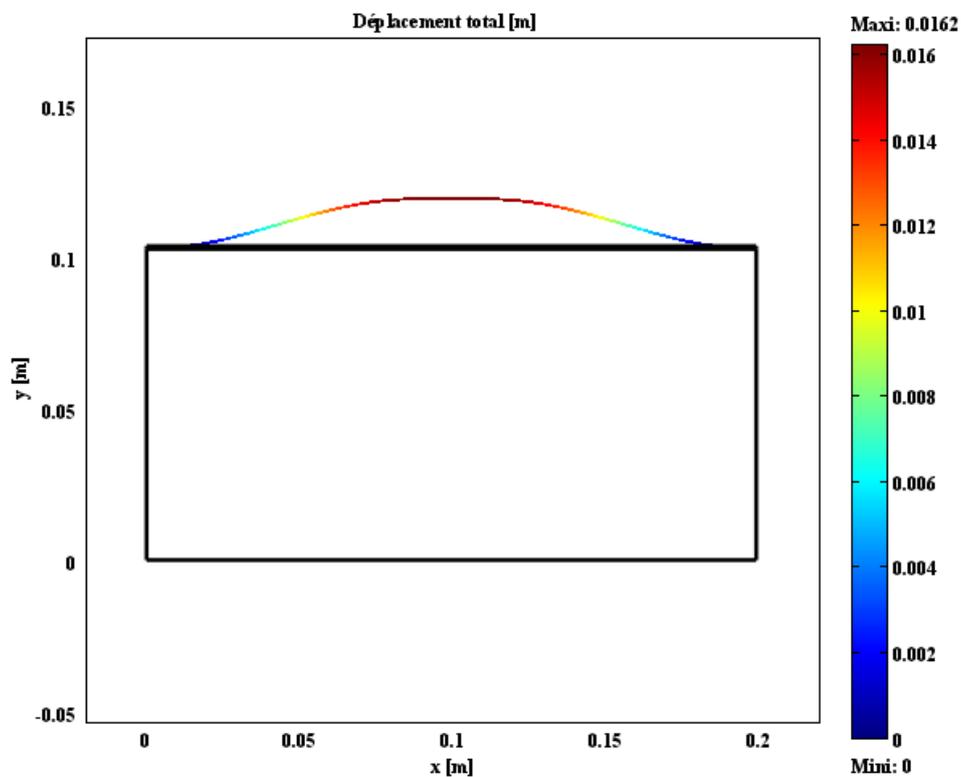


Figure III.5: Déformation de la plaque en Aluminium- $P=4.10^4$  Pa

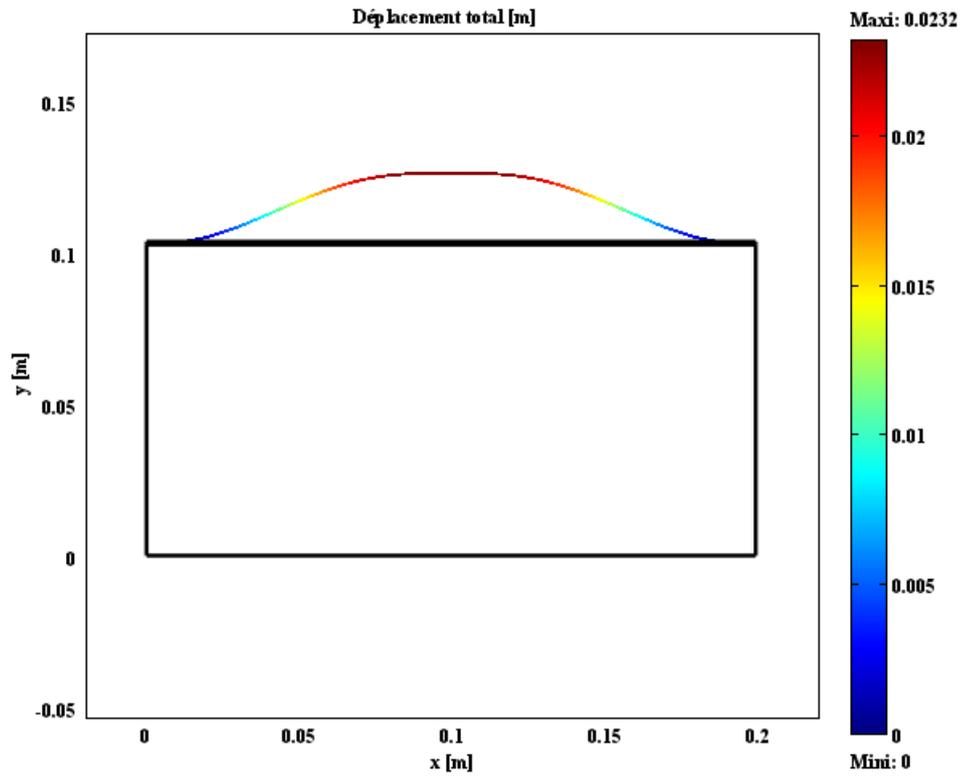


Figure III.6 : Déformation de la plaque en Aluminium- $P=6.10^4$  Pa

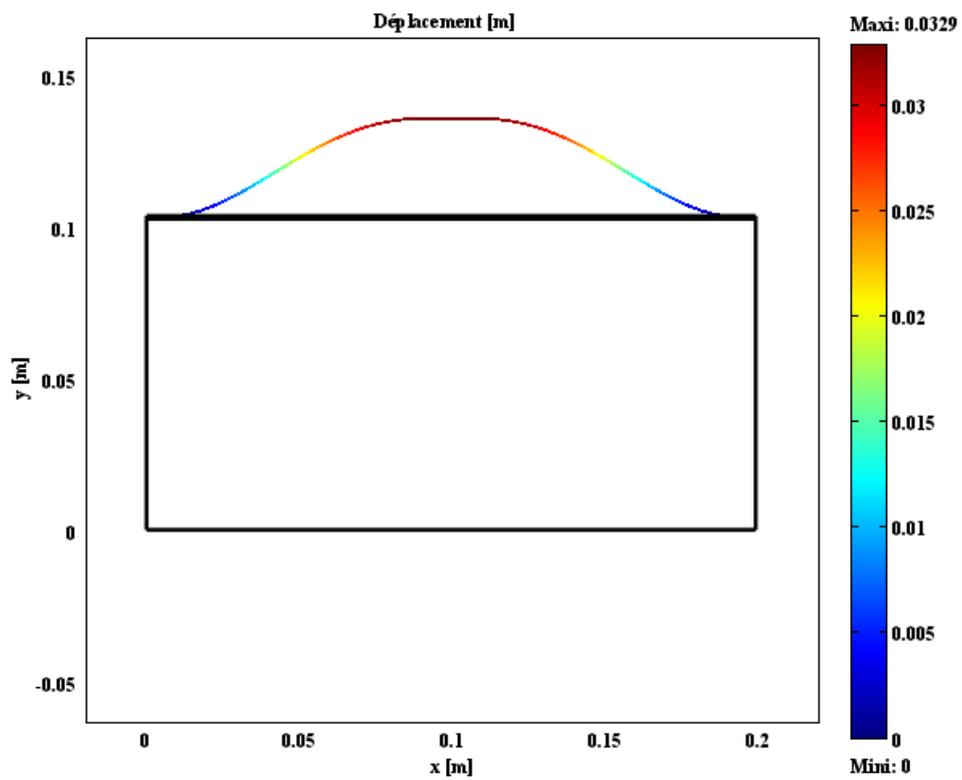


Figure III.7 : Déformation de la plaque en Aluminium- $P=8.10^4$  Pa

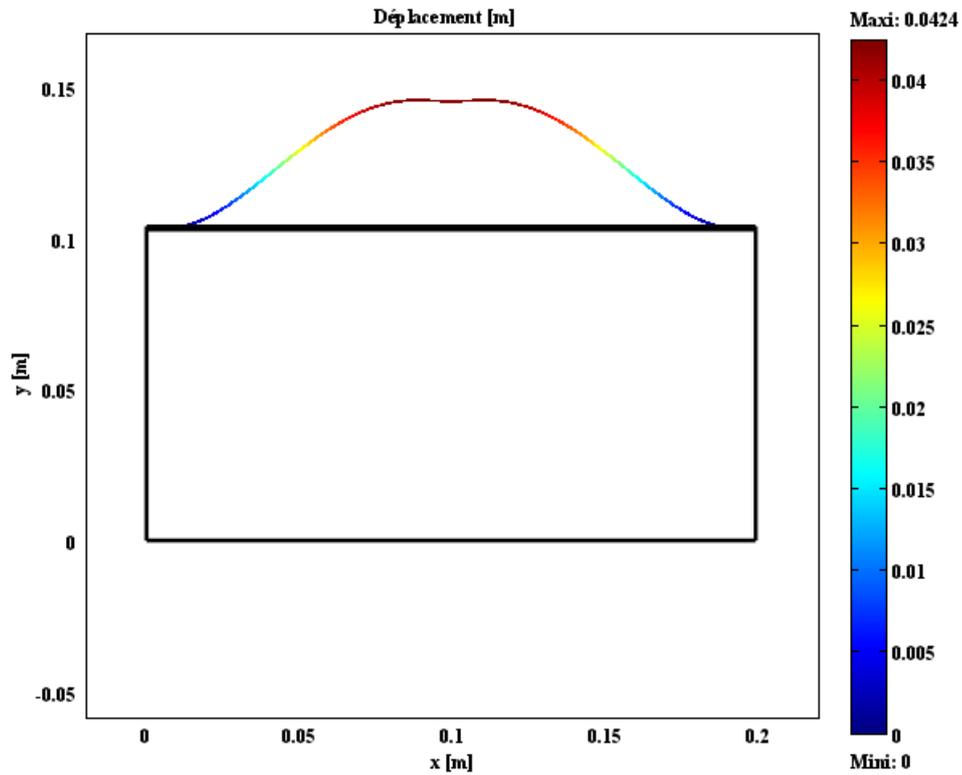


Figure III.8 : Déformation de la plaque en Aluminium- $P=10^5$  Pa

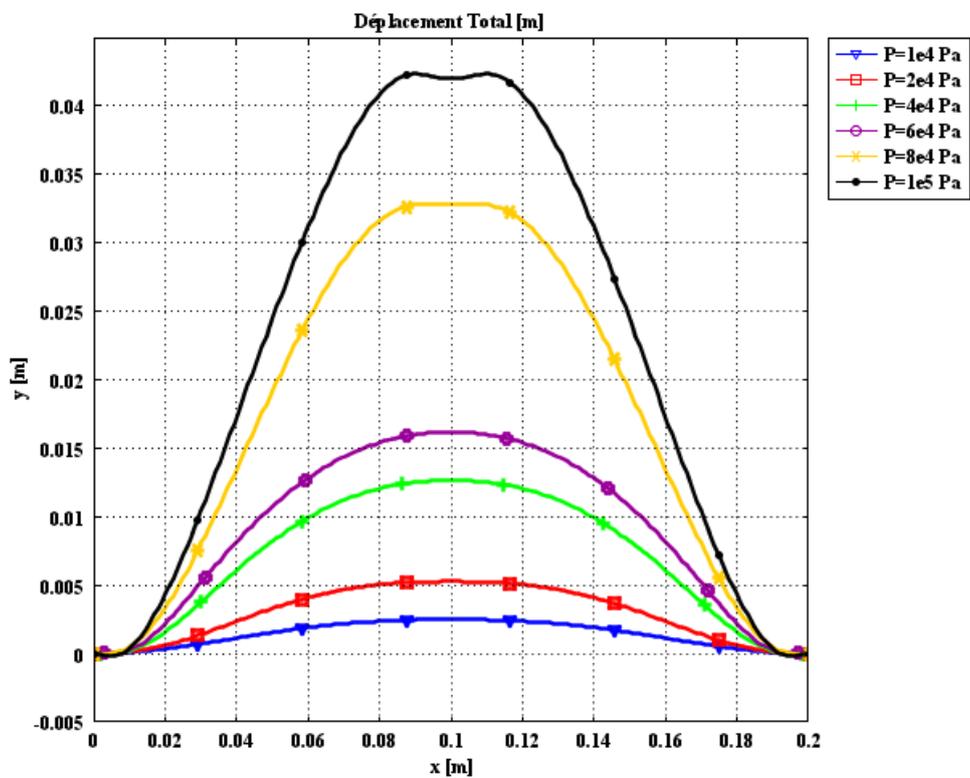
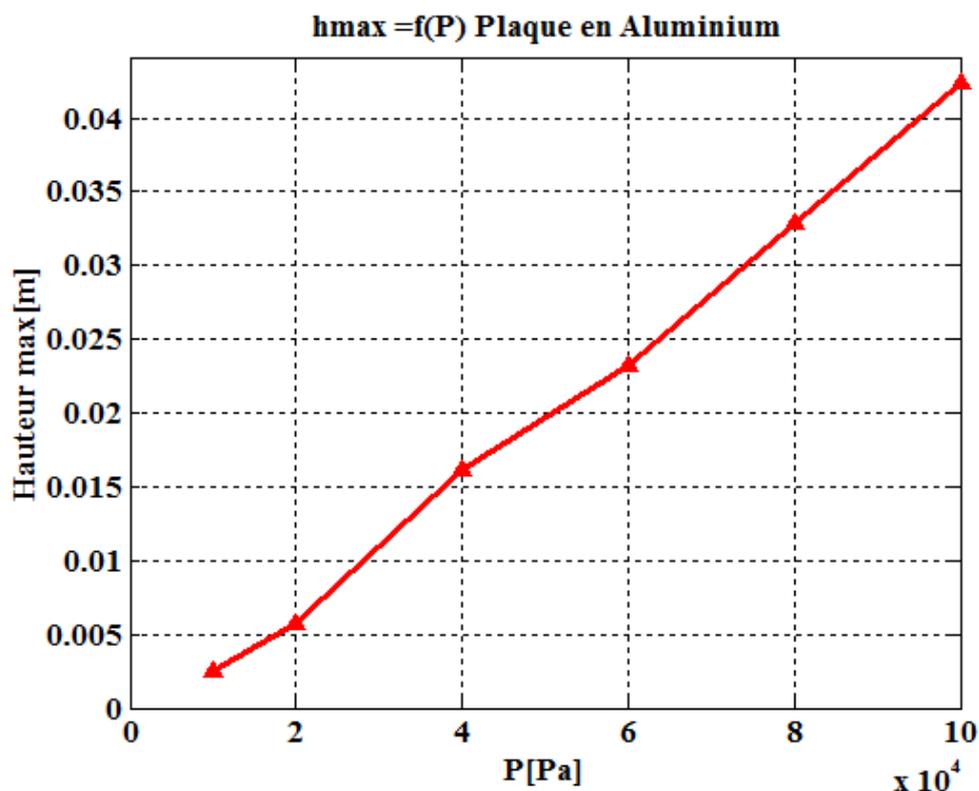


Figure III.9 : Déformation de la plaque en Aluminium avec différentes pressions



**Figure III.10 : Déplacement maximal de la plaque Al en fonction de la pression appliquée**

### Comparaison de la formabilité de certains matériaux sous FEH libre

Afin de comparer la formabilité de certains matériaux, sous FEH, en particulier l'Aluminium, le cuivre et l'acier, nous avons considéré, en plus de l'Aluminium, d'autres plaques de différents matériaux (Tableau III.1).

En analysant la déformation des plaques en cuivre sous différentes pressions électro hydrauliques (Figures III.11-17), nous remarquons clairement, que la formabilité du Cuivre est plus faible que celle de l'Aluminium.

De plus, le déplacement maximal des plaques en Cuivre est parfaitement proportionnel à la pression appliquée (Figure III.18).

Cependant, les figures (III.19-25) montrent que l'Acier (Structural steel) présente la plus faible formabilité avec le FEH.

D'autre part, la variation du déplacement maximal au niveau de la plaque en fonction de la pression appliquée, n'est pas uniforme (Figure III. 26). Ainsi, l'Acier se comporte de manière particulière sous FEH.

### Chapitre III : Applications numériques : résultats et interprétations

Cette étude comparative a permis de conclure que l'Aluminium est le matériau qui présente la meilleure formabilité sous FEH. En outre, nous pouvons remarquer que les trois formes obtenues avec les trois matériaux, sous une même pression  $P=10^5$  Pa, sont différentes (Figure III.27).

