



HAL
open science

Etude expérimentale et numérique du procédé de formage incrémental à chaud de tôles en titane

Badreddine Saidi

► **To cite this version:**

Badreddine Saidi. Etude expérimentale et numérique du procédé de formage incrémental à chaud de tôles en titane. Matériaux et structures en mécanique [physics.class-ph]. Université de Technologie de Troyes; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2018. Français. NNT : 2018TROY0025 . tel-03211429

HAL Id: tel-03211429

<https://theses.hal.science/tel-03211429>

Submitted on 28 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse
de doctorat
de l'UTT

Badreddine SAIDI

Étude expérimentale et numérique du procédé de formage incrémental à chaud de tôles en titane



Spécialité :
Matériaux, Mécanique, Optique et Nanotechnologie

2018TROY0025

Année 2018

Thèse en cotutelle avec l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis - Tunisie



THESE

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES

Spécialité : MATERIAUX, MECANIQUE, OPTIQUE ET NANOTECHNOLOGIE

présentée et soutenue par

Badreddine SAIDI

le 27 juillet 2018

Étude expérimentale et numérique du procédé de formage incrémental à chaud de tôles en titane

JURY

M. M. SOULA	PROFESSEUR	Président
M. T. BEN ZINEB	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
M. A. CHEROUAT	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Examineur
Mme L. GIRAUD-MOREAU	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Directrice de thèse
M. T. HASSINE	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Rapporteur
M. R. NASRI	PROFESSEUR	Directeur de thèse

Personnalité invitée

M. M. AYADI	MAITRE DE CONFERENCES - HDR
-------------	-----------------------------

à ma mère et mon père,

à ma femme,

à mes enfants Ramez et Ryma,

Je dédie ce travail.

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mes directeurs de thèse, Mme. GIRAUD-MOREAU Laurence de l'Université de Technologie de Troyes (utt) et M. NASRI Rachid de l'école nationale d'ingénieurs de Tunis(ENIT), pour toute leurs aides, pour leurs soutiens pédagogiques, leurs conseils et leurs directives pour mener à terme ce travail.

J'adresse tous mes remerciements à M. HASSINE Tarek, Maitre de conférences à l'Université de Sousse, Tunisie, ainsi qu'à M. BEN ZINEB Tarak, Professeur à l'Université de Lorraine, France, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

Je tiens à remercier M. SOULA Mohamed et M. CHEROUAT Abel pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse et pour leurs participations scientifiques ainsi que le temps qu'ils ont consacré à ma recherche.

Je tiens à remercier particulièrement mes collègues des ISET de Rades, Nabeul, Jendouba et Béja, pour toutes nos discussions et leurs précieux conseils.

Il m'est impossible d'oublier M. BOUILLA Atef et M. ADRAGNA Pierre-Antoine pour leurs aides précieuses pour mes travaux expérimentaux.

Je voudrais également remercier vivement les équipes GAMMA3 de l'utt et MAI de l'ENIT pour leurs accueils chaleureux et leurs soutiens inébranlables durant la période de la thèse. Je n'oublie pas de remercier l'ingénieur du laboratoire GAMMA3, M. SLIMANE Amara.

Je remercie toutes les personnes avec qui, j'ai partagé mes études et notamment ces années de thèse à Troyes.

Ensuite, je tiens à remercier le Conseil Général des Champagne Ardennes qui m'a financé cette thèse.

Pour finir, j'aimerais dédier ce travail à ma famille et mes amis qui m'ont supporté tout au long de ma thèse.

SAIDI Badreddine

Sommaire

SOMMAIRE	1
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FORMAGE INCREMENTAL DES TOLES MINCES	5
1. INTRODUCTION.....	5
2. LE FORMAGE INCREMENTAL ASYMETRIQUE DES TOLES.....	7
2.1. <i>Historique du procédé de formage asymétrique des tôles</i>	7
2.2. <i>Les différents types de formage incrémental</i>	9
2.3. <i>Les moyens utilisés en formage incrémental</i>	11
2.3.1. Les dispositifs de pose des tôles	11
2.3.2. Les poinçons utilisés en formage incrémental.....	12
2.3.3. Les machines utilisées en formage incrémental	13
3. LES FACTEURS AFFECTANTS LE PROCEDE DE FORMAGE INCREMENTAL	16
3.1. <i>Introduction</i>	16
3.2. <i>Les facteurs relatifs au poinçon</i>	17
3.2.1. La géométrie du poinçon	17
3.2.2. La vitesse de rotation du poinçon.....	20
3.2.3. La trajectoire du poinçon.....	21
3.2.4. L'incrément axial.....	22
3.3. <i>Les facteurs relatifs à la tôle</i>	23
4. CARACTERISATION ET CONTROLE DU PROCEDE DE FORMAGE INCREMENTAL	23
4.1. <i>Les efforts mis en jeux</i>	23
4.2. <i>Le profil des pièces</i>	25
4.3. <i>La distribution de l'épaisseur</i>	26
4.4. <i>L'angle limite de formage</i>	27
4.5. <i>La Courbe limite de formage CLF</i>	28
4.6. <i>La rugosité des pièces en formage incrémental</i>	30
5. OPTIMISATION DES PARAMETRES DU FORMAGE INCREMENTAL	31
6. CONCLUSION	32

CHAPITRE II: ETUDE EXPERIMENTALE DU FORMAGE INCREMENTAL A CHAUD DU TI-6AL-4V
.....**33**

1.	INTRODUCTION.....	33
2.	LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE CHAUFFAGE EN FORMAGE INCREMENTAL DES TOLES MINCES	34
2.1.	<i>Introduction</i>	34
2.2.	<i>Le chauffage total de la tôle</i>	34
2.3.	<i>Le chauffage partiel de la tôle</i>	37
2.4.	<i>Le chauffage combiné de la tôle</i>	43
2.5.	<i>Conclusion</i>	44
3.	CONCEPTION ET REALISATION DU MONTAGE DE FORMAGE INCREMENTAL A CHAUD (WSPIF)	47
3.1.	<i>Mise en place du dispositif WSPIF à base des cartouches chauffantes</i>	47
3.2.	<i>Système de formage, de mesure et de contrôle</i>	50
3.2.1.	Le capteur de force	51
3.2.2.	Le poinçon.....	52
3.2.3.	La machine à commande numérique CNC.....	52
3.2.4.	La tôle en alliage de titane Ti-6Al-4V	53
3.2.5.	La caméra infrarouge	53
3.2.6.	Le scanner Laser	54
3.2.7.	La Machine à Mesurer Tridimensionnelle	55
4.	ESSAIS EXPERIMENTAUX DU FORMAGE INCREMENTAL A CHAUD DU TI-6AL-4V.....	55
4.1.	<i>Choix de la pièce de référence et génération de la trajectoire de l'outil</i>	55
4.2.	<i>Optimisation des paramètres géométriques</i>	56
4.2.1.	Effet des paramètres géométriques du poinçon	56
4.2.2.	Optimisation des paramètres du procédé	58
4.3.	<i>Optimisation des paramètres dynamiques du poinçon</i>	63
4.4.	<i>Définition de la température de chauffage</i>	64
4.5.	<i>Réalisation des essais de formage à chaud de titane</i>	66
5.	NUMERISATION DES PIECES FORMEES ET RESULTATS	67
5.1.	<i>Démarche de la numérisation</i>	67
5.2.	<i>Analyse des distributions des épaisseurs des pièces</i>	70
5.3.	<i>Analyse des profils des pièces</i>	74
5.4.	<i>Analyse des efforts de formage</i>	77
6.	CONCLUSION	81

CHAPITRE III: SIMULATION ET OPTIMISATION DU FORMAGE INCREMENTAL A FROID DU TI-6AL-4V83

1.	INTRODUCTION.....	83
2.	REVUE SUR LA SIMULATION NUMERIQUE DU FORMAGE INCREMENTAL	83
2.1.	<i>Introduction</i>	83
2.2.	<i>Les modélisations du formage incrémental à froid</i>	84
2.3.	<i>Discussion des modèles</i>	87
3.	MODELISATION NUMERIQUE DU FORMAGE INCREMENTAL A FROID	87
3.1.	<i>Le modèle éléments finis</i>	87
3.2.	<i>Loi de comportement du Ti-6Al-4V</i>	89
3.3.	<i>Simulation et vérification du modèle en EF</i>	91
4.	OPTIMISATION DES PARAMETRES DE FORMAGE INCREMENTAL A FROID DU TI-6AL-4V	93
4.1.	<i>Choix du plan d'expérience</i>	93
4.2.	<i>Optimisation des paramètres par la méthode des surfaces de réponses</i>	96
4.3.	<i>Choix des paramètres optimums</i>	102
5.	CONCLUSION	103

CHAPITRE IV: SIMULATION NUMERIQUE DU FORMAGE INCREMENTAL A CHAUD DU TI-6AL-4V104

1.	INTRODUCTION.....	104
2.	REVUE SUR LES MODELISATIONS - SIMULATIONS NUMERIQUES DU FORMAGE INCREMENTAL A CHAUD (WSPIF).....	104
2.1.	<i>Modélisation de Honarpisheh</i>	105
2.2.	<i>Modélisation de Amirahmad</i>	106
2.3.	<i>Modélisation de Sbayti</i>	107
2.4.	<i>Modélisation de Moayedfar</i>	107
3.	SIMULATION DU FORMAGE INCREMENTAL A CHAUD DE PIECE TRONCONIQUE	108
3.1.	<i>Introduction</i>	108
3.2.	<i>Modélisation et maillage en élément finis</i>	108
3.3.	<i>Loi de comportement du matériau Ti-6Al-4V</i>	109
3.4.	<i>Conditions aux limites et trajectoire du poinçon</i>	111
3.5.	<i>Résultats des simulations numériques de la pièce tronconique</i>	112
4.	ETUDE DE L'EFFET DE L'ANGLE DE LA PIECE TRONCONIQUE	115

4.1.	<i>Évolution de la température en fonction de l'angle</i>	116
4.2.	<i>Analyse des distributions des épaisseurs</i>	118
4.3.	<i>Analyse des profils des géométries des pièces tronconiques</i>	122
4.4.	<i>Analyse des efforts de formage incrémental</i>	126
4.5.	<i>Les principaux résultats de la comparaison numérique/expérimentale</i>	131
5.	ETUDE DE L'EFFET DE LA PROFONDEUR DE LA PIECE TRONCONIQUE.....	132
6.	FORMAGE INCREMENTAL D'UNE PROTHESE CRANIENNE.....	137
6.1.	<i>Introduction</i>	137
6.2.	<i>Demarche de la rétroconception du crane</i>	138
6.3.	<i>Discussion des résultats</i>	141
6.3.1.	Effet de la température sur l'effort de formage	143
6.3.2.	Effet de la température sur la distribution de l'épaisseur(t).	143
6.3.3.	Effet de la température sur le profil des déplacement (U).....	144
6.4.	<i>Simulation numérique de la prothèse crânienne</i>	145
7.	CONCLUSION	147
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		149
NOMENCLATURE ET LEXIQUE.....		154
TABLE DES FIGURES		156
LISTE DES TABLEAUX.....		161
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		162

Introduction générale

Plusieurs biens qui nous entourent et que nous utilisons dans la vie courante (automobile, aéronautique, électroménager, électronique ...) sont constitués de tôles métalliques. La mise en forme de ces tôles peut être réalisée par différents procédés. Le choix dépend de la forme à donner et de la fonction de la pièce. Les techniques les plus couramment utilisées sont des techniques de fabrication en série (découpage, pliage, emboutissage). Parmi les procédés de mise en forme, l'emboutissage est certainement le plus utilisé dans les secteurs automobile, aéronautique, ferroviaire... Il permet des cadences de production élevées mais nécessite un investissement important dans les machines et l'outillage. Pour les petites séries, les prototypes ou les pièces à usage unique, les industriels rencontrent des problèmes de coût lors de leur fabrication. Le développement d'outillages spécifiques (matrice, poinçon et serre-flan) pour les presses mécaniques ou hydrauliques rend le coût prohibitif dans le cas de pièces réalisées en série limitée.

Le procédé de formage incrémental des métaux en tôles (ISF) est une alternative évoquée depuis presque deux décennies qui apparaît comme une réponse adaptée aux demandes des industriels qui recherchent, pour la petite série et le prototypage, des solutions plus flexibles et plus économiques. Ce procédé consiste à déformer localement la tôle par repoussage grâce au déplacement d'un outil de forme hémisphérique de petite taille dont la trajectoire peut être pilotée par une machine à commande numérique ou un robot. Ce procédé supprime le couple poinçon-matrice utilisé en emboutissage, ne nécessite pas d'outils spécifiques et est beaucoup moins couteux que l'emboutissage. Mais c'est un procédé lent en raison de la longue trajectoire de l'outil.

Il est donc particulièrement adapté à la petite série, la réalisation de pièces à usage unique ou le prototypage.

Comme l'ont montré différents auteurs[1, 2, 3], le formage incrémental permet de mettre en forme des pièces automobiles ou médicales. Mais jusqu'à aujourd'hui, ce procédé ne garantit pas toujours la géométrie finale souhaitée et les pièces formées souffrent d'un mauvais état de surface. Des développements importants sont donc encore nécessaires pour une entrée réelle de ce procédé sur le marché. Plusieurs recherches expérimentales et numériques sont conduites afin d'étudier les facteurs affectant ce procédé pour les

différents métaux (alliages d'aluminium, acier, alliages de cuivre...). La mauvaise formabilité de certains métaux comme les alliages de titane reste de plus un handicap pour leur mise en forme par formage incrémental. Le titane est largement utilisé dans la fabrication des prothèses biomédicales mais aussi pour la production en série limitée de pièces dans les domaines aéronautiques, navale et automobile. Pour certains secteurs, tel que le secteur médical, on a besoin de produire des petites séries de pièces voir des pièces uniques adaptées à chaque individu comme c'est le cas des prothèses ou des implants. Le formage incrémental est donc parfaitement adapté et très prometteur pour ce domaine.

Le procédé de formage incrémental est un procédé qui engendre en raison des efforts de formage des taux de déformations non-négligeables, et même particulièrement importants dans le cas du titane, limitant les possibilités de géométries à réaliser.

Plusieurs auteurs ont montré que les efforts nécessaires de formage peuvent être diminués par une élévation de la température d'essai et que la formabilité des métaux peut être améliorée. Le procédé de formage incrémental à chaud de tôles en alliage de titane a jusqu'ici encore très peu été étudié. C'est dans cette perspective que le présent travail de thèse est développé.

Ce sujet de thèse en cotutelle s'appuie sur les compétences complémentaires de deux équipes de recherche en France et en Tunisie qui ont déjà effectué des travaux sur le formage incrémental. Des études ont été réalisées dans l'équipe GAMMA3 pour simuler numériquement le procédé à température ambiante de pièces en aluminium et un dispositif expérimental a été conçu afin de réaliser ce procédé sur une machine à commande numérique de l'Université de Technologie de Troyes. Les équipements expérimentaux limitent cependant les essais à des pièces géométriques de forme très simples et ne supportent pas des efforts de formage importants. Le Laboratoire de Mécanique Appliquée et Ingénierie (LR-MAI-ENIT) de l'École Nationale des Ingénieurs de Tunis possède aussi une expérience à la fois numérique et expérimentale du procédé de formage incrémental. Un dispositif expérimental a été conçu et réalisé dans le cadre du master de B. Saidi pour effectuer des expériences de formage incrémental sur une fraiseuse à commande numérique à 3 axes à température ambiante avec mesure des efforts au cours de l'essai. L'objectif de cette collaboration est donc de coupler les compétences

et les équipements de deux laboratoires afin de mieux maîtriser ce procédé de formage et développer un dispositif pour le formage à chaud de pièces en titane.

On envisage à travers cette thèse une étude expérimentale et numérique du procédé de formage incrémental à un point à chaud des tôles minces en alliage de titane Ti-6Al-4V. L'objectif est de mettre en place des équipements expérimentaux permettant de réaliser le procédé de formage incrémental à chaud sous différentes températures et mesurer les efforts de formage ainsi que la température au cours de l'essai. Le deuxième objectif est de simuler numériquement ce procédé par la méthode des E.F. en tenant compte de la température. Le présent manuscrit est réparti en quatre chapitres comme suit :

Le chapitre 1 présente un état de l'art sur le procédé du formage incrémental (ISF) à température ambiante. On commence par rappeler l'historique et le principe du procédé de formage incrémental. Les principaux paramètres ayant une influence sur le procédé. Les moyens de contrôle utilisés dans la littérature seront ensuite détaillés.

Le chapitre 2 du manuscrit est dédié à l'étude expérimentale du procédé de formage incrémental à chaud. Suite aux conclusions tirées des différentes solutions développées dans d'autres travaux pour le chauffage de la tôle lors d'une opération de formage incrémental, on propose une nouvelle solution de chauffage. Celle-ci consiste à chauffer la pièce grâce à des cartouches chauffantes implantées dans la matrice du dispositif. Une campagne d'essais expérimentaux de formage incrémental à chaud est menée pour une pièce tronconique en alliage de titane Ti-6Al-4V. Le profil des pièces formées, la distribution des épaisseurs et les efforts générés sont contrôlés dans cette étude. Cette étude est réalisée pour différents angles de formage de la pièce et pour différentes profondeurs.

Le chapitre 3 est consacré à la simulation numérique du procédé de formage incrémental. On évoquera dans un premier temps les différentes modélisations de ce procédé à température ambiante faites par différents chercheurs. Par la suite on présentera la modélisation par éléments finis sur le code Abaqus du formage incrémental à froid que nous avons réalisée. Celle-ci est validée par des essais expérimentaux. Ce modèle est ensuite utilisé pour conduire des travaux d'optimisation des paramètres du procédé de

formage incrémental à froid par des plans d'expérience couplés à une méthode de surface de réponse.

Le chapitre 4 porte sur la comparaison entre les résultats de la campagne expérimentale et les prévisions de la simulation numérique par éléments finis du formage incrémental à chaud de tôles en alliage de titane Ti-6Al-4V.

On commence par présenter la modélisation numérique du procédé de formage incrémental à chaud particulièrement appliqué à l'alliage de Titane Ti-6Al-4V et on discutera des modèles pouvant être choisis et reflétant le mieux la réalité. Un modèle éléments finis avec un couplage thermomécanique est utilisé pour réaliser les simulations sur l'alliage de Titane Ti-6Al-4V. Ce modèle est utilisé pour prédire l'évolution de la force de formage, la distribution d'épaisseur, et le profil final de la pièce formée.

On effectue une comparaison des résultats expérimentaux et numériques du formage incrémental de pièce tronconique en alliage de titane Ti-6Al-4V pour deux profondeurs de formage et différents angles de formage. Pour terminer, on s'intéresse au formage incrémental à chaud d'une prothèse de crâne humain. Une approche de rétro-conception est utilisée. A partir du squelette d'un crâne on effectue en effet une numérisation de la pièce par un scanner laser. La partie associée à la prothèse est récupérée du nuage de points obtenus et est utilisée pour définir la CAO de la pièce à réaliser par formage incrémental. Les résultats expérimentaux et numériques sont comparés et utilisés pour la validation du modèle numérique.

Chapitre I: Revue bibliographique sur le formage incrémental des tôles minces

1. Introduction

La mise en forme de tôles métalliques, occupe une place très importante dans les disciplines de construction mécanique, en effet les tôles sont largement utilisées dans la fabrication des industries aéronautiques, l'industrie d'automobiles, les produits électroménagers, les produits informatiques et d'autres disciplines. Malgré l'invention de nouvelles technologies qui ne cesse de faire appel à des nouveaux matériaux pour remplacer les métaux, ces derniers restent en tête de liste des matériaux les plus consommés dans le monde.

Les tôles métalliques font toujours l'objet de recherche et de développement afin de trouver les méthodes adéquates pour les mettre en forme suivant les besoins. Les métaux en feuille occupent une place spéciale vue leur utilisation, les procédés associés et la complexité des formes, poussent les chercheurs à rebondir sur des procédés classiques comme le pliage, le repoussage, le fluotournage et l'emboutissage pour créer de nouveaux procédés répondant à des besoins spécifiques. Parmi les différents procédés de mise en forme des tôles minces, l'emboutissage est certainement le plus utilisé. Ce procédé est caractérisé par une grande productivité et son domaine d'application est très étendu (automobile, aéronautique, ferroviaire, électroménager, sanitaire...). Cependant, le procédé d'emboutissage nécessite le développement d'outillages spécifiques (poinçon, matrice, serre-flan, ...) sur des presses mécaniques ou hydrauliques. La fabrication et la mise au point de ces dispositifs de production requièrent des investissements importants conduisant à des coûts pièces prohibitifs pour des productions en petites séries ou du prototypage. Pour de faibles volumes de production, l'amélioration de la compétitivité des entreprises confrontées aux exigences des marchés internationaux passe donc par le développement de technologies plus flexibles et plus économiques avec un impact réduit pour l'environnement.

Le formage incrémental, ou encore ISF (Incremental Sheet Forming) présenté par la figure I-1, fait partie de ces nouvelles technologies et apparaît aujourd'hui comme une réponse adaptée aux besoins de la production en petite série et au prototypage. Il permet

de générer des formes très diverses sans matrice ni outillage spécifique, en exploitant une machine d'usinage à commande numérique 3 axes ou un robot. Mais il reste encore des développements importants avant qu'il pénètre réellement sur le marché. Les points critiques liés à ce procédé sont :

- La non-conformité dimensionnelle des pièces obtenues,
- Le mauvais état de surface (rugosité) des pièces obtenues,
- Les efforts importants mis en jeux,
- La réduction d'épaisseur de la tôle,
- Les énergies développées.

De nombreux recherches académiques tant sur le plan expérimental que numérique sont menées dans le monde entier afin d'identifier les paramètres du procédé qui permettraient de résoudre ces problèmes, améliorer et industrialiser ce procédé innovant : L. Filice et al [4], G. Ambrogio et al [5], M. Bambach [6], J.J. Park [7], J. Jesweit et al [8, 9], J. Belchior [10], B. Saidi et al [11], M. Honarpicheh et al [12, 13].

Ce chapitre présente un état de l'art sur le formage incrémental à température ambiante. L'historique et le principe du procédé de formage incrémental sont rappelés. Les principaux paramètres influents sur le procédé ainsi que les moyens de contrôle utilisés dans la littérature sont ensuite détaillés.

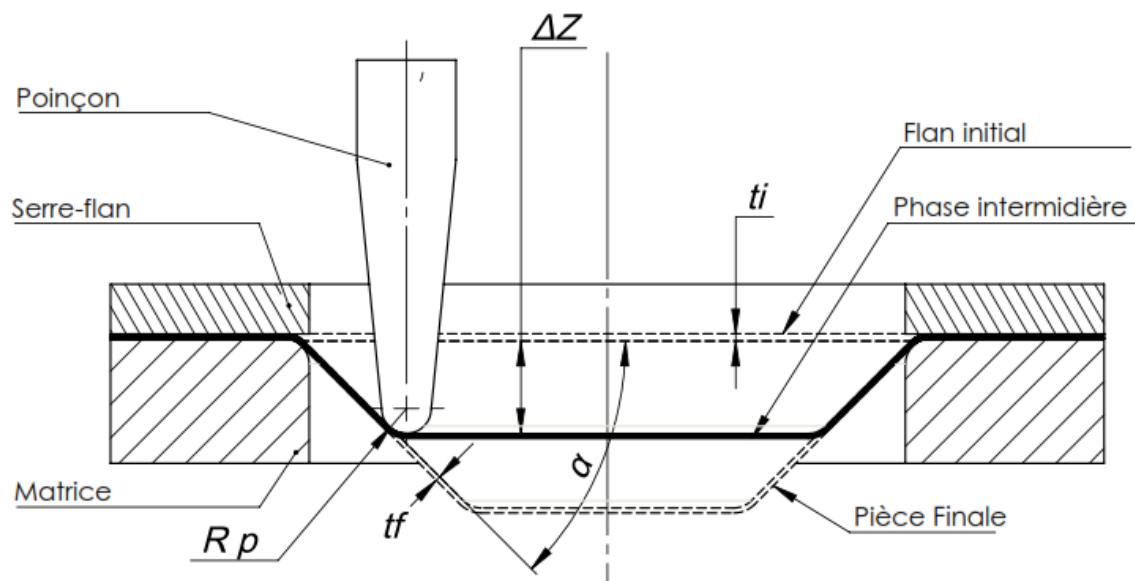


Figure I-1. Schéma de principe du procédé de formage incrémental à un point SPIF

2. Le formage incrémental asymétrique des tôles

2.1. Historique du procédé de formage asymétrique des tôles

La naissance du procédé du formage incrémental, est accordée aux travaux effectués par L. Edward [14], selon lesquels la tôle est déformée localement par un simple outil en mouvement comme le montre la figure I-2

Ce procédé a été breveté sous le nom de « formage sans moule » bien avant que le procédé soit réalisé. Il n'a vu le jour que suite aux développements des machines outil à commande numérique MOCN. L'évolution des logiciels de FAO et CAO a permis de programmer les trajectoires des outils utilisés. De nombreuses travaux de recherche sont apparus pendant les deux dernières décennies telles, H. Iseiki et al [15, 16], L. Filice et al [4], G. Ambrogio et al [5, 17], M. Bambach [6], B. Saidi et all [11, 18, 19] , J.J Park [7], S. Dejardin [20], M. Durante et all [21], J.Liu et al [22] et A. Mohammadi et al [23].

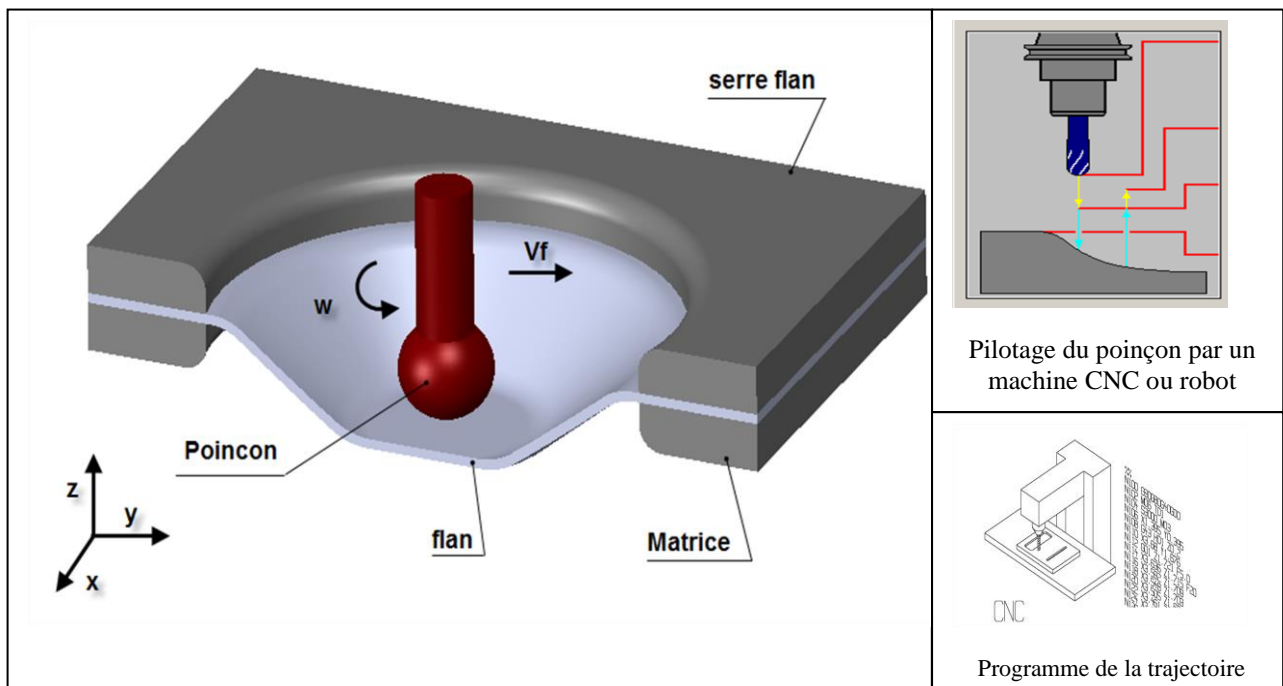


Figure I-2.Principe du formage incrémental

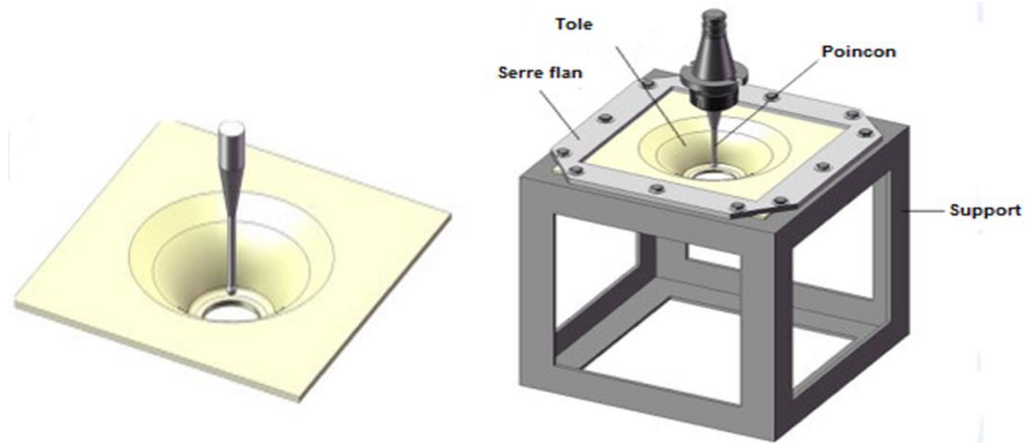


Figure I-3.Principe du formage incrémental à un point

Le principe du procédé de formage incrémental est basé sur le déplacement d'un outil généralement de forme hémisphérique et de petite taille, dont la trajectoire est pilotée par une machine à commande numérique ou un robot pour déformer localement la tôle immobilisée à ces extrémités comme l'illustre la figure I-3.

Comparé au procédé traditionnel d'emboutissage, le formage incrémental supprime le couple poinçon-matrice et donc ne nécessite plus la réalisation d'outillages spécifiques. Ce nouveau procédé de mise en forme présente plusieurs avantages :

- Coût d'équipement réduit : il n'utilise pas de contre moules de formes spécifiques, les outillages sont simples et peu coûteux,
- Une grande flexibilité : la seule modification du programme générant la trajectoire de l'outil suffit pour mettre en forme une pièce ayant une nouvelle géométrie,
- La possibilité de réaliser une grande variété de pièces de formes asymétriques sur la même machine.

Comparés aux techniques conventionnelles de formage des métaux en tôles, tel que l'emboutissage, ce procédé permet une réduction des investissements en matériels. Les outillages sont simples, peu coûteux et récupérables, l'investissement est ainsi réduit de 25% par rapport à l'emboutissage.

En contrepartie, le formage incrémental est un procédé lent en raison de la longue trajectoire de l'outil. Le procédé de formage incrémental est donc un procédé adapté à la petite série, au prototypage rapide, à la réalisation de pièce unique. Comme il est noté dans les travaux de J. Belchior [10], ce procédé est intéressant et économique comparé

au procédé d'emboutissage pour les pièces de faibles dimensions avec des séries allant jusqu'à 250 unités, et jusqu'à 700 unités pour les pièces de dimensions importantes comme les capots de voiture.

Un autre inconvénient de ce procédé est la mauvaise garantie de la géométrie finale (la non-conformité dimensionnelle comparée à la pièce nominale fournie par la CAO) et de l'état de surface.

Le procédé de formage incrémental présentant un fort potentiel pour la petite série, de nombreuses recherches [24, 25, 26] sont effectuées afin d'identifier les paramètres adéquats et le rendre industrialisable.

2.2. Les différents types de formage incrémental

Il existe deux familles de formage incrémental (J.Jesweit et al [9] et S.Gatea et al[2]):

- Le formage négatif : l'outil travaille sur la surface concave de la pièce et généralement ne nécessite aucun support, on parle de formage incrémental à un point « SPIF : *Single Point Incremental Forming* » (figure I-4a).
- Le formage positif : l'outil travaille sur la surface convexe de la pièce. L'utilisation d'un support est indispensable, on parle de formage incrémental à deux points « TPIF : *Two Point Incremental Forming* » (figure I-4b).

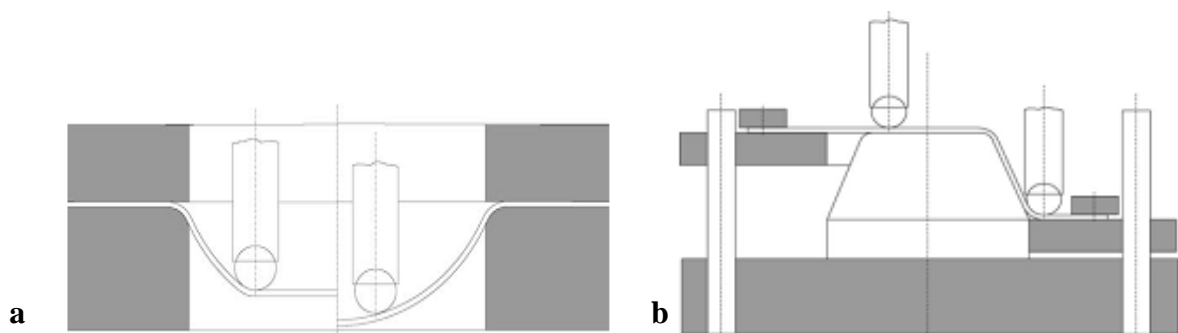


Figure I-4. Formage incrémental asymétrique : (a)-Principe du formage négatif SPIF (b)-

Principe du formage positif TPIF

C'est le formage incrémental à deux points (TPIF) qui a été développé en premier lieu. Il repose sur le principe de former localement la tôle à l'aide d'un poinçon comme le formage incrémental à un point (SPIF),

Mais un contre poinçon ou moule est nécessaire, pour se mettre en contact totalement ou partiellement avec la tôle comme le montre la figure I-5. La matrice et le serre-flan sont mobiles le long de l'axe vertical. Le montage de la tôle est ainsi plus compliqué par rapport au SPIF car il y a une interaction entre le poinçon et le serre flan lors du déplacement vertical.

Le TPIF fait l'objet de plusieurs travaux de chercheurs renommés tels que J.M. Allwood et al [27], J. Jesweit et al [8] et G. Hirt et al [28].

Bien que le formage incrémental à un point vient après l'apparition du formage incrémental à deux points, il correspond à l'idée brevetée dans les travaux de L. Edward [14]. Le formage incrémental à un point est le plus étudié dans les recherches car il peut être facilement réalisé soit sur des machines à commandes numériques (CNC) soit avec des robots pour la réalisation de pièces de formes différentes [9]. Il est plus facile à exploiter et moins coûteux que le formage incrémental à deux points.

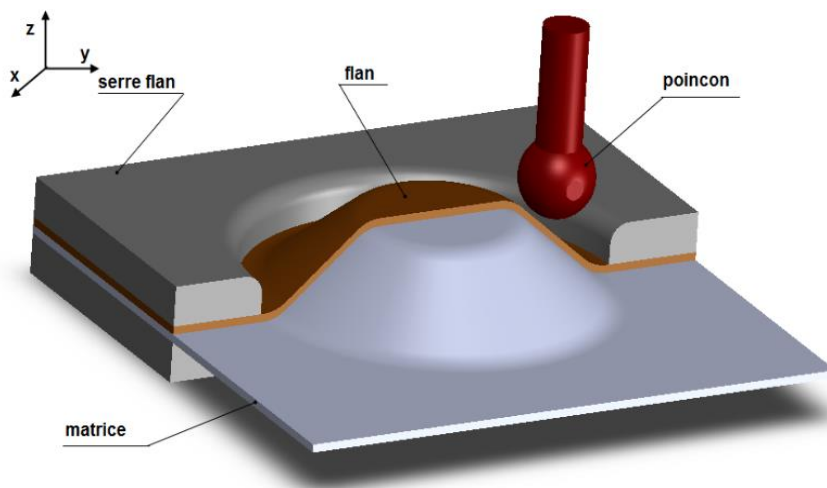


Figure I-5.Principe du formage incrémental à deux points TPIF

2.3. Les moyens utilisés en formage incrémental

2.3.1. Les dispositifs de pose des tôles

Le procédé de formage incrémental est encore supposé à l'heure actuelle dans sa phase de modélisation. Il n'est pas encore utilisé par les industriels comme procédé de production des pièces commercialisées, de cet effet les montages ou les dispositifs de pose des flans pour leur formage sont encore des solutions d'expérimentation, basées sur des structures pour maintenir et supporter les tôles lors de la phase du formage[5, 18, 20, 30, 29].



Figure I-6. Dispositif et chaîne d'acquisition des efforts de formage incrémental [18]

Ces dispositifs sont constitués principalement d'une matrice sur laquelle repose le flan contenant un espace libre pour permettre le formage de la pièce, et un serre-flan pour maintenir le flan dans sa position. Un poinçon piloté en mouvement par une trajectoire 3D de la pièce à réaliser assuré par une machine à commandes numériques CNC ou un robot. L'ensemble est fixé sur une semelle montée sur la table de la machine de formage comme le montre la figure I-6. Sur cette solution de base, d'autres éléments peuvent être introduits pour un suivi des paramètres du procédé comme les capteurs des efforts, l'implantation de caméras, de caméras infrarouges ou des thermocouples. Quelques solutions retenues et utilisés par les chercheurs sont présentées dans la figure I-7.

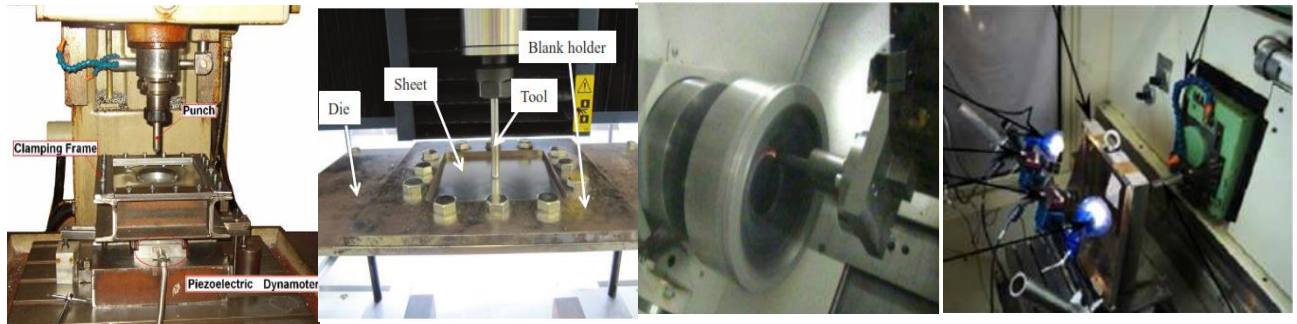


Figure I-7. Quelques dispositifs utilisés par les chercheurs lors des essais

Les dispositifs de formage incrémental à deux points TPIF sont plus complexes car il y a deux mouvements des outils de formage à assurer. Le mouvement de translation de la matrice qui supporte la tôle doit être synchronisé avec le mouvement de translation du poinçon, comme le montre la figure I-8 du dispositif utilisé par B.T. Araghi et al [31].

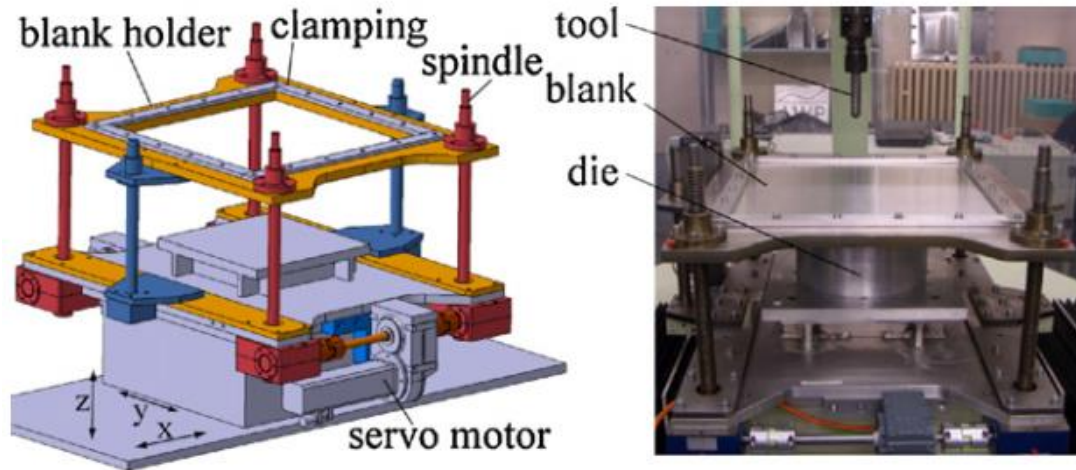


Figure I-8. Dispositif de formage incrémental à deux point TPIF [31]

2.3.2. Les poinçons utilisés en formage incrémental

Le poinçon en formage incrémental est l'outil qui se déplace et agit par sa force pour déformer la tôle localement, il se déplace selon une trajectoire reproduisant la forme de

la pièce. La géométrie et les dimensions de l'outil font l'objet de plusieurs travaux traitant leurs effets sur la qualité des pièces formées.

Les outils simples à bout hémisphérique dont un modèle est présenté par la figure I-9, sont les premiers outils utilisés avec des diamètres variables de quelque millimètres jusqu'au 30mm. Malgré les essais menés avec d'autres formes et solutions technologiques des outils, les premiers outils proposés de forme hémisphérique sont encore les plus utilisés.