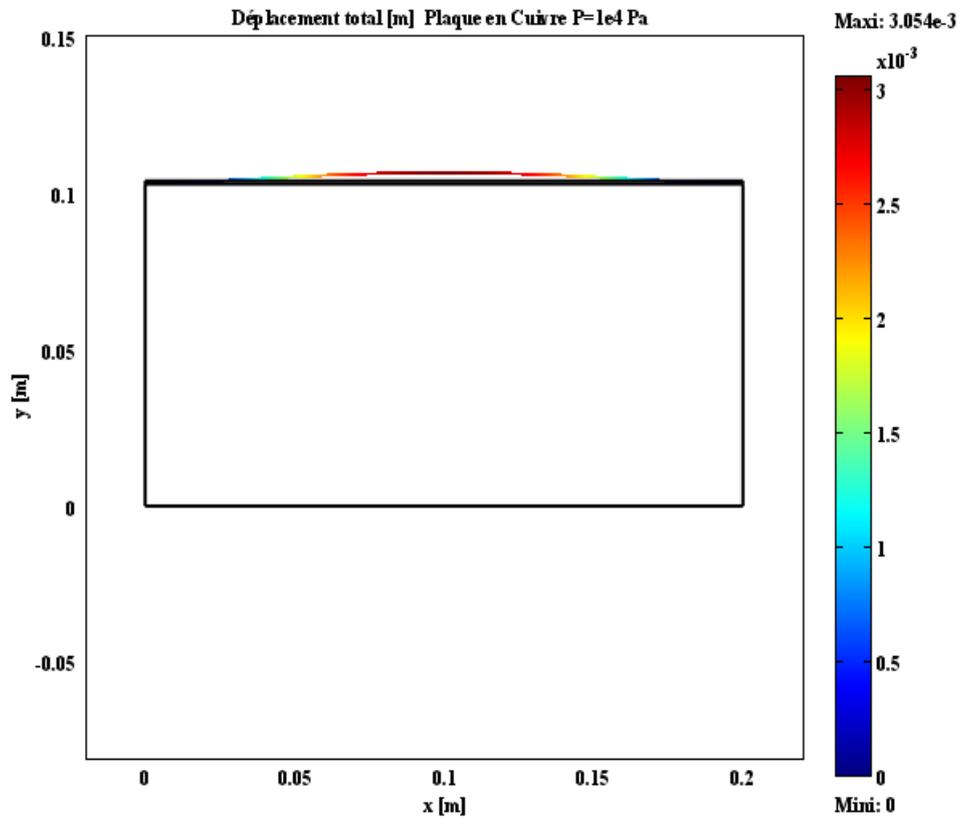


Figure III.11 : Déformation de la plaque en Cuivre -  $P=10^4$  Pa

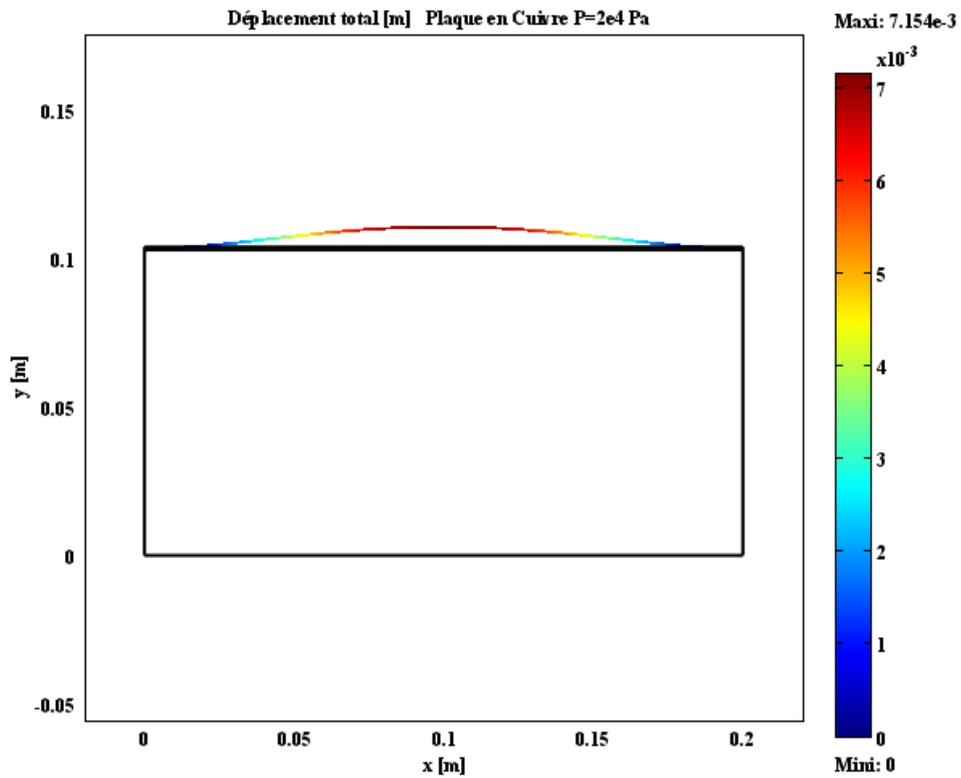


Figure III.12 : Déformation de la plaque en Cuivre -  $P=2 \cdot 10^4$  Pa

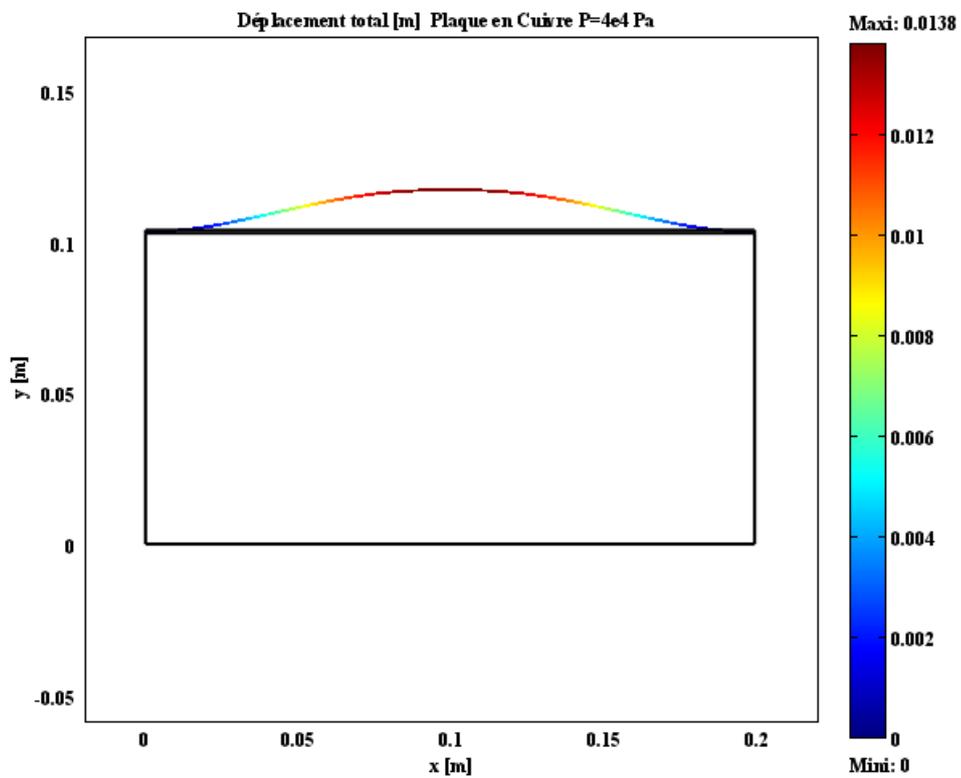


Figure III.13 : Déformation de la plaque en Cuivre -  $P=4 \cdot 10^4$  Pa

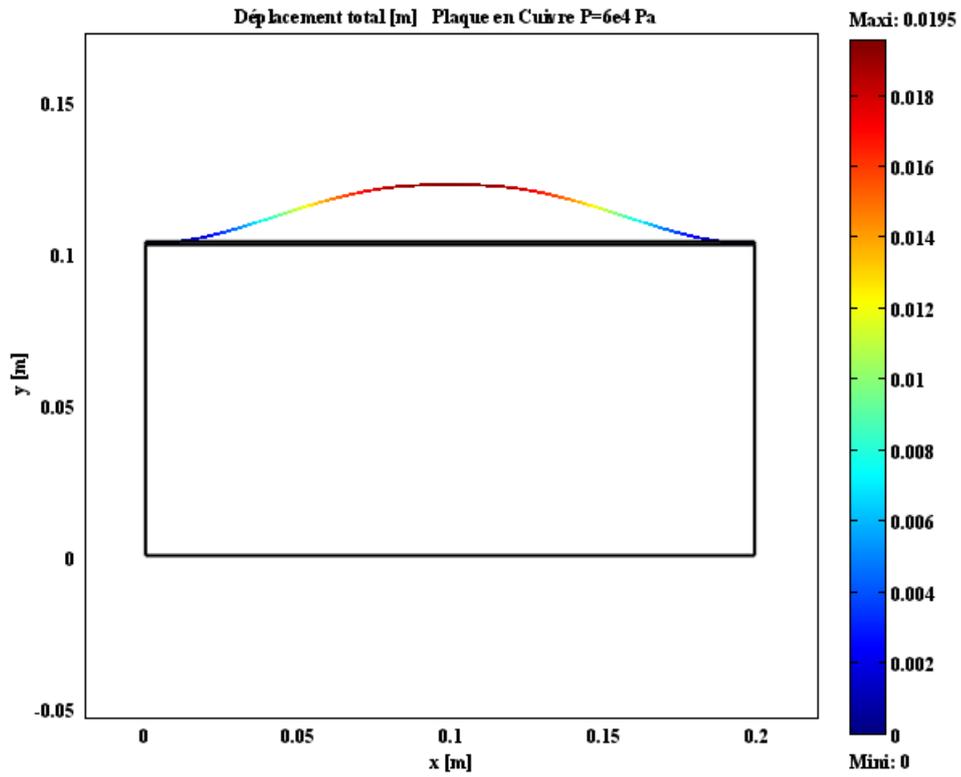


Figure III.14 : Déformation de la plaque en Cuivre -  $P=6.10^4$  Pa