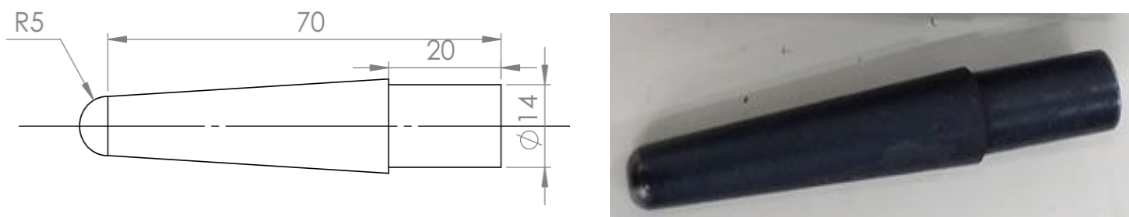


Figure I-9.poinçon en acier X160CrMoV12 de dureté 55HRC

2.3.3. Les machines utilisées en formage incrémental

Le formage incrémental des tôles est principalement réalisé sur des Machine-Outil à Commande Numérique CNC (figures I-10, I-11 et I-12). Ceci peut être expliqué par l'existence de ces machines dans la plupart des laboratoires de recherches et des institutions, la rigidité de ces structures et leurs capacités à remplir les conditions du procédé de formage incrémental en termes d'effort de formage, trajectoires du poinçon, vitesses et programmes associés.

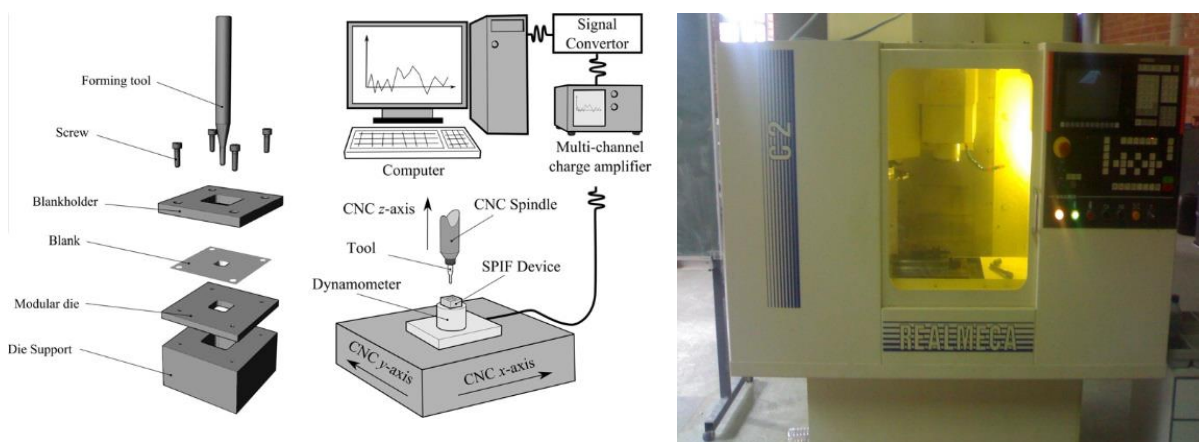


Figure I-10.Exemple de montage SPF et structure de la machine associée



Figure I-11. Montage de SPIF sur une MOCN[18]



Figure I-12. Montage de TPIF sur une MOCN

Un brevet portant sur une machine dédiée au formage incrémental a néanmoins été déposé dès 1999 par la société japonaise AMINO. Il a été répandu en Europe en 2000. Il concerne une machine trois axes (x, y, z) à structure cartésienne, ainsi que des porte-pièces et des outils associés. Notons aussi que la machine de formage développée et présentée par la

figure I-13 possède toutefois peu de spécificités particulières qu'une machine « MOCN » ne possède pas.

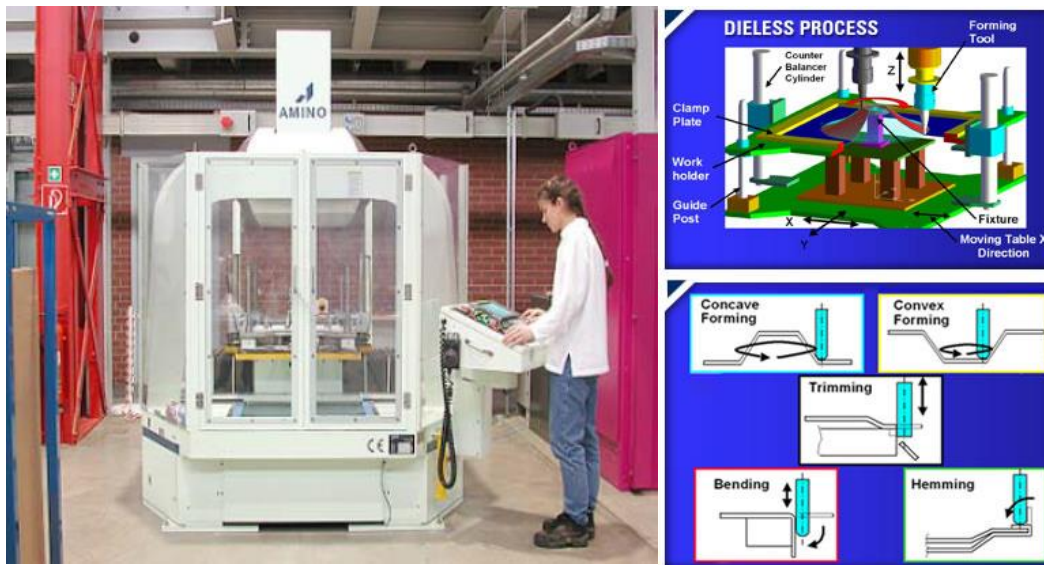


Figure I-13. La machine de formage incrémental développée par AMINO

Les robots sont les autres moyens utilisés pour le formage. Les robots ont l'avantage de permettre la génération de formes plus complexes, avec une bonne productivité et des vitesses importantes de travail. Ils sont aussi utilisés pour le formage incrémental à deux points TPIF par l'association de deux robots.

Deux familles de robot existent, les robots à structure en série et les robots à structure en parallèle. Les robots à structure en série donnés par la figure I-14 sont les plus utilisés par les chercheurs vus leur cout raisonnable et leurs possibilités de réaliser des formes complexes dans des espaces étroits. Les robots à structure en parallèle donnés par la figure I-15 offrent une bonne rigidité mais avec un cout élevé (M. Sasso et al [32]). Toutefois les robots ont l'inconvénient d'avoir une faible rigidité face aux efforts manipulés. Une compensation de la rigidité de la structure est nécessaire afin de compenser les écarts dimensionnels obtenus. J. Belchior [10] a proposé une approche couplée matériau structure/ machine, afin de prendre en compte l'effet des déformations élastiques de la structure du robot et compenser les erreurs de la trajectoire de l'outil.



Figure I-14. Robot à structure en série d'usinage CETIM S4

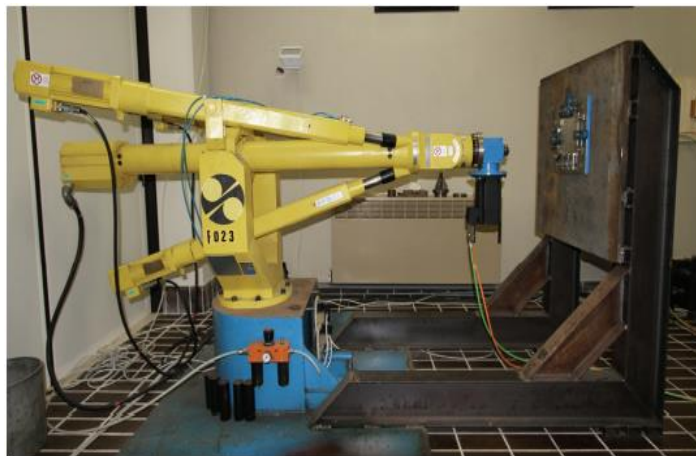


Figure I-15. Robot à structure parallèle Tricept H1

3. Les facteurs affectants le procédé de formage incrémental

3.1. Introduction

L'étude des paramètres des procédés ayant un impact sur la conformité dimensionnelle des pièces, la valeur des efforts de formage..., la recherche des valeurs optimales fait encore aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches. Deux formes simples (un cône tronqué et une pyramide tronquée) sont utilisées comme pièces de références dans les différentes études que ce soit sur le plan numérique ou expérimental. Ce paragraphe présente les facteurs qui apparaissent dans la bibliographie comme les plus influents sur les résultats.

3.2. Les facteurs relatifs au poinçon

3.2.1. La géométrie du poinçon

La géométrie du poinçon (forme, taille) est un des paramètres les plus étudiés car elle a un impact sur la répartition des épaisseurs, l'état de surface, la formabilité et les efforts de formage [33, 34, 35].

Les principaux outils de formage utilisés sont à tête hémisphérique, avec un rayon variant entre 2,5 mm et 30mm. Cependant, d'autres types de poinçon ont été testés par d'autres chercheurs. Les premiers qui ont testés l'effet de la forme de l'outil et de ses dimensions sont Y.H. Kim et J.J Park,[29] ils ont montré qu'une bille libre offre plus de formabilité que pour un outil hémisphérique.

H. Iseki et T. Naganawa[16] utilisent aussi un outil avec une bille libre en bout du poinçon pour limiter le phénomène de frottement entre poinçon et matrice(figure I-16) . Certains auteurs utilisent des rouleaux sphériques et cylindriques, ce qui permet un résultat satisfaisant au niveau de la répartition de l'épaisseur, et la qualité de surface avec des efforts de formages minimales.

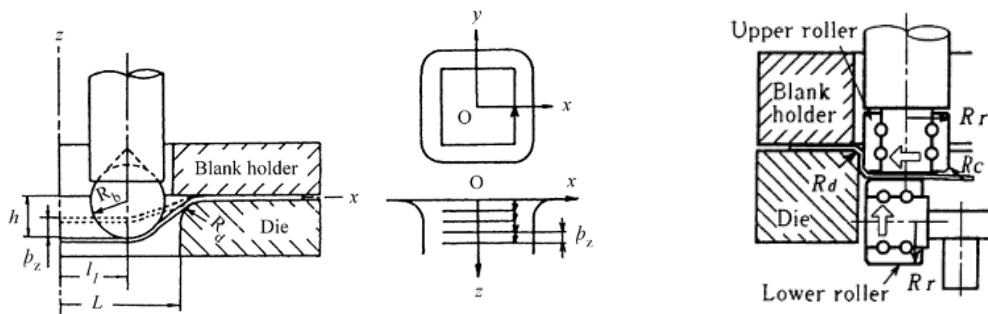


Figure I-16.Poinçons avec des rouleaux sphériques et cylindriques [12, 13]

B. Lu et all [36] utilisent un outil dit outil à bille oblique "*oblique roller-ball ORB*" présenté par sur la figure.1-17, pour minimiser l'effet de frottement lors du formage. Des améliorations ont été apportées au procédé, surtout au niveau du coefficient de frottement entre tôle et poinçon, la qualité des surfaces, l'uniformité des épaisseurs et la minimisation des efforts de formage.

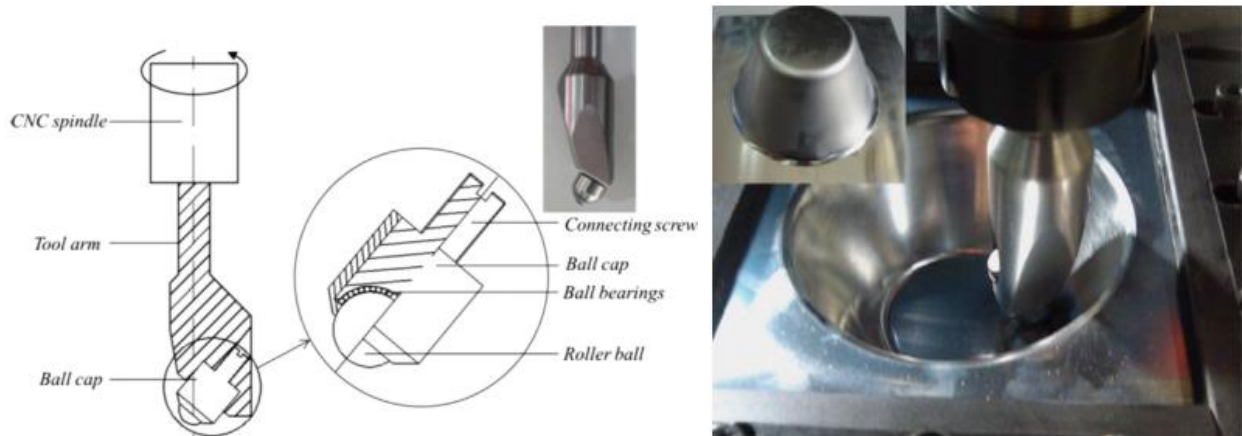


Figure I-17. Poinçons avec des rouleaux sphériques et cylindriques [36]

On trouve l'utilisation d'outils vibrants, qui permettent de limiter les efforts sur la machine et diminuer les déformations indésirables par une réduction des frottements. Sur le même principe, certains ont étudié un outil multi-tête, dont la rotation provoque des impacts sur la tôle. Son utilisation peut s'avérer bénéfique dans le cas de pièces ayant des déformations importantes.

Afin d'améliorer les limites de formage et d'élargir la gamme d'applications potentielles du procédé de formage incrémental, B. Cawley et al [37] ont mené des essais sur l'alliage de l'aluminium Al3003-O, tout en variant la forme et les dimensions de la tête du poinçon comme le montre la figure I-18.

Deux types de têtes ont été étudiés en utilisant un tronç de courbes paraboliques personnalisés. Les résultats ont été comparés aux outils à têtes hémisphériques standard et à fond plat.

Les résultats de l'étude des outils à têtes hémisphériques et plates sont en corrélation avec les travaux antérieurs de point de vue conformité dimensionnelle et effort généré. Les outils à têtes de forme parabolique entraînent une diminution de formabilité et une amélioration de la qualité de surface avec une augmentation du coefficient de frottement.

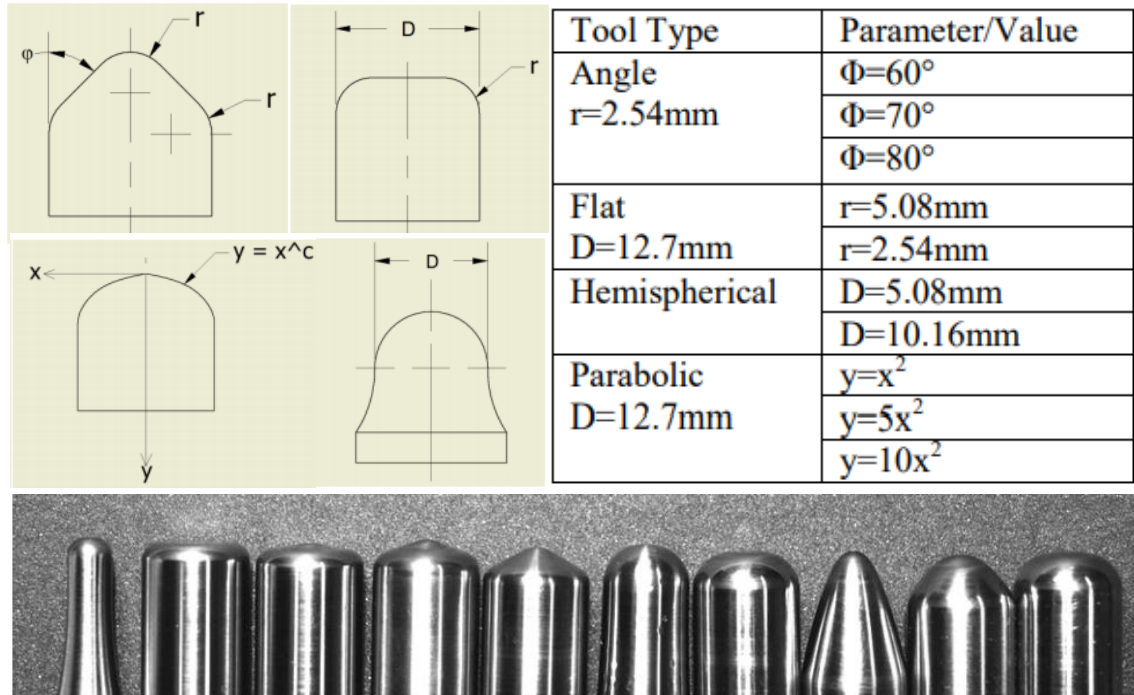


Figure I-18. Variations de la forme et des dimensions de la tête du poinçon[37]

J. Jesweit et al [52] dans un autre travail publié en 2015 ont montré que pour les tôles épaisses, il est recommandé d'utiliser de gros outils sphériques (12,7 mm ou plus), ou un gros outil plat. L'outil plat fournit la meilleure combinaison formabilité et faible rugosité. Pour l'aluminium, l'acier galvanisé et l'acier inoxydable, il est recommandé d'utiliser un outil plat.

D'autres travaux sont menés et montrent souvent que le diamètre à un impact sur la formabilité des métaux traité [34, 35]. Le tableau I-1 regroupe quelques valeurs des diamètres utilisées par les chercheurs.

Tableau I-1. Tableau récapitulatif des diamètres de poinçons utilisés par les auteurs

Auteur	G.Centeno [38]	I.Bagudanch [39]	J.Dufflour [40]	B. Lu [36]	F.Guzmán [41]	R.Hino [42]	D. Xu [43]	J. Soeiro [44]
Année	2014	2013;2015	2010	2014	2012	2014	2014	2015
Diamètre de l'outil en mm	06, 10 et 20	6, 10, 20	10	5	10	11	2,5	4
Auteur	P.Shanmuganatan [33]	Q.Zhang [45],	G.Palumbo [46]	G.Ambrogio [47]	M. Otsu [48]	A.Daleffe [49]	S.Kurra [50]	Saidi et al [18,35,51]
Année	2014	2010	2012	2013	2014	2013	2015	2015-2018
Diamètre de l'outil en mm	5, 10, 15	6	16	15	6	5	6, 10, 14	5, 10, 15

3.2.2. La vitesse de rotation du poinçon

Plusieurs travaux [49, 50, 54] ont été menés pour traiter l'effet de la vitesse de rotation sur la qualité des pièces produites à travers le suivi des efforts, de la rugosité, des épaisseurs, des profils, de l'angle limite de formage et de la profondeur maximum formée dans le cas d'un cône tronqué.

Le poinçon est généralement animé en rotation pour minimiser le frottement mais il peut être libre (exemple d'une bille dans une cage). J. Jeswiet et al [52], D. Xu et al [53] ont montré que l'augmentation de la vitesse de rotation du poinçon augmentait la formabilité. Cette augmentation est due en partie à un échauffement local de la tôle et surtout à une diminution des effets de frottement à l'interface poinçon/tôle. Comme la température de la zone en contact augmente, la force axiale de formage voit une diminution, mais d'autres travaux ont montré qu'une faible vitesse de rotation du poinçon limitée à un roulement animé par la vitesse d'avance permet l'amélioration de la qualité des surfaces des pièces produites.

K. Hamilton et J. Jesweit [54] ont analysé l'effet de la vitesse sur la rugosité et sur la distribution de l'épaisseur des cônes tronqués réalisés en alliage d'aluminium. M. Durante et al [56] ont mené une étude afin d'évaluer l'influence du sens de la vitesse de rotation des outils. Le programme d'essais expérimentaux fournit une évaluation préliminaire des coefficients de frottement, effectuée par des essais de glissement pour les deux sens de vitesse de rotation. La force de formage axiale diminue avec la rotation dans le sens des anti-aiguilles de l'outil alors que pour une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre elle augmente. Cela est dû à la combinaison des deux sens de rotation (trajectoire circulaire le long d'un cercle et rotation de l'outil autour de son axe).

La vitesse d'avance est aussi un facteur prédéterminant de la qualité des pièces fournis en formage incrémental. Ce facteur affecte en premier lieu le temps de formage des pièces. La qualité de la pièce est modifiée avec l'augmentation de cette vitesse qui pourrait être aussi associée à une vitesse de rotation plus élevée. Cependant, G. Ambrogio et al [47] ont montré que l'augmentation de la vitesse d'avance (et par conséquent l'augmentation de la vitesse de déformation) n'affecte pas la microstructure du matériau, ce qui signifie que la puissance mécanique fournie n'est pas suffisante pour provoquer une augmentation

significative de la température entraînant des changements importants de la microstructure.

S. Kurra et al[38], ont effectué des essais expérimentaux afin de chercher la vitesse optimum permettant de minimiser la rugosité dans le cas d'un cône tronqué. D'après eux, la vitesse optimum est de l'ordre de 1100mm/mn.

3.2.3. La trajectoire du poinçon

Différentes stratégies de parcours existent, celui-ci peut être continue (hélice) [53, 58] ou discontinue (sauts) [11, 13].

M. Azaouzi [59] regroupe les différents parcours en cinq familles de trajectoires (nommées SG1 à SG5) avec deux déclinaisons possibles pour trois d'entre-elles, continue ou alternée. Ces trajectoires sont illustrées par la figure I-19 pour le cas d'un cône tronqué.

R. Malhotra [60] traite dans son étude l'effet de la trajectoire du poinçon sur l'endommagement des pièces coniques dont la génératrice est de forme parabolique.

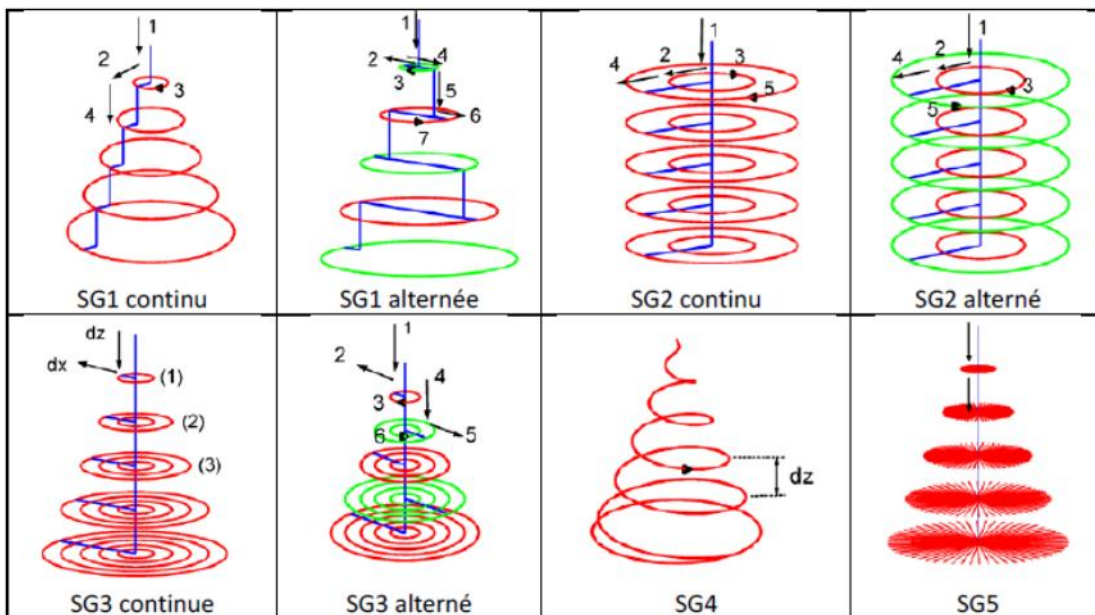


Figure I-19. Les parcours possibles de l'outil [59]

3.2.4. L'incrément axial

Quelque que soit la stratégie de parcours utilisée, le pas de déplacement axial doit être défini. Ce pas de déplacement axial (Δz) est un facteur important du procédé il affecte la formabilité et l'état de surface de la pièce obtenue [7, 47, 49, 57]. La valeur du pas de déplacement a un impact direct sur le temps de formage et la valeur des efforts de formage. Les valeurs les plus utilisées dans la littérature s'étalent de 0,1 à 2 mm (voir Tableau I-2).

Tableau I-2 .Les différentes valeurs de l'incrément (Δz) utilisées par les auteurs

AUTEUR	B. Valoppi [61]	B.Saidi [35]	M.Honarpic heh [12, 62]	AlGhamdi, [63]	Soeiro [44]	Y.Fang [64]	G. Centeno [38]
ANNEE	2017	2016	2016	2015	2015	2014	2014
Delta Z	0,5	0,5 ; 0,75 ;1	0,1 ;0,3 ;0, 5	0,32	0,2	0,2	0,2-0,5
AUTEUR	G.Ingarao [65]	G.Ambrogio, [66]	R. Hino [42]	D. Xu, B.[67]	M. Otsu [48]	B. Lu [36]	I.Bagudanch [68]
ANNEE	2014	2014	2014	2014	2014	2014	2013
Delta Z	1 -0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,2 et 0,5
AUTEUR	G.Ambrogio [47]	D.Xu [53]	R.Malhotra [60]	Bambach [6]	S.Dejardin [20]	Q. Zhang [69]	Hamilton, [54]
ANNEE	2013	2013	2012	2010	2010	2010	2010
Delta Z	0,1; 0,25; 0,3; 0,5 et 1	0,5	0,5 et 1	0,25; 0,5 et 1	0,2	0,2	0,1016 0,2540 0,4064
AUTEUR	M. Sasso [32]	G.Ambrogio [70]	L. Filice [4]	G.Ambrogio [1]	G. Ambrogio [5]	Y.H. Kim [29]	Iseki [16]
ANNEE	2008	2007	2006	2005	2004	2002	2002
Delta Z	0.5	0,5 et 1	0,3; 0,65 et 1	0,5	1 et 2,5	0,1; 0,3 et 0,5	multistage

3.3. Les facteurs relatifs à la tôle

Les matériaux étudiés en formage incrémental sont généralement des matériaux ductiles. La plupart des recherches sur le procédé sont réalisées avec des alliages d'aluminium en raison des efforts relativement faibles pour former ce matériau et de son coût peu élevé. Mais d'autres matériaux sont aussi utilisés comme les alliages de titane [71], les aciers[18], les alliages de magnésium[72] et les alliages de cuivre [13]. En plus des métaux, des tentatives ont été faites sur d'autres familles de matériaux comme les plastiques [39], les panneaux sandwich[73]...

4. Caractérisation et contrôle du procédé de formage incrémental

4.1. Les efforts mis en jeu

Les forces de formage sont des paramètres de contrôle importants, car ils permettent d'assurer l'intégrité de la machine et des outils. Une estimation des efforts maximums de formages permet en comparant cette valeur au seuil d'effort acceptable pour la machine, de préserver l'équipement utilisé.

Les premières investigations sur ce sujet sont dues aux travaux de J. Jeswiet et al [8]. Des mesures de forces ont été faites au cours de l'opération de formage pour une pièce pyramidale avec un angle d'inclinaison de 40° d'épaisseur 1,21mm en aluminium. Les résultats de mesure présentés sur la figure I-20 montrent l'évolution des trois composantes de l'effort. On peut voir que la composante axiale atteignant 450N est la plus importante, la valeur des autres composantes est faible et ne dépasse pas 50N. La figure I-21-a, issue des travaux de J. Duflou [74] sur le formage incrémental à un point d'un cône tronqué, montre aussi l'importance de l'effort axial comparé aux deux autres composantes de l'effort. Au cours du temps, la force augmente rapidement jusqu'à atteindre sa valeur maximum puis diminue en raison de l'amincissement de la tôle au cours de l'opération de formage incrémental. La vue détaillée des composantes de forces (**F_x**, **F_y** et **F_z**) pour deux contours circulaires de l'outil (figure I-21-b) montre que la composante axiale (**F_z**) passe par une valeur nulle à la fin de chaque mouvement circulaire lorsque l'outil n'est plus en contact avec la pièce. Les composantes (**F_x** et **F_y**), évoluent entre des valeurs minimales et maximales suivant des formes sinusoïdales et sont déphasées entre elles.

J. Jeswiet [8] a également mesuré les efforts dans le cas du formage incrémental à deux points TPIF. Il a pour cela utilisé un capteur dynamométrique de force à six axes, monté sur le dispositif de formage incrémental à deux points TPIF.

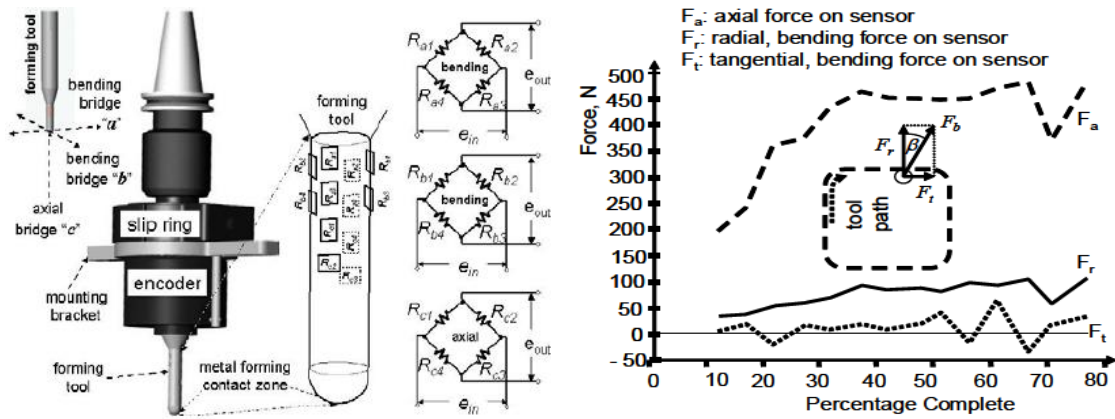


Figure I-20. jauges de mesure de forces et évolution des forces de formage SPIF [8]

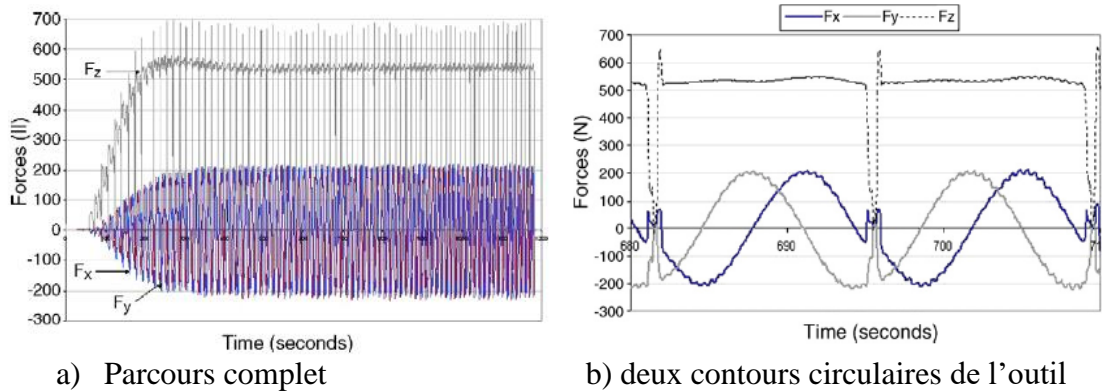


Figure I-21. Evolution des composantes de force F_x , F_y et F_z [74]

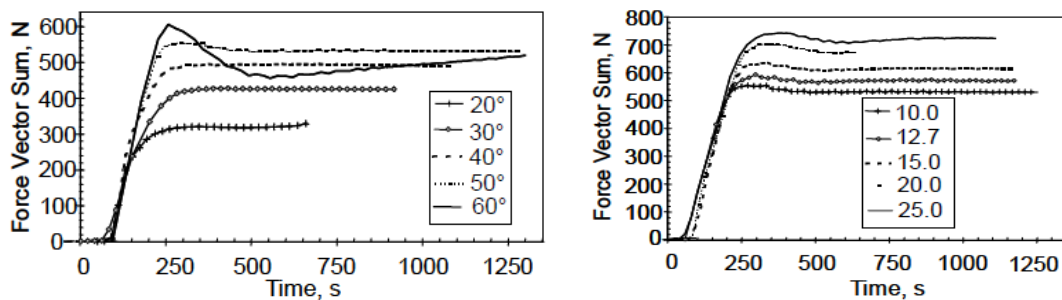


Figure I-22. Influence de l'angle d'inclinaison α et du diamètre de l'outil D_p sur la force [8]

Plusieurs études ont été menées dans la bibliographie pour étudier l'influence des paramètres du procédé de formage incrémental sur les efforts de formage. J. Jeswiet et

all[8] ont montré que le diamètre de l'outil (D_p) et de l'angle d'inclinaison (α) ont un impact sur la valeur des efforts (voir figure I-22).

J. Dufflou [74], G. Ambrogio et al[5, 70] ont aussi étudié l'influence de ces deux paramètres ainsi que deux autres: le pas de déplacement vertical (Δz) et épaisseur de la tôle (t) sur la valeur des efforts au cours du temps. La valeur de l'effort axial maximal varie en fonction des valeurs de ces quatre paramètres (α , D_p , Δz et t). Pour ces études menées en ne faisant varier qu'un seul paramètre à la fois les trois autres ayant une valeur fixe, l'effort axial le plus faible a été obtenu dans les quatre cas pour la valeur étudiée la plus basse de chaque paramètre.

4.2. Le profil des pièces

La conformité de la pièce formée par le procédé de formage incrémental est la première chose à assurer [3]. Cette conformité dimensionnelle des pièces coniques est souvent vérifiée par une comparaison des profils obtenus suivant un ou plusieurs plans de coupe choisis, par rapport aux profils théoriques (coupes de la CAO de la pièce) [58, 75, 76] .

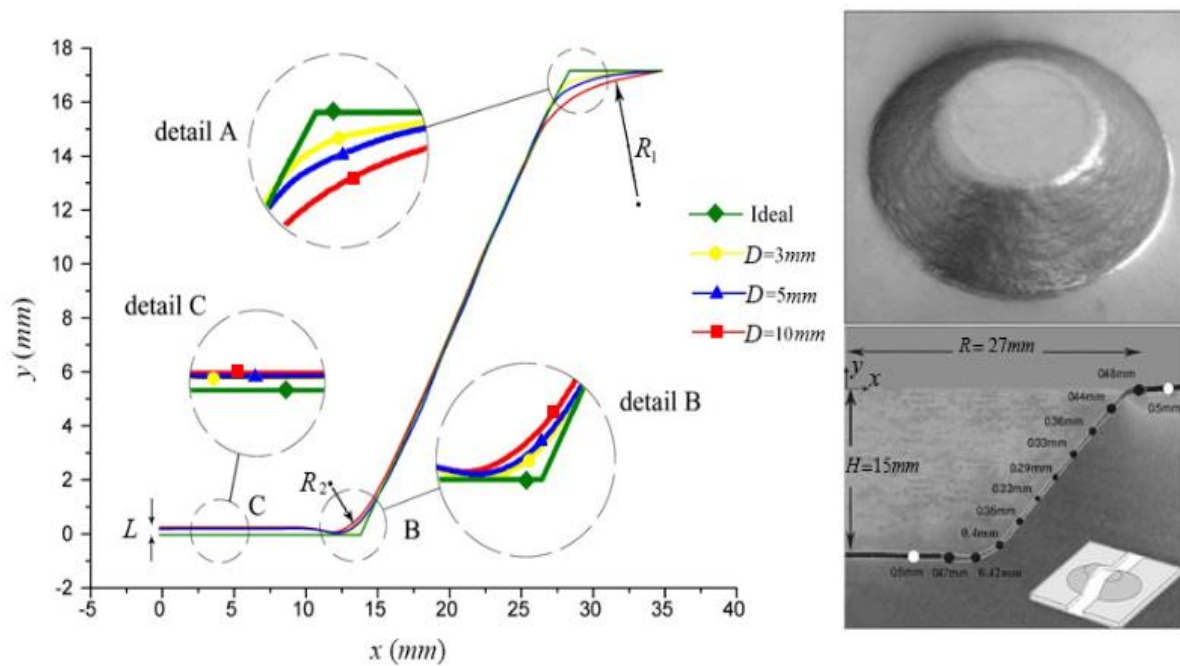


Figure I-23. Erreurs des profils en fonction du diamètre du poinçon [77]

Les erreurs mesurées entre profils réalisés et profils théorique sont généralement dues au phénomène du retour élastique lié au relâchement des contraintes. Il est particulièrement important après le retrait du serre-flan. A. Asgari et al [77] montrent que pour un cône tronqué l'erreur est principalement concentrée en deux zones, le fond de la pièce et le col supérieur du cône tronqué où l'outil attaque le flan, comme le montre la figure I-23. De plus cette erreur augmente lorsque le rayon du poinçon augmente. Certains auteurs ont proposé des solutions afin de prévoir les valeurs des erreurs et anticiper ce phénomène comme l'utilisation de trajectoires optimisées [34, 78, 64] et des stratégies multi-passes [16].

4.3. La distribution de l'épaisseur

La variation de l'épaisseur est un paramètre important de contrôle de conformité dimensionnelle. Cette conformité peut être jugée par plusieurs paramètres qui sont souvent reliés entre eux. Une estimation de l'épaisseur finale peut être calculée par une loi dite loi sinus [8]. Dans cette formule, l'épaisseur finale est liée à l'angle de formage et l'épaisseur initiale. Cependant, dans la pratique, la tôle n'a jamais une épaisseur uniforme à la fin du procédé de formage incrémental. La figure I-24 présente la distribution de l'épaisseur à la fin du formage incrémental d'un cône tronqué dans un plan de coupe passant par l'axe de révolution de la pièce.

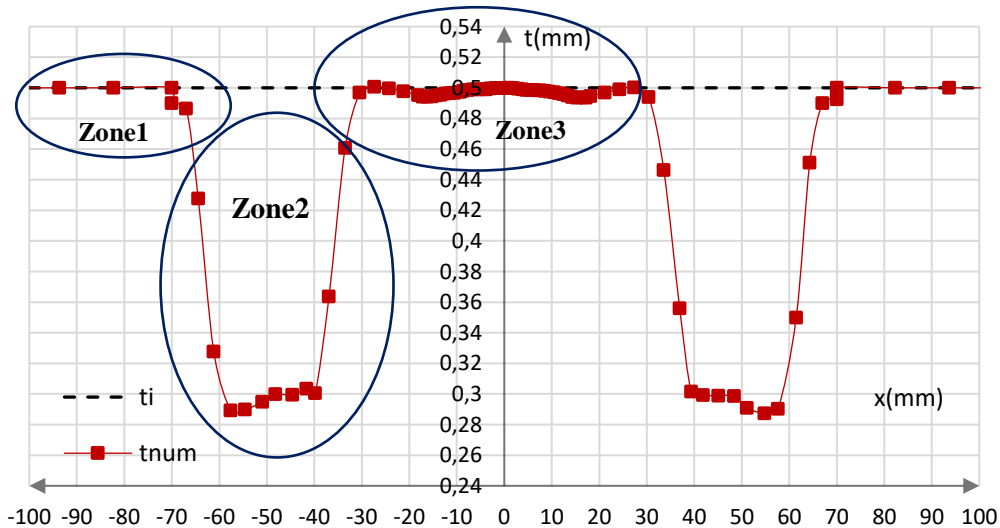


Figure I-24. Les trois zones de la distribution de l'épaisseur cas d'une pièce conique ($\alpha=55^\circ$)

La courbe se compose en trois zones : une partie relative à la zone de fixation entre le serre-flan et la matrice où l'épaisseur reste fixe, égale à sa valeur initiale, une deuxième zone relative à la partie oblique du cône tronqué (zone où l'épaisseur chute jusqu'à une valeur minimale puis remonte pour atteindre sa valeur initiale) et une troisième zone associée au fond de la pièce conique. C'est donc dans la seconde zone que l'épaisseur minimale est atteinte et où la rupture de la tôle peut apparaître.

La loi sinus est utilisée par de nombreux auteurs [29, 70, 80] pour avoir principalement une approximation de l'épaisseur minimale et donc de l'amincissement maximal (figure I-25).

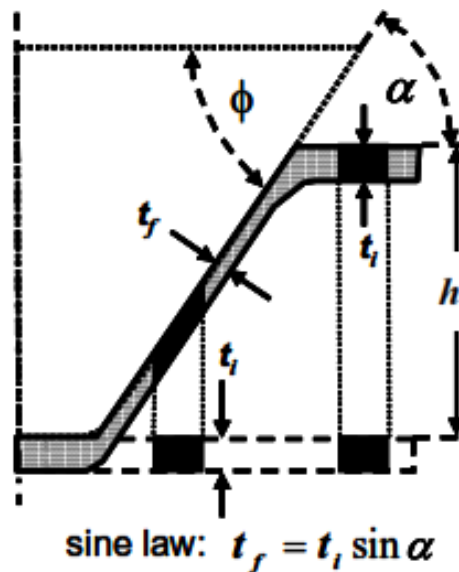


Figure I-25. Application de la loi sinus sur l'épaisseur dans la zone déformée [8]

L'amincissement maximal de la pièce est lié à plusieurs paramètres du procédé. L'influence de différents paramètres comme la vitesse de rotation de la broche (N), la vitesse de d'avance du poinçon (V_f), l'incrément axial de l'outil (Δz) sur la répartition de l'épaisseur a été étudiée par différentes auteurs (Hamilton et J. Jesweit [54], H. Nirala [80] et M. Honarpicheh [81]).

4.4. L'angle limite de formage

L'angle limite de formage correspond à l'inclinaison maximale de la zone déformée par rapport à la partie non déformée (angle α de la figure I.1) pouvant être réalisé sans rupture. L'angle limite de formage est généralement recherché sur les pièces de référence comme le cône tronqué ou la pyramide. La valeur de l'angle limite de formage est lié à plusieurs paramètres [5, 82].

Il dépend principalement du matériau utilisé. Plusieurs études portent sur la recherche de l'angle limite de formage pouvant être atteint avec le procédé de formage incrémental avec différents matériaux.

Certains matériaux sont connus pour présenter une bonne limite de formage comme les alliages d'aluminium (entre 70 et 76°), mais d'autres matériaux présentent une mauvaise aptitude à la déformation plastique et ont une limite de formage très faible comme les alliages de titane (environ 45°). Le tableau I-3 présente quelques nuances de matériaux travaillées et l'angle limite de formage atteint. Cette valeur très faible limite la forme des pièces en titane pouvant être réalisées par formage incrémental. Plusieurs recherches sont donc réalisées afin d'améliorer cette aptitude. Le chauffage de la pièce est la solution principale [12, 23].

Tableau I-3. Différent angles limites des métaux en formage incrémental SPIF

Auteur	Buffa et al [83]	Shanmunagatan et al [33]	Hino et al [84]	Kurra et al [85]	Honapisheh et al [12]
Année	2013	2014	2014	2014	2016
Matériau	Alliage d'aluminium AA7075-O	Alliage d'aluminium AA3003-O	Alliage de magnésium AZ31-O	Acier EDD steel	Alliage de titane Ti-6Al-4V
Angle limite	A chaud 80°	A froid 76°	A chaud 70°	A froid 75	A chaud 55°

4.5. La Courbe limite de formage CLF

Le diagramme limite de formage est un outil utilisé en emboutissage, afin de savoir, si la mise en forme d'une tôle pour un matériau et une épaisseur donnée, est réalisable par ce procédé. Plusieurs travaux ont été réalisés dans le but de mettre en place le diagramme limite de formage pour le formage incrémental à un point SPIF (L. Flice et al[4], J. Jeswiet et al[9] et J.J Park et al[7]).

Les travaux effectués montrent que les niveaux des limites de formage en formage incrémental, sont supérieurs à ceux des procédés conventionnels comme l'emboutissage comme le montre la figure I-26. Cette courbe limite de formage en formage incrémental, est une droite affine de pente négative contrairement aux procédés conventionnels de pente positive. Elle est contenue dans le premier quadrant du diagramme limite de formage qui contient déjà la courbe des procédés conventionnels (ϵ_1 et $\epsilon_2 > 0$). Il faut noter

que la différence entre les deux courbes touche son maximum lorsque ϵ_2 est nulle ($\epsilon_2 = 0$).

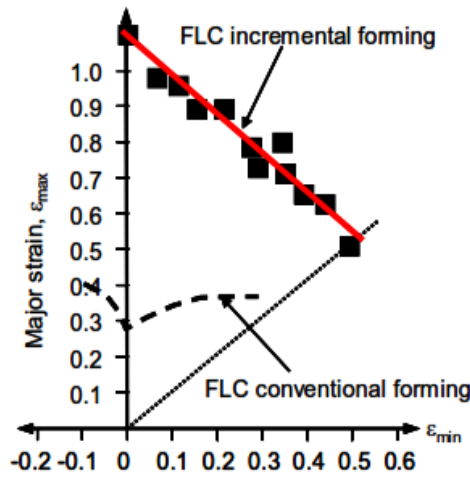


Figure I-26. Courbe limite de formage CLF du formage incrémental [8]

Plusieurs paramètres influencent la formabilité du matériau :

- L'épaisseur de la tôle (t),
- Le pas de déplacement vertical (Δz),
- La vitesse de déformation du matériau,
- La taille de l'outil de formage (d_p).

Le pas de déplacement axial (Δz), a une influence significative sur l'état de surface de la pièce obtenue mais aussi sur la formabilité. La formabilité des métaux diminue lorsque le pas de déplacement axial (Δz) augmente comme l'illustre la figure I-27. [8, 86]

L'augmentation de la vitesse la broche N (tr/min) peut aussi améliorer la formabilité. Ceci s'explique par un échauffement local de la tôle, et une réduction des efforts de frottement à l'interface tôle outil.

Le diamètre de l'outil (D_p) joue un rôle important. La figure I-28 montre l'influence du diamètre de l'outil sur la formabilité du matériau pour la mise en forme d'une pyramide en aluminium.

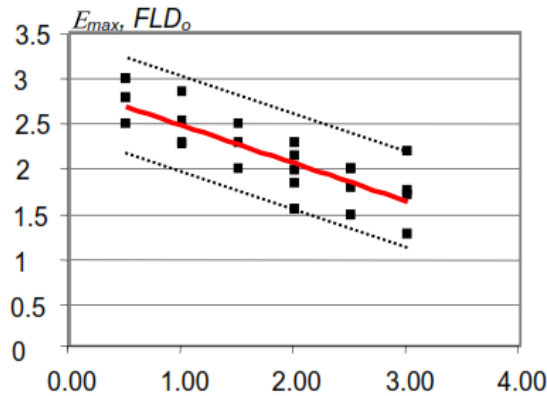


Figure I-27. Influence de l'incrément axial Δz sur la formabilité [8]

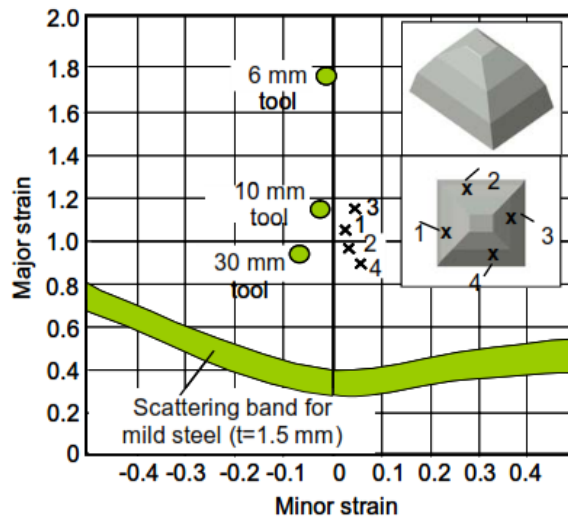


Figure I-28. Influence de diamètre de l'outil sur la formabilité [8]

Ces quatre derniers paramètres influencent la formabilité du matériau lors du formage incrémental mais le meilleur moyen pour augmenter la formabilité consiste à chauffer la pièces (G. Ambrogio et al [9], M. Honapishech et al [12], A. Mohammadi et al [23]).

4.6. La rugosité des pièces en formage incrémental

Le mauvais état de surface des pièces formées constitue l'un des points les plus critiques du procédé. La rugosité des pièces formées fait donc partie des paramètres de contrôle. Différentes recherches [17, 57] ont donc été effectuées afin de chercher les paramètres du procédé améliorant l'état de surface. Les études menées jusqu'à maintenant, montrent que parmi les paramètres du procédé, le pas vertical (Δz) est le principal facteur affectant

l'état de surface. Le diamètre (d_p) du poinçon a aussi un effet considérable [70]. les résultats des travaux de J. Jeswiet [9] synthétisés sur la figure I-29 montrent que la diminution de l'incrément axial (Δz) fait diminuer la rugosité. Un diamètre de poinçon plus important améliore la rugosité.

Les études menées par M. Durante [21] pour déterminer et comparer les allures des différents paramètres de rugosité, ont prouvé que d'autres paramètres, comme l'épaisseur de la tôle, le matériau travaillé, les conditions de contact d'outil-tôle ont aussi un impact.

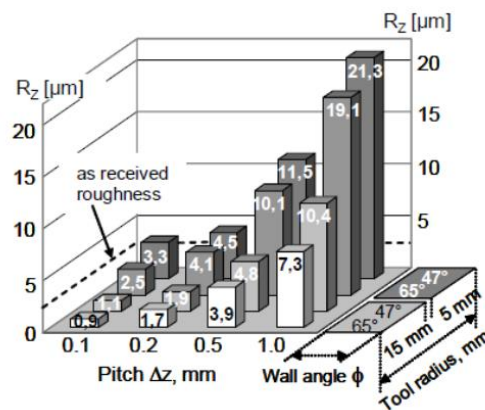


Figure I-29. Influences des facteurs (Δz), (D_p) et (α) sur la rugosité [8]

5. Optimisation des paramètres du formage incrémental

Comme cela a été vu précédemment, plusieurs paramètres influencent les résultats du formage incrémental. Plusieurs travaux ont alors été effectués afin de rechercher les valeurs optimales de ces paramètres. La réalisation d'une pièce par formage incrémental étant très longue du fait de la grande trajectoire de l'outil, la plupart des travaux sur l'optimisation du procédé sont basés sur une méthode utilisant des plans d'expériences. On peut citer les travaux de S. Kurra et al [57] qui ont utilisé les plans d'expérience pour trouver la valeur optimum du pas de déplacement vertical, du diamètre de l'outil et la lubrification dans le but de trouver une rugosité optimum pour un cône tronqué. En 2014 S.P. Shanmuganatan et al [33] ont aussi appliqué une méthode basée des plans d'expérience en faisant varier quatre facteurs (diamètre du poinçon (d_p), incrément axial (ΔZ), vitesse de rotation (N) et vitesse d'avance (V_f)) afin d'optimiser l'épaisseur moyenne, l'angle de formage limite et la rugosité de surface pour la mise en forme des pièces coniques en alliage d'Aluminium Al 3003, Ils ont montré que :

- Le diamètre de l'outil a un impact sur la rugosité de la surface. Lorsque le diamètre de l'outil augmente, la rugosité de la surface diminue.
- Une augmentation du diamètre de l'outil réduit l'épaisseur moyenne mesurée sur la pièce conique.
- L'effet du diamètre de l'outil sur l'angle limite de formage est plus faible que les autres paramètres traités.

6. Conclusion

Le procédé de formage incrémental est un procédé prometteur pour la mise en forme des métaux en feuille. La formabilité est jugée comme un des critères de choix par rapport aux autres procédés, outre les gains financiers qu'il apporte pour les petites séries. Cette formabilité est fonction de plusieurs facteurs relatifs au poinçon (le diamètre, la forme, vitesse de rotation, vitesse d'avance et sa trajectoire), ainsi que des facteurs liés à la tôle (épaisseur, pression du serre flan). Dans cette revue bibliographique on a présenté l'effet de ces facteurs sur les paramètres de jugement du procédé de formage incrémental, les éventuels problèmes et les solutions apportées par différents auteurs. Un problème important se pose pour les métaux de faible ductilité comme les alliages de titane qui trouvent une large gamme d'utilisation en particulier dans le domaine biomédical. Le secteur médical, plus particulièrement celui du biomédical, fait en effet parti des secteurs pour lesquels ce nouveau procédé de mise en forme est très bien adapté. Le secteur médical a en effet besoin de produire des petites séries de pièces, voir des pièces uniques adaptées à chaque individu comme c'est le cas des prothèses ou des implants. Le titane est très utilisé dans le secteur biomédical pour les prothèses et les implants car c'est un matériau biocompatible. Mais sa faible limite de formage limite les possibilités de géométries à réaliser en formage incrémental. Pour des angles de courbure importants, la tôle risque de se déchirer. A froid, ce procédé permet donc difficilement de réaliser le formage de géométries complexes et d'obtenir des précisions acceptables.

Une solution envisageable pour diminuer les efforts nécessaires au cours du formage est comme il a été vu dans ce chapitre de réaliser ce procédé à chaud. Le chauffage des alliages de titane permet une amélioration de leur comportement plastique. Le formage incrémental à chaud fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II: Etude expérimentale du formage incrémental à chaud du Ti-6Al-4V

1. Introduction

Les équipes GAMMA3 et LASMIS de l'UTT ainsi que l'équipe MAI de l'ENIT de Tunis ont déjà réalisé plusieurs études numériques et expérimentales du procédé de formage incrémental [18, 87]. Parmi les domaines d'application du formage incrémental, le domaine du biomédical est celui pour lequel ce procédé a vraiment un très grand intérêt : Il permet de mettre en forme des prothèses adaptées à chaque patient pour une efficacité maximum. L'entreprise LDR médical spécialisée dans la conception d'implants et prothèses étant implantée à Troyes et l'UTT ayant de plus établi des contacts avec le « British Columbia Institute of Technology » de Vancouver (institut effectuant des recherches sur des prothèses médicales), nous avons décidé d'étudier le formage incrémental à chaud, permettant de diminuer les efforts de formage et mettre en forme des pièces en titane.

Dans ce chapitre les différentes solutions développées par les chercheurs pour le chauffage de la tôle lors d'une opération de formage incrémental sont présentées. Ces solutions peuvent être classées en trois familles :

- Le chauffage local de la zone de contact outil-tôle,
- Le chauffage total de la tôle et
- Le chauffage combiné.

Dans la suite on présente notre méthode de chauffage qui consiste à un chauffage par des cartouches implantées dans la matrice du dispositif de formage ainsi que la campagne d'essais réalisée. Le dispositif de chauffage est équipé par des instruments de mesure des efforts, de suivi et de régulation de la température. Une campagne d'essai de formage a été menée sur des tôles minces en alliage de titane Ti-6Al-4V. Les pièces réalisées à des températures optimisées sont numérisées pour quantifier et analyser les distributions des épaisseurs ainsi que les profils des pièces obtenues selon des plans de coupe.

2. Les différentes techniques de chauffage en formage incrémental des tôles minces

2.1. Introduction

Le formage incrémental des tôles asymétriques se base généralement sur la formabilité des métaux ou alliage comme les inox ou les alliages d'aluminium ASF [14]. Il y a des domaines où les contraintes liées au choix du matériau sont plus sévères comme dans le domaine médical, le domaine pharmaceutique et le domaine aéronautique où les métaux comme les alliages de titane et de magnésium sont souvent utilisés. Ils présentent quelques handicaps comme leurs faibles formabilités ou leurs mauvaises aptitudes aux déformations plastiques.

Certains auteurs [12] ont cherché à développer des solutions pour améliorer cette aptitude, au niveau du procédé de formage par l'élévation de la température de travail en particulier pour le procédé de formage incrémental à un point.

Depuis 2008 avec G. Ambrogio. [17] et J. J Park [7] et d'autres équipes de recherche travaillent sur le chauffage en formage incrémental. Plusieurs tentatives de conception des systèmes de chauffage sont mises en place afin d'augmenter et homogénéiser la température de formage. Les solutions testées peuvent être classées en trois catégories :

1. Des systèmes de chauffage local de la zone à déformer.
2. Des systèmes de chauffage total de la tôle.
3. Des systèmes de chauffage combiné.

Dans la suite on présente les principales solutions proposées ainsi que leurs effets et plages d'utilisations.

2.2. Le chauffage total de la tôle

1- Afin de voir l'influence du chauffage de la tôle lors d'une opération de formage incrémental sur l'évolution des forces de formage, G. Ambrogio et al [17] ont effectués des essais à chaud sur l'alliage de magnésium AZ31 qui ne possède pas une bonne formabilité à froid, et qui nécessite de ce fait une force importante pour le déformer. Les essais ont été effectués sur des tôles pour former un cône tronqué avec un grand diamètre ($D=100$ mm) et une profondeur ($h=40$ mm), avec différents angles

d'inclinaisons (α). Toutes les expériences ont été effectuées sur une fraiseuse CNC à 3 axes, l'interface entre le poinçon et la tôle est lubrifiée.

Une attention particulière a été accordée à la conception du système de chauffage et d'isolation, afin de parvenir à un contrôle thermique efficace sur la feuille. Une bande de chauffage a été placée le long de la surface externe du banc comme le montre la figure II-1. Sa température est asservie par un régulateur PID équipé de trois thermocouples placés à différents rayons sur le flan. Les essais sont effectués en variant les paramètres du procédé et la température (200, 250 et 300°C).

En conclusion, le chauffage de la tôle a pu apporter une amélioration de la formabilité du magnésium. L'influence de la température et de l'incrément axial sont importants, alors que le rôle du diamètre de l'outil (d_p) n'est pas très significatif. Une augmentation de la température permet de diminuer l'effort de formage comme le montre la figure II-2. La formabilité maximale est atteinte à $T=300\text{ }^\circ\text{C}$, ce résultat est conforme aux résultats obtenus pour les autres procédés de formage, comme l'emboutissage profond à chaud [88].

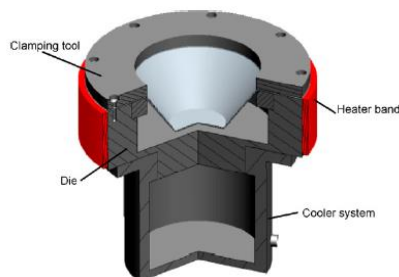


Figure II-1. Système de chauffage du montage de formage SPIF [17]

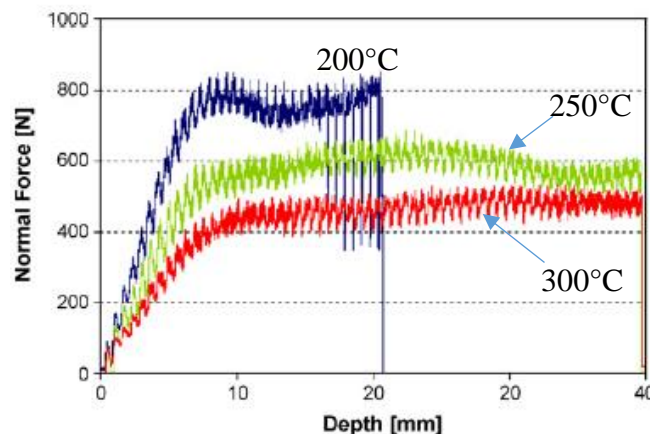


Figure II-2. Allure des efforts à des températures différentes [17]

- 2- En 2008 J.J Park et al [7] présentent les résultats de leur étude sur le formage incrémental d'une tôle en alliage de magnésium AZ31 à haute température afin d'augmenter son aptitude à la déformation plastique. Des pièces coniques sont formées jusqu'à l'apparition d'une fissure. Ces essais sont effectués à $T = 20^{\circ}\text{C}$, 50°C , 100°C , 150°C , 200°C et 250°C . La tôle est chauffée par des ventilateurs soufflant de l'air chaud, pour maintenir la température constante au court de l'essai, un dispositif de mesure de température sans contact est mis en place. Ils montrent que la courbe limite de formage (CLF) augmente en fonction de l'augmentation de la température comme les autres alliages.

- 3- Le travail de P.J. Silva et al [89] présente une nouvelle technique de chauffage total de la tôle en alliage d'aluminium d'épaisseur 1mm. Le but de cette recherche est de diminuer le temps de formage, le critère d'évaluation retenue est la conformité dimensionnelle de la pièce à réaliser. Les dimensions du système de chauffage ont été définies conformément aux dimensions de la pièce à réaliser de base carrée 150x150x80mm. Le chauffage est généré par 11 lampes halogènes de puissance 100W chacune. Le contrôle de la température lors du formage est fait par trois capteurs. Le chauffage du dispositif est commandé par un régulateur de température tout ou rien dans la plage de 20°C à 550°C .

En outre, un thermomètre laser a été utilisé pour mesurer la température à côté de point de formage. Une caméra thermique est utilisée comme un troisième instrument de surveillance de la température, visualisant la répartition de la température sur la tôle lors du travail. Des pièces réalisées à la température ambiante et à la température de 160°C sont analysées.

Le chauffage avec ces lampes halogènes apporte une amélioration au niveau du procédé de formage incrémental des tôles en aluminium. On améliore la ductilité de la tôle, le temps de formage est réduit, on obtient une amélioration de la conformité dimensionnelle des pièces surtout au niveau des arrondis du congés du cône tronqué (voir Figure II-3).

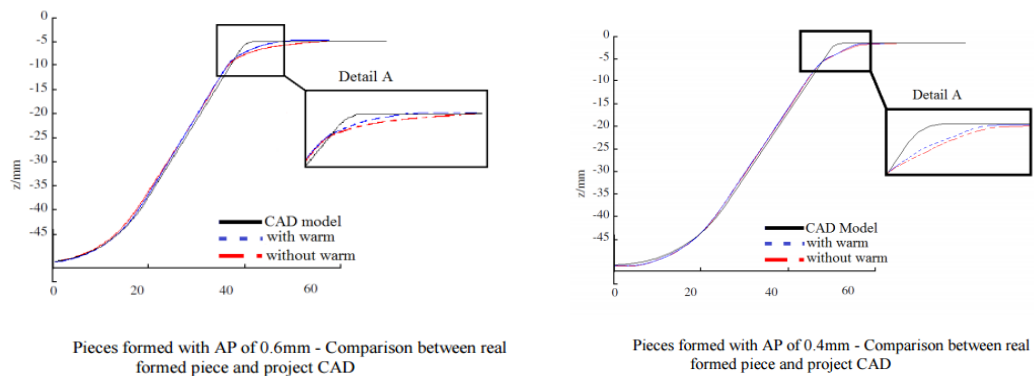


Figure II-3. Améliorations de la formabilité au niveau du fond par l'effet de la température. [89]

- 4- En 2017 Ambrogio et al [90] publient une nouvelle étude sur le formage incrémental à chaud appliqué sur un alliage de titane. Le critère d'évaluation retenu est l'effort de formage. Les résultats obtenus en termes de conformité dimensionnelle ou des efforts développés sont comparés avec les résultats dans le cas du formage de la même prothèse par le formage super-élastique. Il montre que le comportement mécanique de la prothèse obtenue présente une meilleure rigidité en raison de l'épaisseur de tôle plus importante. Le travail a mis en évidence les bonnes performances des deux techniques et les résultats satisfaisants de point de vue de biocompatibilité.
- 5- T. Nguyen et al [91] en 2017, présentent une machine de formage incrémental à chaud basée sur un chauffage utilisant l'énergie générée par le courant de Foucault. Il étudie l'effet de chauffage sur la formabilité et le retour élastique des prothèses fabriqués en alliage de titane. Dans cette étude les auteurs utilisent un plan d'expérience de quatre facteurs à deux niveaux et recherchent l'angle à la rupture mesurée pour un cône tronqué. Ils montrent que l'élévation de la température améliore la formabilité.

2.3. Le chauffage partiel de la tôle

Pour certains chercheurs leurs solutions se focalisent autour de la zone de la tôle en cours de déformation c'est à dire la zone où l'outil applique sa force pour déformer le flan. Ce sont des solutions de chauffage local. Plusieurs techniques de chauffage local de la partie en contact avec le poinçon sont développées. On présente dans la suite les principales solutions retenues.

1. A. Göttmann et al [92] dans leur travail utilisent le laser comme technique pour effectuer le chauffage local. Un rayon de laser est focalisé sur la zone de contact poinçon-tôle du côté outil avec une inclinaison de 45° par rapport à la face de la tôle. Un dispositif permettant de focaliser le rayon laser est conçu et réalisé dans ce but et intégré à la machine CNC pour permettre au rayon de suivre la trajectoire de l'outil. Les essais sont testés sur des tôles en alliage de titane (TiA16V4) et (T40) qui présentent des aptitudes à la déformation plastique à froid limitées.

La profondeur maximale de formage est le critère de jugement de la formabilité. L'approche proposée montre qu'avec cette technique de chauffage local améliore l'aptitude à la déformation plastique du TiA16V4, par contre pour l'alliage T40 ne présente pas une grande amélioration par rapport au formage incrémental à froid (voir figure II-4).

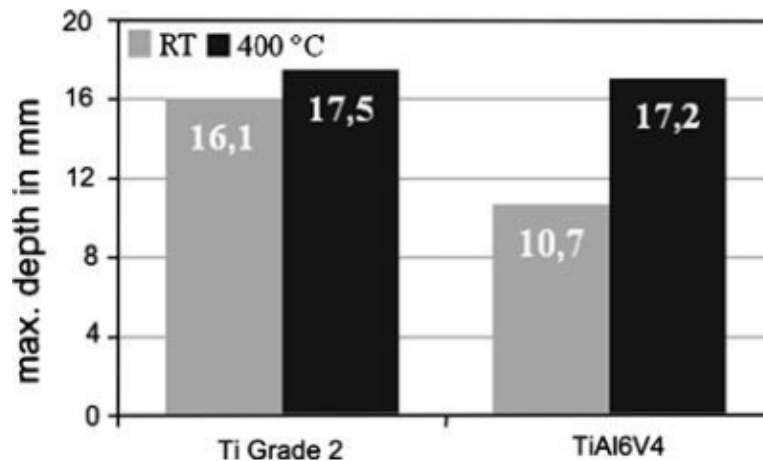


Figure II-4. Comparaison des profondeurs maximale des deux alliages de titane [92]

2. G. Buffa et al [83], présentent une nouvelle approche pour améliorer la formabilité des tôles en focalisant le chauffage dans la zone contact poinçon-tôle due à la friction causée par une élévation des vitesses de rotation du poinçon. L'expérimentation a été faite sur une variété d'alliages d'aluminium (AA1050-O-AA1050 H24 et AA6082-T6) en élevant les vitesses de rotations. La température est surveillée par des thermocouples fixés sur le flan. Une augmentation significative de la formabilité des alliages est observée pour les deux métaux étudiés. De nouvelles courbes de formabilité ont été construites en fonction de la

variation de la vitesse de rotation. Elles montrent une nette amélioration de la formabilité des alliages, quelles que soient l'état de la tôle, à savoir, entièrement recuit, écroui, ou traité thermiquement. Une augmentation maximale de l'angle de cône de 7.5° , 10° et 12.5° , par rapport au processus traditionnel à froid, a été prouvée pour les alliages d'aluminium AA1050-H24, AA1050-O et AA6082-T6. En effet, une augmentation de la vitesse de rotation fait diminuer les contraintes de formage d'une manière remarquable suite à l'élévation de la température.

3. A. Mohammadi et al. [23] exposent le phénomène de la non-conformité géométrique des pièces coniques au niveau de la collerette pour le cas de faible angle d'inclinaison. Dans un premier temps, un dispositif de formage incrémentiel à chaud assisté par des rayons laser est mis au point pour améliorer la formabilité de l'alliage d'aluminium (AA5182-O). Dans un deuxième temps, les essais sont focalisés sur le formage des pièces coniques peu profondes et les mécanismes de déformation associés ainsi que la zone de formage au niveau du contact outil-tôle. Pour obtenir des paramètres appropriés de procédé de formage incrémental, un modèle éléments finis est développé en tenant en compte le transfert de chaleur transitoire. La simulation porte sur l'optimisation du mouvement et de l'emplacement du rayon laser sur la pièce conique. Différentes stratégies de positionnement du rayon laser ont été utilisées pour lesquelles des mesures de la forme et des forces de formage ont été faites.

Les résultats de la modélisation thermique ont été utilisés avec succès pour prédire une température de formage optimale qui couvre la zone de contact. On observe que le positionnement laser outil peut affecter de manière significative la hauteur du décalage par rapport à la forme voulue. Focaliser le rayon laser sur la paroi du cône en dehors de la zone de contact, se traduit par une diminution sensible de la hauteur et une réduction des forces de formage. Cette réduction des efforts est attribuée à la chaleur induite par le ramollissement du matériau et correspond bien avec les effets observés dans des matériaux caractérisés par un exposant de durcissement plus faible.

4. R. Hino et al [84] en 2014 adoptent la solution de A. Mohammadi et al [23] et ils présentent un dispositif de formage incrémental à chaud. Il est basé sur le chauffage par des rayons laser pour améliorer la formabilité des tôles en alliage de magnésium AZ31. Il utilise un poinçon de forme hémisphérique, la zone contact outil-tôle est chauffée localement par un rayon laser mobile pour augmenter la ductilité de la matière. Les essais sont menés sur une tôle en alliage de cuivre AZ31 d'épaisseur 0,78mm en faisant varier les conditions à savoir la vitesse d'avance du poinçon de 480mm/mn jusqu'à 4000 mm/mn ainsi que la puissance du rayon laser (jusqu'à 950W).

Les résultats expérimentaux montrent que l'aptitude au formage de l'alliage est remarquablement améliorée avec l'augmentation de la puissance du laser ou au chauffage. On montre aussi que la distance focale du faisceau laser et la vitesse d'avance affectent la formabilité. Les résultats indiquent également que les contraintes résiduelles du cône tronqué obtenues ont été nettement réduites pour atteindre la valeur zéro avec un chauffage local.

5. D. Xu et al [43] présentent deux approches de chauffage local de la zone de formage associé au procédé de formage incrémental. La première utilise un système de chauffage du au frottement donné par la rotation de l'outil à des vitesses importantes. La deuxième utilise le chauffage par résistances électriques. Ces deux techniques sont utilisées pour former des tôles en métaux durs d'épaisseur 1.4mm en alliage de magnésium AZ31B.

Le chauffage par des grandes vitesses de rotation du poinçon est obtenu par le contact entre poinçon-flan. Les équations de frottement décrit cette quantité de chaleur en un point de contact.

$$Q_i = f_i V_i t_i = f_i (r_i w + V) t_i \quad (\text{II-1})$$

Le chauffage par courant électrique de l'outil et généré par un courant traversant l'outil et régit par la loi d'Ohm. L'outil est relié à une des électrodes qui lui assure un chauffage tous au long de l'opération de formage.

$$Q_E = I^2 R_{contact} t_t \quad (\text{II-2})$$

Q_E : Le flux de chaleur généré/ I : le courant appliqué, $R_{contact}$: la constante de résistance

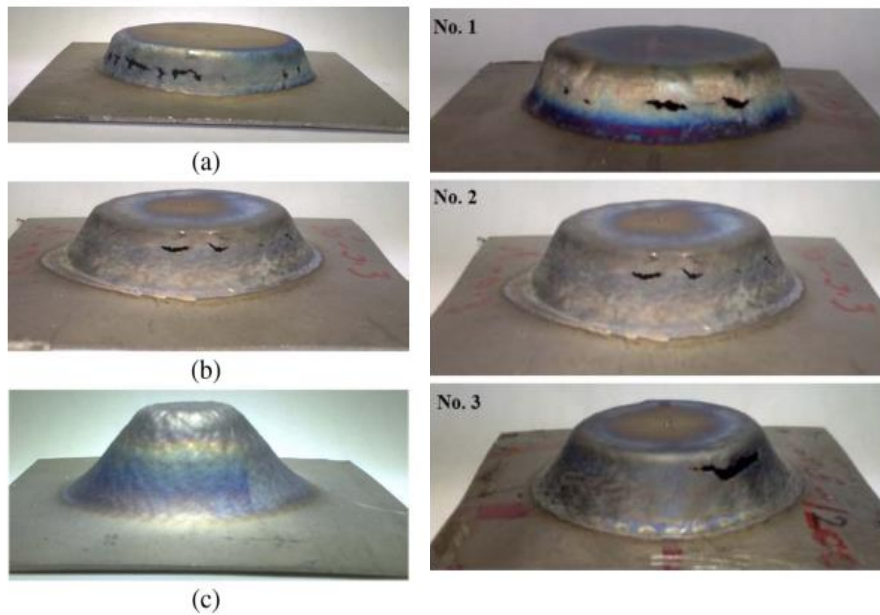
La surveillance de la variation des températures en utilisant les deux techniques est faite par des caméras infrarouges de plage de mesure (-40°C à 2000°C). Les résultats obtenus montrent que le chauffage par frottement est mieux que le chauffage par résistance électrique. De point de vue temps de réponse le chauffage par résistance électrique est favorable, il offre aussi la possibilité de réaliser des pièces coniques avec des angles d'inclinaison (79°) importants pour cette famille de matériau.

6. M. Honarpisheh et al [12] traitent expérimentalement et numériquement le procédé de formage incrémental à un point avec chauffage électrique sur des tôles en alliage de Titane Ti-6Al-4V. La configuration expérimentale utilisée dans ce travail est un dispositif dont les principales parties sont, le poinçon de formage en acier rapide (HSS), le flan, un serre-flan, une matrice contenant une isolation thermique avec le support du capteur des efforts, source d'alimentation en courant continu permettant d'assurer un chauffage dans une gamme entre 400 et 500°C, et une machine-outil CNC à 3 axes.

Des essais sont menés sur des tôles en alliage de Titane Ti-6Al-4V (90×90×1 mm), tous en variant le diamètre du poinçon, l'incrément axial (ΔZ) et l'angle d'inclinaison (α), les trajectoires de l'outil sont générées par un logiciel commercial de CAO (POWERMILL) ces trajectoires sont utilisées en simulation numérique. Pour éviter l'oxydation des tôles lors des essais à chaud on utilise une poudre (MoS₂) pour la lubrification.

Les figures II-5 et II-6 présentent le résultat des effets des paramètres du procédé, tels que l'incrément axial (ΔZ) et l'angle d'inclinaison (α) et le diamètre de l'outil (d_p), sur la formabilité, la force de formage incrémentiel et la distribution d'épaisseur des pièces coniques.

Les résultats des travaux expérimentaux montrent que la force de formage présentée par la résultante est proportionnelle à l'incrément axial (ΔZ) et elle est inversement proportionnelle au diamètre de l'outil (d_p). En outre, la distribution de l'épaisseur des pièces coniques formées diminue avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison et elle diminue une fois on diminue l'incrément axial (ΔZ) de l'outil.



(a)- $\alpha=64^\circ$, (b)- $\alpha=56^\circ$, (c)- $\alpha=45^\circ$ et No.1 : $\Delta Z=0,1\text{mm}$, No.2 : $\Delta Z=0,3\text{mm}$, No.3 : $\Delta Z=0,5\text{mm}$

Figure II-5. Pièces obtenues avec variation des paramètres de travail [12]

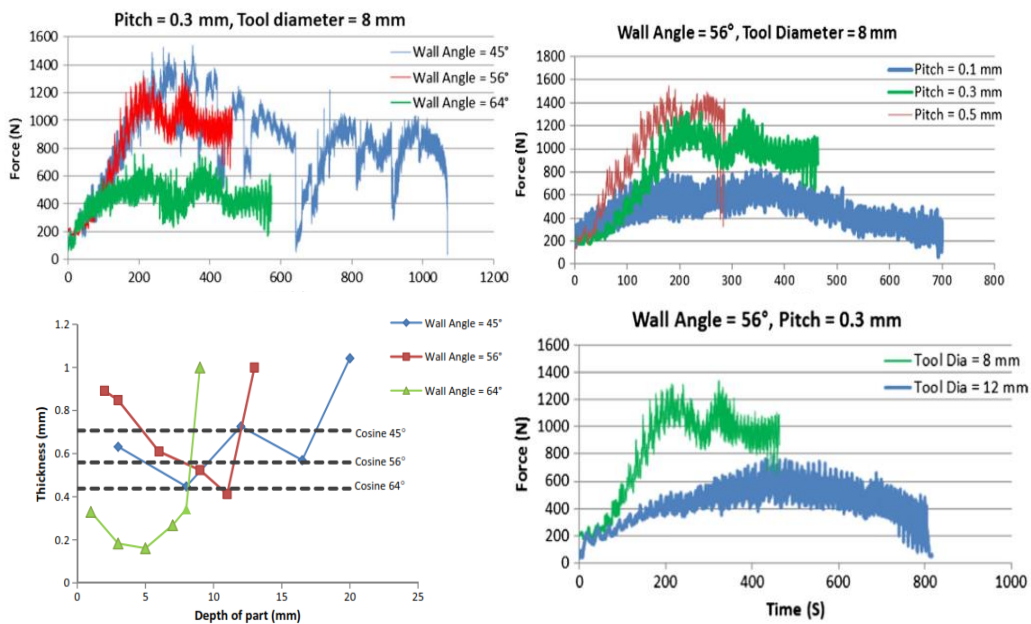


Figure II-6. Variation des efforts en fonction de la variation des paramètres d'essais [12]

2.4. Le chauffage combiné de la tôle

G. Palumbo et M. Brandizzi [46] présentent dans leur travail une nouvelle technique de chauffage combinée du procédé de formage incrémental à un point (SPIF), pour réaliser une coque de porte de voiture en alliage de titane (Ti6Al4V). Le chauffage de la tôle est obtenu principalement par effet électrique sous forme de bande chauffante autour de la matrice supportant le flan. Une augmentation de température est obtenue par frottement de la rotation de l'outil à des vitesses importantes comme le montre la figure II-7.

Les essais sont menés en variant la vitesse de rotation de 800 à 1600rpm et l'incrément axial (ΔZ) de 0,5 à 1,0 mm. La température a été mesurée au cours des essais en continu dans la zone centrale à l'aide d'un pyromètre. En outre, un système de corrélation d'images numériques a été utilisé pour mesurer la distribution des contraintes dans la pièce.

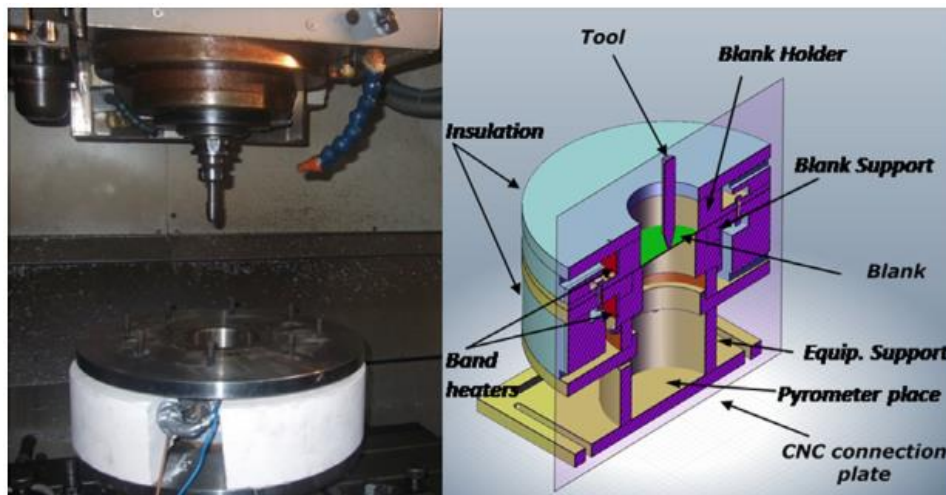


Figure II-7. Technique de chauffage combinée du procédé SPIF [46]

La combinaison des deux techniques de chauffage (chambre de chauffage électrique et chauffage par friction dus à la vitesse de rotation élevée du poinçon) peut être une solution réalisable pour le formage des métaux de faible formabilité tels que des alliages de Titane, comme le montre la figure II-8 présentant les profils des pièces coniques obtenues avec différentes vitesses de rotation de l'outil. Un autre effet positif a été remarqué suite à l'élévation de cette vitesse de rotation de l'outil. La striction du matériau n'est pas favorisée ce qui permet d'atteindre un niveau plus élevé d'amincissement sans amorce de rupture et un formage à des profondeurs relativement faibles ($h=12\text{mm}$).

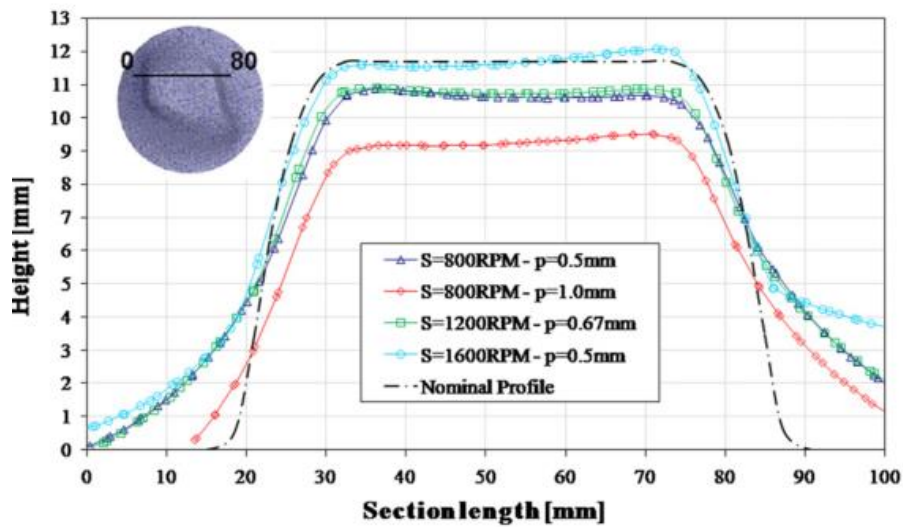


Figure II-8. Les profils des pièces coniques obtenues sous diverse vitesses de rotation [46]

2.5. Conclusion

Les résultats regroupés dans le tableau II-1 suivant, montrent que les objectifs visés par les chercheurs étaient de trouver la bonne solution de chauffage qui améliore la ductilité des matériaux traités ainsi que leur formabilité, de produire des pièces conformes aux dimensions et minimiser les efforts de formage mis en jeux.

Une amélioration de la formabilité a été observée pour l'utilisation des techniques de chauffages locales [9, 80, 39, 72] surtout avec les alliages de titane dont la ductilité présente un handicap pour le formage incrémental. Cependant la qualité des pièces obtenues doit être améliorée car celles-ci présentent souvent des fissures et des brûlures dues au chauffage [62]. Pour les techniques de chauffage total présentées, elles sont souvent utilisés avec des matériaux ductiles comme l'alliage de cuivre ou les alliages d'aluminium [89]. Elles utilisent un chauffage total du dispositif de formage incrémental [17], mais n'assurent pas un chauffage permanent tout au long de l'essai. L'industrialisation de cette solution demande des énergies importantes pour sa mise en œuvre.