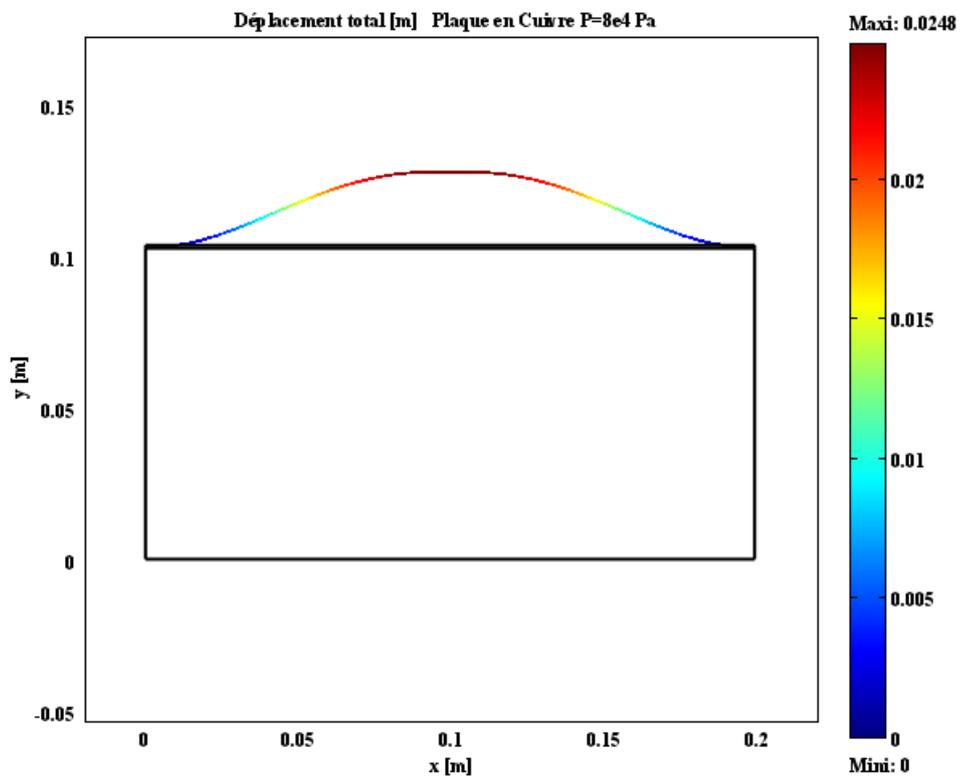


Figure III.15 : Déformation de la plaque en Cuivre -  $P=8.10^4$  Pa

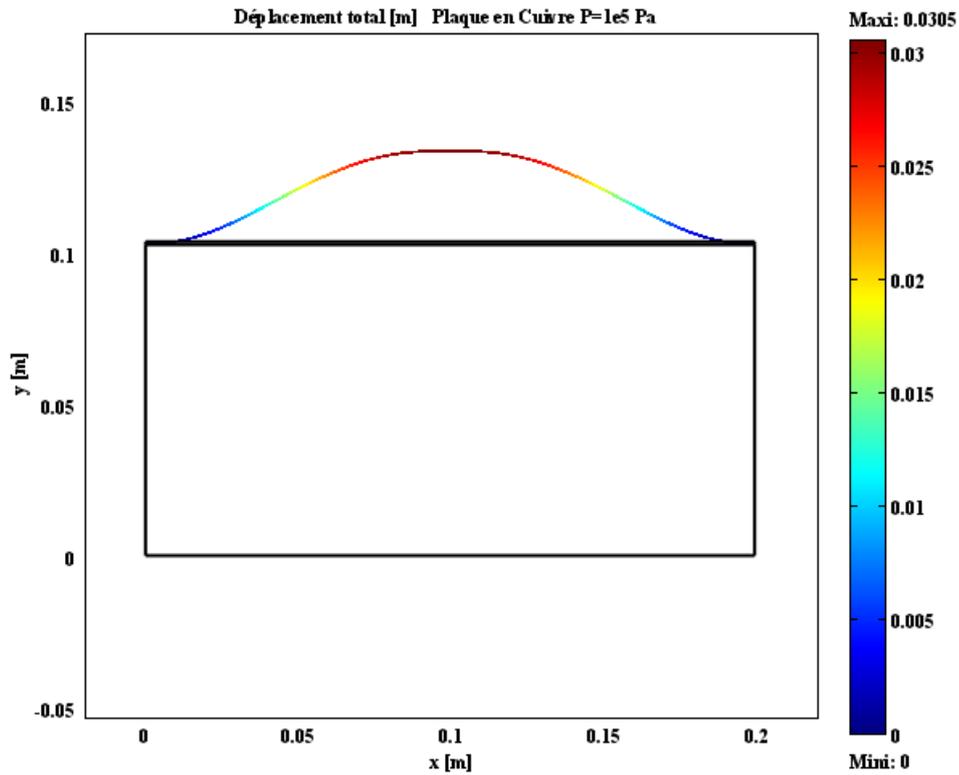


Figure III.16 : Déformation de la plaque en Cuivre -  $P=10^5$  Pa

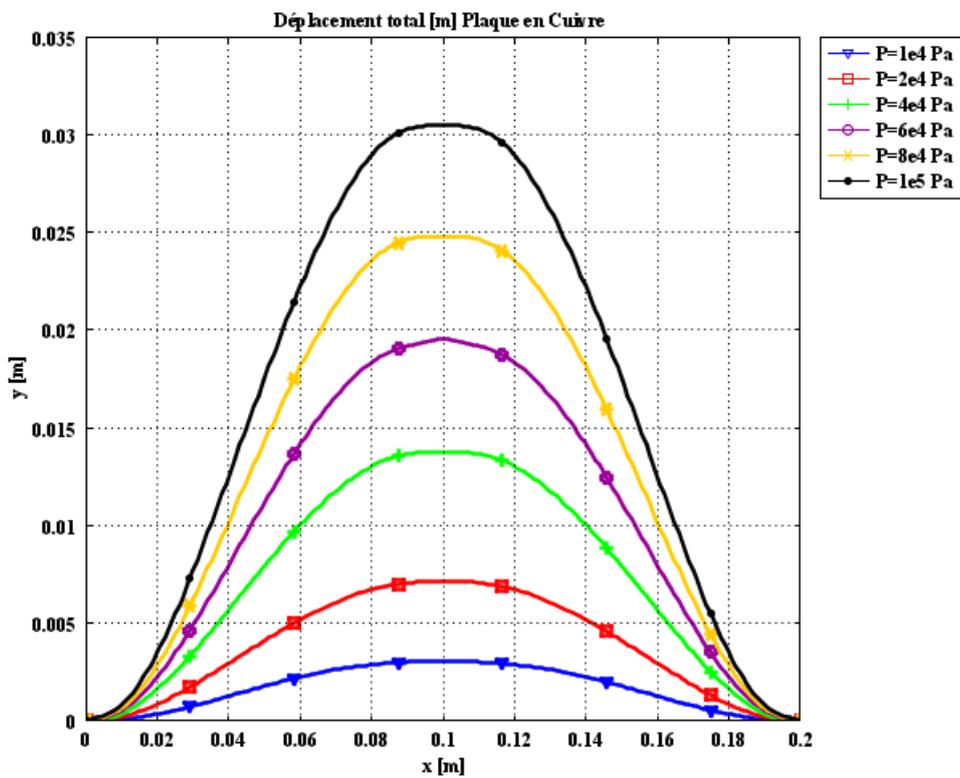


Figure III.17 : Déformation de la plaque en Cuivre avec différentes pressions

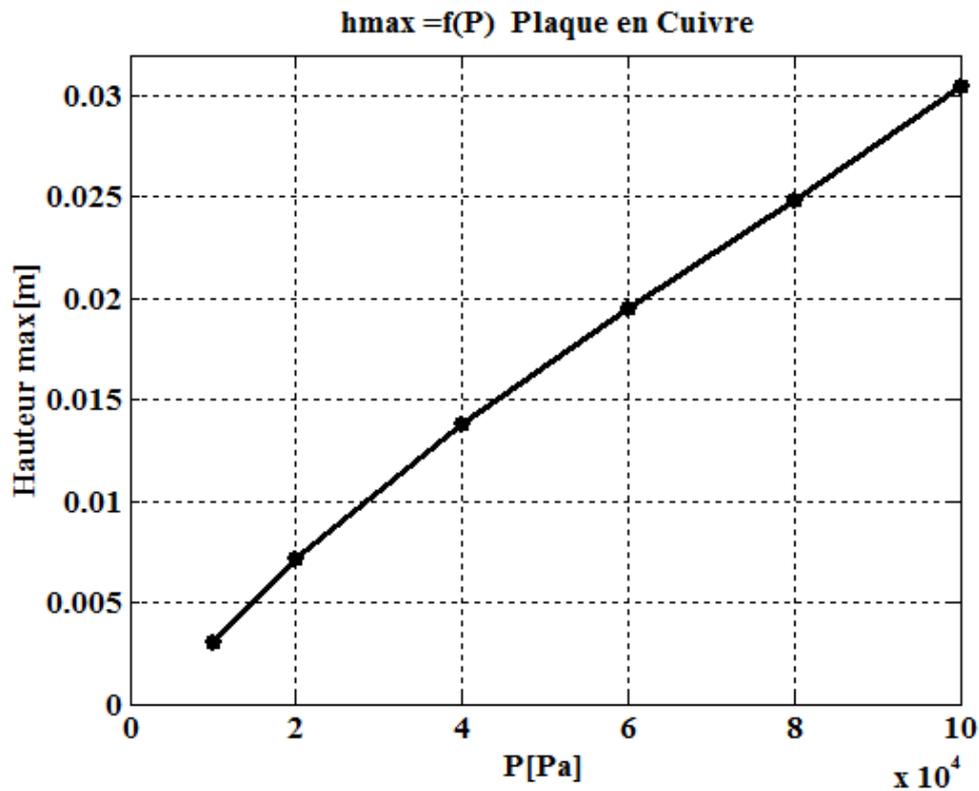


Figure III.18 : Déplacement maximal de la plaque Cu en fonction de la pression appliquée

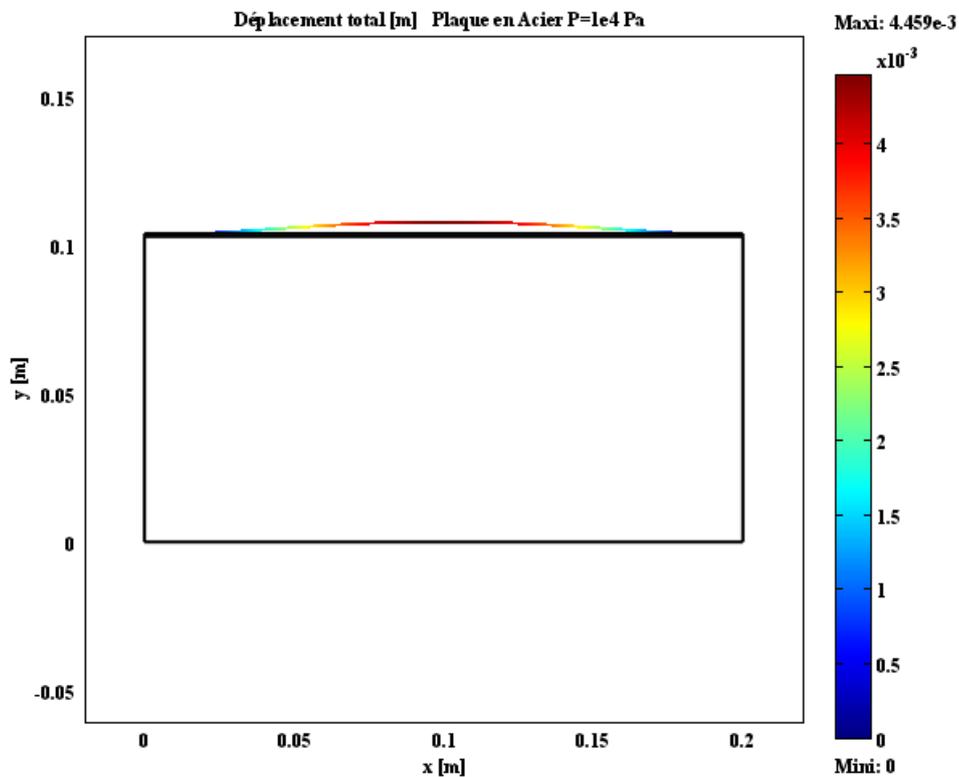


Figure III.19 : Déformation de la plaque en Acier - P=10<sup>4</sup> Pa

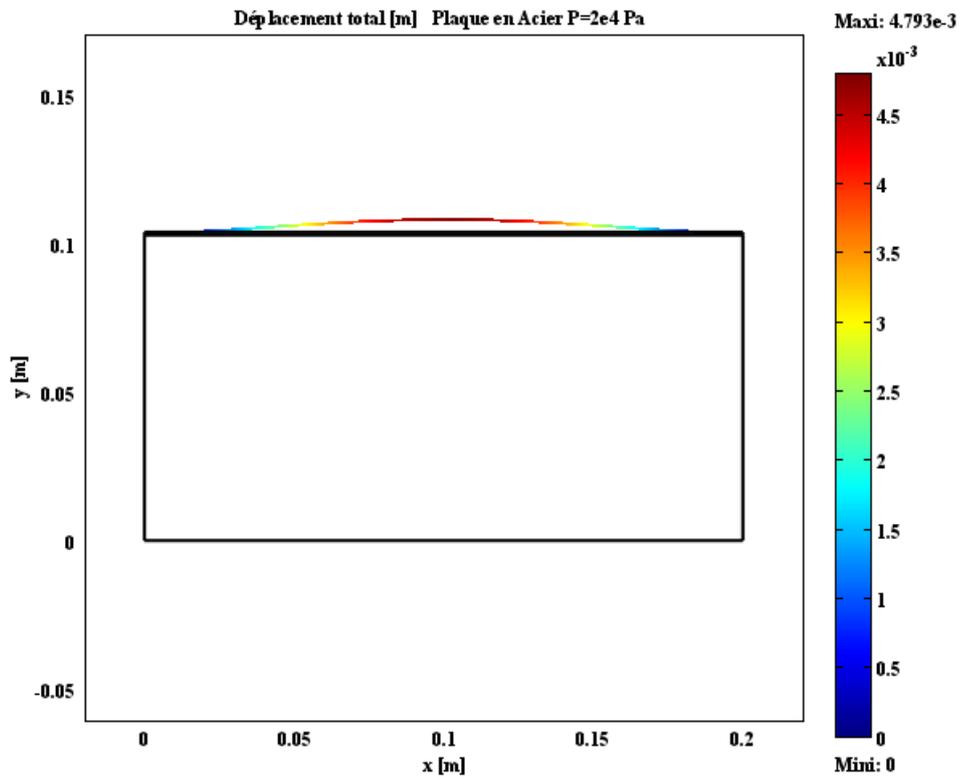


Figure III.20 : Déformation de la plaque en Acier-  $P=2 \cdot 10^4$  Pa

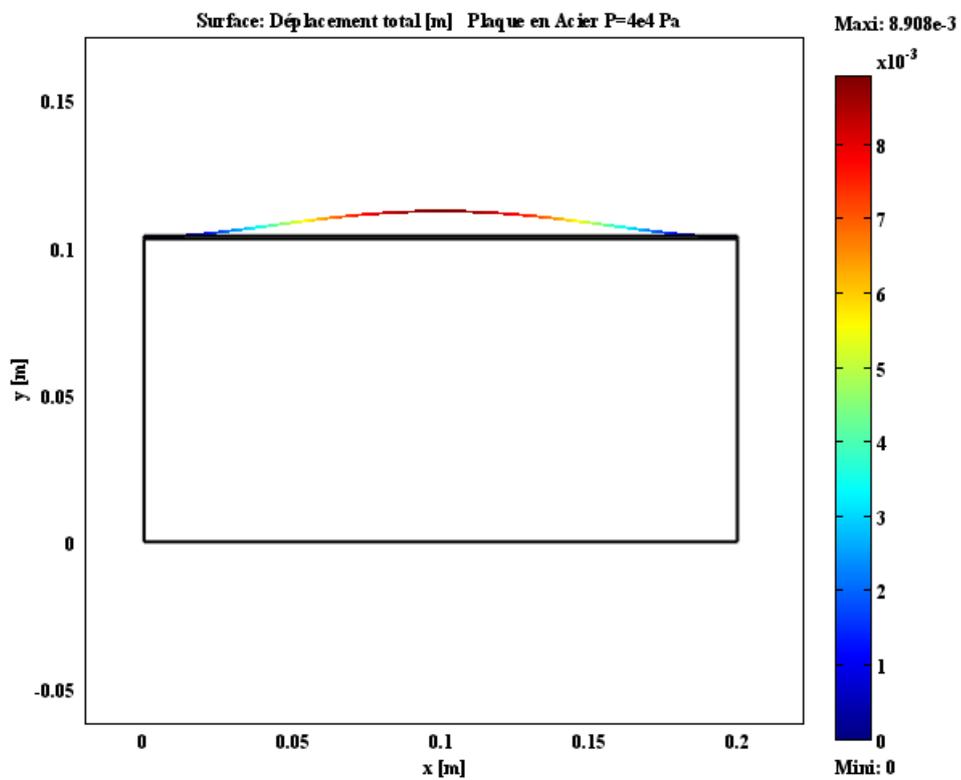


Figure III.21 : Déformation de la plaque en Acier -  $P=4 \cdot 10^4$  Pa

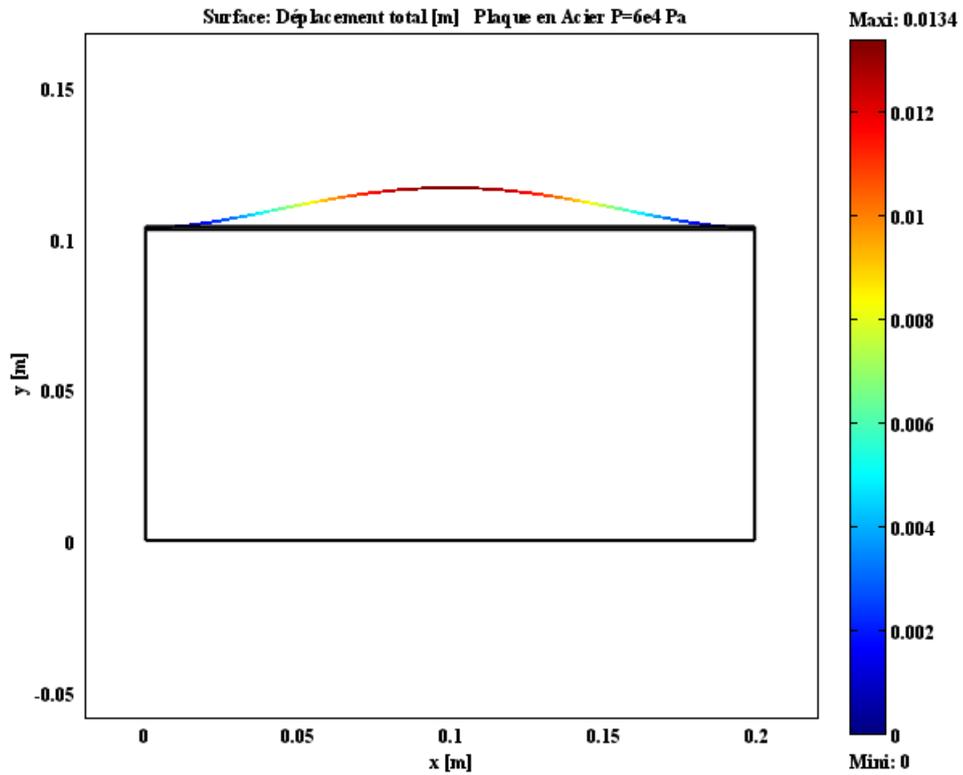


Figure III.22 : Déformation de la plaque en Acier -  $P=6 \cdot 10^4$  Pa

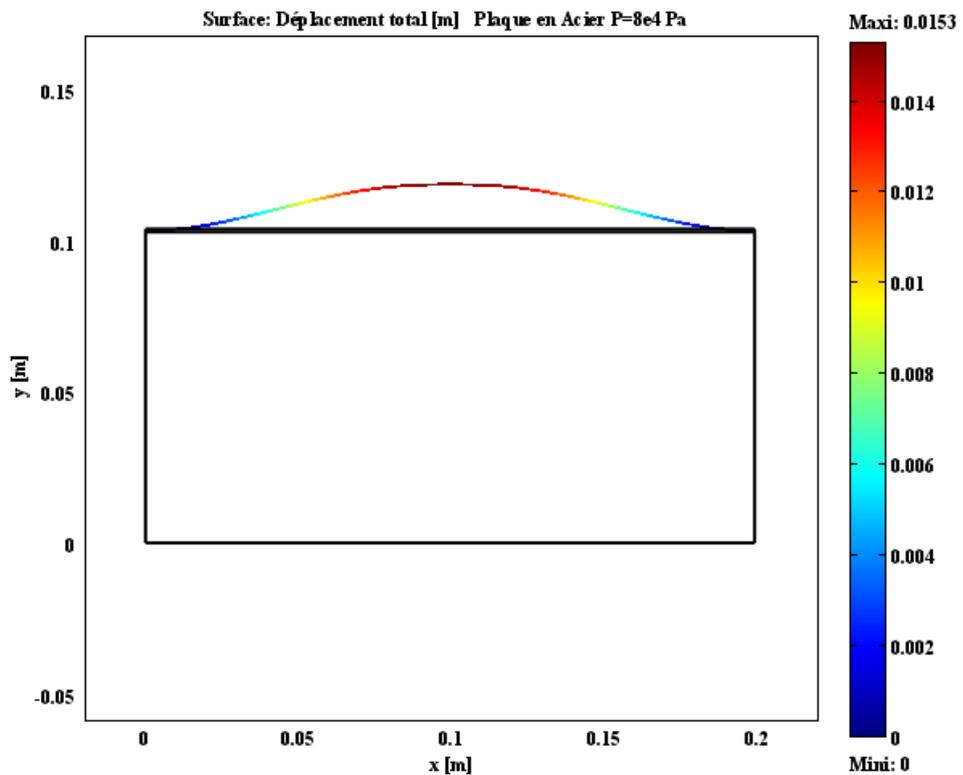


Figure III.23 : Déformation de la plaque en Acier -  $P=8 \cdot 10^4$  Pa

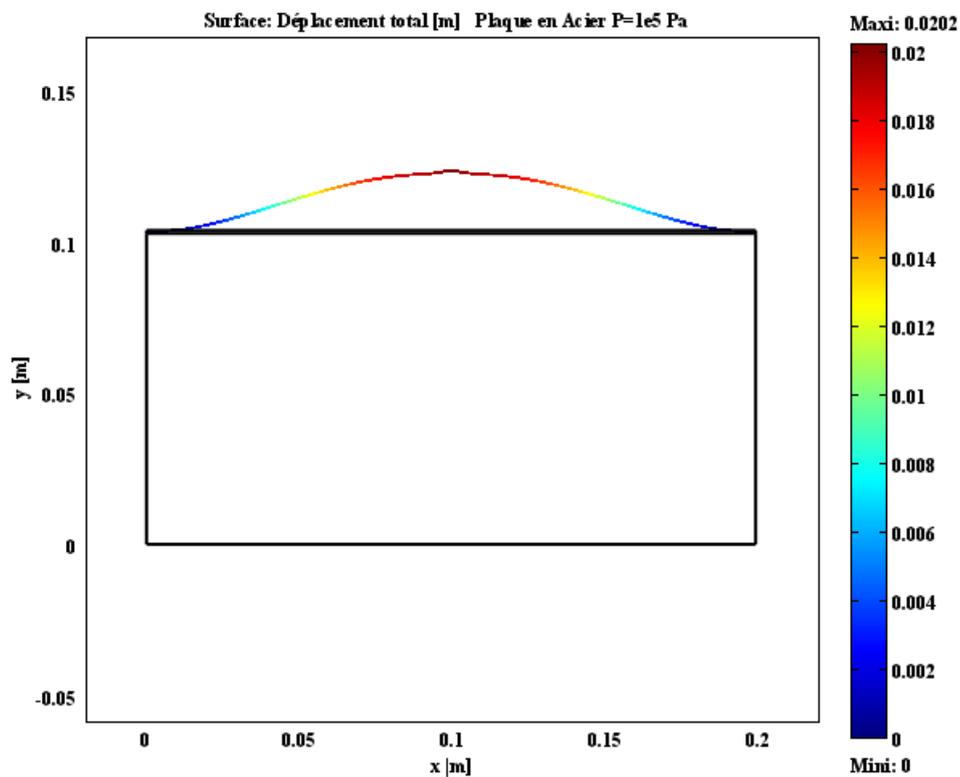


Figure III.24 : Déformation de la plaque en Acier -  $P=10^5$  Pa

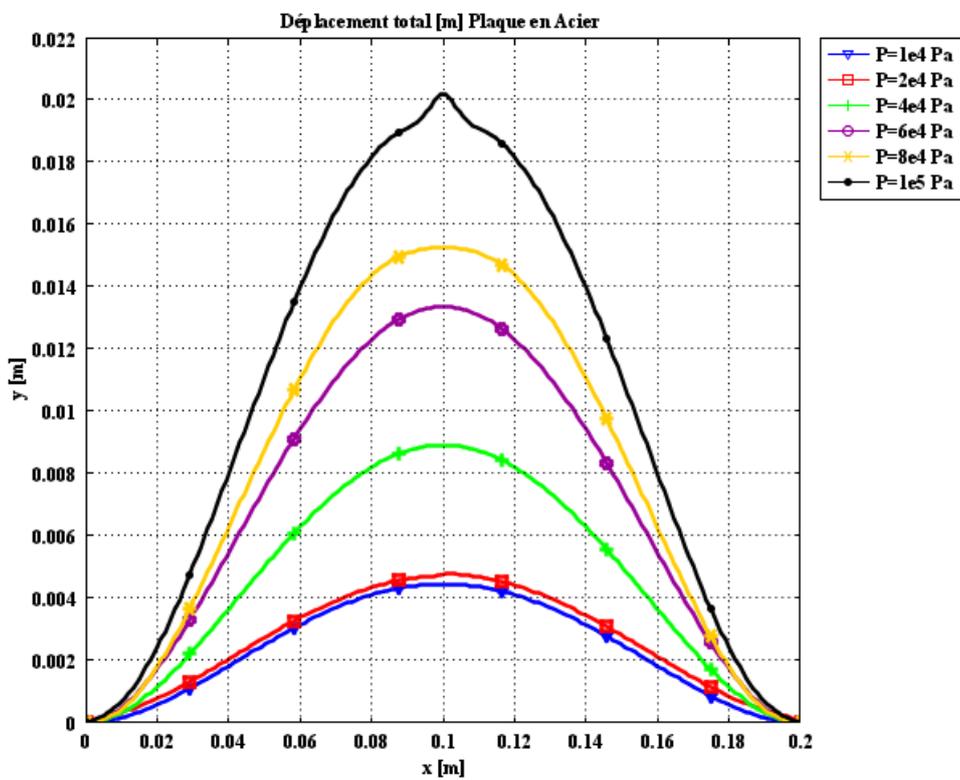