La solution de chauffage combiné composée par un chauffage total par résistances électriques présenté par G. Ambrogio et al [17] et G. Palumbo et al [46] associé à un chauffage local par effet de frottement dû aux vitesses importantes de l'outil permet d'améliorer la formabilité mais non la qualité de la pièce produite. A travers cette revue

des travaux, on peut dire que toutes les solutions présentent des handicaps, soit la qualité des pièces réalisées, soit la formabilité limitée soit une industrialisation coûteuse.

Le formage incrémental à chaud nécessite donc encore des investigations.

Pour ce travail de doctorat, notre objectif était de développer et mettre en œuvre une solution de chauffage du dispositif de formage incrémental, simple à implémenter, adaptée aux machines d'usinage CNC et permettant de mettre en forme des tôles en alliages de titane. Elle doit assurer un chauffage total et permanent de la tôle tout au long de sa réalisation. Cette solution doit fournir des pièces ne présentant pas des défauts dus au chauffage comme les fissures et les brûlures.

Tableau II-1. Recueil des des solutions de chauffage du procédé de formage incrémental (WSPIF)

Type de chauffage	Auteurs	Année	Matériau travaillé	Température de chauffage	Technique de chauffage	Critère d'évaluation
Chauffage total	J.J. Park [7]	2008	AZ31	20°C, 50°C, 100°C, 150°C, 200°C et 250°C	Des ventilateurs à air chaud	Courbe limite de formage
	G. Ambrogio [17, 90]	2008 et 2017	AZ31	20°C, 250°C et 300°C	Chauffage totale chambre avec des résistances	Mesure de force de formage
	P. SILVA. [89]	2015	AA1050	160°C	Lampes halogènes	Temps, forme et formabilité
	L.Khanh [91]	2017	Alliage de Titane	480°C et 600°C	Machine spéciale avec courant de Foucault	Formabilité (angle à la rupture)
Chauffage local	A.Gottmann, [92]	2011	Titane5 et grade 2	400 °C	Rayon de laser sur la zone de contact poinçon-tôle	Formabilité (profondeur max de pièces coniques)
	G.Buffa [93]	2013	AA1050-O ; AA1050 H24 et AA6082-T6	20°C ; 50°C ; 150°C ; et 250°C	Elévation de rotation de l'outil 2000-10000trs/mn	Formabilité-angle de formage
	M.Amirah and [23]	2016	AA5182-O	260°C	Rayon laser de l'extérieur	Formabilité et force et épaisseur
	D.Xu [53]	2014	AZ31B	300°C	Frottement dû à la rotation de l'outil 2000 rpm et résistances électriques	Formabilité angle de formage et profondeur
	H. Ryutaro. [84]	2014	AZ31B	400°C	Vitesse d'avance 4000mm/mn et rayon laser (950W)	Formabilité angle de formage
	M. Honarpish eh [12]	2015	Ti-6Al-4V	400°C-500°C	Chauffage par résistance électrique (cathode et anode)	La formabilité, la force et la distribution d'épaisseur
Chauffage combiné	G. Palumbo [46]	2012	Ti-6Al-4V	25°C, 200°C, 400°C,	2chambres de chauffe + friction entre 400et 1600rpm de la broche	Formabilité-profondeur contrainte de formage

3. Conception et réalisation du montage de formage incrémental à chaud (WSPIF)

3.1. Mise en place du dispositif WSPIF à base des cartouches chauffantes

Une analyse détaillée a été menée pour choisir une solution de chauffage efficace et industrialisable apportée au dispositif de formage incrémental. Dans cette nouvelle solution le chauffage est assuré avec des cartouches chauffantes implantées dans la matrice. Le flan à déformer repose sur la matrice pour avoir une surface de contact lui permettant un chauffage par conduction tout au long de l'opération de formage. Un travail succinct et pointu qui prend en compte plusieurs paramètres, nous a permis de concevoir et réaliser un banc d'essai de formage incrémental à un point (WSPIF) à chaud dont les fonctions de services sont regroupées dans le tableau II-2.

Le dispositif de formage incrémental à chaud est présenté sur la figure II-9. Il est constitué de deux blocs :

- Un bloc supérieur contenant la matrice, le serre flan et de quatre colonne avec une plaque inférieure.
- Le deuxième bloc contenant principalement la semelle sur lequel est fixé le capteur de mesure des efforts. Les deux blocs sont liés uniquement par le capteur des efforts par 12 vis de type M6.

La réalisation du dispositif est faite en respectant les plans de conception qui vérifient, le calcul de résistance des matériaux et le calcul thermique associé aux cartouches chauffantes (voir figure II-10). Un régulateur de température (PID) est mis en place permettant de réguler la température par l'alimentation des cartouches en courant électrique. Le régulateur agit en fonction de la température mesurée par le thermocouple placé sur le flan, pour alimenter les cartouches. De cette manière on peut garantir une plage de température de travail pour une opération de formage incrémental à chaud à une température désirée.

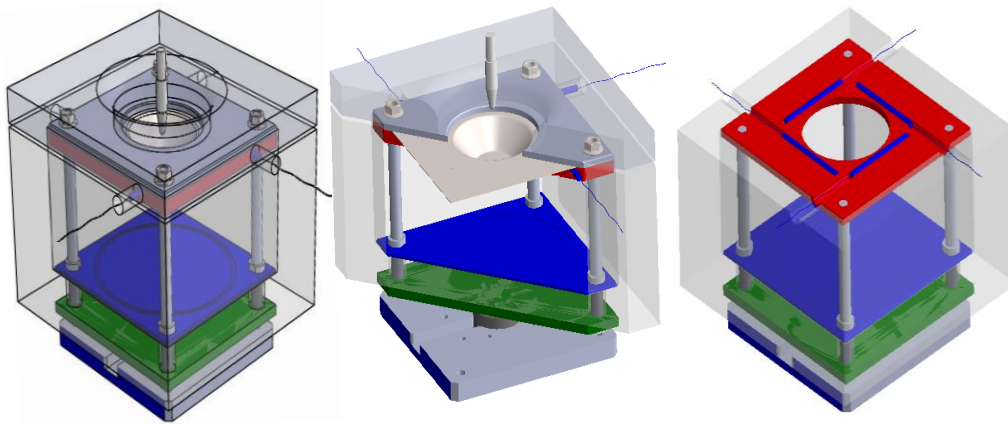


Figure II-9. Montage de formage incrémental à chaud avec des cartouches chauffantes

Tableau II-2. Les fonctions de service du dispositif de formage incrémental à chaud

	Fonctions de service	Elément	Niveau
FS1	Permettre le chauffage de la pièce à une température donnée.	-Cartouches chauffantes -Température	P=4 x 2000 W T _{max} =850°C
FS2	Maintenir la température de chauffage tout au long de l'essai de formage incrémental à chaud	Régulateur de température PID, thermocouple	Mesure jusqu'à une T=1260°C
FS3	Permettre de mesurer les forces appliquées de l'outil sur la tôle chauffée en temps réel	Capteur de mesure d'efforts : -Force axial -Force radial	F _z = 15000 N F _x = 5000 N F _y = 5000 N
FS4	Isoler thermiquement la tôle pour maintenir une température constante et éviter les pertes de chaleur	Brique réfractaire spéciale pour four	Delta T=1700°C
FS5	Fournir l'énergie nécessaire pour le chauffage	Courant contenu	U=380V
FS6	Utiliser un outil pour le formage de la pièce	Outil à tête hémisphérique	Diamètre (mm) 5 ≤ Ø ≤ 25
FS7	Permettre le serrage du dispositif sur la machine	De forme d'un carré avec un support à brider	Coté a= 300mm
FS8	Assurer un déroulement sécurisé du travail	Forme et dimension de sécurité	500x500*450
FS9	Permettre à l'utilisateur de former la pièce	Matière : - Alliage de titane - Acier - Cuivre	

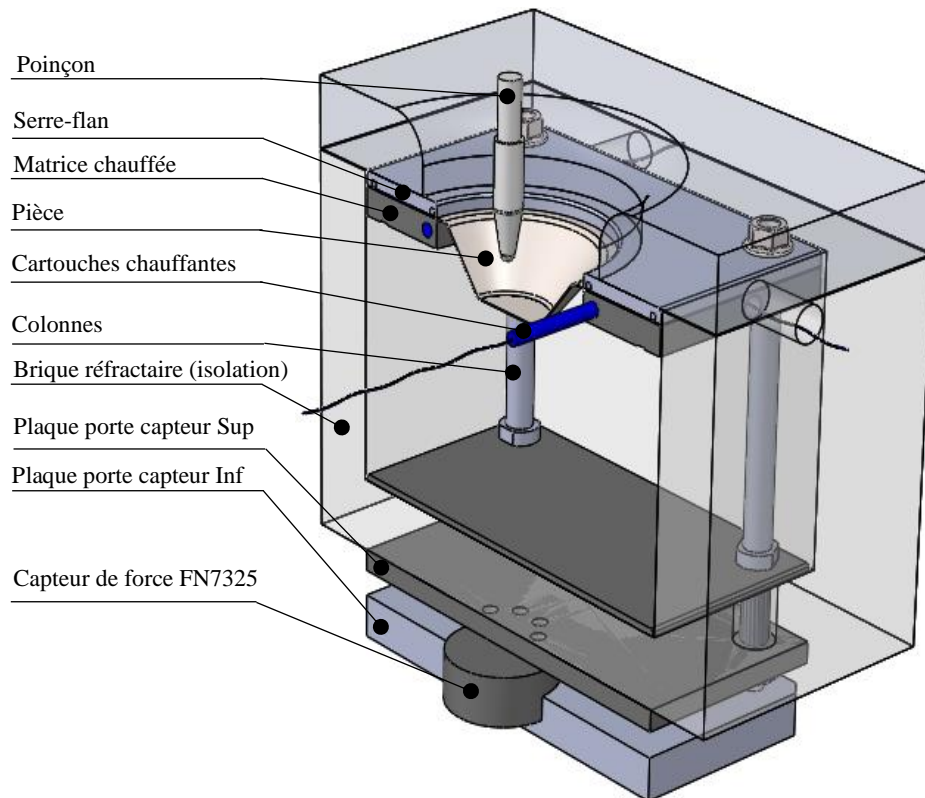


Figure II-10. Les différents composants du montage de formage incrémental à chaud

La fabrication des différentes plaques et des colonnes a été réalisée sur des machines conventionnelles d'usinage. Une attention particulière a été accordée au logement du capteur FN7325, pour pouvoir assurer un bon serrage et relier les deux blocs du dispositif. Les trous des logements des cartouches chauffantes sont profonds et ils doivent vérifier l'uniformité de chauffage de la matrice. Les constructeurs de ces cartouches chauffantes exigent des tolérances des trous de type H7 pour assurer leurs efficacités et leurs sécurités.

La réalisation de l'isolation thermique fut le majeur défi, puisque on souhaite développer une solution qui pourrait être industrialisable. Afin d'isoler un dispositif avec des dimensions relativement grandes (300x300x350) et garantir un maintien de la température pour des plages importantes de 400-500°C, l'utilisation de briques réfractaires est une des solutions adéquates. Ces briques réfractaires ont été utilisées pour fabriquer une enceinte thermique qui couvre l'ensemble du bloc supérieur du dispositif tout en gardant la possibilité de relier les deux blocs ensemble comme le montre la figure II-11.



Figure II-11. Montage du Dispositif (WSPIF) sur le centre d'usinage CNC

3.2. Système de formage, de mesure et de contrôle

Pour la réalisation des essais de formage incrémental à chaud sur des tôles en alliage de titane, des équipements supplémentaires étaient nécessaires pour la bonne réalisation des essais et surtout le suivi et le contrôle en temps réel des paramètres tels que la température et l'effort de formage. La figure II-12 détaille le schéma d'installation du dispositif équipé du capteur d'effort FN7325 sur le centre d'usinage « Maho », ainsi que le montage de contrôle de la température. Le suivi de la température en temps réel est assuré par une caméra infrarouge de type IRISYS 4000.

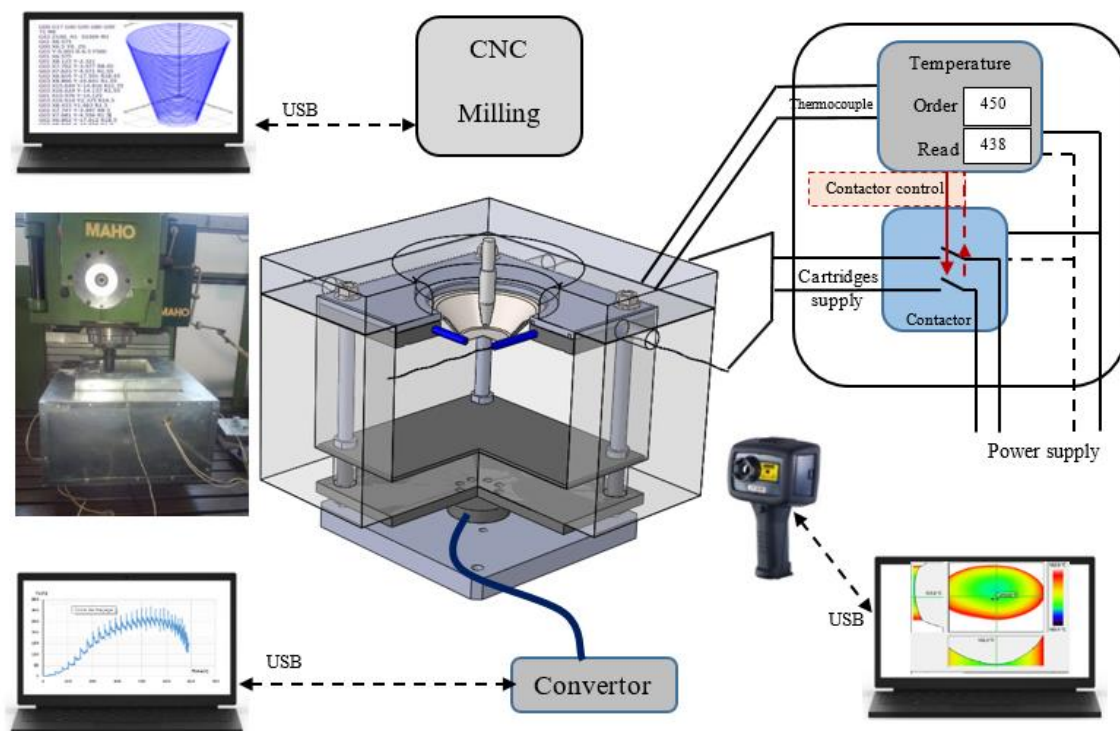


Figure II-12. Schéma de montage et de régulation du dispositif WSPIF

Suite au formage de pièce, il est important de vérifier la conformité dimensionnelle des pièces. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser un scanner Laser METRIS-MCA-203D et une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). La figure II-13 présente le montage du dispositif de formage incrémental à chaud sur la machine à commande numérique et les instruments de mesure et suivi de la température et des efforts de formage.



Figure II-13. Montage et essai mené par le dispositif de formage incrémental à chaud

3.2.1. Le capteur de force

Le capteur multi-composant FN7325 (figure II-14) associé à une chaîne d'acquisition fournit les mesures des efforts de formage. Ce capteur, mesure des efforts allant jusqu'à 5000 N et des moments allant jusqu'à 200 N.m sur les axes X et Y, et suivant l'axe Z des efforts jusqu'à 250kN et des moments jusqu'à 7 000 N.m. La plage de température de travail est entre -20°C et 80°C avec une flexibilité thermique de $(5.10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$. Pour la fiabilité des résultats le capteur est étalonné.

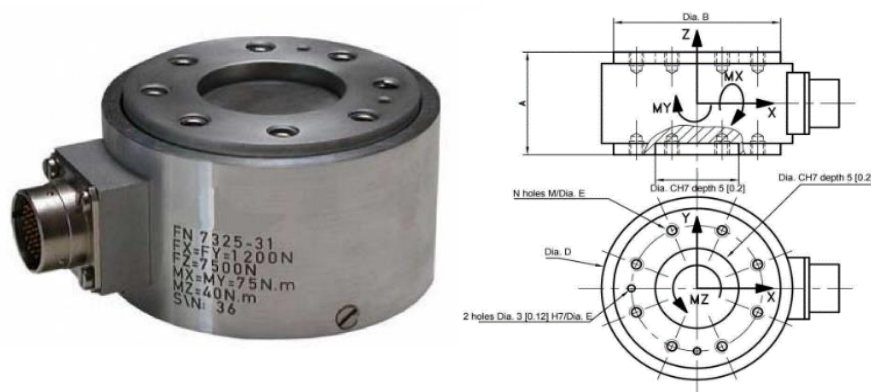


Figure II-14. Le capteur de force multi-composant FN7325¹

¹ www.fgp-instrumentation.com

3.2.2. Le poinçon

Le formage des pièces est assuré par des poinçons hémisphériques de différents diamètres (5, 8, 10, 15 et 20 mm) en acier X160CrMoV12. Ces outils ont subi un traitement thermique de trempe à 1030°C et refroidi à l'air pour monter la dureté à 55 HRC. Les valeurs des diamètres déjà utilisées par les chercheurs s'étalent entre 8 et 30 mm, comme le montre la figure II-15.



Figure II-15. Les poinçons utilisés, de diamètres ($d_p = 5, 8, 10, 15$ et 20)

3.2.3. La machine à commande numérique CNC

La machine utilisée pour les essais est un centre d'usinage de type MAHO modèle MH 1000E dont les caractéristiques sont fournies dans le tableau II-3. La machine est équipée d'un ordinateur de type MAHO continue Path Control, de modèle Philips-CNC 432. Malgré l'existence de nouvelles machines plus performantes, on a choisi de travailler avec ce modèle pour effectuer nos travaux car cette machine est équipée d'une broche mécanique (figure II-16).

La broche mécanique de cette machine fonctionne avec des solutions purement mécaniques ainsi que pour le changement des vitesses, par contre les nouvelles machines sont équipées de broche avec des variateurs électroniques, ce qui présente un handicap lors de l'utilisation de notre dispositif à chaud. Cela pourrait en effet engendrer des défaillances des cartes électroniques.

Tableau II-3. Les caractéristiques de la machine MAHO -MH 1000E

Puissance [KW]	Vitesse de rotation [trs/mn]	Vitesse d'avance [mm/mn]	Courses (X,Y,Z)[mm]	Nombre d'axe
20	50-3200	3000	1000, 500, 700	3



Figure II-16. Le centre d'usinage CNC MAHO- MH 1000 E²

3.2.4. La tôle en alliage de titane Ti-6Al-4V

Des essais de formage incrémental à un point ont été réalisés sur des tôles en alliage de titane Ti-6Al-4, découpées en flans comme le montre la figure II-17 dont les caractéristiques mécaniques figurent dans le tableau II-4.



Figure II-17. Tôle de l'alliage de titane Ti-6Al-4V 2(e=0.5mm)

Tableau II-4. Les caractéristiques mécaniques du l'alliage de titane Ti-6Al-4V

Etat	Limite élastique R _{p0,2} [MPa]				Résistance de rupture R _m [MPa]	Allongement de rupture A [%]	Dureté Vickers [HV]
	20°C	100°C	200 °C	300 °C			
Typique	900	800	700	620	950	12	290
Durci. Thermique	1050	870	820	750	1150	10	350

3.2.5. La caméra infrarouge

Pour suivre en temps réel l'évolution de la température et sa répartition sur le flan et le dispositif, on utilise une caméra infrarouge amovible de type IRISYS 4000 (figure II-18), équipée d'un logiciel permettant de traiter et exploiter les mesures des températures prises

² <https://fr.dmgmori.com/>

sur le terrain. Lors de la campagne expérimentale du formage incrémental à chaud, on assiste les essais par des photos prises avec cette caméra infrarouge. Celui-ci nous offre une vue en temps réel de la répartition de la température. On peut prendre des photos qui illustrent cette répartition de la température avec des informations à propos des zones les plus chaudes ou froides, ainsi que la plage de température de travail.

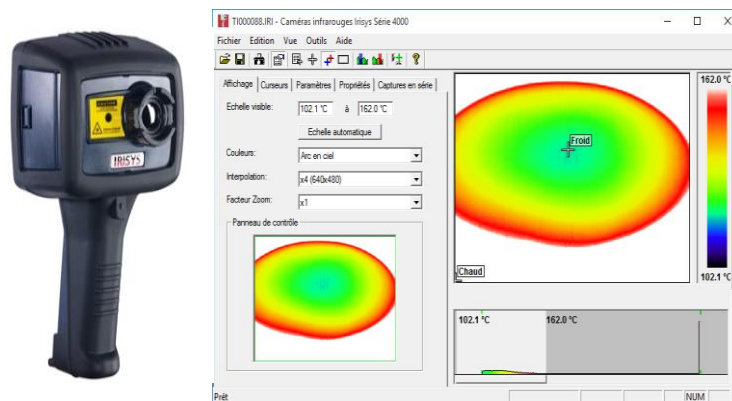


Figure II-18. La caméra infrarouge IRISYS 4000 et le logiciel de traitement d'image³

3.2.6. Le scanner Laser

Dans notre étude on utilise un scanner Laser METRIS MCA 24 Portable Measuring, associé au logiciel FOCUS pour la numérisation des pièces réalisées, ce qui permet d'analyser et comparer les distributions des épaisseurs et les profils. La figure III-19 présente le laser.

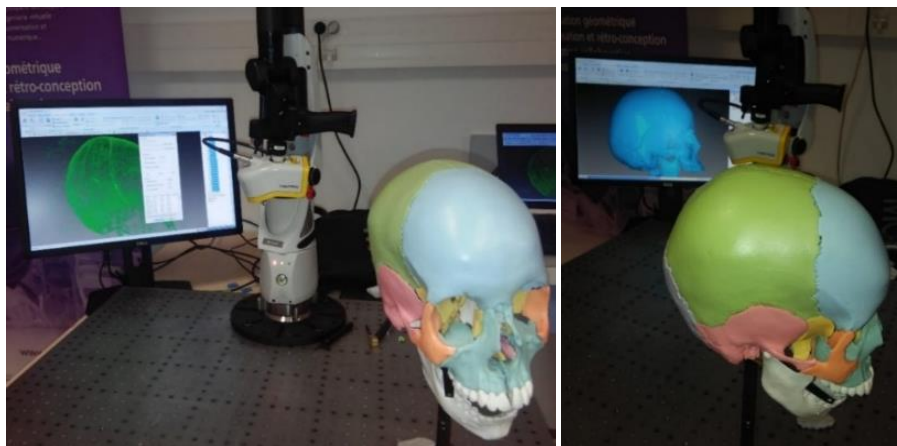


Figure II-19. Le scanner Laser METRIS MCA 24 Portable Measuring⁴

³ <https://www.iristem.gr>

⁴ <http://www.metris3d.hu>

3.2.7. La Machine à Mesurer Tridimensionnelle

Une machine à mesurer tridimensionnelle MMT est aussi utilisée pour numériser les pièces formées avec le dispositif de formage incrémental à chaud (WSPIF) et obtenir des profils suivant un plan de coupe. La MMT ALTERA de Nikon Metrology de modèle ALTERA-10.7.6-Ceramic Technology est présentée par la figure II-20 suivante. Elle est conçue en céramique de haute qualité, avec un rapport rigidité/ poids quasi parfait, et offrant une plus grande résistance aux variations de température. Elle est constituée de portique et coulisseaux en céramique ultra stables avec des règles optiques de résolution 0,05 μ m.

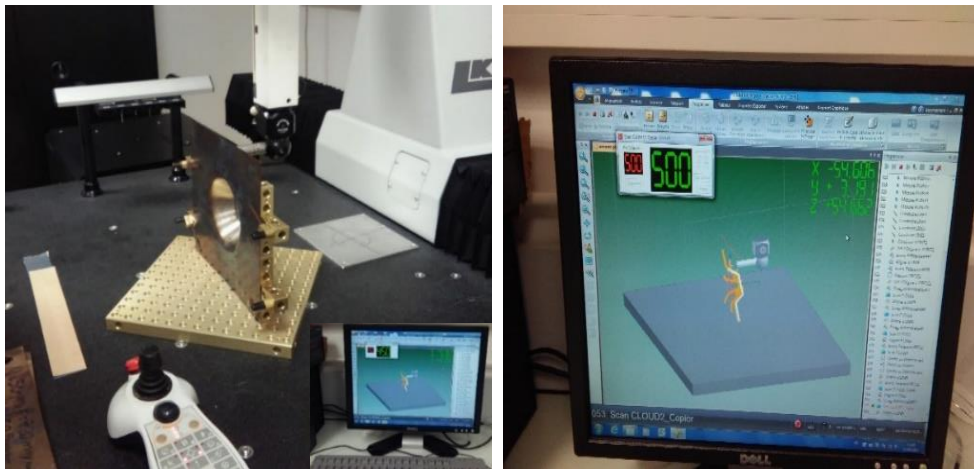


Figure II-20. La machine MMT-ALTERA-10.7.6- Ceramic Technology⁵

4. Essais expérimentaux du formage incrémental à chaud du Ti-6Al-4V

4.1. Choix de la pièce de référence et génération de la trajectoire de l'outil

Comme nous avons pu voir dans l'état de l'art des différents travaux publiés sur le formage incrémental présenté dans le chapitre I, une des formes de pièces la plus traitée dans les études et utilisée comme pièce de référence est celle d'un cône tronqué [2, 5, 24]. Pour notre étude de formage incrémental à chaud des tôles en alliage de titane Ti-6Al-4V, on a choisi cette pièce de forme d'un cône tronqué présentée par la figure II-21 pour mener les essais, ainsi que pour la simulation numérique.

⁵ <https://www.nikonmetrology.com/fr/>

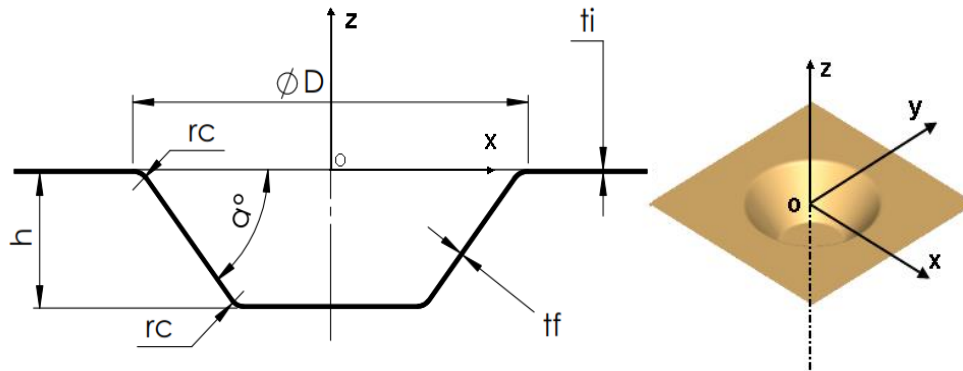


Figure II-21. Pièce de référence de forme d'un cône tronqué

La pièce a déjà été conçue à l'aide du logiciel de CFAO Catia V5, qui possède l'avantage de permettre non seulement la création du modèle géométrique de la pièce (CAO), mais aussi de fournir un programme pour générer la trajectoire de l'outil sur le centre d'usinage CNC comme le montre la figure II-22. A partir du modèle de la pièce, on génère la trajectoire de formage à implémenter sur la machine CNC avec les conditions de travail choisies comme les vitesses de travail (N et Vf), l'incrément axial de l'outil et son diamètre. On peut aussi choisir le type de trajectoire de l'outil (spirale ou niveaux de z).

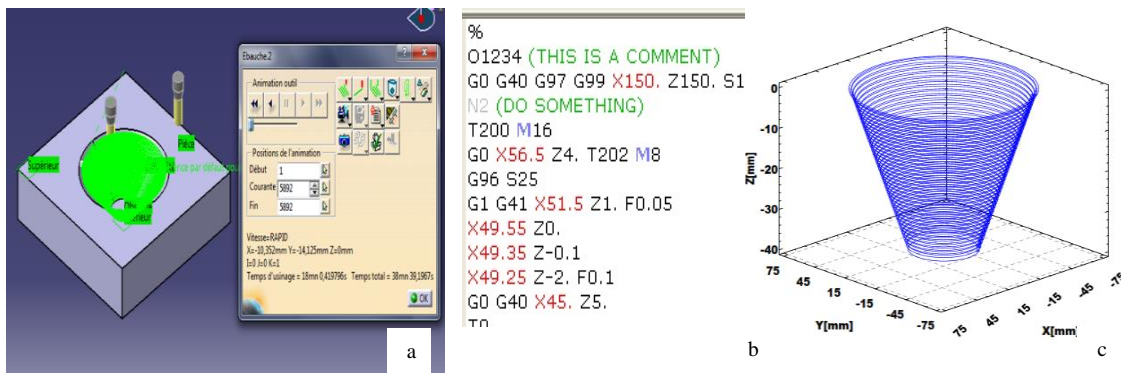


Figure II-22. Génération de la trajectoire à implémenter sur la machine CNC à partir de la pièce

4.2. Optimisation des paramètres géométriques

4.2.1. Effet des paramètres géométriques du poinçon

Le procédé de formage incrémental est parfaitement adapté pour la production de pièces à usage unique comme les prothèses médicales en titane. Ce matériau est utilisé car il possède une grande résistance et une parfaite biocompatibilité avec le système osseux.

Mais peu de travaux ont été réalisés sur le formage incrémental du titane, du fait que ce matériau est délicat à mettre en forme. La recherche des paramètres permettant d'améliorer les conditions de réalisation des prothèses en alliage de titane passe par le choix et l'optimisation de ces paramètres.

Des essais préliminaires de formage incrémental à froid ont été menés sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V (tableau II-5), pour voir l'effet du diamètre du poinçon (d_p), et l'incrément axial (Δz) pour un angle d'inclinaison du cône fixé. Les résultats des essais présentés par les figures II-23 et II-24, montrent que pour un angle ($\alpha=30^\circ$), la rupture de la tôle apparaît pour une profondeur de 9 mm. La profondeur maximum atteinte est donc très faible pour un angle d'inclinaison peu élevé. Ceci confirme que le formage à froid des tôles mince en alliage de titane Ti-6Al-4V est très difficile.

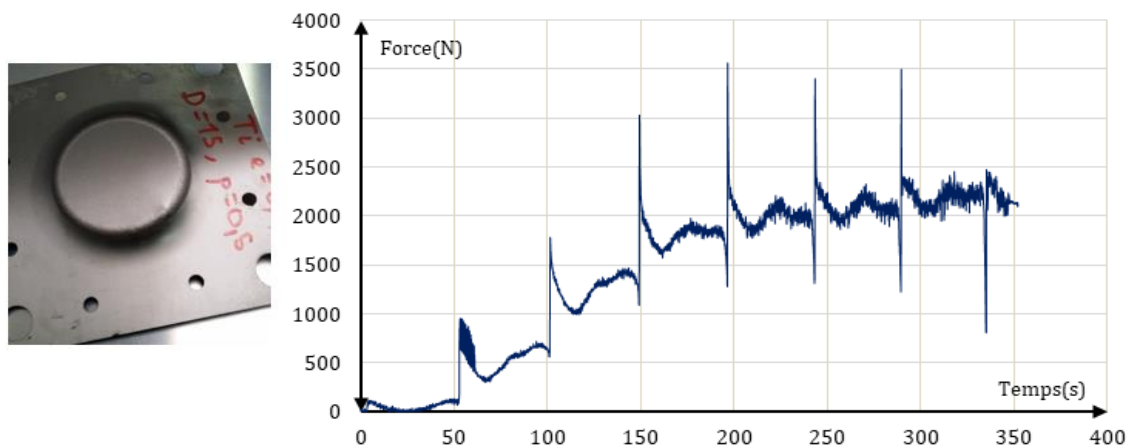
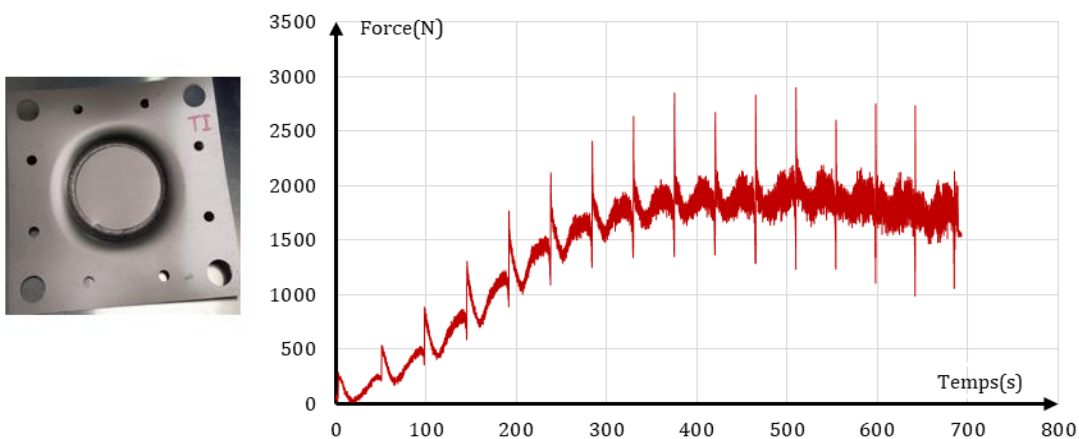


Tableau II-5. Conditions d'essais avec variation de l'incrément axial et du diamètre du poinçon

Epaisseur t [mm]	Angle α [°]	Vitesse de rotation N [trs/mn]	Vitesse d'avance Vf [mm/mn]	Incrément Δz [mm]	Diamètre du poinçon dp [mm]
0,5	30	800	400	1	10
0,5	30	800	400	0,5	15

En conclusion on peut dire qu'une augmentation de diamètre du poinçon (dp), ou de l'incrément axial (Δz) augmente l'effort axial de formage comme cela a été montré par G.Ambrogio et al [70].

4.2.2. Optimisation des paramètres du procédé

Dans le cadre de cette étude qui porte sur le formage incrémental à chaud des alliages de titane, des essais préliminaires à froid sur d'autres matériaux ont déjà été menés avant d'entamer les essais de formage à chaud du fait du coût élevé des tôles de titane ou du matériel nécessaire pour les essais. Une première campagne d'essais a été effectuée afin d'optimiser les paramètres de l'outil. Dans cette optique on a choisi de mener ces essais sur des tôles en inox 304L en faisant appel à la méthode des plans d'expérience comme outil d'optimisation.

Le matériau utilisé dans cette partie est de l'inox 304L dont les caractéristiques mécaniques sont fournies dans le tableau II-6. Les essais ont été réalisés sur un centre d'usinage avec un capteur d'effort multi-composant FN7325, en utilisant le dispositif de formage incrémental à un point à froid. On utilise des poinçons de diamètre 10 mm et 15 mm dont la dureté est de 55HRC. Le parcours du poinçon utilisé est une trajectoire par niveaux de z, constituée de contours de forme circulaire suivis d'un déplacement vertical (Δz) avant de passer au contour suivant pour donner à la pièce la forme d'un cône tronqué de grand diamètre ($\varnothing D$) et de profondeur (h) selon une inclinaison (α). Les paramètres variables dans cette étude sont :

- L'épaisseur de la tôle (t),
- Le diamètre du poinçon (dp),
- L'incrément axial du poinçon (Δz),
- L'angle d'inclinaison du cône tronqué ($\beta=90-\alpha$).

Les autres paramètres comme les vitesses vont être fixés avec des valeurs définies suite à des essais préliminaires. L'objectif de cette étude est l'optimisation des quatre paramètres retenus pour que l'effort axial de formage mesuré soit minimal.

Tableau II-6. Les caractéristiques mécaniques de l'inox 304L

AISI	304 L	DIN	1.4306 - X 2 CrNi 19 11				AFNOR	Z 3 CN 18 10	
Composition chimique selon DIN [%]									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Autres	
< 0.030	< 1.00	< 2.00	< 0.045	< 0.015*	18.0-20.0	-	10 - 12	N < 0.11	
*Pour les barres, le fil machine, les profils et les demi-produits concernés, la teneur maxi en soufre est de 0.03%									
Propriétés physiques									
Densité ρ [kg·m ⁻³]		Résistivité électrique ρ [$\mu\Omega\cdot m$]			Chaleur spécifique C_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]		Conductivité thermique λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]		
7900		0.73			500		15		
Coefficient de dilatation α [10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹] entre 20°C et							Module élastique E [GPa]		
100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	200 à 20°C		
16.0	17	17	18	18	18.5	18.5			
Propriétés mécaniques									
Etat	Limite élastique R _{p0.2} [MPa]				Résistance de rupture R _m [MPa]	Allongement de rupture A ₅ [%]	Dureté Vickers [HV]		
	20°C	100°C	200°C	300°C					
Recuit	190	147	118	100	500 - 600	45	150 - 180		
Ecroui max.	965				1275	4	390		

Une attention particulière est accordée à l'angle d'inclinaison mesuré dans cette étude, il s'agit bien de l'angle (β) et non pas de l'angle (α) qui est généralement utilisé lors des études ainsi que pour notre travail. La relation entre ces angles comme le montre la figure II-25 suivante est.

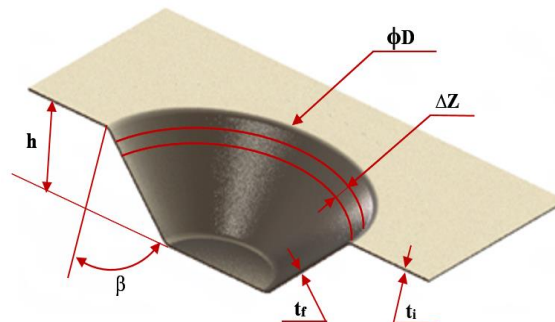


Figure II-25. Dessin montrant la mesure de l'angle (β)

L'optimisation du procédé de formage incrémental à froid avec quatre paramètres nécessite un nombre d'essais énorme. On fait appel à la méthode des plans d'expérience pour l'optimisation. On utilise un plan d'expérience orthogonale de Taguchi (L8) avec 4 facteurs à 2 niveaux illustré par le tableau II-7.

Tableau II-7. Les facteurs du plan d'expérience de Taguchi (L8)

Facteurs	Notation	Niveau bas	Niveau haut
t : Épaisseur [mm]	A	0,5	0,8
dp : Diamètre du poinçon [mm]	B	5	10
Δz : Incrément [mm]	C	0,5	1
β : Angle d'inclinaison [°]	D	30	60

L'objectif de cette optimisation est de minimiser l'effort maximal de formage atteint pour la réalisation des pièces coniques. Le domaine d'étude abordé nous impose des valeurs limites minimales et maximales pour chaque paramètre, associées à des conditions pratiques particulières pour lesquelles les essais sont exclus. L'incrément axial est généralement compris entre 0,1 et 3 mm. L'angle d'inclinaison doit rester inférieur à 90°. Le diamètre du poinçon ne doit pas être trop faible car il risquerait de percer la tôle. Il est de plus important que l'effort axial n'excède pas la valeur seuil limite de la machine et du capteur de l'effort pour préserver les équipements. La revue bibliographique et nos essais préliminaires nous ont permis d'établir les limites pour chaque paramètre, fournis dans le tableau II-8.

Tableau II-8. Les contraintes du domaine d'étude relatives au plan d'expérience

Type de contrainte	Paramètres	Limite minimale	Limite maximale
Contraintes en valeurs	Fz : Effort axial de formage [N]	--	5000N
Les contraintes de position	dp : Diamètre du poinçon [mm]	5	30
	Δz : Incrément axial [mm]	0,1	3
	β : Angle d'inclinaison [°]	10	90

On a réalisé huit essais de formage incrémental à froid en respectant les différents facteurs pour chaque essai. Le suivi de l'effort le long des essais nous a permis de tracer les courbes pour les 8 essais menés. Elles sont présentées sur les figures II-26 et II-27. Pour déterminer la valeur maximum de l'effort atteinte on effectue un lissage de chaque courbe. Le tableau II-9 regroupe les essais, les valeurs des facteurs d'essais ainsi que la valeur maximale de la force obtenue pour chaque essai.