Figure III.25 : Déformation de la plaque en Acier avec différentes pressions

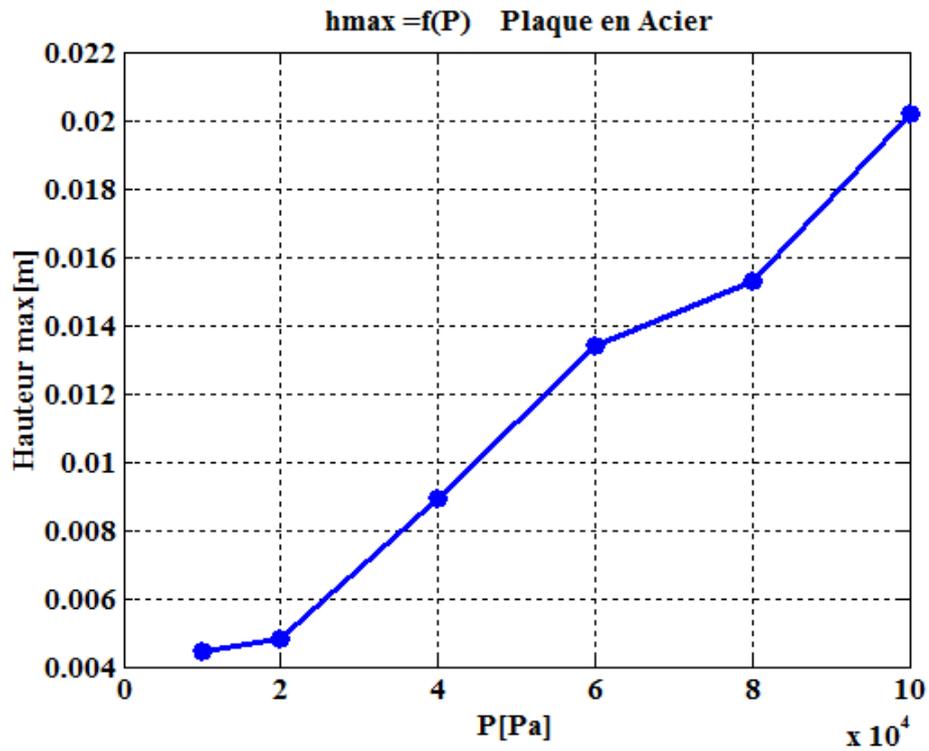


Figure III.26 : Déplacement maximal de la plaque en Acier en fonction de la pression appliquée

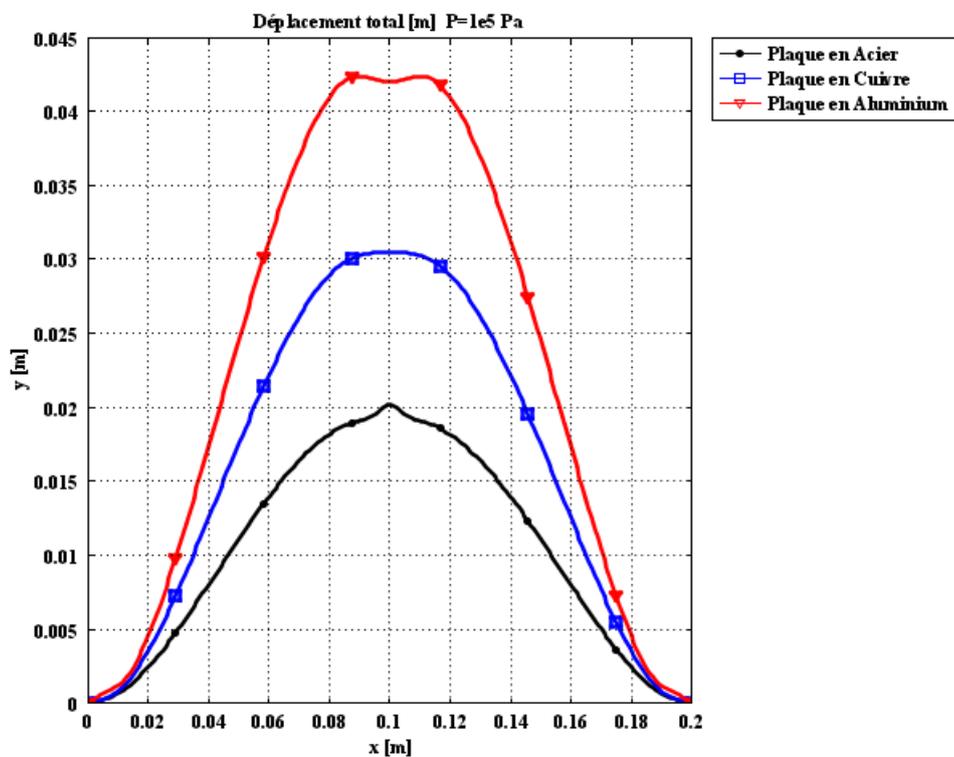


Figure III.27 : Déformation des différentes plaques -  $P=10^5$  Pa

### Formage électro hydraulique de plaques avec matrices

Dans une deuxième application, nous avons essayé de simuler le FEH de deux plaques, l'une en cuivre et l'autre en Aluminium, en utilisant des matrices de différentes formes.

Les figures (III. 28-31) montrent les déformations des plaques avec deux matrices de formes différentes : matrice conique et matrice conique tronquée, avec une même pression de  $7 \cdot 10^4$  Pa. Nous pouvons remarquer que la plaque n'épouse pas parfaitement la forme de la matrice, surtout dans le premier cas. Ce ci est validé expérimentalement [36].

En effet, Melander et al [36] ont évalué la précision de forme à la surface inférieure plate, mesurant les distances verticales entre la surface inférieure de la plaque et la matrice, et cela pour différents aciers (Figure III. 32). Ces résultats expérimentaux montrent, dans tous les cas étudiés (différents aciers), un écart entre la plaque déformée et la matrice [36].

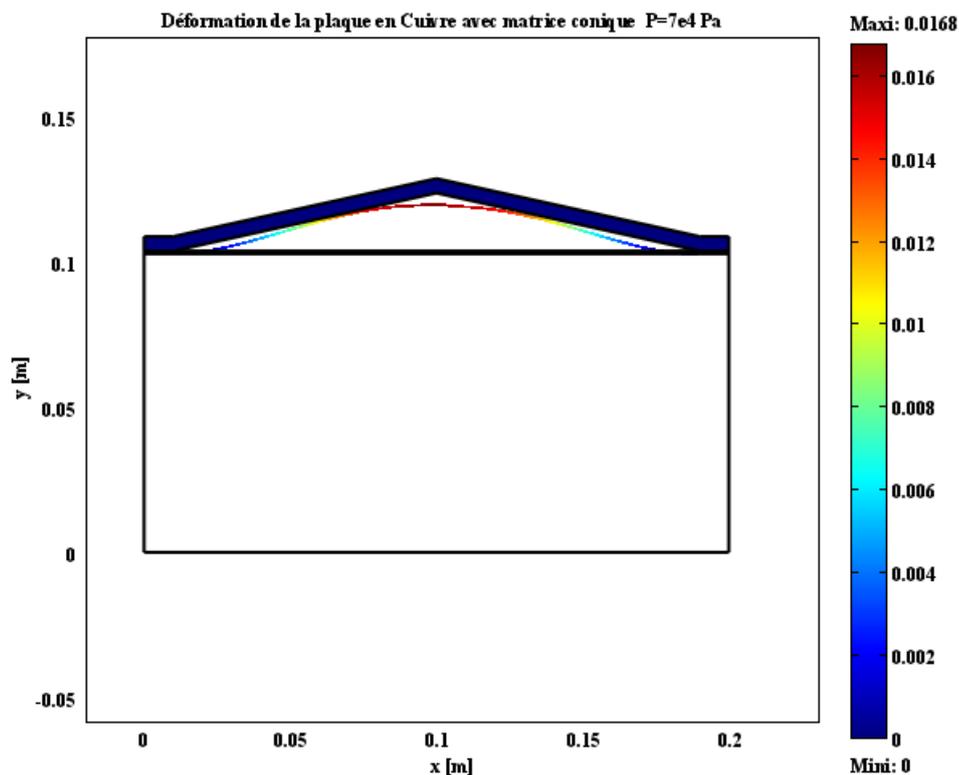


Figure III.28 : Déformation de la plaque en Cu - matrice conique -  $P=7 \cdot 10^4$  Pa

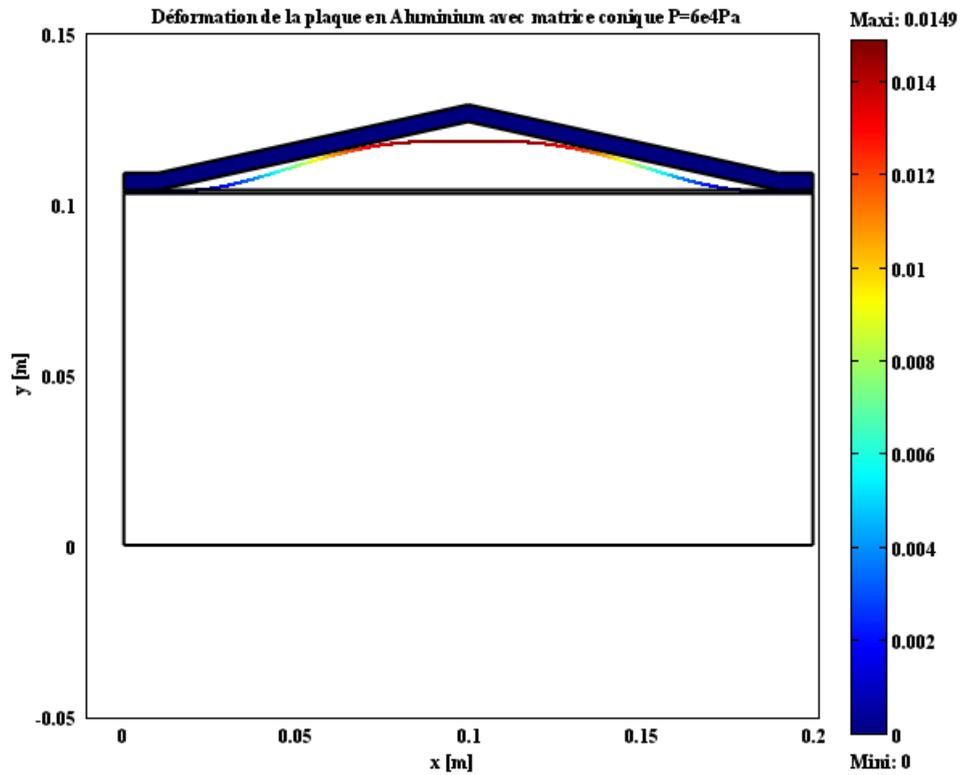


Figure III.29 : Déformation de la plaque en Al - matrice conique -  $P=6.10^4 Pa$