Tableau II-9. Plan d'expérience de Tagauchi (L8) et les valeurs maximales des forces mesurées

Experiences	A:t[mm]	B: dp[mm]	C: Δz[mm]	D: β [°]	Fz[N]
E1	0,5	5	0,5	30	1620
E2	0,8	5	0,5	60	3520
E3	0,5	10	0,5	60	1760
E4	0,8	10	0,5	30	2470
E5	0,5	5	1	60	1570
E6	0,8	5	1	30	3450
E7	0,5	10	1	30	1870
E8	0,8	10	1	60	3630

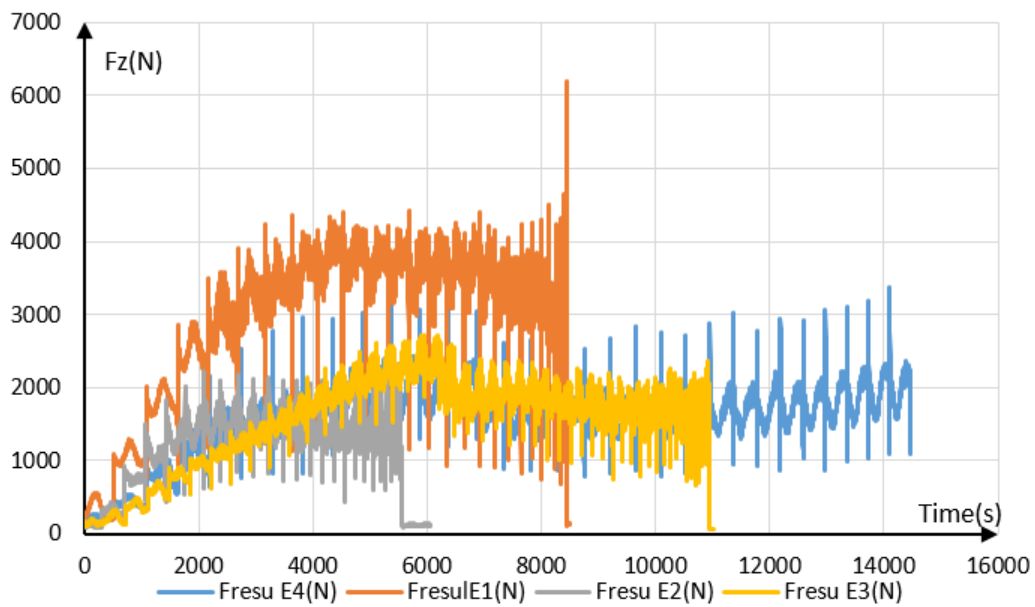


Figure II-26. Courbe des efforts axiaux des essais E1, E2, E3 et E4

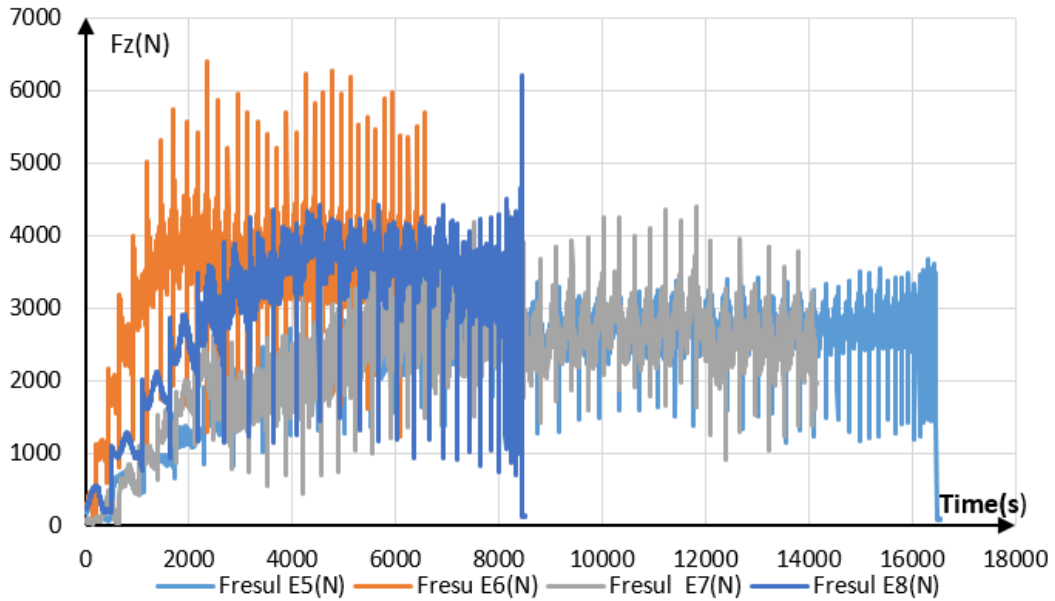


Figure II-27. Courbes des efforts axiaux des essais E5, E6, E7 et E8

Une analyse de variance ANOVA, a été menée afin d'analyser les effets des quatre paramètres d'entrée de ce plan sur la force maximale de formage. Cette technique a déjà été adoptée par plusieurs auteurs afin de comparer l'impact des divers facteurs sur les valeurs de réponse et de définir les facteurs significatifs.

Les résultats de l'analyse sont présentés par le diagramme de Pareto standardisé présenté par la figure II-28. Il montre la prédominance de l'épaisseur de tôle (t) qui a un effet significatif sur la force de formage maximale. La taille de l'incrément axial (Δz) et l'angle du cône tronqué (β) ont des effets beaucoup moins importants sur la valeur maximale de la force de formage. Un faible impact du diamètre du poinçon (d_p) sur la force de formage est observé.

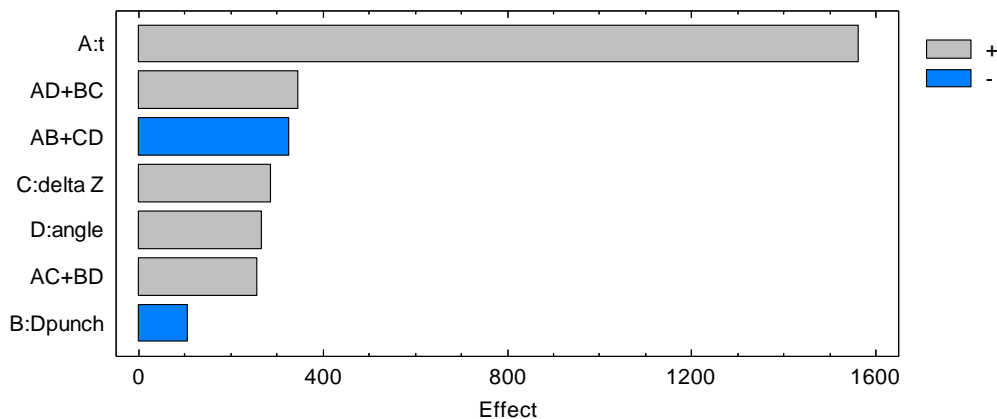


Figure II-28. Diagramme de Pareto standardisé des effets des 4 facteurs et leurs interactions

Pour que ces résultats aient un sens, une vérification de normalité doit être faite pour les différents effets des facteurs et leurs interactions calculées. La figure II-29 présente la courbe de probabilité normale. Nous pouvons voir que tous les points sont le long de la ligne droite et donc les données suivent une distribution normale.

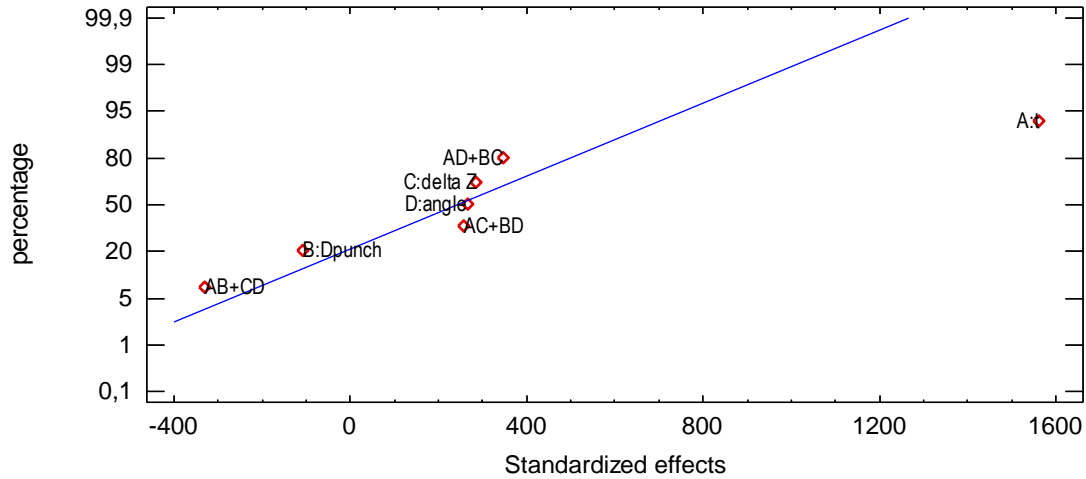


Figure II-29. Vérification de normalité des facteurs du plan et leurs interactions

Le tableau II-10 suivant présente les valeurs optimales de l'épaisseur de la tôle (t), du diamètre du poinçon (d_p), de l'incrément axial (Δz) et de l'angle (β) permettant de minimiser l'effort de formage (F_z). Ce résultat sera retenu pour le choix des paramètres des essais à chaud.

Tableau II-10. Les valeurs optimales des facteurs permettant de minimiser la force de formage

Facteurs	Valeur inférieure	Valeur supérieure	Valeur optimale
A: t [mm]	0,5	0,8	0,500058
B: d_p [mm]	5	10	5,0101
C: Δz [mm]	0,5	1	0,5
D: β [°]	30	60	60,0
Effort de formage minimal [N]			1540,83

4.3. Optimisation des paramètres dynamiques du poinçon

La réalisation des expériences à chaud a été précédée par quelques essais de mise en point. Quelques essais ont été réalisés à froid pour trouver la plage des vitesses de travail. On a choisi de faire le premier essai avec des vitesses de rotation et d'avance ($N=500$ trs/mn et $V_f=1050$ mm/mn) souvent utilisé par les chercheurs [8, 28]. Mais après une pénétration

de 3mm de profondeur de l'outil, la tôle commençait à chauffer et on a détecté un arrachement de matière associé à un chauffage local.

Après plusieurs essais avec des vitesses de formage différentes (N , V_f), la conclusion est qu'une faible vitesse de rotation rejoignant quasiment le roulement de l'outil est la plus favorable. Pour confirmer ce résultat dans le cas du formage incrémental à chaud, un essai de formage d'un cône tronqué a été mené à une température de 150°C sur une tôle en alliage d'aluminium comme le montre la figure II-30. Le résultat est correct et on vérifie que travailler à une vitesse de rotation faible permet d'éviter un échauffement local ainsi que l'apparition des ruptures.

Dans notre cas pour le formage de l'alliage de titane, on a choisi de prendre pour la vitesse de rotation de l'outil la valeur de ($N=50\text{tr}/\text{mn}$) correspondant à la vitesse minimale de la machine CNC utilisée. La vitesse d'avance a été définie égale à ($720\text{mm}/\text{mn}$), ce qui permet quasiment pour un diamètre d'outil de 5 mm de définir le mouvement de l'outil comme un roulement sans glissement sur la tôle.



($d_p=5\text{mm}$, $D=130\text{mm}$, $\alpha=60^\circ$, $h=40\text{mm}$, $\Delta z=0,5\text{mm}$ et $T=150^\circ\text{C}$)

Figure II-30. Pièces en alliage d'aluminium, obtenues par formage incrémental à chaud

4.4. Définition de la température de chauffage

L'objectif principal de cette étude était de voir l'effet de la température sur l'aptitude à la déformation plastique dans le cas du formage incrémental des tôles minces en alliage de titane Ti-6Al-4V.

Une revue des travaux publiés sur le comportement des alliages de titane à chaud, montre que pour une température supérieure à 400°C , l'aptitude à la déformation plastique est

nettement améliorée, et pour des plages de température entre 500 et 600°C les résultats sont encore meilleurs[94]. Pour le formage incrémental d'une pièce en alliage de titane Ti-6Al-4V, les chercheurs M. Honarpishech et al [12] et M. Sbaity et al [95] ont utilisé une plage de température entre 400 et 500°C.

Notre objectif est de définir la plage de température permettant avec notre dispositif l'obtention de pièces de profondeur importante avec un angle maximal de formage tout en garantissant une pièce saine. Dans cet objectif on a commencé par chercher la plage de température optimale qui favorise la profondeur maximale avec des pièces saines sans brûlure ni fissuration, pour un angle de formage fixé.

La figure II-31, présente les résultats du formage incrémental d'un cône tronqué (en alliage de titane Ti-6Al-4V ($d_p=5\text{mm}$, $\varnothing D=130\text{mm}$, $\alpha=45^\circ$, $h=40\text{mm}$, $\Delta z=0,5\text{mm}$) à différentes températures. On montre que pour des températures inférieures à 400°C (cas d'une température de 300°), le matériau reste rigide et on ne voit pas une grande amélioration de la formabilité. La rupture a eu lieu pour une profondeur de 21mm, très proche du formage à la température ambiante. En effet, l'endommagement à température ambiante dans les mêmes conditions apparaît pour une profondeur de 17mm. Le formage utilisant ce dispositif pour une température de 700°C, fait apparaître un autre phénomène : le matériau se trouve très ramolli et l'outil, au lieu de déformer la tôle la déchire. Cette température ne convient pas pour notre travail.

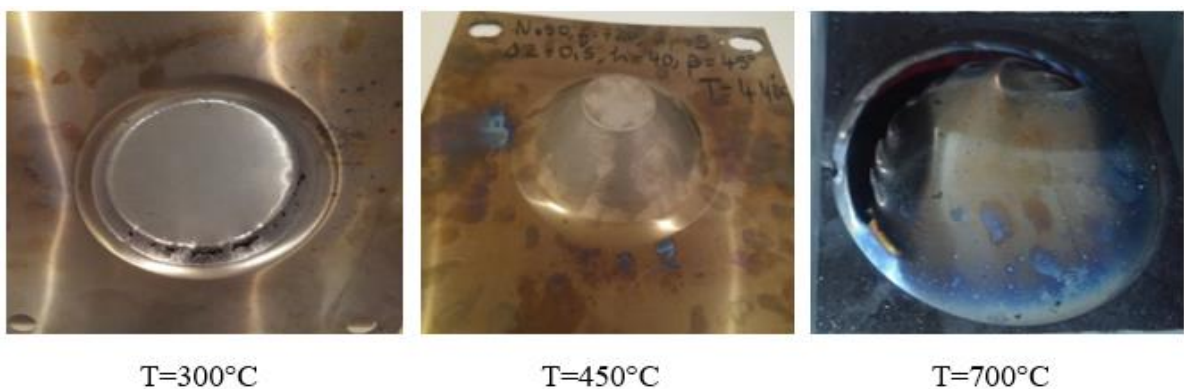


Figure II-31. Pièces obtenues par le dispositif (WSPIF) à différentes températures

La température optimale du formage définie entre 400°C et 500°C par certains auteurs a été confirmée par nos essais. En effet un essai de formage incrémental à chaud de la pièce conique avec notre dispositif pour une température de 450°C, donne lieu à une pièce saine

sans rupture ni brulure et on atteint une profondeur de 40mm pour l'angle 45°, comme le montre la figure II-32.



Figure II-32. Pièces réalisées à une température de 450°C

4.5. Réalisation des essais de formage à chaud de titane

Après avoir déterminé les paramètres optimaux d'essais du formage incrémental à chaud sur notre dispositif expérimental avec des cartouches chauffantes, nous avons mené une campagne d'essais expérimentaux afin de définir la limite de formage à chaud de l'alliage de titane Ti-6Al-4V sur notre dispositif expérimental. Le tableau II-10 rappelle les conditions d'essais. La campagne d'essai expérimentale a été effectuée en faisant varier l'angle de formage de la pièce ($\alpha=45^\circ, 50^\circ, 53^\circ, 55^\circ, 57^\circ$ et 60°). Les résultats sont présentés sur la figure II-33 et ils feront l'objet des discussions des parties qui suivent.

Tableau II-10. Les conditions d'essais en variant l'angle de pièce conique

ti [mm]	rc [mm]	h [mm]	dp [mm]	ΔZ [mm]	$\varnothing D$ [mm]	N [trs/mn]	Vf [mm/mn]	T [°C]	α [°]
0,5	5	40	5	0,5	130	50	600	450	Variable

Dans cette étude, les paramètres de contrôle sont la distribution de l'épaisseur (t), le profil de la pièce formée (U_{exp}) comparé au profil théorique (U_{the}) et l'effort axial maximal de formage mesuré.

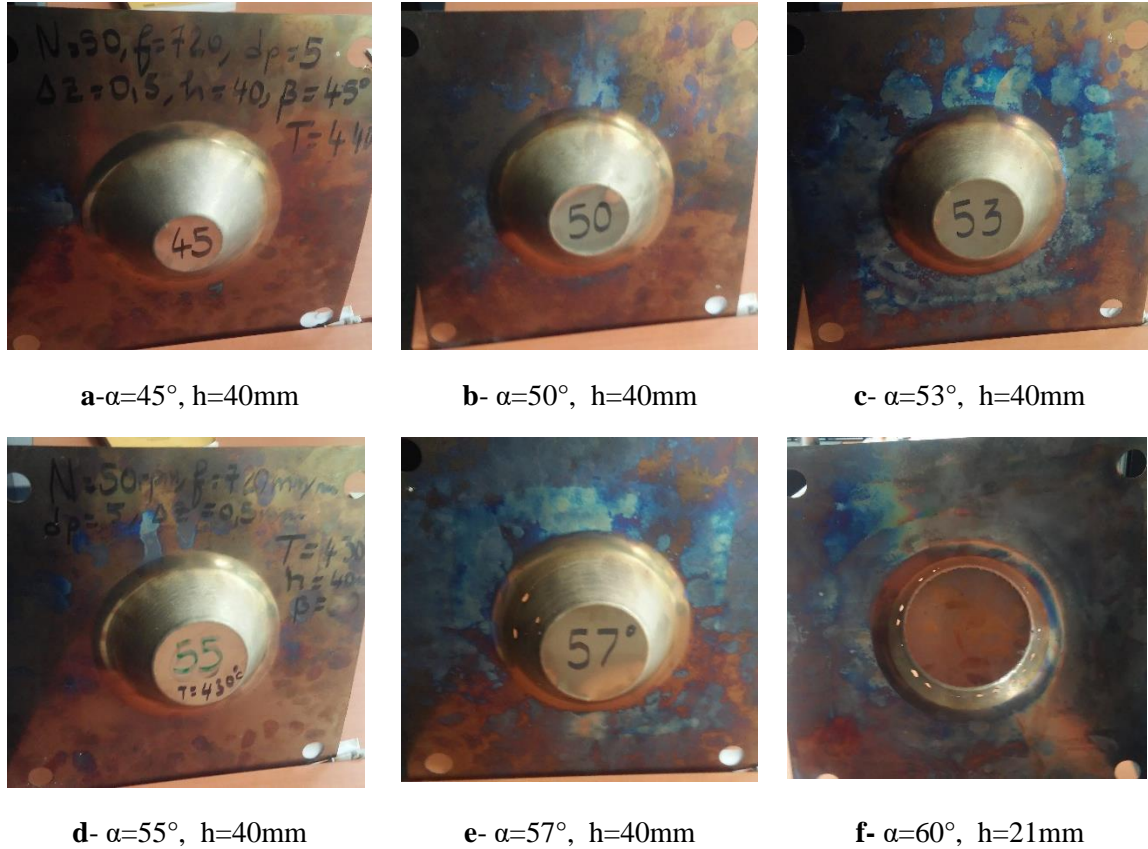


Figure II-33. Pièces obtenues avec formage incrémental à chaud à différents angles d'essais

5. Numérisation des pièces formées et résultats

5.1. Démarche de la numérisation

La numérisation des différentes pièces réalisées à une température de 450°C pour différents angles d'inclinaison a été effectuée avec la machine à mesurer tridimensionnelle MMT. L'objectif de la numérisation est d'obtenir différents profils de la pièce suivant des plans de coupes définis passant l'axe de révolution de la pièce ainsi que la distribution de l'épaisseur le long de ces profils. Quatre plans de coupes (**Plan1**, **Plan2**, **Plan3**, **Plan4**) ont été définis pour effectuer un palpé des surfaces de la pièce formée comme le montre la figure II-34. Un programme de mesure développé sur la machine MMT a permis d'effectuer les mesures sur la surface supérieure et la surface intérieure de la pièce sans déplacer ni toucher la pièce fixée sur la table en marbre.

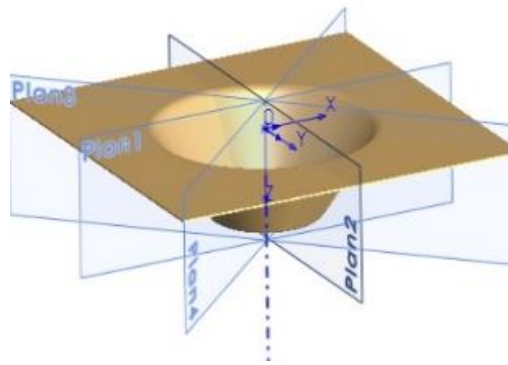


Figure II-34. Les quatre plans de palpation avec la MMT

L'exploitation des mesures enregistrées sous forme d'un fichier texte à l'aide du programme de la machine MMT, est faite à l'aide d'un programme développé sous Matlab. Ce programme permet de tracer les différents profils et de calculer l'épaisseur le long de chaque profil à partir des mesures réalisées sur les deux surfaces (extérieur et intérieur du cône). La distribution d'épaisseur et les profils ont ainsi pu être tracés pour les quatre plans de coupe comme le montre la figure II-35. Pour la bonne conduite des mesures ainsi que leurs comparaisons, on respecte une démarche de pose des pièces coniques sur la table pour assurer que les mesures sont prises sur les différents des pièces coniques au même endroit.

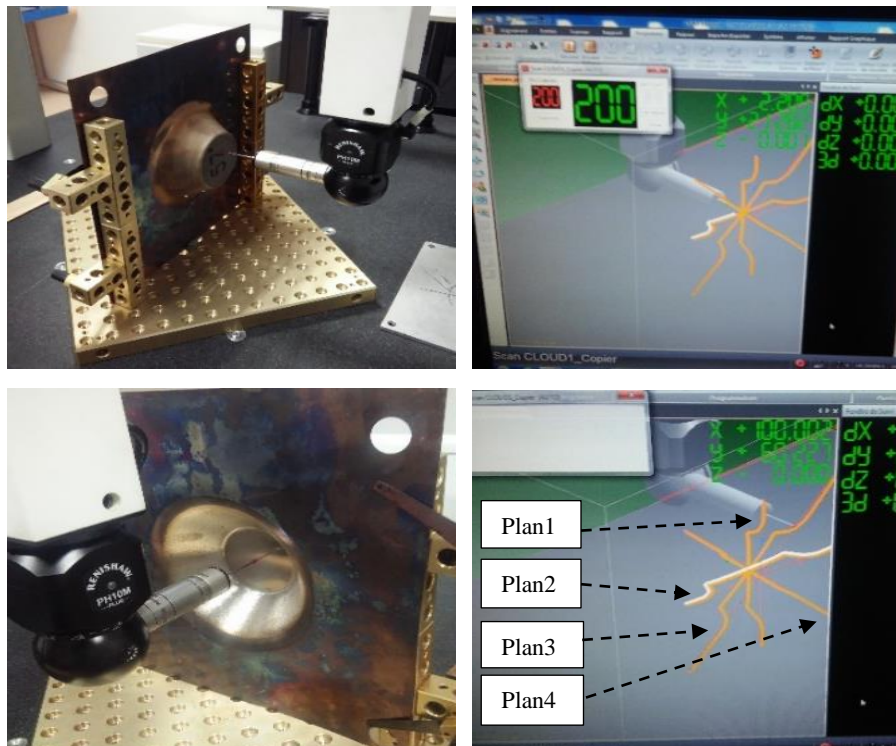


Figure II-35. Palpation et mesure des deux faces de la pièce selon les quatre plans

La distribution des épaisseurs (t) et des profils (U) selon les quatre plans de coupe permet d'évaluer l'erreur relative. La pièce étant axisymétrique, des résultats identiques devraient normalement être obtenus pour les 4 plans. La figure II-36 présentant les distributions des épaisseurs (t_{plan1} , t_{plan2} , t_{plan3} , t_{plan4}) montre que cette erreur est très faible tout au long du profil et qu'on obtient des épaisseurs minimales très similaires.

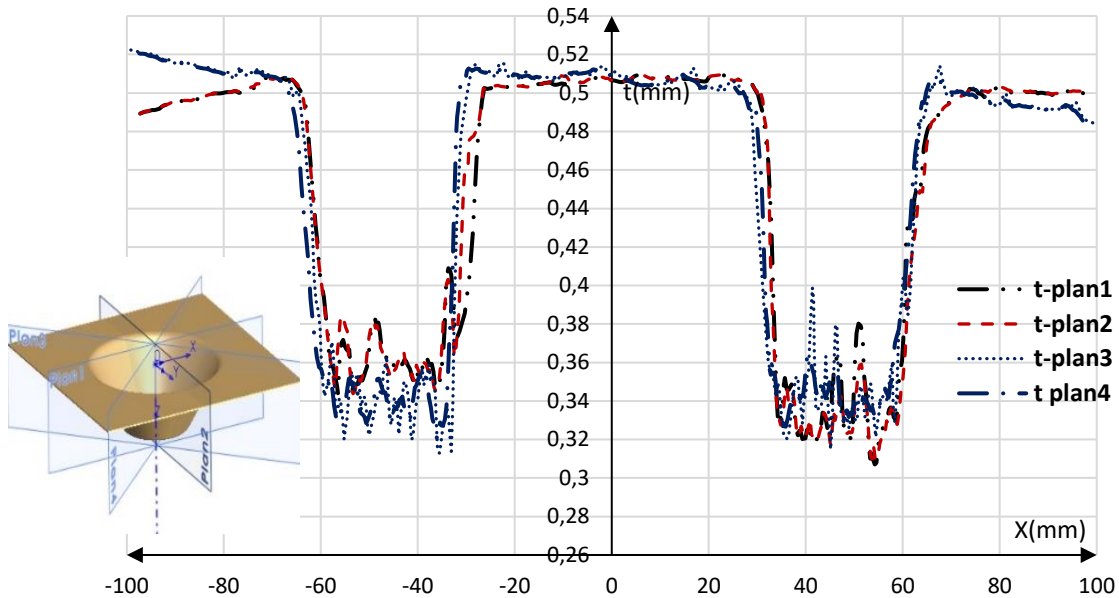


Figure II-36. Distribution des épaisseurs expérimentales (t) selon les 4 plans de coupes

Les déplacements mesurés selon les quatre plans de coupe (U_{plan1} , U_{plan2} , U_{plan3} , U_{plan4}) sont reportés sur la figure II-37. La comparaison des erreurs relatives des profils par rapport au premier profil (U_{plan1}) est donnée sur la figure II-38 sur laquelle on associe le profil (U_{plan1}) pour apporter un ordre de l'évolution des erreurs dans chaque zone.

On montre que les erreurs restent toujours faibles et qu'elles ne dépassent pas 3%. Comme le montre la figure II-38, l'erreur est importante aux extrémités au niveau des congés d'entrée du cône nommée zone 1. Cette erreur diminue dans la zone 2 puis elle augmente pour s'annuler dans le centre du fond du cône zone 3. Une grande partie de cette erreur est due au palpement par la MMT.

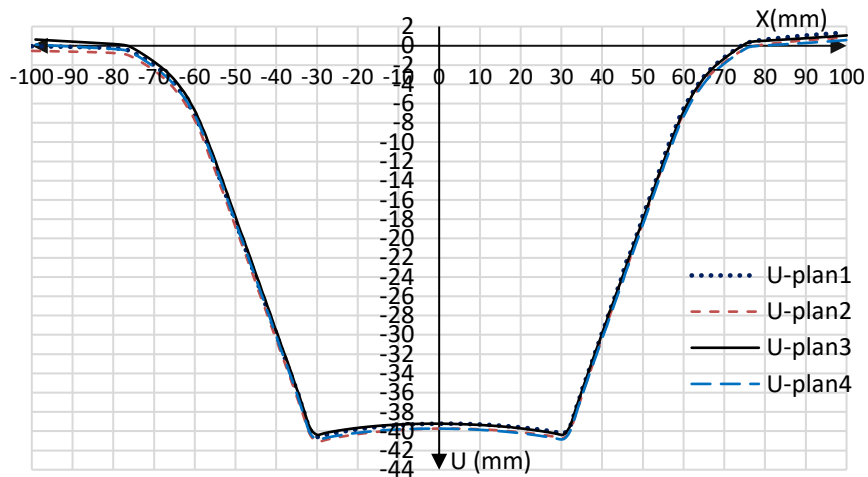


Figure II-37. Profils des déplacements (U) selon les 4 plans de coupe

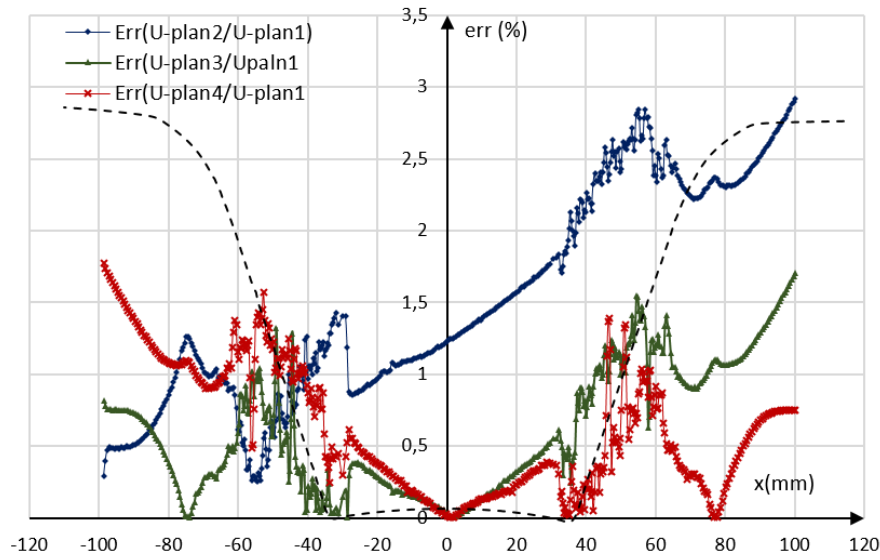


Figure II-38. Erreurs relatives des déplacements (U) comparés à U-x, x selon les plans de coupe

Les erreurs étant très faibles, on ne gardera que le plan (*plan1*) pour la présentation des résultats dans la suite de ce chapitre. Les résultats présentés dans la suite pour la distribution des épaisseurs ou le profil mesuré seront dans le plan de coupe plan1 (-X, X).

5.2. Analyse des distributions des épaisseurs des pièces

Les figures de II-39 à II-43 présentent la distribution des épaisseurs obtenue pour les cinq valeurs d'angle d'inclinaison des pièces conique (45° , 50° , 53° , 55° et 57°) et pour une profondeur de formage de ($h = 40$ mm). La distribution des épaisseurs se compose de trois zones comme le montre la figure II-39 :

- Une partie relative à la zone de fixation entre le serre-flan et la matrice ;
- La zone 2, zone de fort amincissement correspondant au bord incliné de la pièce ;
- La troisième zone représentant le fond de la pièce qui n'entre pas en contact avec le poinçon. L'épaisseur est alors proche de sa valeur initiale.

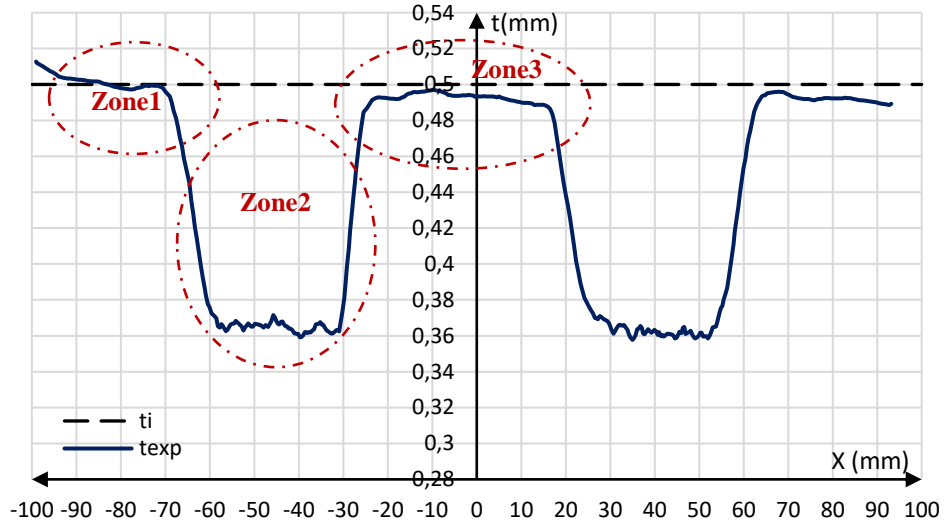


Figure II-39. Distribution des épaisseurs pour $\alpha=45^\circ$; $h=40\text{mm}$; $T=450^\circ\text{C}$

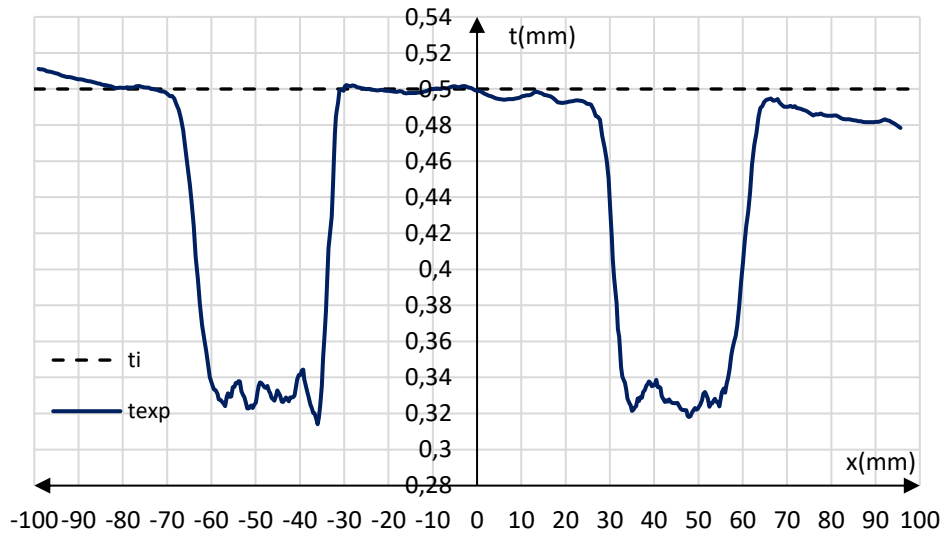


Figure II-40. Distribution des épaisseurs pour $\alpha=50^\circ$; $h=40\text{mm}$; $T=450^\circ\text{C}$

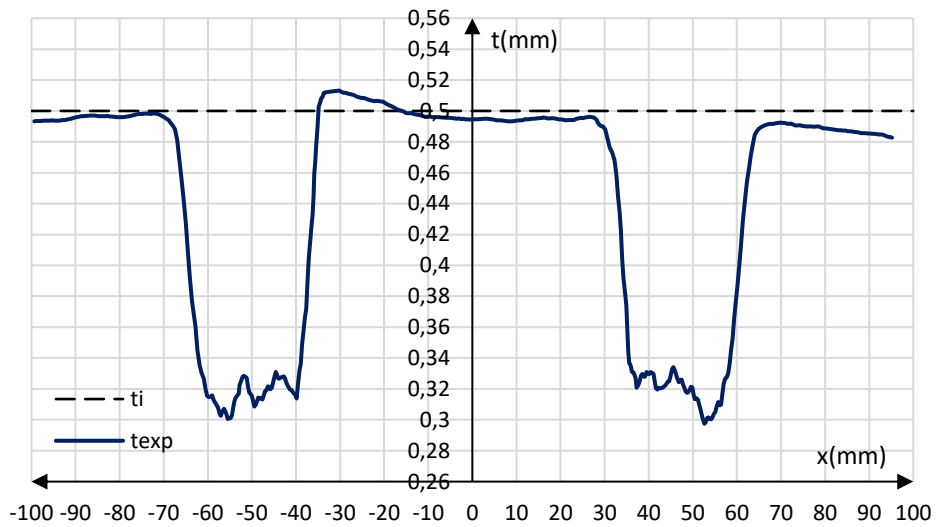


Figure II-41. Distribution des épaisseurs pour $\alpha=53^\circ$; $h=40\text{mm}$; $T=450^\circ\text{C}$

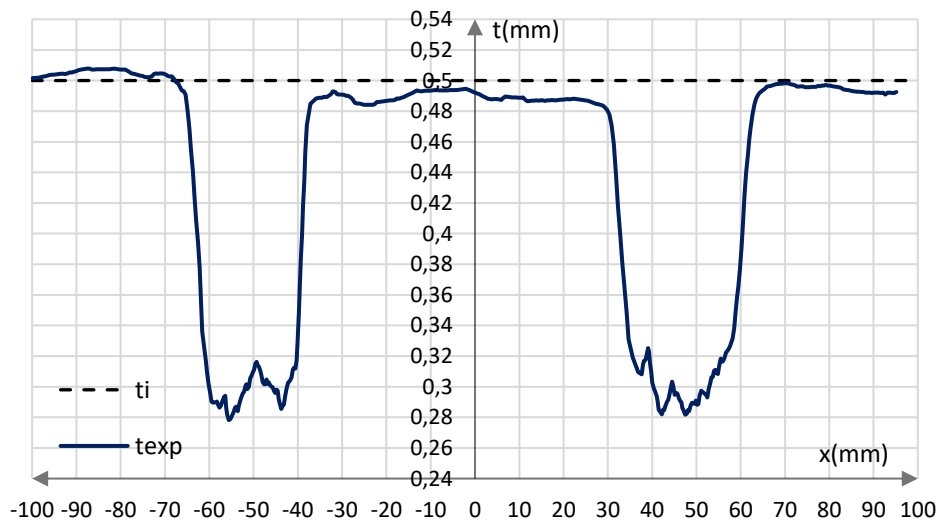


Figure II-42. Distribution des épaisseurs pour $\alpha=55^\circ$; $h=40\text{mm}$; $T=450^\circ\text{C}$

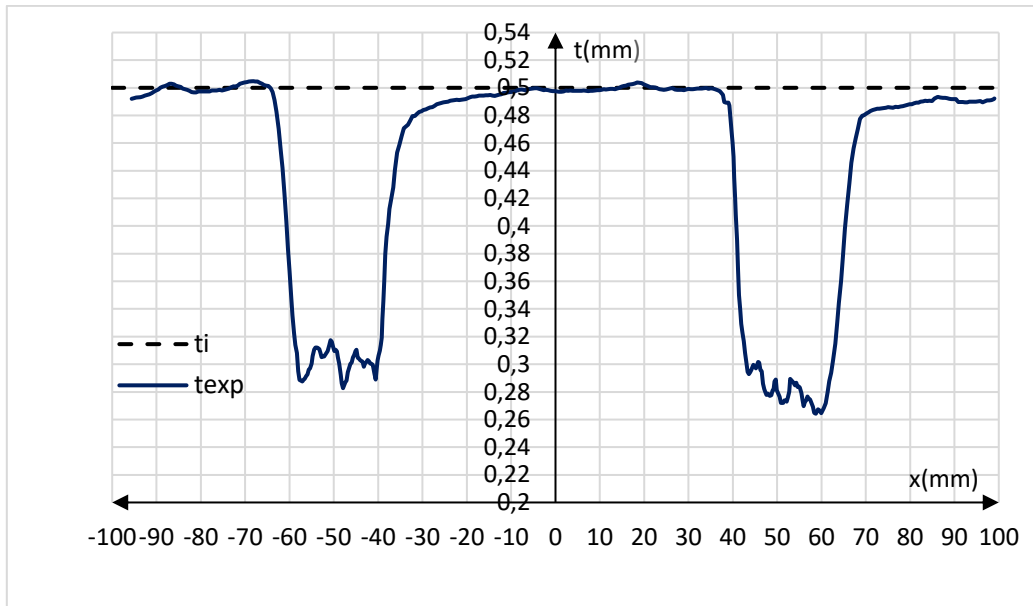


Figure II-43. Distribution des épaisseurs pour $\alpha=57^\circ$; $h=40\text{mm}$; $T=450^\circ\text{C}$

Sur la figure II-44 on montre que lorsque l'angle de la pièce augmente, l'épaisseur minimale de la tôle déformée diminue ce qui a été confirmée par les travaux de M. Honapicheh et al [12]. Le formage incrémental à chaud améliore la formabilité de l'alliage de titane Ti-6Al-4V. L'angle limite de formage obtenu est ($\alpha = 57^\circ$) pour une profondeur de ($h = 40\text{ mm}$). Les premières fissures apparaissent en effet pour cet angle de formage.

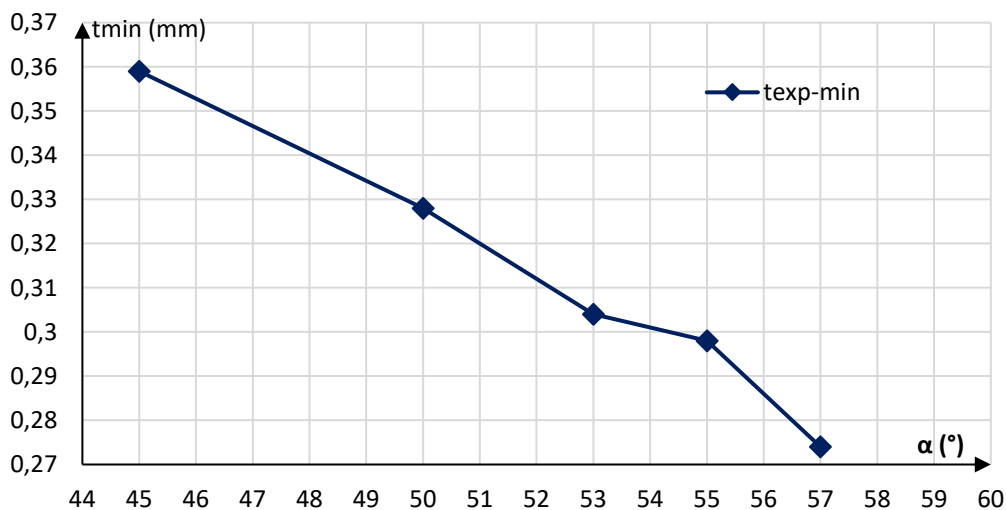


Figure II-44. Evolution de l'épaisseur minimale (t_{\min}) en fonction de l'angle (α)

5.3. Analyse des profils des pièces

Les figures de II-45 à II-49, présentent les différents profils obtenus pour les différents angles de formage (45° , 50° , 53° , 55° et 57°). Pour chaque angle, le profil expérimental (U_{exp}) est comparé au profil théorique (U_{the}).