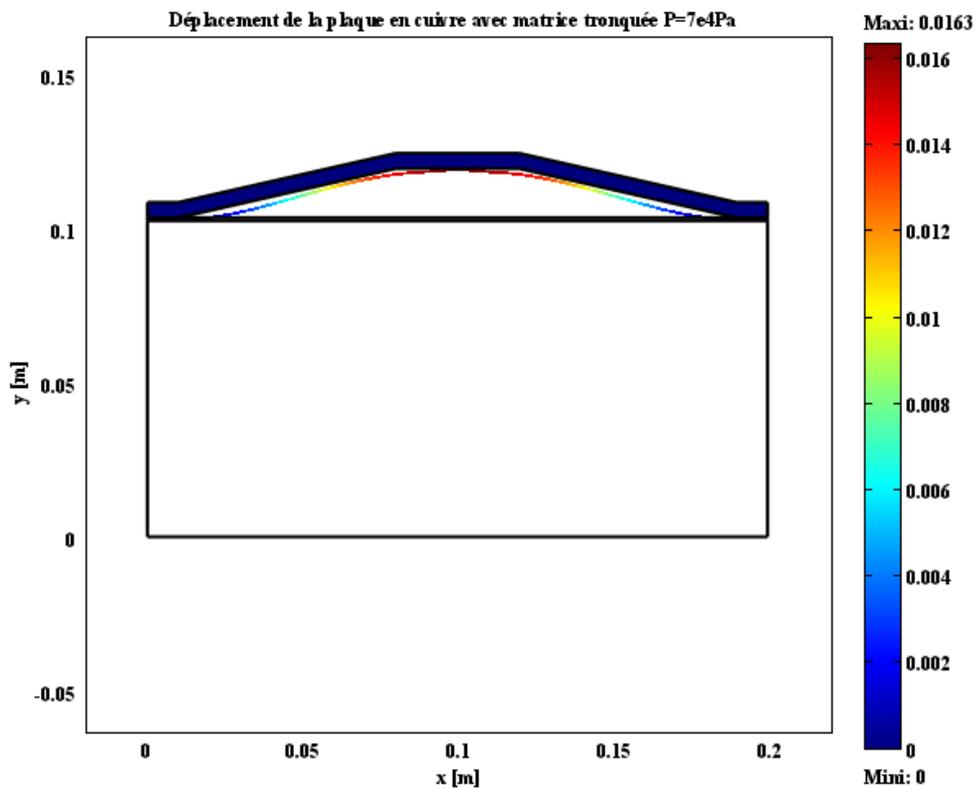


Figure III.30 : Déformation de la plaque en Cu - matrice tronquée -  $P=7.10^4 Pa$

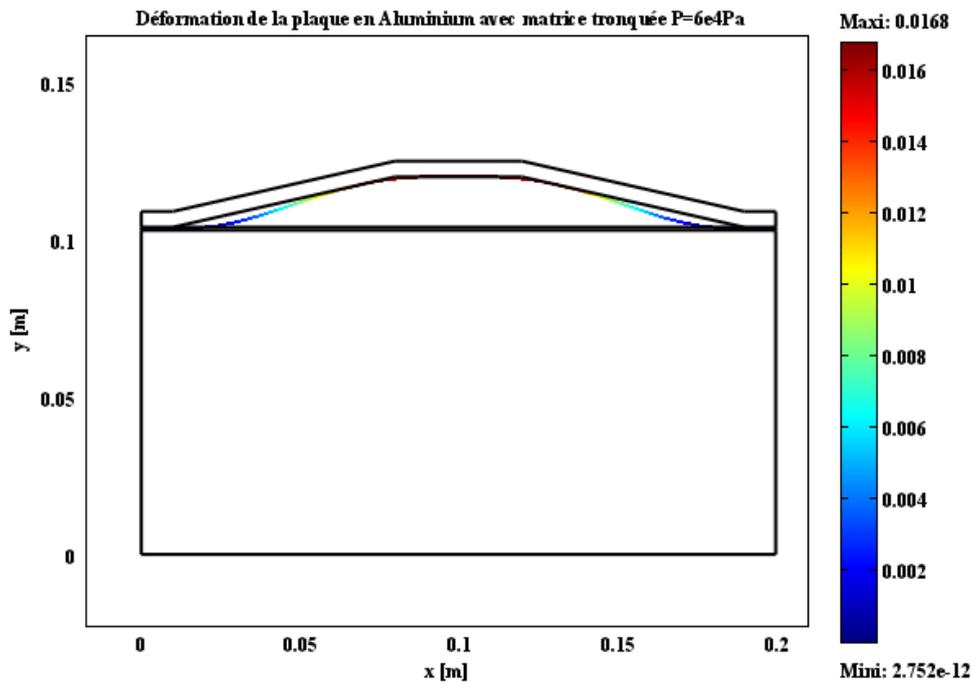


Figure III.31 : Déformation de la plaque en Al - matrice tronquée -  $P=6.10^4$  Pa

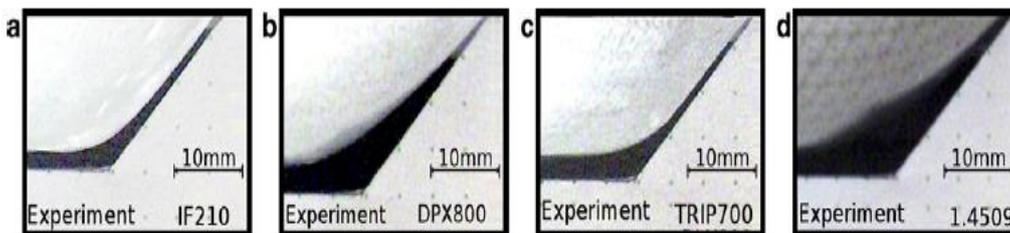


Figure III.32 : Distances entre plaques et matrices au niveau de l'extrémité [36]

### Evolution temporelle du FEH de plaques

Afin d'aborder une étude temporelle de la déformation d'une plaque par FEH, nous avons considéré une pression électrique sous forme sinusoïdale (Figure III.33). L'évolution temporelle de la déformation de la plaque simulée numériquement est montrée sur la figure (III.34)

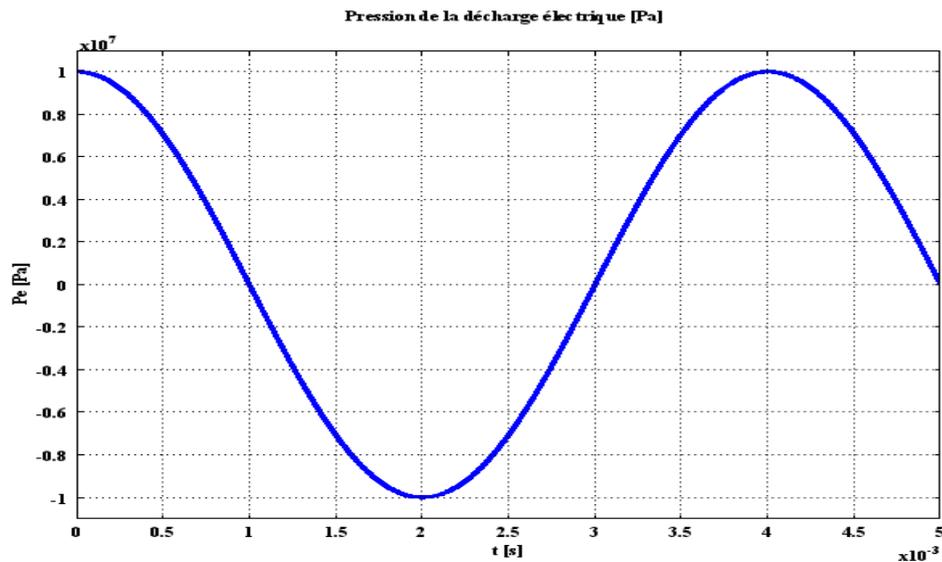


Figure III.33: Variation temporelle de la pression considérée numériquement

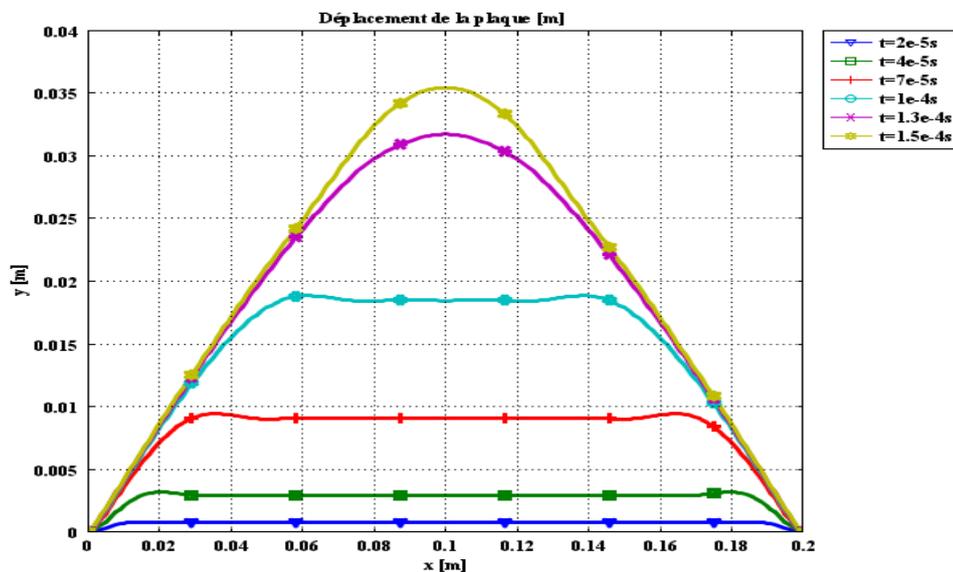


Figure III.34: Evolution temporelle de la déformation de la plaque sous pression variable

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus numériquement pour les applications d'EHF, Deux applications ont été traitées, le FEH libre et le FEH avec matrices en utilisant trois matériaux différents Dans ce travail, Le modèle de simulation du FEH décrit l'effet de la décharge électrique au niveau des électrodes comme une pression générée (différentes valeurs de pressions) au point milieu des électrodes. De plus, une comparaison entre le comportement mécanique et la formabilité de différents matériaux a été abordée.