L'analyse des trois zones (figure II-45) montre que :

- La zone 1 : on rencontre une erreur importante de l'ordre de 10%. On montre que cette erreur est légèrement affectée par l'augmentation de l'angle (figure II-50).
- Pour la zone 2 : on vérifie qu'on a presque une conformité totale entre le profil trouvé et celui théorique. La température et sa répartition sur le flan a un effet important ce qui a donné une ductilité du matériau pour pouvoir le déformer et obtenir ce résultat.
- La zone 3 : elle présente un bombage du fond du de la pièce conique. L'erreur relative à une valeur moyenne de (3%). Comme le montrent les figures II-50 et II-51, les évolutions des erreurs des zones 1 et 3 sont très peu affectées par l'évolution de l'angle.

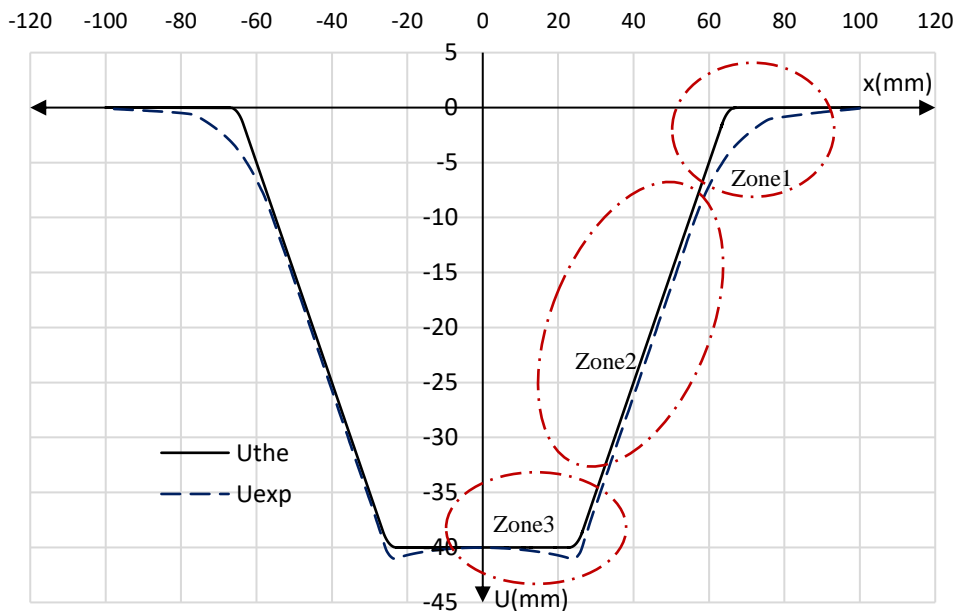


Figure II-45. Profils des formes réelles - expérimentales pour $\alpha=45^\circ$

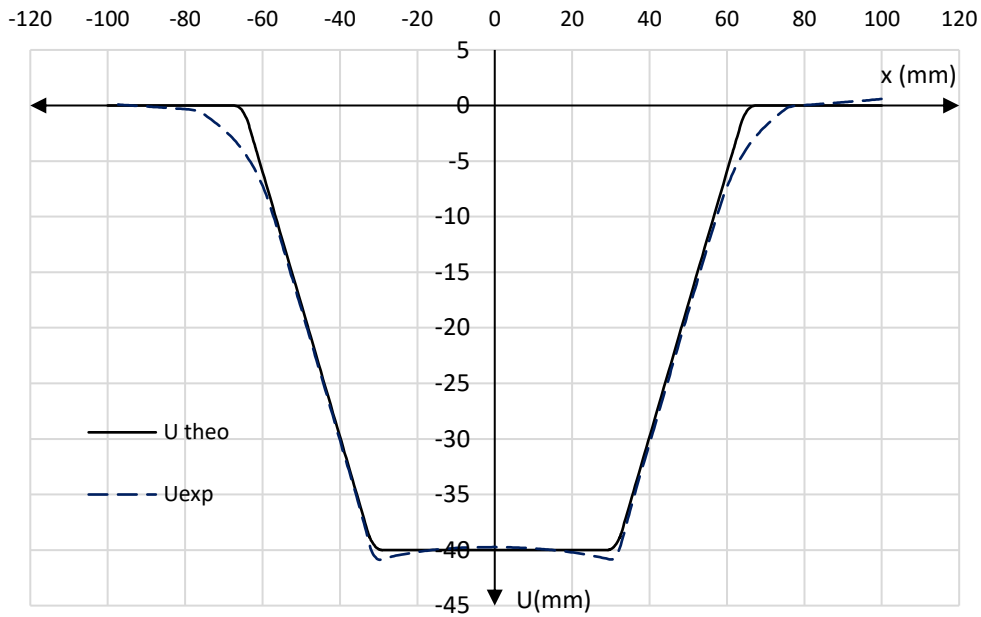


Figure II-46. Profils des formes réelles - expérimentales pour $\alpha=50^\circ$

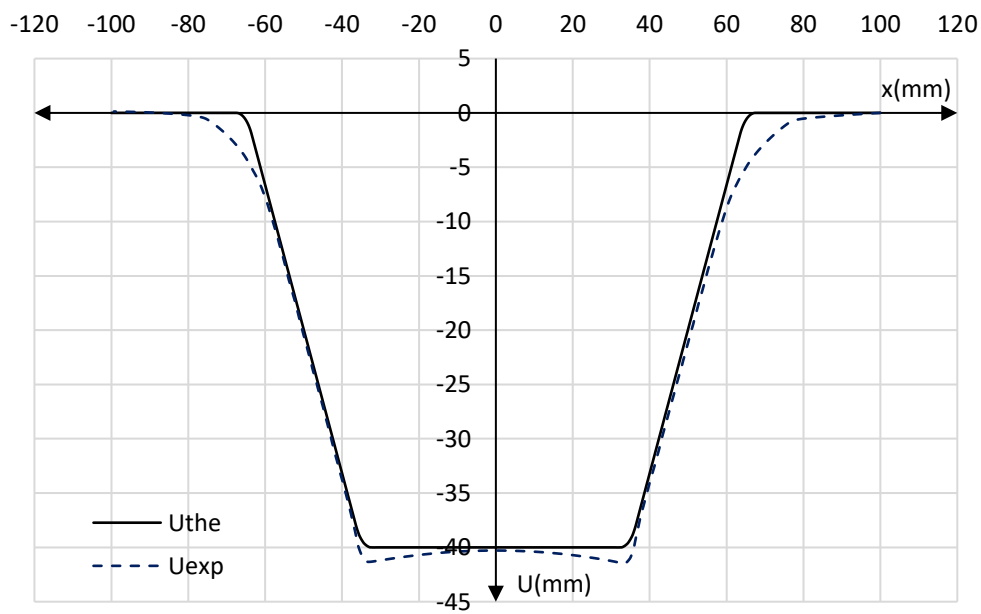


Figure II-47. Profils des formes réelles - expérimentales pour $\alpha=53^\circ$

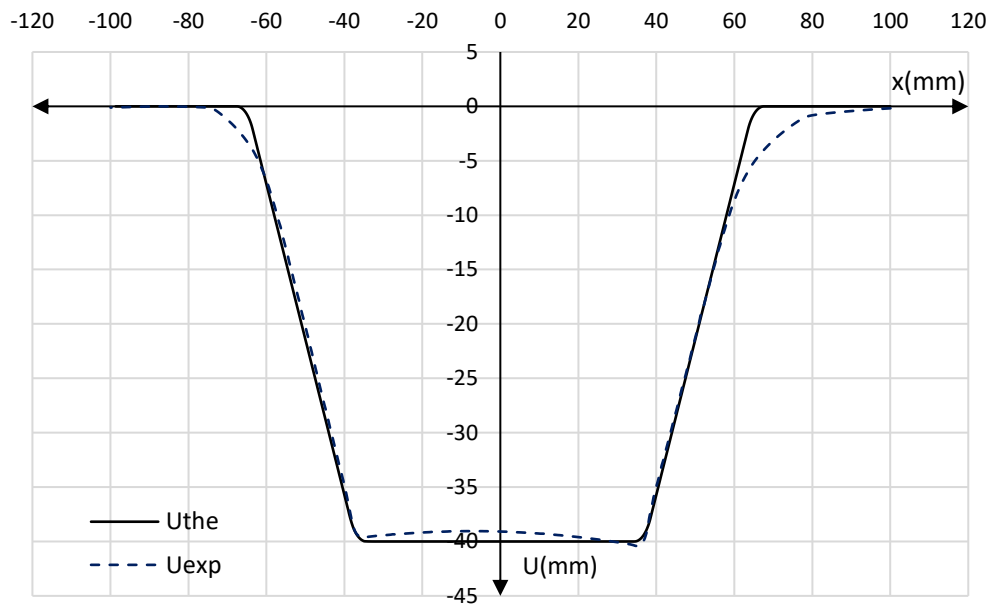


Figure II-48. Profils des formes réelles - expérimentales pour $\alpha=55^\circ$

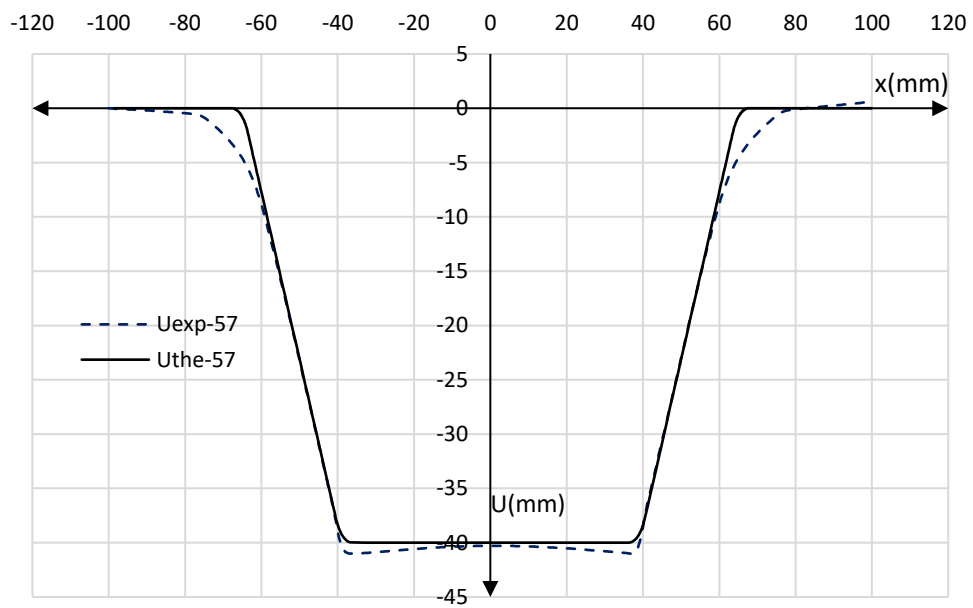


Figure II-49. Profils des formes réelles - expérimentales pour $\alpha=57^\circ$

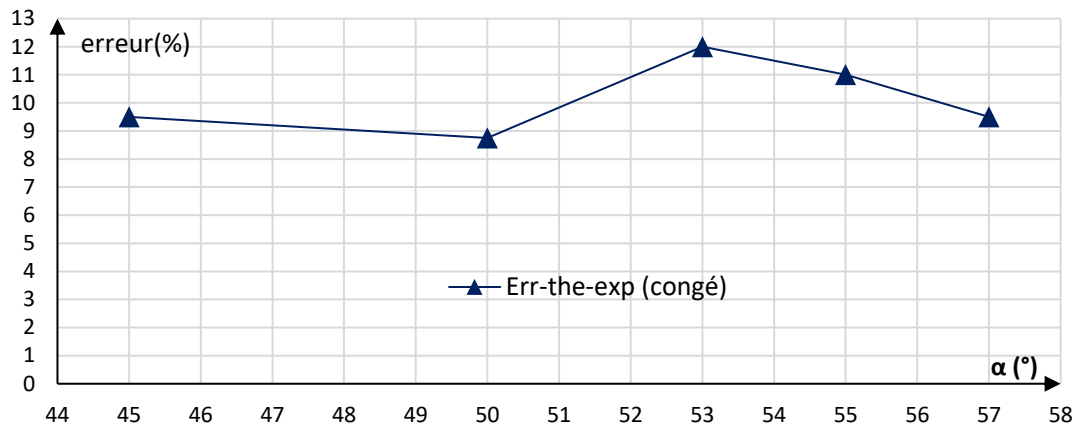


Figure II-50. Erreurs relatives entre (U_{exp}/U_{the}) au niveau du congé

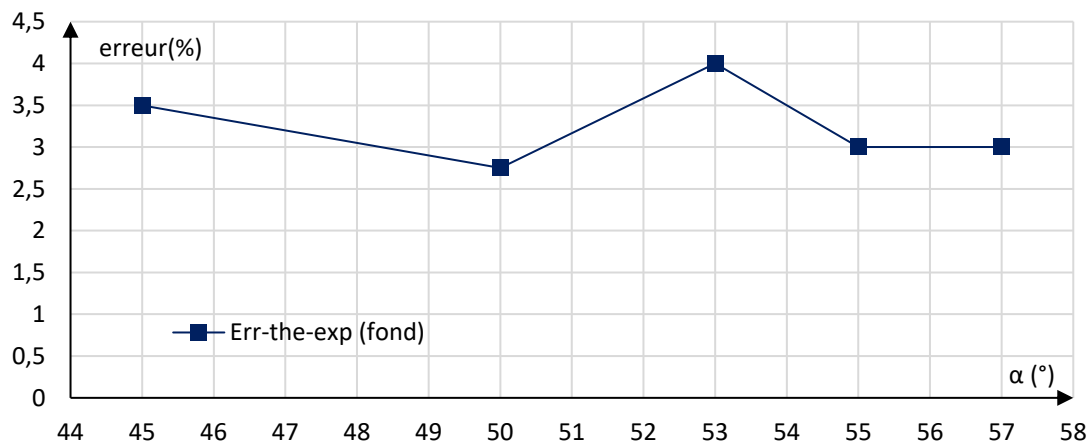


Figure II-51. Erreurs relatives entre (U_{exp}/U_{the}) au niveau du fond de la pièce

5.4. Analyse des efforts de formage

Les mesures fournis par le capteur multi-composant FN7325 associé avec sa chaîne d'acquisition nous permet de suivre les trois composantes de l'effort de formage (F_x , F_y , et F_z). Dans la plupart des travaux de formage incrémental, on ne présente que la composante axiale F_z . L'isolation thermique du capteur nous a permis de suivre l'effort tout au long des essais des différentes pièces avec différents angles d'inclinaison ($\alpha=45^\circ, 50^\circ, 53^\circ, 55^\circ$ et 57°). On remarque que l'effet du chauffage par l'amélioration de la ductilité de l'alliage de titane Ti-6Al-4V ainsi que l'uniformité de la distribution de la température sur le flan permet de diminuer l'effort de formage d'une manière significative par rapport au formage du même matériau à froid.

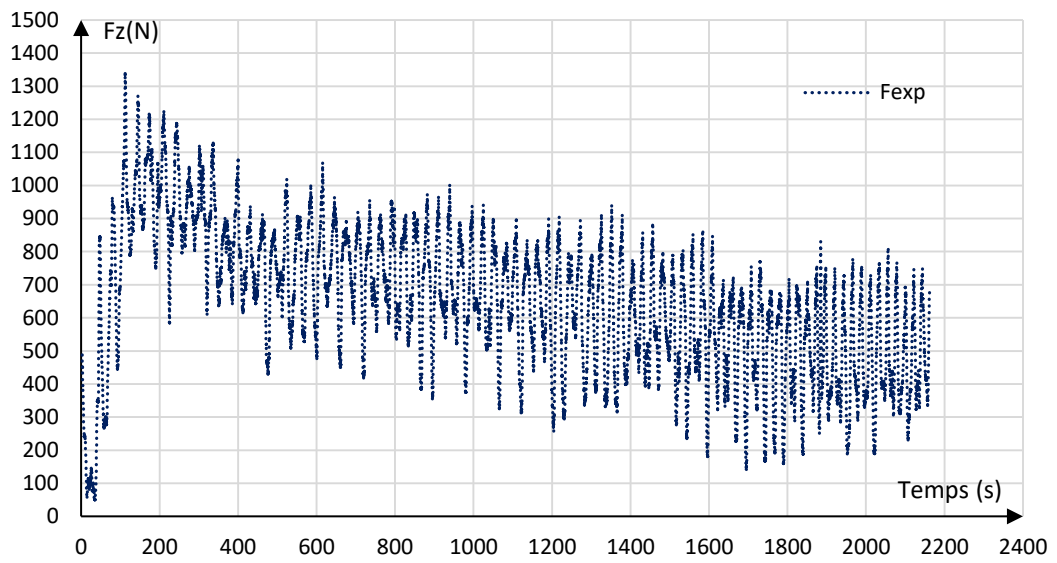


Figure II-52. Courbe des efforts F_z pour $\alpha=45^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$

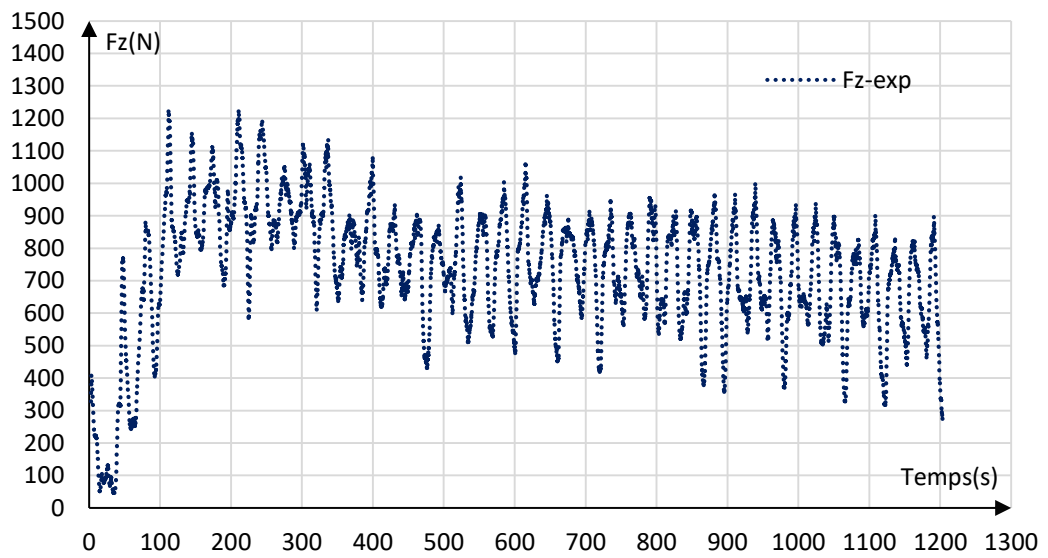


Figure II-53. Courbe des efforts F_z pour $\alpha=50^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$

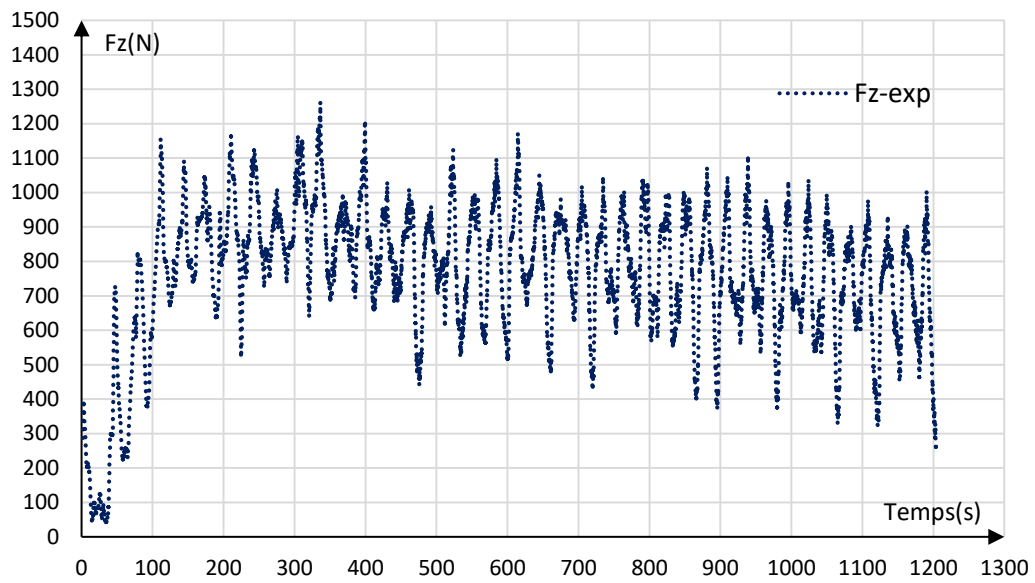


Figure II-54. Courbe des efforts F_z pour $\alpha=53^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$

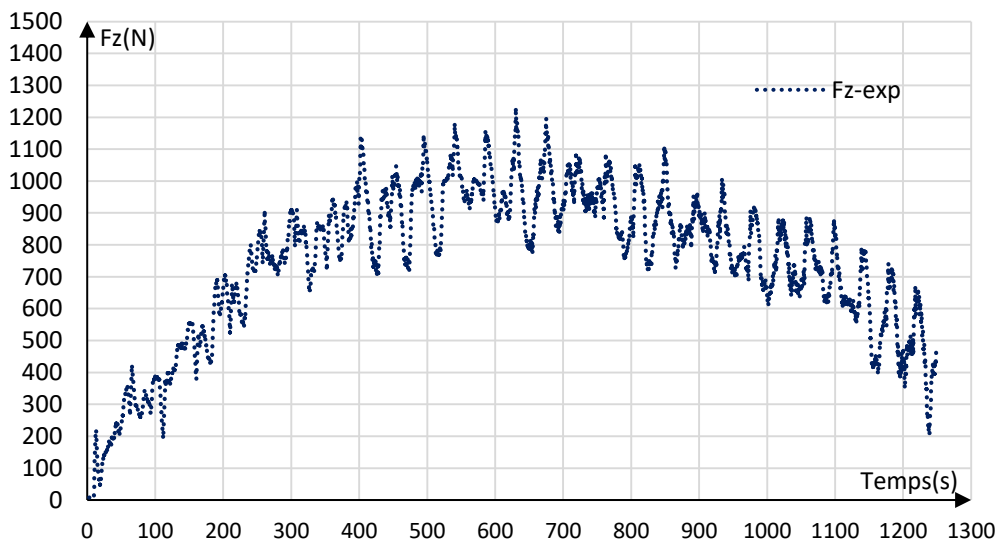


Figure II-55. Courbe des efforts F_z pour $\alpha=55^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$

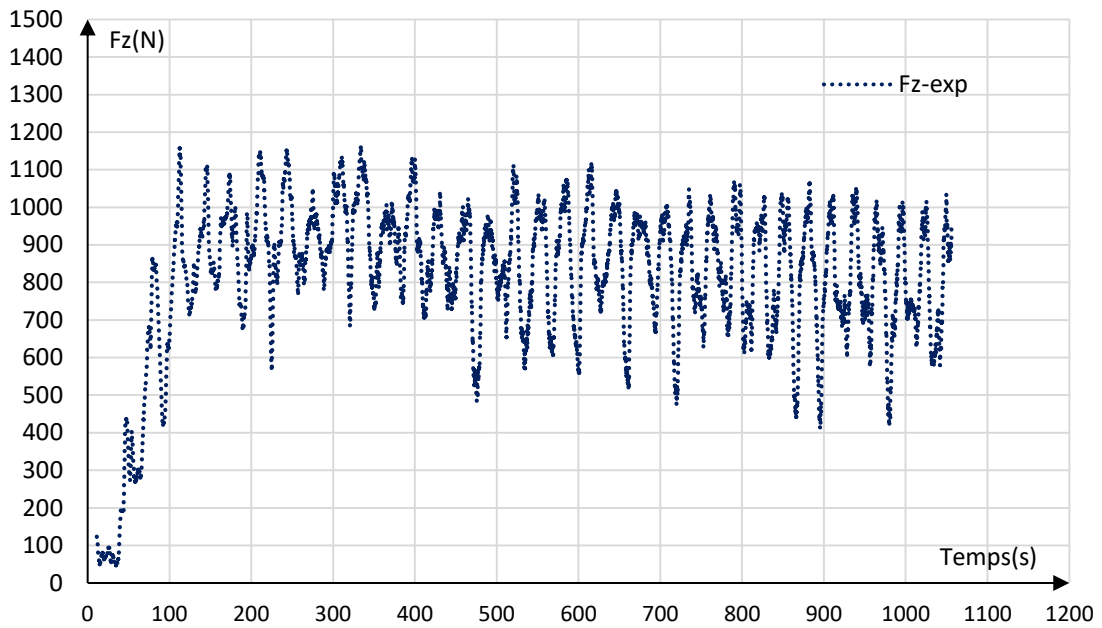


Figure II-56. Courbe des efforts F_z pour $\alpha=57^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$

Les figures de II-52 à II-56 présentent les différentes allures des efforts du formage en fonction du temps pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V avec les différents angles de formage ($\alpha=45^\circ, 50^\circ, 53^\circ, 55^\circ$ et 57°) pour des essais effectués à la température de (450°C). Pour chaque cas, on note une stabilisation à partir du cinquième tour. On note que l'angle d'inclinaison de la pièce a un effet proportionnel sur l'effort de formage à chaud. Les valeurs des efforts maximums atteints pour chaque angle de formage sont illustrées dans la figure II-57. On remarque une augmentation remarquable de l'effort pour un angle de 55° ce qui correspond à l'angle maximale de formage et puis apparition de la rupture pour un angle de 57° .

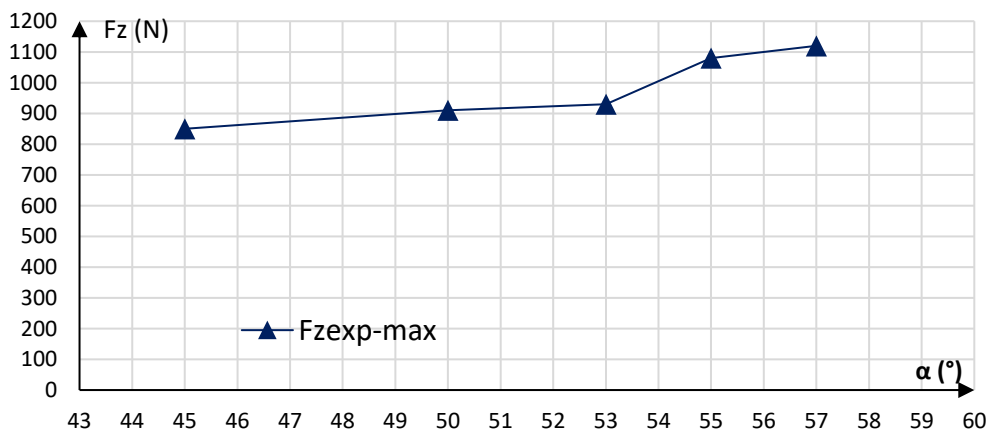


Figure II-57. Évolution de l'effort maximale de formage en fonction de l'angle

6. Conclusion

Dans cette étude, une investigation expérimentale sur le formage incrémental à chaud et à froid des tôles en alliage de titane Ti-6Al-4V a été menée. L'analyse des différents résultats expérimentaux obtenus sont résumés dans le tableau II-11 et sont les suivants :

- Un nouveau dispositif de formage incrémental à chaud a été mis au point. Il utilise des cartouches chauffantes implantées dans la matrice et permettant d'assurer un chauffage uniforme de la tôle objet du formage. Le dispositif est isolé thermiquement par des briques réfractaires. Un capteur d'effort permet un suivi en temps réel des forces de formage. Le dispositif est équipé par un thermocouple permettant sa régulation en température et pouvant atteindre un chauffage jusqu'à 800°C.
- La formabilité des alliages de titane est améliorée pour une température comprise entre 400 et 500°C. Un chauffage supérieur à cette plage risque de rompre la tôle. Pour une plage de température $T = 450^{\circ}\text{C}$ avec une incertitude de 30°C on obtient des pièces saines sans brûlures ni ruptures et en conformités dimensionnelles avec les profils souhaités.
- Le chauffage de l'alliage de titane Ti-6Al-4V améliore sa ductilité, et on peut former des pièces coniques d'angle de formage ($\alpha=55^{\circ}$) de profondeur ($h=40\text{mm}$) avec un chauffage à $T=450^{\circ}\text{C}$.
- La variation de l'angle d'inclinaison de la pièce pour un diamètre de l'outil et un incrément axial optimisés, montre que l'angle limite de formage est de $\alpha = 57^{\circ}$.
- L'effort de formage a remarquablement diminué par l'effet du chauffage par rapport au formage à froid pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V. Cet effort augmente lorsque l'angle d'inclinaison augmente pour le formage à chaud.
- L'épaisseur minimale diminue lorsque l'angle d'inclinaison augmente pour atteindre des taux de réduction de 28.2% et 45.2% pour les angles respectivement 45° et 57° .
- Les écarts entre les profils obtenus comparés aux profils théoriques sont faibles. Cette erreur au niveau de la base (fond cône tronqué) est de l'ordre de (3%), et au niveau du congé coté serre-flan elle est de l'ordre de 10%.

Tableau II-11. Les principaux résultats expérimentaux du formage incrémental à chaud

Angle du cône α [°]	45°	50°	53°	55°	57°	Moyenne
Epaisseur expérimentale minimale t_{exp} [mm]	0,359	0,328	0,304	0,298	0,274	0,3126
Taux de réduction de l'épaisseur expérimental [%]	28,2	34,4	39,2	40,4	45,2	37,48
Effort expérimental maximal F_{exp} [N]	850	910	930	1080	1120	978
Erreur entre U_{exp} et U_{the} (fond) [%]	3,5	2,75	4	3	3	3,25
Erreur entre U_{exp} et U_{the} (congés) [%]	9,5	8,75	12	11	9,5	10,15

Chapitre III: Simulation et optimisation du formage incrémental à froid du Ti-6Al-4V

1. Introduction

Le formage incrémental des tôles est un procédé de formages innovant très réputé à nos jours par les chercheurs et les industriels. Ce procédé permet d'obtenir des pièces axisymétriques sans outils spécifiques. Les travaux de recherche menés sur ce procédé ne cessent de se développer pour trouver des solutions aux différents problèmes rencontrés et rechercher les paramètres d'utilisation optimum pour ce nouveau procédé. Trois voies de recherches sont souvent évoquées par les chercheurs : les études expérimentales, les modélisations numériques et les modélisations analytiques. Il est aujourd'hui en effet bien connu que pour réduire le nombre d'essais expérimentaux d'un essai de mise en forme, la mise en place de simulations numériques par la méthode des éléments finis est indispensable.

Dans ce chapitre on s'intéresse à la modélisation numérique du procédé de formage incrémental appliqué à l'alliage de Titane Ti-6Al-4V. On évoquera dans un premier temps les différents modèles utilisés par les chercheurs pour modéliser ce procédé et on discutera des meilleures solutions pour refléter la réalité des résultats expérimentaux. Par la suite on présentera notre modélisation par éléments finis sur le code Eléments Finis Abaqus pour le formage incrémental d'un cône tronqué. Les résultats de la simulation seront comparés aux résultats expérimentaux pour validation du modèle numérique. Ce modèle est ensuite utilisé pour conduire des travaux d'optimisation des paramètres du procédé du formage incrémental à froid par la méthode des plans d'expérience.

2. Revue sur la simulation numérique du formage incrémental

2.1. Introduction

La modélisation numérique du procédé du formage incrémental des tôles minces est souvent réalisée par la méthode des éléments finis utilisant des codes de calculs commerciaux tels que les codes ABAQUS[®], LS-DYNA[®] ou PAM-STAM[®]. La plupart des simulations sont implémentés sur le code ABAQUS[®] que sera utilisé dans cette étude.

Les modèles éléments finis développés sont généralement évalués et validés par comparaison avec les résultats expérimentaux.

La validation du modèle EF du procédé de formage incrémental passe par la comparaison des efforts numériques et expérimentaux mis en jeu, du profil final de la pièce, la distribution des épaisseurs... Des problèmes liés à la fiabilité et au temps de calcul sont souvent évoqués et poussent les chercheurs à améliorer ces modèles. Les simulations numériques du procédé de formage incrémental sont associées à des temps de calcul extrêmement élevés à cause du caractère fortement non-linéaire du problème (grandes déformations, contact flan-outil, ...), de la longueur de la trajectoire à parcourir par l'outil, de la nature incrémentale du procédé et finalement du maillage de la pièce constitué d'un grand nombre d'éléments compte tenu de la faible zone de contact entre la pièce et l'outil.

2.2. Les modélisations du formage incrémental à froid

Dans la littérature on trouve plusieurs travaux portant sur la simulation numérique du formage incrémental d'une pièce tronconique avec pour but de prédire correctement pour la forme finale, la répartition de l'épaisseur, la rugosité et les efforts développés. Les travaux sur la simulation numérique du formage incrémental à chaud seront présentés dans le prochain chapitre.

- En 2001 H.Iseki [15] fut parmi les premiers à mettre en place un modèle EF sur le code ABAQUS® pour simuler le procédé de formage incrémental et comparer les résultats numériques obtenus avec ceux des essais expérimentaux et des formes théoriques. Le flan est modélisé par des éléments maillés en coque avec un encastrement appliqué aux extrémités et l'outil est modélisé comme une bille. Les résultats du modèle EF montrent une bonne adéquation de la forme obtenue par rapport aux résultats de l'expérience.
- En 2002 l'équipe de M. Bambach [28] propose un modèle EF du procédé de formage incrémental sur le code ABAQUS® avec un schéma explicite. La tôle est maillée avec des éléments coques. Il utilise une loi de comportement prenant en compte l'endommagement. Ce modèle permet une bonne prédiction de la forme finale mais aussi de la distribution de l'épaisseur pour le cône tronqué.
- En 2005 J.Jeswiet [8, 9] présentent une comparaison des résultats expérimentaux avec deux modèles EF explicite et implicite développés sur ABAQUS®. Ils

montrent que le modèle explicite présente des résultats convenable vue le temps alloué plus faible pour cette simulation.

- S. Dejardin et S.Thibaud [20], en 2010 présentent un modèle 3D avec un schéma explicite développé sur le code LS-DYNA[®] avec un maillage plus fin dans la zone de contact poinçon-tôle. Le profil final de la pièce conique est comparé avec celui obtenu par l'expérience. Ce modèle montre une bonne concordance entre les résultats. Le retour élastique avait aussi été simulé ce qui n'est pas le cas dans toutes les études.
- J. Duflou et all en 2010 [40] présentent un nouveau modèle 3D avec schéma explicite développé sur ABAQUS[®] pour étudier le torsion de la pièce sous l'effet de l'outil lors d'une opération de formage incrémental d'une pyramide. Ils observent une asymétrie des effets d'amincissement de l'épaisseur. Les résultats prédits par le modèle EF qui portent sur les distributions des épaisseurs et les efforts développés en fonction des facteurs du procédé sont confirmés par les résultats des essais expérimentaux.
- S. Thibaud et al [82] (2012) présentent un modèle de micro SPIF avec un schéma explicite sur le code LS-DYNA[®]. En raison de l'importance du cisaillement transverse, le flan est maillé avec des éléments de volume avec intégration réduite à huit nœuds. Le comportement mécanique de l'alliage de cuivre est modélisé par une loi élasto-plastique avec un écrouissage isotrope. La comparaison faite avec les résultats expérimentaux montre une bonne concordance au niveau des efforts développés, le profil et la distribution de l'épaisseur ainsi qu'au niveau du retour élastique calculé. Le modèle développé démontre sa capacité à prédire de manière efficace le formage de petites pièces de faible épaisseur par le procédé SPIF.

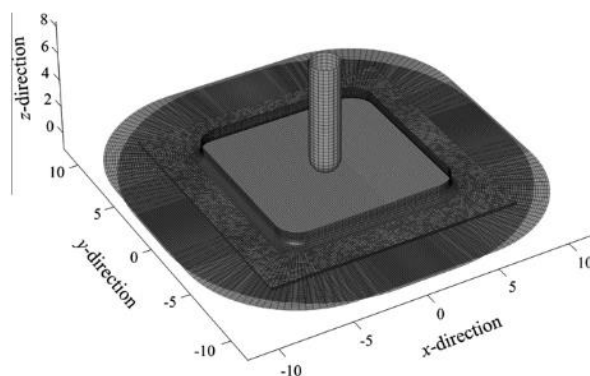


Figure III-1. Modèle EF de micro SPIF avec un flan en éléments solides 3D [82]

- Y.Fang et al [64] présentent une étude comparative expérimentale et numérique du formage incrémental à un point SPIF de l'alliage d'aluminium AA1100. La simulation numérique a été réalisée en utilisant le code LS-DYNA[®] avec des éléments de coque pour le maillage de la tôle. La déformation de la tôle et l'endommagement ont été étudiés dans la zone de formage. La simulation en EF d'un cône tronqué confirme certains résultats analytiques. La validation expérimentale a été réalisée en mesurant les déformations. Le modèle EF prédit correctement l'apparition de fissure sur la pièce.

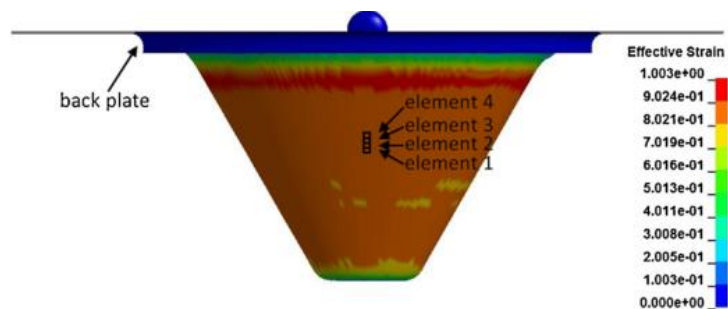


Figure III-2.Simulation numérique en éléments de coque utilisant le code LS-DYNA[64]

- S. Kurra, et al [85] se sont intéressés à l'angle d'inclinaison maximale et l'amincissement maximal le long d'un plan de coupe d'un cône tronqué extra-profond en acier.

Un modèle éléments finis 3D complet a été développé avec LS-DYNA[®] et un schéma explicite pour la simulation numérique du procédé de formage incrémental à un point. Le flan a été maillé avec des éléments coques avec cinq points d'intégration dans l'épaisseur. Le comportement élasto-plastique du flan est modélisé par la loi de Swift. La matrice et le poinçon sont représentés par des corps rigides. Les contacts de l'outil-flan, et du flan-matrice sont modélisés en utilisant un algorithme de contact surface à surface. La loi de Coulomb est utilisée pour modéliser le frottement entre les différentes surfaces en contact. En raison de l'application d'huile de lubrification à l'interface de d'outil-flan, un coefficient de frottement faible de 0,01 est introduit. La distribution de l'épaisseur obtenue à partir de simulations numériques s'est avérée plus précises que les valeurs obtenues à partir du modèle analytique. Le modèle analytique ne donne pas une

bonne prédiction de l'épaisseur dans la région de flexion, tandis que le modèle éléments finis permet de prédire l'épaisseur dans les régions de fort étirement de la tôle.

Cette liste des travaux présentés n'est pas exhaustive, de nombreux travaux ont été menés pour mettre en place des modèles de simulations du procédé du formage incrémental.

2.3. Discussion des modèles

Les travaux de modélisation en éléments finis du procédé de formage incrémental ne cessent de se développer pour avoir un modèle capable de simuler la réalité expérimentale. Pour les modèles EF à froid deux familles sont présentés : maillage avec des éléments coque et maillage avec des éléments volumiques. Avec les modèles qui utilisent des éléments volumiques pour le maillage de la tôle [20, 40, 85, 18], le temps de calcul est très élevé mais il permet d'obtenir une bonne conformité des résultats numériques avec les résultats expérimentaux avec des erreurs relativement faible [82]. La deuxième famille utilise les éléments coque pour le maillage de la tôle, cette modélisation est souvent utilisée par les chercheurs [15, 28, 85] car elle permet de minimiser le temps de calcul. Elle permet de prédire correctement le profil des pièces formé, la distribution de l'épaisseur. Les efforts de formage obtenus avec les éléments coque sont légèrement moins précis que ceux obtenus avec des éléments de volume mais l'erreur est faible ce qui explique le grand nombre d'équipes de recherche utilisant ce type de modélisation.

3. Modélisation numérique du formage incrémental à froid

3.1. Le modèle éléments finis

Nos premiers travaux ont porté sur la modélisation du formage incrémental (SPIF) à température ambiante. L'objectif était de trouver les paramètres optimums du procédé à froid et tirer des conclusions à travers des comparaisons avec des résultats expérimentaux.

La simulation numérique du procédé est effectuée avec ABAQUS/Explicit. On utilise un modèle dynamique explicite. Le maillage de la tôle d'épaisseur ($t=0,5\text{mm}$) est réalisé avec des éléments de type coque (S4R). Ce sont des éléments coque à 4 nœuds avec une intégration réduite et une formulation en grandes déformations de type quadrilatéral en contrainte-déplacement. Comme choisi plusieurs auteurs [1, 10, 15, 40], les outils (matrice, poinçon) sont considérés comme des surfaces rigides. Pour notre modélisation

la matrice, le serre-flan et le poinçon sont assimilés à des surfaces analytiques rigides. Pour le formage incrémental du cône tronqué, les géométries sont les suivantes (figure IV-3) :

- Le poinçon est assimilé à une bille de diamètre (d_p)
- La matrice est assimilée à une couronne de diamètre intérieur 120mm et de diamètre extérieur de 200. On ajoute sur le diamètre intérieur une collerette de rayon 5mm, utilisé comme guide de la tôle lors de l'opération de formage comme le montre la figure III-3.
- Le serre-flan est assimilé à une couronne de mêmes dimensions que la matrice

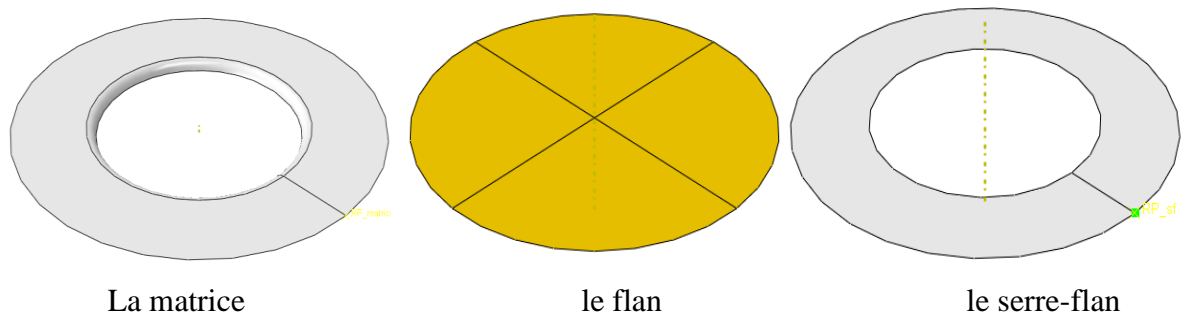


Figure III-3. Les pièces constituant la modélisation du SPIF

La matrice est la pièce fixe, sur laquelle repose le flan, le contact entre les deux surfaces est de types surface sur surface. Le frottement est modélisé par la loi de Coulomb avec un coefficient de frottement de valeur ($\mu=0,1$). Le serre-flan est placé sur le flan. On utilise le même type de contact entre le flan et le serre-flan. Une attention particulière est faite pour le choix de la pression appliquée par le serre-flan sur le flan. Une pression $P_{sflan}=4,3$ Mpa, a été appliquée, comme cela est conseillé dans les travaux de J. Bechior [10] pour la même pièce afin d'éviter le glissement du flan. Le modèle complet est donné par la figure III-4.

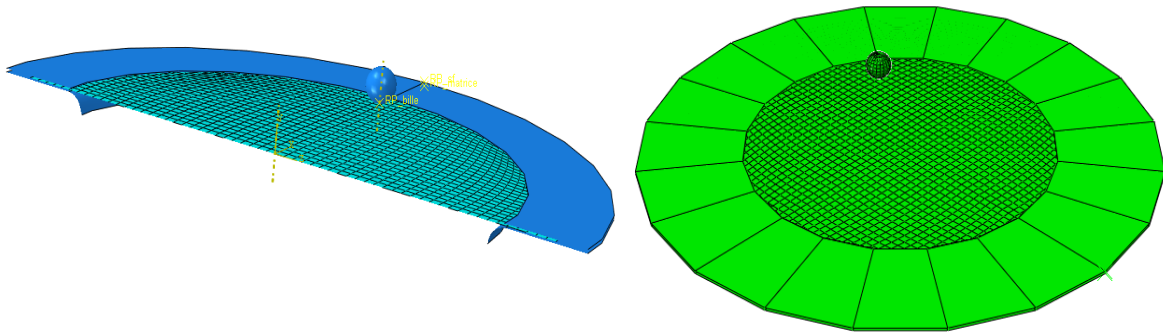


Figure III-4. Modélisation en EF du procédé de formage incrémental à froid

3.2. Loi de comportement du Ti-6Al-4V

Le matériau travaillé est un alliage de titane Ti-6Al-4V dont la composition chimique et les caractéristiques mécaniques fournis par le constructeur sont illustrés par les tableaux III-1 et III-2. On choisit pour la simulation de ce procédé une loi élasto-plastique pour décrire le comportement de l'alliage de titane (figure III-5). Une loi de type Swift a été choisi pour décrire l'écrouissage : $\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon^p)^n$ Les paramètres du modèle ont été déterminés par approche inverse[35].

Tableau III-1. Les propriétés mécaniques du Ti-6Al-4V

Etat	Limite élastique R _{p0.2} [MPa]				Résistance de rupture R _m [MPa]	Allongement de rupture A [%]	Dureté Vickers [HV]
	20°C	100°C	200 °C	300 °C			
Typique	900	800	700	620	950	12	290
Durci thermique	1050	870	820	750	1150	10	350

Tableau III-2. Composition chimique de l'alliage de Titane Ti-6Al-4V

Composition chimique du Ti-6Al-4V en [%] (AC = Autres Chacun, AT = Autres Total)									
C	Fe	H	N	O	Al	V	AC	AT	Ti
< 0,08	< 0,3	< 0,0125	< 0.05	< 0,2	5,5 - 6,75	3,5 - 4.5	< 0.1	< 0.4	Bal

La figure III-5 présente pour l'alliage de titane étudié, la courbe contrainte déformation et le tableau III-3 donne les paramètres du modèle défini par l'approche inverse.

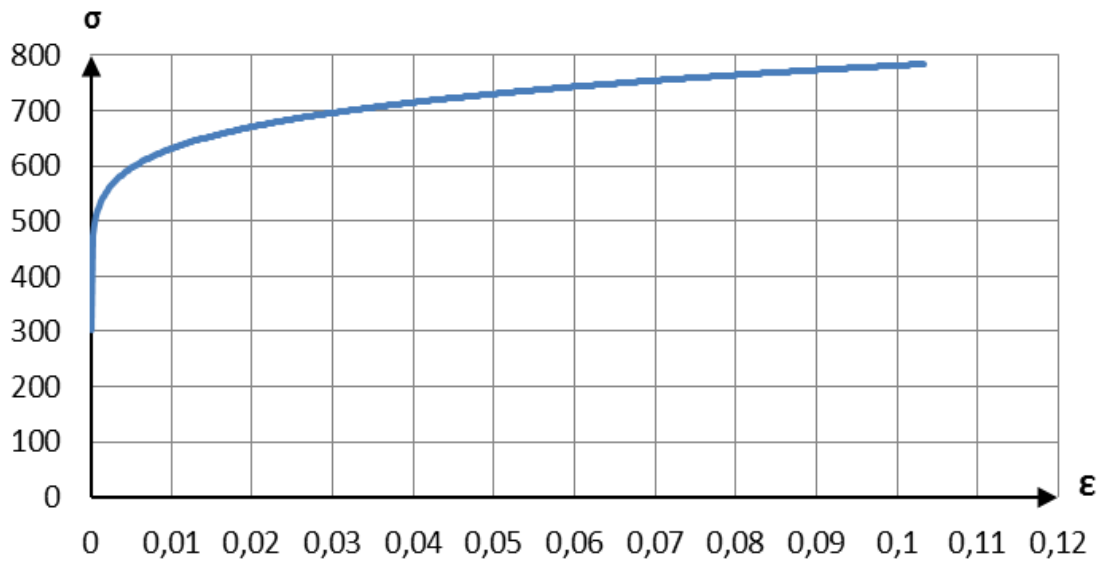


Figure III-5. Courbe de traction contrainte-déformation de l'alliage de titane Ti-6Al-4V

Tableau III-3. Propriétés mécaniques de l'alliage de titane Ti-6Al-4V, paramètres du modèle

Module d'élasticité : E	100 GPa
Limite élastique : σ	405 MPa
Coefficient d'écroutissage : n	0,084
Coefficient de proportionnalité : K	697,7 MPa
Déformation élastique : ε_0	0,00157

Le poinçon assimilé à une bille de surface rigide suit une trajectoire fournie sous forme d'amplitudes selon les trois directions (X, Y, Z). Cette trajectoire est créée avec le logiciel Catia en définissant l'incrément axial (ΔZ) de l'outil et son diamètre (d_p). La pièce de référence utilisée pour la simulation est un cône conique d'angle intérieur (α) et de profondeur (h). La figure III-6 présente la trajectoire obtenue avec un diamètre du poinçon de ($d_p=10$ mm) et un pas de déplacement axial de ($\Delta z=1$ mm).

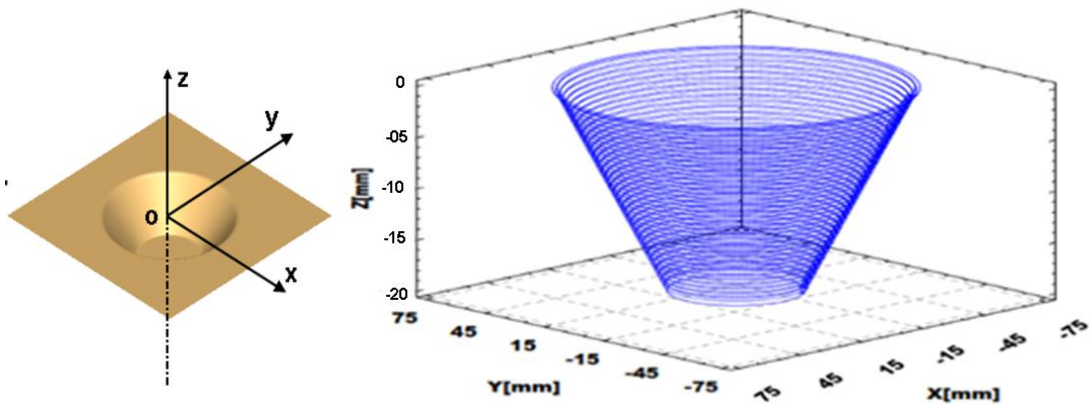


Figure III-6. Génération de la Trajectoire de l'outil par Catia

3.3. Simulation et vérification du modèle en EF

La modélisation du formage incrémental à un point (SPIF) est mise en place sur le logiciel Abaqus. On commence par faire des simulations de vérification pour voir les résultats du modèle. Les paramètres qui optimisent une opération de simulation à savoir la taille de l'élément et le nombre des nœuds associés ainsi que le temps alloué pour cette simulation sont déterminés suite à une série d'essai de simulation préliminaire

On présente quelques résultats illustrés par les figures suivantes. La répartition de l'épaisseur sur le flan déformé donnée par la figure III-7 qui montre que la partie encadrée ne subissent pas d'amincissement par contre on atteint une épaisseur minimale sur la partie oblique de la tôle déformée. Les déplacements du profil (U) illustré par la figure III-8 démontre le même résultat, en effet le déplacement maximal est atteint sur le fond.

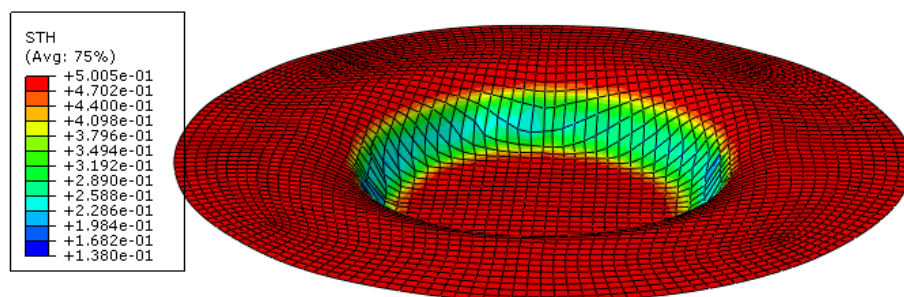


Figure III-7. Répartition de l'épaisseur sur la pièce conique

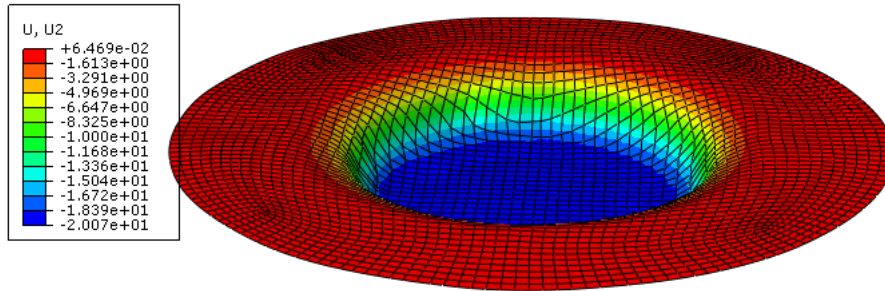


Figure III-8. Répartition des déplacements axiaux sur la pièce conique

Une première étude de l'effet du diamètre du poinçon (d_p) sur la distribution de l'épaisseur et l'effort axial a été réalisée.

La figure III-9, illustre l'effet du diamètre du poinçon sur l'effort de formage. On remarque que la valeur maximale de l'effort de formage croît lorsque le diamètre du poinçon augmente. L'utilisation d'un poinçon de petit diamètre permet donc de diminuer la valeur des efforts mis en jeu.

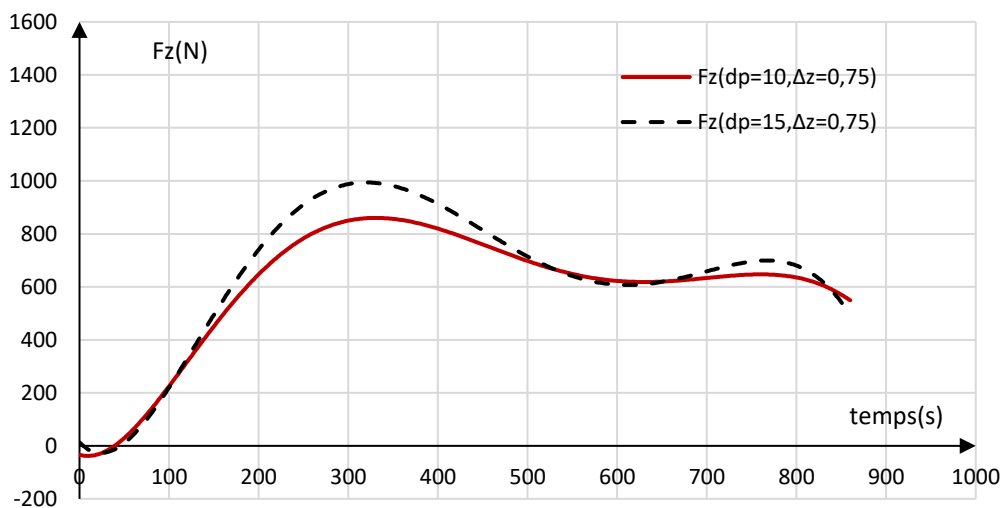


Figure III-9. Effet du diamètre du poinçon sur l'effort de formage F_z

La figure III-10 présente la variation de l'épaisseur le long d'un plan de coupe passant par l'axe de révolution de la pièce pour deux diamètres de poinçon différents. On peut observer que pour le diamètre plus petit, la réduction d'épaisseur est plus faible (épaisseur minimale plus grande).

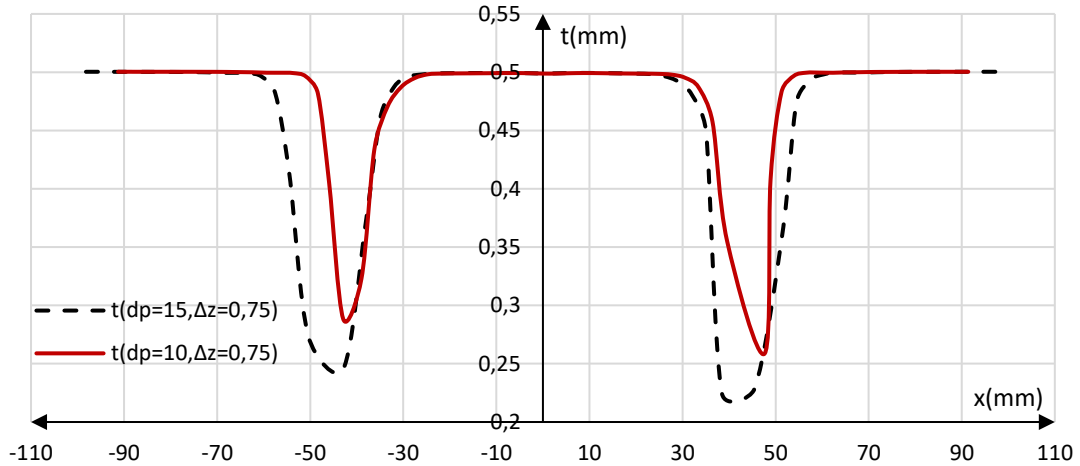


Figure III-10. Effet du diamètre du poinçon sur la distribution de l'épaisseur

Les deux résultats ne permettent pas encore de conclure de manière générale sur l'effet du diamètre du poinçon, ces essais ayant été réalisés pour une valeur particulière d'autres paramètres comme l'incrément axial, l'angle de formage, les vitesses de l'outil. Une étude d'optimisation plus globale est nécessaire.

Nous avons choisi de mener une étude utilisant les plans d'expériences afin d'étudier l'effet de certains facteurs du procédé (diamètre du poinçon et incrément axial) sur l'épaisseur minimale atteinte sur la pièce et l'effort maximale. L'optimisation de ces paramètres sera ensuite réalisée grâce à la méthode de surface de réponse.

4. Optimisation des paramètres de formage incrémental à froid du Ti-6Al-4V

4.1. Choix du plan d'expérience

L'objectif ici est de déterminer par la simulation numérique les valeurs du diamètre du poinçon (d_p) et la taille de l'incrément vertical du poinçon (Δz) qui permettent de minimiser la force axiale de formage et de maximiser l'épaisseur minimale pour le formage de la pièce conique tronquée présentée et étudiée expérimentalement dans le chapitre II. La géométrie de la pièce est rappelée sur la figure III-11. Le diamètre du poinçon (d_p) et l'incrément vertical (Δz) sont variables, les autres facteurs du procédé

sont fixés à des valeurs optimales. Comme le nombre de variables d'entrée est faible, un plan factoriel complet à trois niveaux a été choisi pour réaliser le plan d'expérience. La méthode de surface est choisie pour trouver la valeur optimum des variables. Cette technique d'optimisation consiste à décrire la réponse sous forme d'une fonction polynomiale en fonction des différentes variables[96]. Les coefficients de la fonction polynomiale sont généralement obtenus par la méthode des moindres carrés.

Les valeurs optimums des variables du problème d'optimisation sont alors définies par le minimum de la fonction polynomiale facilement calculable.

Le tableau III-4 présente le plan d'expérience utilisé dans cette étude : les deux facteurs et leurs valeurs pour les trois niveaux.

Dans cette étude, l'objectif est de déterminer le diamètre (d_p) et l'incrément axial (Δz) optimums permettant de minimiser l'effort maximal du formage et maximiser l'épaisseur minimale (c'est-à-dire minimiser l'amincissement de la tôle). La principale contrainte prescrite par les essais expérimentaux est la profondeur des pièces qui ne doit pas dépasser 15mm. Ce choix est basé sur des essais expérimentaux menés sur notre dispositif avec des tôles en alliage de titane et qui ont montré que le formage incrémental à froid ne permet pas d'atteindre des profondeurs plus importantes[49].

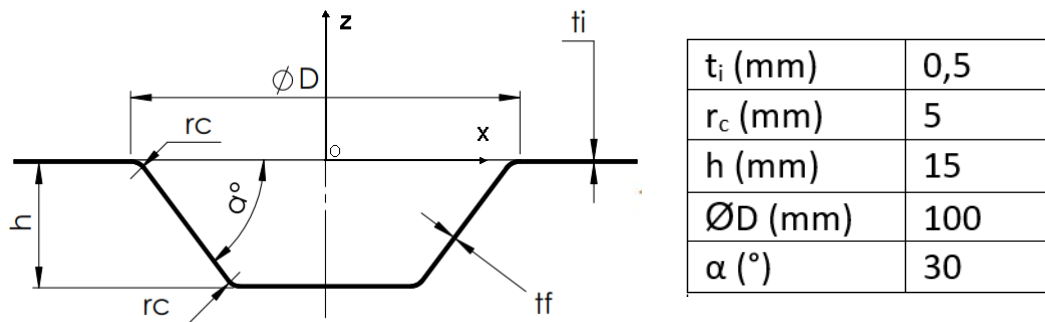


Figure III-11. La pièce de référence retenue pour la simulation numérique

Tableau III-4. Plan d'expérience avec trois facteurs et deux niveaux

Facteur	Facteur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Diamètre du poinçon d_p (mm)	A	10	12.5	15
Incrément Δz (mm)	B	0.5	0.75	1

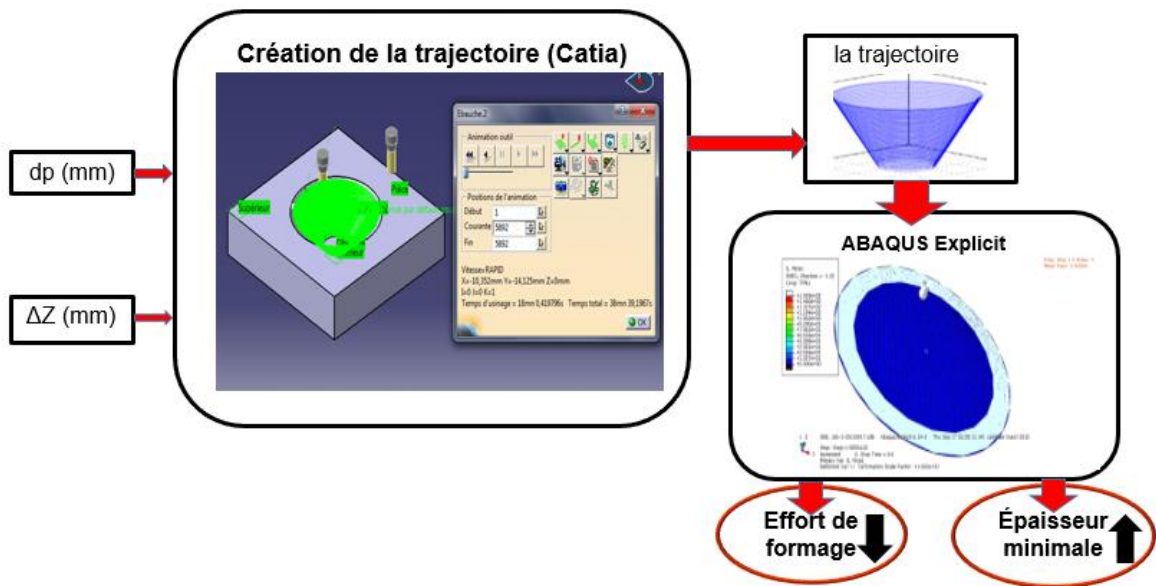


Figure III-12. Schéma de la simulation, création de la trajectoire et obtention des résultats

Compte tenu des deux facteurs et des trois niveaux, neuf simulations numériques du procédé de formage incrémental ont été réalisées en utilisant le modèle élément finis développé. La démarche de simulation du procédé de formage incrémental en fonction des deux facteurs est illustrée par la figure III-12.

Les réponses de la simulation numérique sont donc l'épaisseur minimale obtenue le long du plan de symétrie de la pièce comme le montre la figure III-13 et la force de formage maximale illustrée par la figure III-14. Le tableau III-5 présente les résultats numériques obtenus pour ce plan factoriel complet.

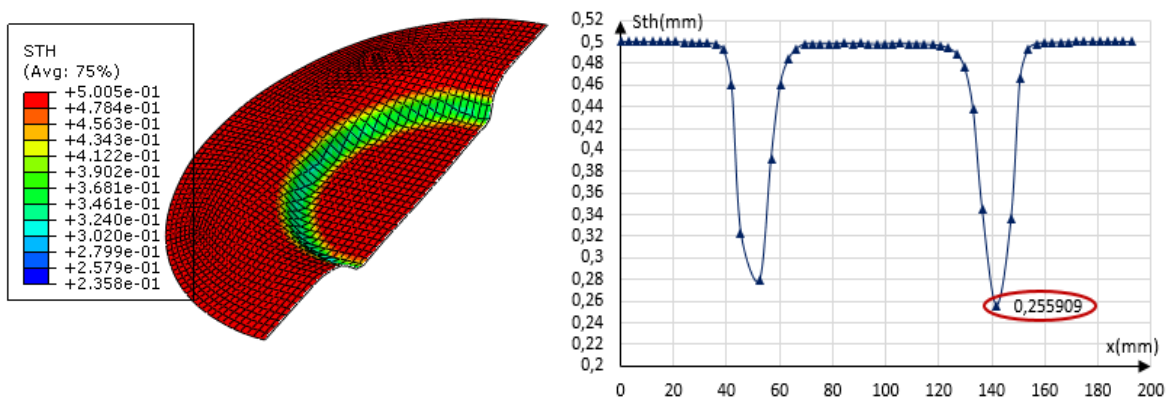


Figure III-13. La distribution de l'épaisseur selon un plan radial ($dp=10$ mm et $\Delta z=0,5$ mm)

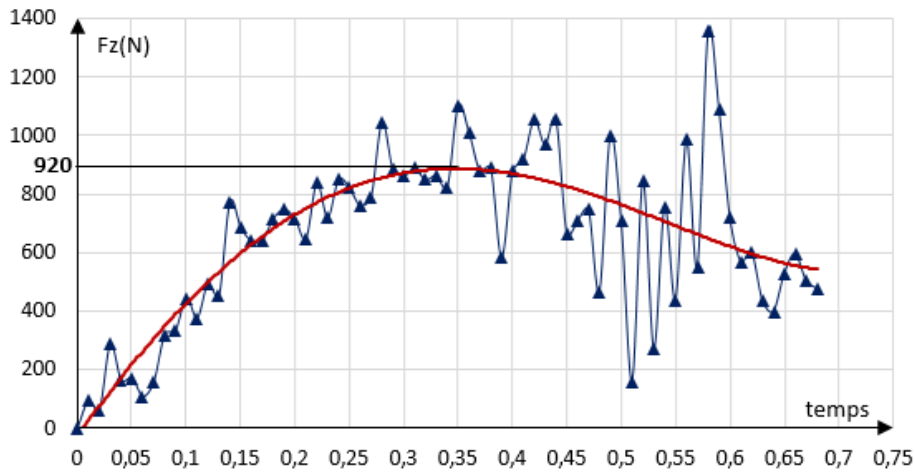


Figure III-14. Courbe de l'effort axial et la valeur maximale atteinte cas ($d_p=12,5\text{mm}$ et $\Delta Z=0,5\text{mm}$)

Tableau III-5. Plan d'expérience et les résultats associés

Expérience	d_p [mm]	Δz [mm]	Épaisseur minimale t [mm]	Force maximale F_{max} [N]
1	10	0.5	0,255	870
2	10	0.75	0,222	950
3	10	1	0,172	1030
4	12.5	0.5	0,258	920
5	12.5	0.75	0,106	980
6	12.5	1	0,197	1110
7	15	0.5	0,205	1060
8	15	0.75	0,205	1120
9	15	1	0,274	1180

4.2. Optimisation des paramètres par la méthode des surfaces de réponses

La recherche de la combinaison optimale des facteurs d'entrées pour l'optimisation des paramètres de sortie du plan d'expérience est faite par la méthode des surfaces de réponse. Des fonctions polynomiales quadratiques sont choisies pour représenter les surfaces de réponses. Elles permettent d'obtenir une relation entre les valeurs de réponse et les

paramètres d'entrée. Les équations (III-1) et (III-2) donnent les fonctions polynomiales du second degré considérées pour relier la force de formage et l'épaisseur minimale en fonction des paramètres d'entrée [97]. Les coefficients \mathbf{a}_i et \mathbf{b}_i (Tableau III-6) de ces fonctions polynomiales sont obtenus à partir des résultats du plan d'expérience avec la méthode analyse de la variance (ANOVA).

$$\mathbf{Fmax} = a_0 + a_1 d_p + a_2 \Delta Z + a_3 d_p^2 + a_4 d_p \Delta Z + a_5 \Delta Z^2 \quad (\text{III-1})$$

$$\mathbf{t} = b_0 + b_1 d_p + b_2 \Delta Z + b_3 d_p^2 + b_4 d_p \Delta Z + b_5 \Delta Z^2 + e2 \quad (\text{III-2})$$

Tableau III-6. Les coefficients \mathbf{a}_i et \mathbf{b}_i des fonctions polynomiales obtenus

\mathbf{a}_0	\mathbf{a}_1	\mathbf{a}_2	\mathbf{a}_3	\mathbf{a}_4	\mathbf{a}_5
1082,22	- 80,67	233,33	5,07	- 16,0	186,67
\mathbf{b}_0	\mathbf{b}_1	\mathbf{b}_2	\mathbf{b}_3	\mathbf{b}_4	\mathbf{b}_5
1,48	- 0,12	- 1,40	0,0037	0,03	0,60

Les surfaces de réponse de réponses en 3D relatives aux deux fonctions polynomiales sont présentées sur les figures III-15 et III-16. Elles montrent les variations de la force axiale de formage et l'épaisseur minimale des pièces coniques en fonction du diamètre de poinçon (d_p) et de l'incrément de saut du poinçon (Δz). Ces surfaces nous permettent de voir les effets du diamètre et de l'incrément du poinçon sur les paramètres de sortie du procédé. L'analyse de variance ANOVA réalisée pour la force axiale de formage et l'épaisseur minimale des pièces coniques présente l'effet de chaque paramètre d'entrée seul.

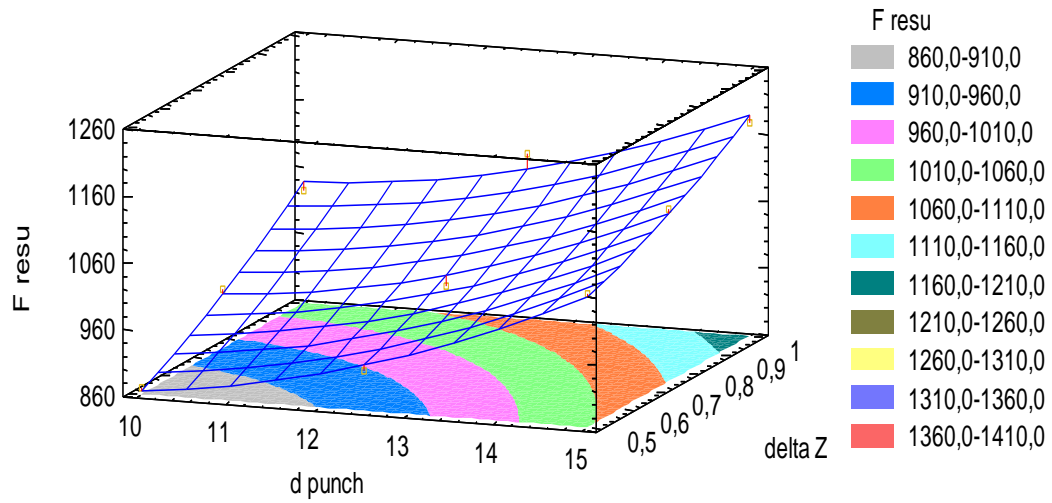


Figure III-15. Surface de réponse de la force maximale

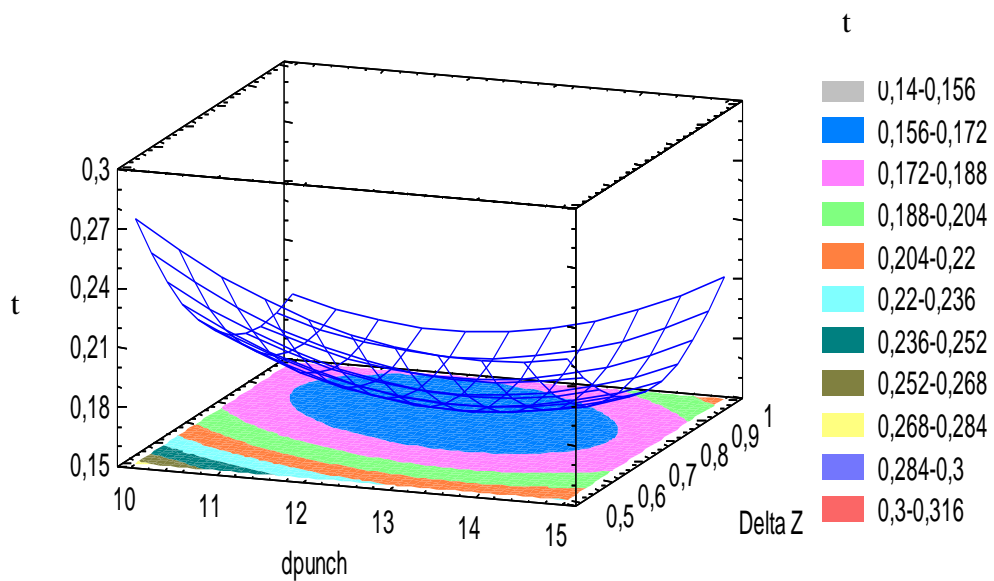


Figure III-16. Surface de réponse de l'épaisseur minimale

On peut observer sur la figure III-17 qu'une élévation du diamètre de poinçon (d_p) et de l'incrément axial (Δz) se traduit par une augmentation de la force axiale de formage. On atteint la valeur minimale de la force pour les valeurs minimums du diamètre de poinçon (d_p) et de l'incrément axial (Δz). On observe sur la figure III-18 que l'épaisseur maximale est une fonction croissante de l'incrément lorsque (Δz) croix l'effort augmente. Par contre l'effort (F_z) est une fonction hyperbolique du diamètre.

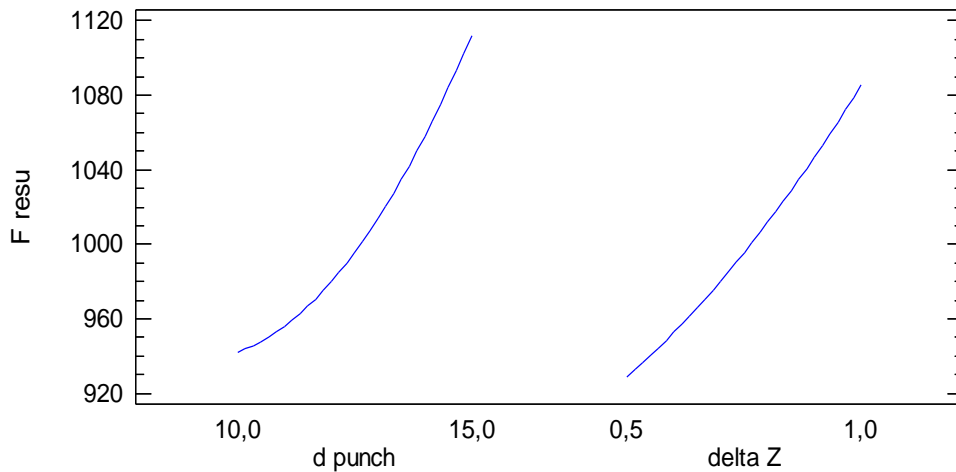


Figure III-17.Effet du diamètre (d_p) et de l'incrément axial (Δz) l'effort maximal

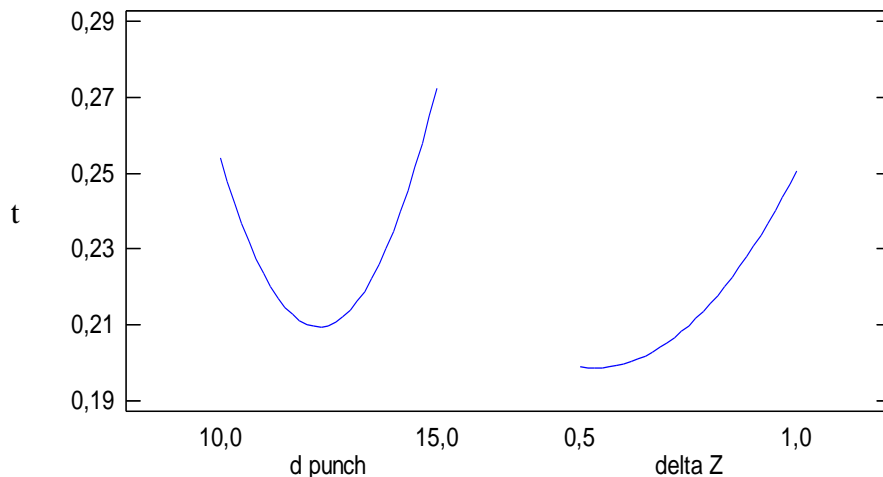


Figure III-18. Effet du diamètre (d_p) de l'incrément (Δz) du poinçon sur l'épaisseur minimale

Le diagramme de PARETO nous permet de voir l'effet standard de chaque facteur sur les paramètres du procédé de formage incrémental objets de cette étude. La figure III-19 et III-20 présentent les diagrammes PARETO de la force maximale et de l'épaisseur minimal. On remarque que le diamètre (dp) et l'incrément (Δz) ont un effet similaire sur la force de formage alors que l'incrément (Δz) a un effet plus important que le diamètre (dp) du poinçon sur l'épaisseur. On peut voir que l'effet de l'interaction des deux paramètres est faible pour les deux paramètres épaisseur et effort.

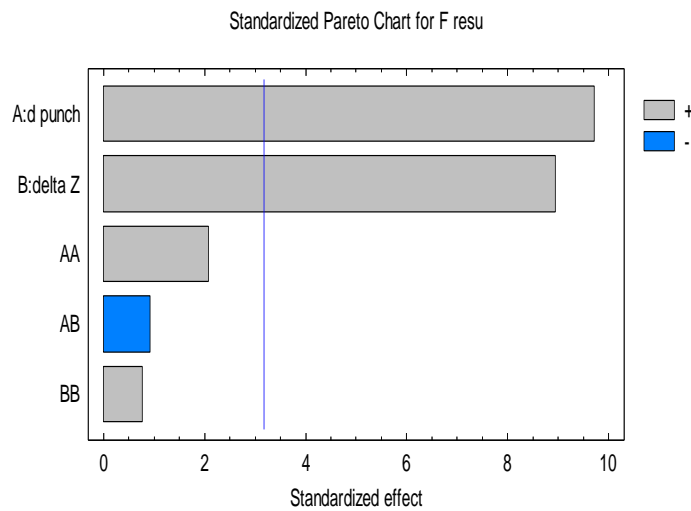


Figure III-19. PARETO de l'effet du diamètre (dp) et de l'incrément (Δz) sur l'effort (Fz)

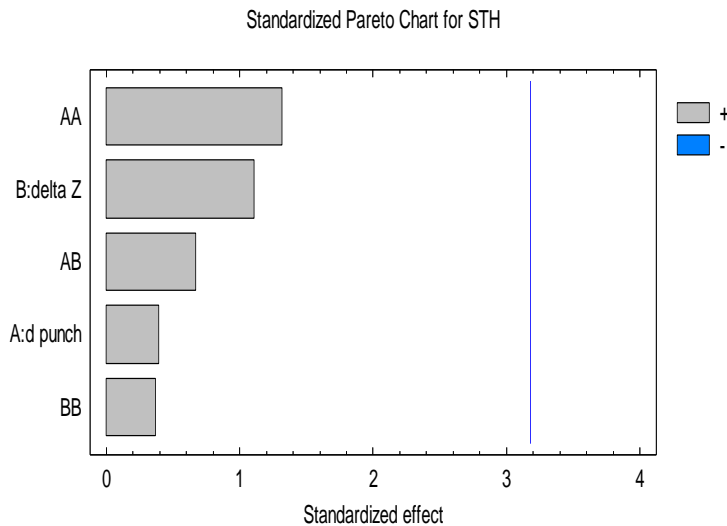


Figure III-20. PARETO de l'effet du diamètre (dp) et de l'incrément (Δz) sur l'épaisseur(t)

Finalement pour vérifier si les effets sont statistiquement significatifs, le tableau III-7 présente les effets de chaque facteur sur l'effort et l'épaisseur ainsi que leurs erreurs

associées. Dans ce modèle, les termes ont été évalués par une valeur de probabilité avec un niveau de confiance de 95%, si la valeur P du modèle est inférieure à 0,05, ce qui permet de prédire les réponses.

Tableau III-7. Effets des facteurs sur la force de formage et l'épaisseur

Paramètres	Effet sur la force		Effet sur l'épaisseur	
	Effet estimé	Erreur Standard	Effet estimé	Erreur Standard
Facteur	995,556	0,745356	0,162658	0,0363665
A: dp	170,0	0,816497	-0,012534	0,0398375
B: Δz	156,667	0,816497	-0,049272	0,0398375
AA	63,3333	1,41421	0,0463493	0,0690005
AB	-20,0	1,0	0,0398845	0,0487907
BB	23,3333	1,41421	0,0744913	0,0690005

Les facteurs du plan d'expérience sont considérés significatifs pour l'expérience lorsqu'ils vérifient le test de normalité par la droite de Henry [97]. La figure III-21 présente des distributions de probabilités normales où tous les points se trouvent autour de la ligne droite pour le cas de la force et l'épaisseur.