### Conclusion générale

Notre objectif visait à modéliser numériquement la mise en forme de pièces industrielles par le formage électro-hydraulique. Pour atteindre notre objectif, comme première étape, une recherche bibliographique a été menée et nous a permis de nous familiariser avec le procédé de FEH et de maîtriser les phénomènes mis en jeu pour pouvoir entamer la seconde partie qui consiste au développement de modèles numériques permettant la simulation de plusieurs applications industrielles de formage électro-hydraulique. Ainsi, nous avons opté pour l'utilisation de l'environnement COMSOL, ce dernier grâce à ses avantages (logiciel permettant le couplage fort de plusieurs modèles multi physiques) nous a permis d'étudier et d'analyser des applications industrielles utilisant ce processus. Les résultats obtenus sont satisfaisants et en bonne concordance avec ceux trouvés expérimentalement. A la fin, plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- Ce procédé de FEH est utilisé pour le formage de tôles ou de tubes métalliques électriquement conducteurs et non conducteurs.
- L'aluminium semble être le matériau le plus prometteur avec ce processus, il offre le plus d'avantages grâce à son comportement mécanique sous l'effet de la pression de la décharge électrique.
- l'épaisseur et les propriétés physiques des matériaux influent sur le taux de déformation des plaques métalliques.
- la distance électrodes-pièce est un paramètre majeur dans ce processus de déformation.
- Un autre paramètre important est la tension de charge où plus exactement l'énergie du générateur de formage.
- les niveaux des déformations plastiques effectives sont globalement plus élevés dans le FEH.

A l'avenir, certaines améliorations dans la modélisation du formage électro-hydraulique, peuvent être menées. Tout d'abord, il convient de mentionner que, bien que notre modèle numérique reproduise efficacement les résultats expérimentaux, certains phénomènes physiques qui ont été négligés dans nos simulations par exemple la dilatation thermique pourraient donner de meilleurs résultats. D'autre part, il serait intéressant de prendre en compte l'effet de la propagation de l'onde de choc électrique dans le milieu de FEH.

## Conclusion générale

---

En outre, nous observons que notre modèle peut aussi être étendu aux applications tridimensionnelles. Il serait aussi intéressant, de développer un modèle tridimensionnel similaire pour les applications industrielles : De nombreux procédés de FEH sont souvent non bidimensionnels et sont mieux traités dans un environnement tridimensionnel.

Différentes géométries complexes peuvent être testées pour valider les capacités des modèles numériques pour les applications industrielles.

D'autres recherches peuvent être poursuivies pour acquérir des connaissances profondes de la dynamique de déformation. Cette étude marque la voie à des études plus détaillées sur les différents aspects de ce processus de FEH. De nouveaux domaines de recherche sont ouverts pour exploration.

## Références Bibliographiques

---

### Références Bibliographiques

[1] I. Hafsaoui, "Étude et Modélisation numérique Tridimensionnelle des Effets Mécaniques du Champ Electromagnétique", thèse de doctorat de l'université du Jijel, 2008.

[2] E.J. Bruno, "*High-Velocity Forming Of Metals*", Dearborn, MI, USA, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 1968.

[3] R. Davies and E.R. Austin, "*Development In High Speed Metal Forming*", New York, USA, Industrial Press Inc., 1970.

[4] Glenn S. Daehn, "High Velocity Sheet Metal Forming: State of the Art and Prognosis for Advanced Commercialization", Department of Materials Science and Engineering, the Ohio State University, 2006.

[5] J. Varis and H. Martikka, "Prototyping of 3D Sheet metal parts using electro hydraulic forming", J.D. Thomas et al. *ActaMaterialia*, 55, "Forming limits for electromagnetically expanded Aluminum alloy", 2863–2873, 2007.

[6] P. L.Kapitza, "A method of producing strong magnetic fields", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* **105** (734), pp. 691–710, 1924.

[7] G. Harvey, & D Brower, "Metal forming device and method". US Patent 2,976,907, 1961.

[8] V. S. Balanethiram, "Hyperelasticity: enhanced formability of sheet metals at high workpiece velocity", PhD thesis, Ohio State University, 1996.

[9] G. Zittel, "A historical review of high speed metal forming", in '4th International Conference on High Speed Forming, 2010.

[10] L. Yutkin, "The electrohydraulic effect and its application in industry", Leningrad. , 1986.

[11] G. S. Daehn, "High velocity sheet metal forming: state of the art and prognosis for advanced commercialization", *Department of Materials Science and Engineering, the Ohio State University*, 2002.

[12] S. Golovashchenko, "Electrohydraulic forming of near-net shape automotive panels", Technical Report DOE Award Number: DE-FG36-08GO18128, Ford Motor Company, MD3135, 2101 Village Rd., Dearborn, MI 48121, 2013.

## Références Bibliographiques

---

[13] V. Psyk, D. Risch, B. Kinsey, A. Tekkaya, M. Kleiner, "Electromagnetic forming - a review", *Journal of Materials Processing Technology* 211, pp. 787–829, (2011).

[14] ANNE-CLAIRE JEANSON "identification de comportement mécanique sous sollicitation dynamique extrême développement d'une stratégie innovante appliquée au magnétoformage et au formage électro-hydraulique", THÈSE DE DOCTORAT de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres PSL Resarci University, 2016.

[15] A. Rohatgi, E. V. Stephens, R. W. Davies, M. T. Smith, A. Soulami, S. Ahzi, , "Electrohydraulic forming of sheet metals: Free-forming vs. conical-die forming", *Journal of Materials Processing Technology* 212(5), pp. 1070–1079, 2012.

[16] L.A. Yutkin, "Electrohydraulic Effect", Moscow, Russia, 1955.

[17] E.J. Bruno, "High-Velocity Forming Of Metals", Dearborn, MI, USA, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 1968.

[18] R. Davies and E.R. Austin, *Development In High Speed Metal Forming*, (New York, USA, Industrial Press Inc. 1970).

[19] J.E. Sandford, "High Velocity Takes Off Again," *Iron Age* (3), 1969.

[20] V.S. Balanethiram, and G.S. Daehn, "Hyperplasticity: increased forming limits at high workpiece velocity". *Scripta Metallurgica et Materialia*, 30, 515-520, 1994.

[21] S.F. Golovashchenko and V.S. Mamutov. "Electrohydraulic Forming of Automotive Panels," (In: Proc. of 6th Global Innovations Symposium: Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries, TMS, San Francisco, CA, USA, February 13-17, 65-70, 2005.

[22] V.J. Vohnout, G. Fenton and G.S. Daehn, "Pressure Heterogeneity in Small Displacement Electrohydraulic Forming Process", (In: Proc. of 4 International Conference on High Speed Forming, Columbus, OH, USA, March 9-10, 65-74, 2010.

[23] Cours Réalisé par : Dr : El hachemi BAHLOUL Année universitaire 2017/2018  
Matière : Techniques de Fabrication Conventionnelles et Avancées / Spécialité :  
MECANIQUE- Master 1 Option : Construction Mécanique /UNIVERSITE BATNA 2  
FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

[24] DOE Award Number: DE-FG36-08GO18128 Project Period: September 2008 through September 2013 Electrohydraulic Forming of Near-Net Shape Automotive Panels.

## Références Bibliographiques

---

[25] Brevet d'invention inventeurs : AVRILAUD GILLES et MERCIER ROMAIN anglaise « procédé de formage électro-hydraulique et dispositif associé » institut national de la propriété industrielle (France) .

[26] Institute national of technology ALLAHABAD –INDIA  
<https://www.slideshare.net/EmeraldPolytechnic/electrohydraulic-forming-and-electromagnetic-forming>

[27] A.SOUILAH "étude de mise en forme des pièces industriels par le champ électromagnétique" thème master en électrotechnique université de Jijel.

[28] INGE L. RYHMING, "Dynamique des fluides", Presses polytechniques et universitaires Rommandes, Lausanne, 1991.

[29] CUVELIER, J. DESCLOUX, J. RAPPAZ, "Element d'équations aux dérivées Partielles pour ingénieurs \_ Théories et méthodes numériques " t2, Presses polytechniques Rommandes ,1988.

[30] B N. Dikarev, "Viscosity dependence of dielectric liquids on electric field " IEEE Transactions on electrical insulation vol 26, n°6, December 1991.

[31] Abdennabi Djahida, « Etude comparative de la magnéto-convection entre un métal liquide et un nanofluide », Université de Béchar, 2015.

[32] K.F.V. Wong, B.L. Bon, S. Vu, S. Samedi, "Study of nanofluid natural convection phenomena in rectangular enclosures", ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Proceedings 6 3–13, 2008.

[33] Seghir Mouad, « Etude comparative entre un concentrateur solaire parabolique et cylindro-parabolique », mémoire de Master, Université de Béchar, 2018.

[34] J.L.Batoz and Dhatt G. "Modélisation des structures par éléments finis", Hermès, 1990. Volume 1 : Solides élastiques, Volume 2 : Poutres et plaques, Volume 3 : Coques. (43, 44, 45, 57)

[35] <http://www.comsol.com>,

[36] A. Melander, A. Delic, A. Björkblad, P. Juntunen, L. Samek, L. Vadillo, "Modelling of Electro hydraulic Free and Die Forming of Sheet Steels", Int J Mater Form 6, pp. 223–231, 2013.

## RESUME

Le formage électrohydraulique (FEH) est basé sur l'effet électrohydraulique : un phénomène complexe lié à la décharge haute tension à l'intérieur de la chambre remplie d'eau. L'onde de choc résultante dans le liquide se propage vers la pièce et accélère la plaque vers la matrice. La simulation numérique du processus de FEH a été abordée utilisant le code COMSOL MULTIPHYSICS. Les modèles numériques ont été développés pour simuler le FEH libre de plaques minces ainsi que le FEH utilisant des matrices de différentes formes. Une comparaison des résultats numériques avec ceux expérimentaux a été effectuée.

## ABSTRACT

Electrohydraulic forming (EHF) is based upon the electro-hydraulic effect: a complex phenomenon related to the high voltage discharge inside the water filled chamber. The resulting shockwave in the liquid is propagated towards the blank, and accelerates the sheet metal blank toward the die. Numerical simulation of EHF processes was developed based upon COMSOL MULTIPHYSICS code. The model was used to simulate free sheet EHF and using dies of different forms. Comparison of the numerical results with experimental ones was performed,

### ملخص

يعتمد التشكيل الكهروهيدروليكي (EHF) على التأثير الكهروهيدروليكي: ظاهرة معقدة تتعلق بتفريغ الجهد العالي داخل الغرفة المملوءة بالماء. تنتشر موجة الصدمة الناتجة في السائل باتجاه الصفيحة المعدنية و تسرعها نحو القالب. تم تطوير محاكاة عددية لعمليات EHF بناءً على كود .

COMSOL MULTIPHYSICS تم استخدام النموذج لمحاكاة التشكيل

الكهروهيدروليكي الحر لصفائح معدنية وباستخدام قوالب بأشكال مختلفة. تم إجراء مقارنة بين النتائج العددية والنتائج التجريبية.