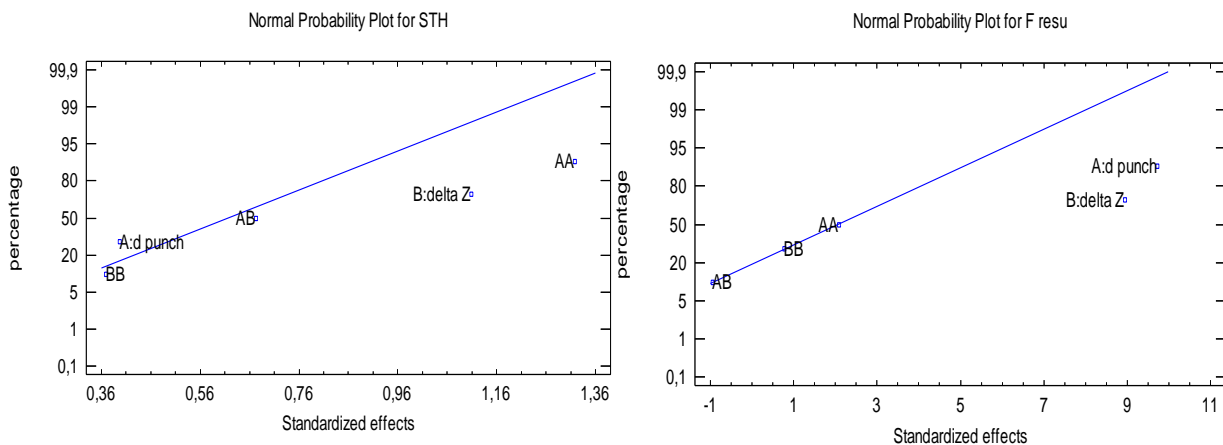


Figure III-21. Distributions de probabilités normales pour le cas de la force et l'épaisseur.

4.3. Choix des paramètres optimums

En conclusion les simulations numériques du procédé couplées à une technique basée sur des plans d'expérience et des surfaces de réponse ont montré que le diamètre du poinçon (d_p) et la taille de l'incrément vertical (Δz) ont un effet similaire sur la force de formage mais que la valeur de l'incrément vertical (Δz) a un effet plus important que le diamètre du poinçon (d_p) sur l'épaisseur. Suite à ces travaux d'optimisation par la méthode de surface de réponses, les paramètres optimums du formage incrémental à froid de tôle en alliage de titane Ti-6Al-4V permettant de minimiser l'effort maximal de formage et de maximiser l'épaisseur minimale pour le cône tronqués sont donnés dans le tableau III-8. Les valeurs optimales sont 10 mm pour le diamètre du poinçon et 0,5mm pour l'incrément de déplacement axial, ce qui correspond aux valeurs minimales de la plage d'étude pour ces deux paramètres. Ces résultats trouvés par la simulation sont similaires à ceux obtenus expérimentalement dans le chapitre II (valeur minimale pour le diamètre et l'incrément axial) et s'alignent avec les résultats des travaux publiés par les autres auteurs [98,70, 76].

Comme on a pu le voir dans le chapitre II, les efforts de formage sont particulièrement importants dans le cas du titane. Pour des angles de courbure importants, de l'endommagement apparaît et la tôle se déchire. A température ambiante, ce procédé ne permet pas de réaliser le formage de géométries complexes en titane ayant des angles de courbure ou des profondeurs importantes. Le titane étant un matériau très utilisé dans le secteur biomédical pour les prothèses et les implants et le procédé de formage incrémental étant un procédé très prometteur pour ce domaine, il est important de trouver des solutions pour diminuer la valeur des efforts engendrés lors du formage. Une solution appropriée comme on a vu dans le chapitre II consiste à réaliser les essais à chaud. Comme pour le cas du formage incrémental à froid, il est important de pouvoir simuler le procédé de formage incrémental à chaud afin de limiter le nombre d'essais expérimentaux de mise au point du procédé. Le paragraphe qui suit présente un état de l'art des méthodes proposées pour simuler le procédé de formage incrémental à chaud.

Tableau III-8.les paramètres optimums de formage retenus

Facteur	Niveau bas	Niveau sup	Valeur optimale
dp[mm]	10,0	15,0	10,0
Δz [mm]	0,5	1,0	0,5
t_{max} [mm]			0,273923
F_{res min} [N]			865,556

5. Conclusion

La modélisation du procédé du formage incrémental des tôles minces est développée dans un premier temps. Un modèle explicite est mis en place pour simuler le procédé de formage incrémental à froid et pour optimiser les facteurs affectants les résultats. On montre que le diamètre du poinçon et de l'incrément de déplacement axial, ont un impact sur l'effort axial et l'épaisseur. On vérifie aussi que le formage de cet alliage de titane TI-6AL-4V ayant une mauvaise ductilité s'avère délicat et on ne peut pas atteindre de grande profondeur lors du formage d'un cône tronqué, on ne dépasse pas 20 mm pour un angle de 45°.

Chapitre IV: Simulation numérique du formage incrémental à chaud du Ti-6Al-4V

1. Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à faire une comparaison entre les résultats de la campagne expérimentale et des prévisions de la simulation numérique en éléments finis du formage incrémental à chaud des tôles minces en alliage de titane Ti-6Al-4V. La comparaison est faite en utilisant les résultats des essais menés sur des tôles minces avec le nouveau dispositif d'essai de formage incrémental à chaud (WSPIF) basé sur le chauffage de la matrice par des cartouches chauffantes. Les pièces réalisées expérimentalement à chaud sont numérisées pour obtenir la distribution des épaisseurs ainsi que les profils des pièces. Le suivi des efforts de formage est réalisé par un capteur de force. Les résultats obtenus sont comparés aux prédictions du modèle élément finis. Le modèle éléments finis avec un couplage thermomécanique est utilisé pour réaliser le formage de l'alliage de titane Ti-6Al-4V.

Dans un premier temps on s'intéresse à la comparaison des résultats expérimentaux et numériques du formage incrémental à chaud de pièce tronconique en alliage de titane Ti-6Al-4V. Une étude des effets de l'angle de cône et de la profondeur de formage est proposée. Dans un deuxième temps, on s'intéresse au formage à chaud d'une prothèse de crâne humain en titane par approche d'ingénierie inverse. A partir du squelette d'un crâne on effectue sa numérisation 3D par un scanner laser. Le nuage des points est ensuite traité pour concevoir la géométrie concernée de la partie associée à la prothèse de ce crâne et la trajectoire de l'outil de forme qu'on souhaite réaliser par formage incrémental à chaud.

2. Revue sur les modélisations - simulations numériques du formage incrémental à chaud (WSPIF)

La modélisation et la simulation numérique du formage incrémental des tôles avec couplage thermomécanique est plus délicate et une attention particulière pour le choix du modèle de comportement du matériau à chaud est cruciale. De plus les grandes déformations élastoplastiques du flan lors du formage et les fortes distorsions des maillages qui peuvent conduire à une perte de la précision du calcul et même l'arrêt de la simulation numérique compliquent les simulations du formage à chaud. Différentes

modélisations sont proposées dans la littérature pour simuler en grandes déformations le formage incrémental à chaud.

2.1. Modélisation de Honarpisheh

M. Honarpisheh et al [12], ont publié en 2016 un travail sur le formage incrémental à chaud d'un alliage de titane Ti-6Al-4V. Le travail porte sur la prédiction numérique des forces de formage et de la distribution de des épaisseurs des pièces tronconiques ($D_0 = 60$ mm ; $H = 20$ mm et un angle de cône φ variable). Dans cette étude, un modèle EF explicite avec un couplage déplacement-température est développé sur ABAQUS. Le flan est modélisé comme un solide déformable 3D et maillé avec des éléments de volume hexaédriques avec intégration réduite à huit nœuds (C3D8RT). Le poinçon est modélisé par une surface rigide analytique indéformable. La loi thermo-élasto-viscoplastique de comportement du titane à chaud est modélisée par le modèle de Johnson-Cook. La tôle est soumise à un chauffage sous forme d'un flux de température d'amplitude fixé à $T = 400^\circ\text{C}$. Le flan est fixé sur ses bords et le mouvement poinçon est généré selon une trajectoire en spirale comme l'illustre la figure IV-1.

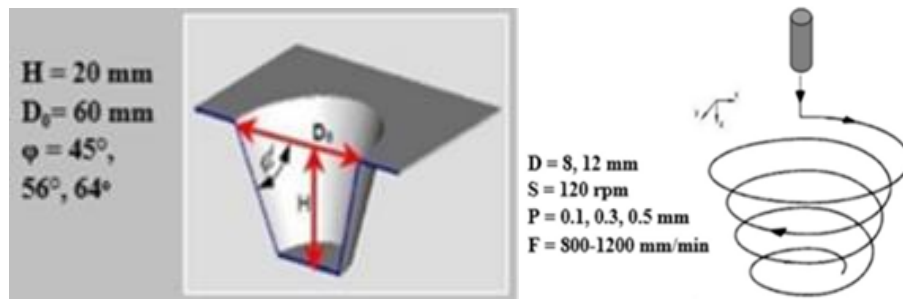


Figure IV-1. Forme de la pièce et trajectoire en spirale de l'outil [12]

Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure VI-2, où on peut noter l'augmentation de la température due à la friction outil-flan. Il permet aussi de prédire l'évolution de l'effort axial de formage. Bien que les allures des efforts prédits et des essais expérimentaux ne soient pas similaires sur la partie élastique du formage, elles fournissent toutes les deux des efforts maximums proches. Les distributions de l'épaisseur prédit selon une coupe radiale montre sont en bonne conformité avec celles des valeurs expérimentaux

(amincissement important au niveau de la base du pièce tronconique). L'étude a montré aussi que les forces de formage sont proportionnelles à l'incrément axial du poinçon (P), à l'angle d'inclinaison du cône (φ) et au diamètre du poinçon (D). Ils montrent que le chauffage permet de diminuer les forces de formage par rapport au formage classique à froid.

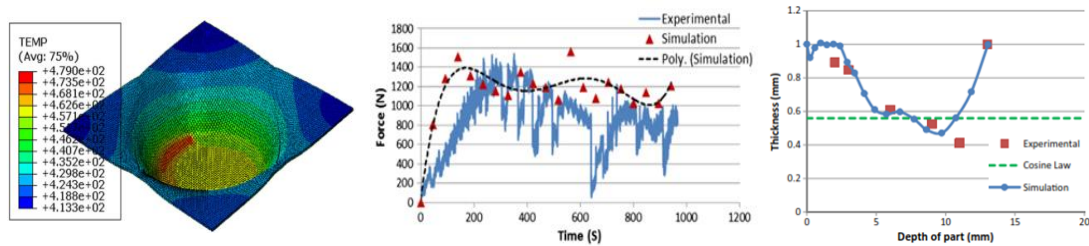


Figure IV-2. Distribution de la température et de l'effort de formage [12]

2.2. Modélisation de Amirahmad

M. Amirahmad et al. [23] a étudié numériquement et expérimentalement le formage incrémental à chaud d'un cône tronqué en alliage d'aluminium AA5182-O. La simulation numérique est faite sur ABAQUS et le flan est modélisé avec des éléments volumique de transfert thermique avec 8 nœuds avec intégration réduite (DC3D8). Le poinçon ainsi que le serre-flan sont modélisés par des surfaces analytiques rigides, le frottement entre le poinçon et la tôle est matérialisé par la loi de Coulomb avec un coefficient ($\mu=0,05$). La fixation du flan est simulée par encastremements le long des nœuds du bord du flan. Le comportement du matériau est modélisé par la loi élastoplastiques de Swift. Les propriétés thermomécaniques du matériau pour différentes températures sont implémentées dans le modèle proposé. Le chauffage Laser et son effet thermique sur la tôle est modélisé par un modèle de transfert de chaleur par convection. Le profil de trajectoire du faisceau laser est simulé sous la forme d'un flux thermique superficiel appliqué sur les éléments correspondants et qui change sa position par petits incréments de temps constants définis par la vitesse de balayage laser (Figure IV-3). La zone chauffée a comme taille environ trois fois la longueur de la zone de contact ce qui permet une légère erreur entre la trajectoire de l'outil et le balayage du rayon laser tout en assurant que la zone de contact est positionnée à l'intérieur de cette zone chauffée. La modélisation thermique a permis de prédire la température de formage incrémental et d'obtenir des résultats numériques en conformité avec les résultats expérimentaux.

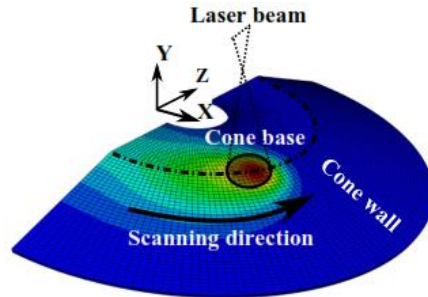


Figure IV-3. Modèle EF du SPIF avec chauffage focalisé laser [23]

2.3. Modélisation de Sbayti

M. Sbayti et al [95], présentent un travail qui vise à montrer la faisabilité du formage incrémental à chaud d'une prothèse de hanche. L'effet des paramètres du procédé, à savoir la température de formage et le diamètre du poinçon ainsi que l'incrément axial sur la formabilité et l'endommagement de la pièce obtenue sont étudiés. Les simulations numériques sont faites sur le code ABAQUS. Un modèle de comportement thermo-viscoplastique couplé en température-déplacement de type Johnson-Cook est utilisé. Le flan est maillé avec des éléments volumiques thermiques C3D8RT avec 8 nœuds à intégration réduite. Le poinçon est modélisé comme un solide déformable maillé à l'aide d'éléments tétraèdres à quatre nœuds (C3D4T) couplés thermiquement. Le parcours du poinçon est généré par un logiciel de FAO avec un incrément axial ($\Delta z = 0.2\text{mm}$). Les simulations sont réalisées tout en variant le diamètre du poinçon ($d_p = 6, 8$ et 10mm) et la température de chauffage ($T = 20, 400$ et 600°C). Les résultats obtenus montrent que la valeur minimum des épaisseurs atteinte augmente en fonction de la température. La conformité du profil est améliorée lorsque la température augmente : profil correct, pas de dommage, pas de défaut, lorsque les paramètres du procédé (diamètre de l'outil d_p , pas Δz , profondeur h , angle de cône α et sont optimisés et température T) sont optimisés.

2.4. Modélisation de Moayedfar

M. Moayedfar et al [99], présentent une modélisation du procédé du formage incrémental intégrant le chauffage pour prédire la rupture précoce de la tôle lors de son formage. Ils utilisent une solution basée sur les plans d'expérience avec la méthode de surface de réponse pour extraire un ensemble de données d'expériences pour la simulation. Les résultats sont ensuite insérés dans un réseau de neurones artificiels comme paramètres d'entrée pour prédire une vaste gamme de paramètres applicables pour éviter la rupture précoce de la tôle.

3. Simulation du formage incrémental à chaud de pièce tronconique

3.1. Introduction

Les modèles couplés en déplacement-température avec un maillage fin du flan composé d'éléments volumique peut entraîner des temps de calcul très important [12, 99] La modélisation du système de serrage de la tôle par le serre-flan (pression ou encastrement) peut avoir un impact sur les résultats de la simulation [12, 23, 99]. Tous les auteurs utilisent des lois de comportement qui prennent en compte la température et le modèle Johnson-Cook est souvent utilisé. Le poinçon matérialisé par M. Sbayti [95] par un solide déformable complique les simulations et son effet reste faible sur les déformations du flan. Dans la suite, nous mettrons en place un modèle de formage incrémental à chaud pour étudier le comportement de l'alliage de titane Ti-6Al-4V. Le flan sera maillé avec des éléments coque avec des partitions de maillage différent. On adopte le modèle de thermo-élasto-viscoplastique Johnson Cook implémenté dans ABAQUS pour simuler la déformation à chaud de l'alliage de titane Ti-6Al-4V. Le poinçon sera considéré comme un corps rigide analytique et le frottement entre le poinçon et le flan est modélisé par la loi de Coulomb.

Dans cette partie on se propose de mettre en place un modèle éléments finis sur le code Abaqus pour simuler le procédé du formage incrémental à chaud. La fiabilité et la précision des résultats du modèle à haute température dépend à la fois de la description des lois et des paramètres du comportement mécanique et thermique du matériau. L'objectif est de simuler numériquement le procédé de formage incrémental à chaud de pièce tronconique et de comparer aux résultats expérimentaux présentés dans le chapitre II.

3.2. Modélisation et maillage en élément finis

Compte tenu des conclusions sur la recherche bibliographique présenté ci-dessus, le modèle retenu est du type dynamique explicite avec couplage thermomécanique utilisant des éléments finis de coque à 4 nœuds avec intégration réduite pour mailler le flan de dimension de 210 x 210 mm². Le poinçon est modélisé par une surface analytique rigide indéformable. Le serre-flan est modélisé par un encastrement sur les bords du flan comme le montre la figure IV-4. Le maillage du flan est divisé en trois parties comme le montre les figures ci-dessous :

- Une première partition avec un maillage grossier qui représente la partie en contact avec le serre-flan, elle est considérée comme fixe.
- La deuxième partie qui représente la partition du flan, de forme circulaire de diamètre 140 mm. C'est la zone de travail entre en contact avec le poinçon. Elle est maillée avec des éléments de taille 3mm x 3mm.
- La troisième partie qui est finement maillée. C'est le fond de la pièce conique représenté par un cercle de diamètre 20 mm.

Le flan est composé de 4482 éléments et 4560 nœuds. Le temps moyen de calcul avec un processeur (Intel i7) est de l'ordre de 3heures et 30mn.

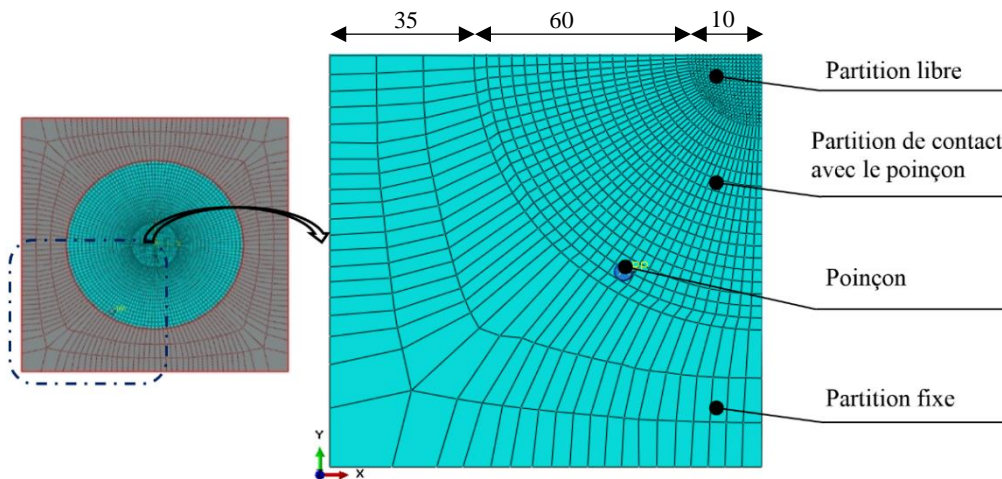


Figure IV-4. Modèle en EF du formage incrémental à chaud

3.3. Loi de comportement du matériau Ti-6Al-4V

Le matériau objet d'étude est l'alliage de titane Ti-6Al-4V dont la composition chimique est fournie dans le tableau IV-1. Pour la simulation du formage incrémental à chaud, la loi de comportement définie par le modèle de Johnson-Cook [100, 101] reliant les contraintes aux déformations plastiques, aux vitesses de déformation et la température :

$$\sigma_y = \left(A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (IV-1)$$

Où (σ_y) est la limite d'élasticité, ($\bar{\epsilon}$) est la déformation plastique équivalente, ($\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$) est le taux de déformation plastique équivalente, ($\dot{\bar{\epsilon}}_0$) le taux de déformation plastique

équivalente de référence, (**T**) est la température ambiante, et (**T_m**) est la température de fusion (**T_r**) est la température de fusion, respectivement. **A**, **B**, **C**, **m** et **n** sont les constantes constitutives du modèle de Johnson-Cook. Plusieurs travaux ont été développés sur le comportement de cet alliage à haute température[94, 102, 103, 104, 105, 106]. Les propriétés mécaniques, thermiques [12, 107] et les paramètres de Johnson-Cook [100, 101], sont énumérés respectivement dans les tableaux IV-2 à IV-4.

Tableau IV-1.Composition chimique de l’alliage de Titane Ti-6Al-4V

Composition chimique du Ti-6Al-4V en [%] (AC = Autres Chacun, AT = Autres Total)									
C	Fe	H	N	O	Al	V	AC	AT	Ti
< 0,08	< 0,3	< 0,0125	< 0.05	< 0,2	5,5 - 6,75	3,5 - 4.5	< 0.1	< 0.4	Bal

Tableau IV-2. Propriétés mécaniques de l’alliage de titane Ti-6Al-4V[107]

T [°C]	E (MPa) [MPa]	ν	ρ [kg/m³]
21,11	117210	0,31	4430
204,44	106870	0,31	4430
426,67	95150	0,31	4430
648,89	82720	0,31	4430

Tableau IV-3.Les propriétés thermiques de l’alliage de titane Ti-6Al-4V[107]

T (°C)	Conductivité α [W/m/°C]	Coefficient Expansion λ [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{°C}$]	Chaleur spécifique Cp [J/Kg/°C]
17,78	6,92	1,13	387,56
93,34	7,44	1,13	406,93
204,44	8,65	1,13	426,31
426,67	11,94	1,13	474,76
537,78	13,67	1,13	517,39
958,22	18	1,13	697,61

Tableau IV-4. Les paramètres de la loi Johnson-Cook de l'alliage de titane Ti-6Al-4V [100]

A [MPa]	B [MPa]	C	m	n	$\dot{\epsilon}_0 [s^{-1}]$	$T_m [^{\circ}C]$	$T_r [^{\circ}C]$
968	380	0,0197	0,577	0,421	1	1655	25

3.4. Conditions aux limites et trajectoire du poinçon

Plusieurs travaux [20, 64, 63] ont montré qu'un glissement de la tôle pourrait avoir lieu entre la matrice et le serre-flan. J. Belchior [10] a calculé la pression à appliquer par le serre-flan pour éviter ce glissement. Lors de la conception du dispositif de formage incrémental à chaud on vient de tenir compte de ce glissement. Notre solution consiste à augmenter la surface de contact entre la tôle et la matrice et d'assurer un bon serrage à l'aide de 4 vis de diamètre 22mm pour un couple appliqué sur chaque vis de 20Nm. La surface de serrage sur la matrice est présentée par la figure IV-5.

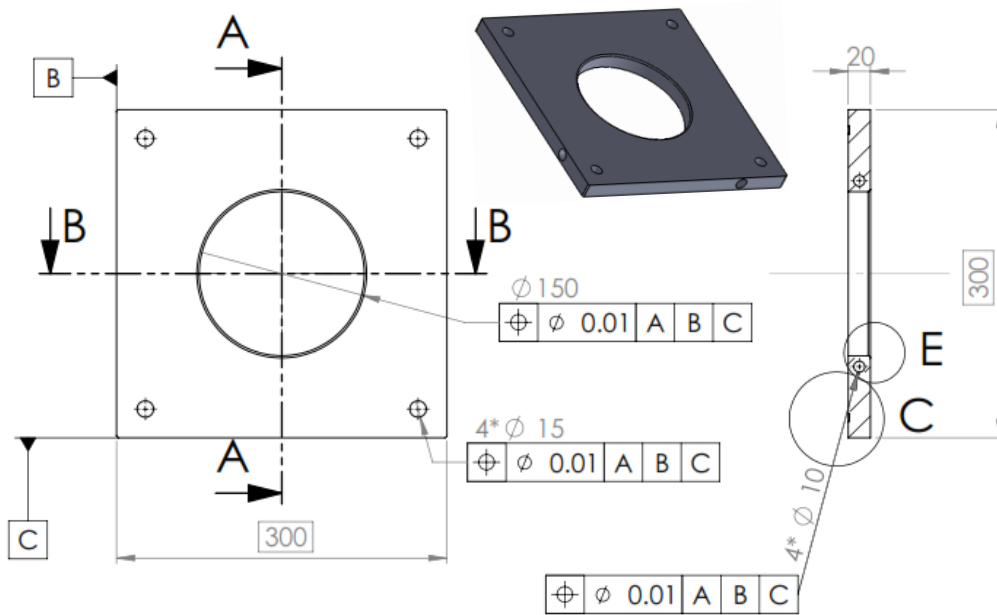


Figure IV-5. Dessin de définition de la matrice

Cette surface est donnée par l'expression suivante.

$$S_{SF} = (300)^2 - \pi \cdot 75^2 = 72328 \text{mm}^2 \quad (\text{IV-2})$$

Pour une valeur de la pression de $P_{SF}=4,3\text{MPa}$ [10] on trouve :

$$F_{SF} = P_{SF} \times S_{SF} = 311012N \quad (IV-3)$$

Cette force est très importante pour bloquer le flan, compte tenu de ce résultat, la matrice et la serre flan ne seront pas pris en compte dans notre étude et les surfaces sous flan avec ces deux outils sera complètement un encastrement. Il est vérifié expérimentalement et numériquement que le poinçon intervient par sa forme, sa trajectoire et son incrément axial (ΔZ). Le frottement entre le poinçon et le flan est défini par un modèle simple de Coulomb.

Pour la génération de la trajectoire de l'outil on utilise le logiciel de CFAO Catia V5. Cette trajectoire est définie sous forme de trois amplitudes selon les trois axes (X, Y, Z). A partir du modèle de la pièce de référence, on génère la trajectoire avec les conditions du formage : vitesse de rotation (N), vitesse d'avance (V_f), incrément axial (ΔZ) et diamètre du poinçon (dp).

3.5. Résultats des simulations numériques de la pièce tronconique

Suite aux résultats de la campagne expérimentale et aux résultats d'optimisation numérique du formage à froid, les simulations sont effectuées sous les conditions suivantes données par la figure IV-6 et le tableau IV-5.

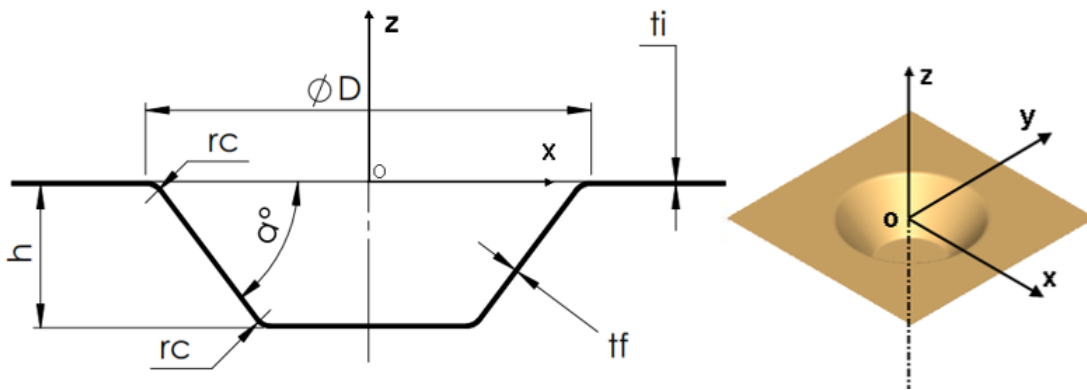


Figure IV-6. Géométrie de la pièce tronconique

Tableau IV-5. Les conditions de la simulation numérique du formage incrémental ($\alpha=50^\circ$)

ti [mm]	rc [mm]	h [mm]	dp [mm]	ΔZ [mm]	$\varnothing D$ [mm]	N [trs/mn]	Vf [mm/mn]	T [°C]	α [°]
0,5	5	40	5	0,5	130	50	600	450	50°

Les paramètres de comparaison sont la distribution de l'épaisseur, le profil de la pièce et l'effort axial de formage. L'élévation de la température due au chauffage de la tôle associée à celui du frottement de la friction du poinçon est aussi discutée. Le profil final et la distribution d'épaisseur sont illustrés sur la figure IV-7.

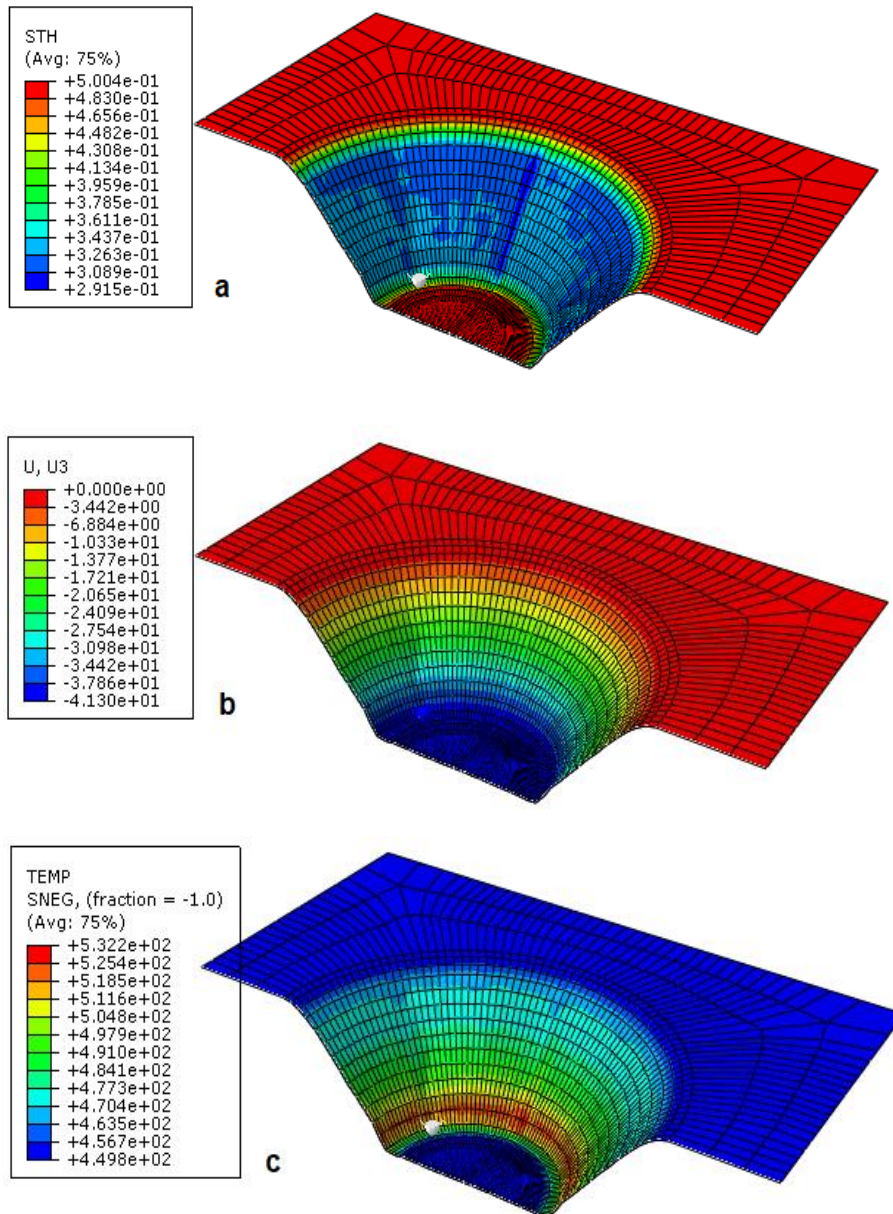


Figure IV-7.Simulation numérique de la pièce tronconique

(a) Distribution d'épaisseur ; (b) Profil de la pièce ; (c) Répartition de la température

Pour la simulation de la pièce conique ($\alpha=50^\circ$), on trace les distributions des épaisseurs (t) et des profils (U) selon les quatre plans (Plan1 ; Plan2 ; Plan3 ; Plan4) comme le montre la figure IV-8 suivante :

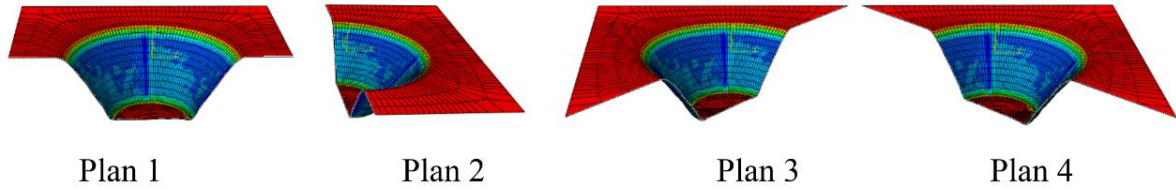


Figure IV-8. Les plans de coupe de la pièce conique d'angle ($\alpha = 50^\circ$)

La distribution des épaisseurs prédites selon les quatre plans (t_{plan1} , t_{plan2} , t_{plan3} , t_{plan4}) est représentée sur le même graphique pour étudier l'erreur entre les différentes courbes. La figure IV-9, montre que cette erreur est très faible tout au long de la distribution et donne des épaisseurs minimums très similaires. Ces résultats prouvent la symétrie du comportement et de déformation de la tôle.

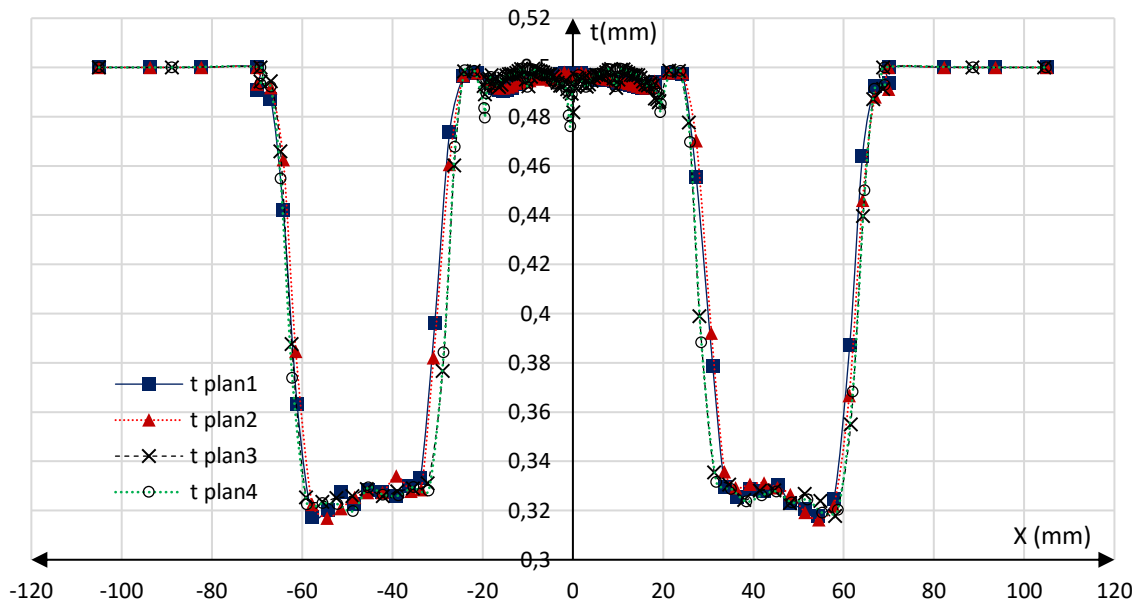


Figure IV-9. Epaisseurs prédites de la pièce tronconique sur les quatre plans ($\alpha=50^\circ$)

Les profils de la pièce tronconique prédits selon les quatre plans de coupe sont reportés sur le même graphique (figure IV-10). La comparaison des profils par rapport au profil (U_{plan1}) du plan (plan1) montre que les erreurs restent toujours faibles et elles ne dépassent pas les 3%.

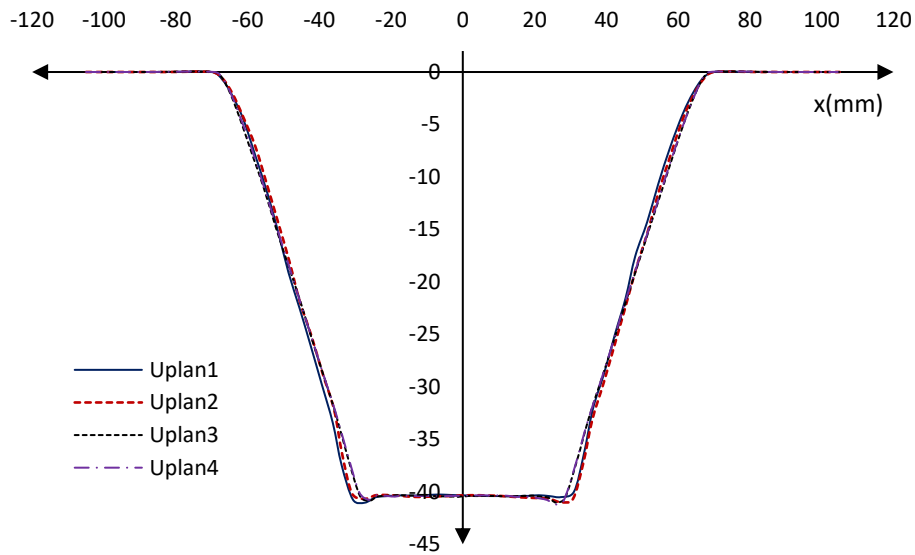


Figure IV-10. Les profils prédits de la pièce tronconique selon les quatre plans ($\alpha=50^\circ$)

Le modèle EF à chaud utilisé est capable de prédire le comportement à chaud des tôles en alliage de Titane Ti-6Al-4V lors du procédé du formage incrémental. La simulation montre que la formabilité des alliages de titane est améliorée pour une température supérieure à 400°C . Pour une plage de température 450°C on obtient des pièces en conformité dimensionnelle avec le profil souhaité. Le modèle tient en compte du chauffage provoqué par le frottement du poinçon lors de son contact avec le flan (une augmentation de 80°C est observée). Les résultats de la simulation montrent qu'une fraction de la chaleur par friction est conduite au flan est localisée autour de la zone affectée. La température dans cette zone augmente en fonction de l'augmentation de l'angle de la pièce simulée.

4. Etude de l'effet de l'angle de la pièce tronconique

Les essais expérimentaux sur le dispositif du SPIF à chaud utilisant des cartouches chauffantes ainsi que la simulation numérique en EF du formage incrémental à un point à chaud des tôles minces en alliage de titane Ti-6Al-4V sont réalisés pour la même pièce de référence moyennant une variation de l'angle (α) comme le montre le tableau IV-6.

Tableau IV-6. Conditions du formage incrémental avec angle (α) variable

ti [mm]	rc [mm]	h [mm]	dp [mm]	ΔZ [mm]	$\varnothing D$ [mm]	N [trs/mn]	Vf [mm/mn]	T [°C]	α [°]
0,5	5	40	5	0,5	130	50	600	450	Variable

4.1. Évolution de la température en fonction de l'angle

La modélisation du procédé du formage incrémental à chaud doit tenir compte de l'introduction du chauffage de la tôle ainsi que le chauffage du au frottement du poinçon. La modélisation du contact entre la tôle et le poinçon, est définie par un modèle de friction de type Coulomb. La fraction d'énergie dissipée causée par le frottement est convertie en chaleur. La figure IV-11 illustre les élévations de la température issue du frottement au niveau de la zone de contact poinçon-flan pour différents angles de cône. Comme il a été discuté précédemment cette quantité de chaleur est fonction de la pression du poinçon. Cette augmentation s'explique par l'augmentation de cette pression qui croix lorsque l'angle de la pièce augmente. Ce résultat confirme les résultats des travaux de de M.Sbayti [95], M. Amirahmed [23] et de E.H.Uheida [76]. Le tableau IV-7, présente les comparaisons des pièces produites par le dispositif expérimental et les pièces simulées.

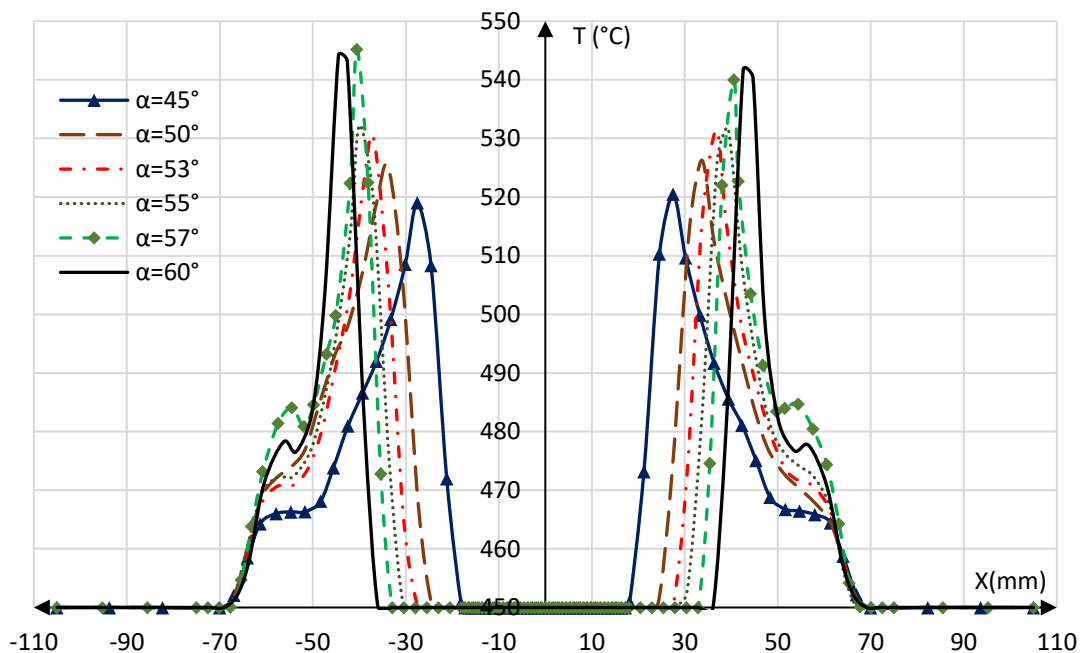
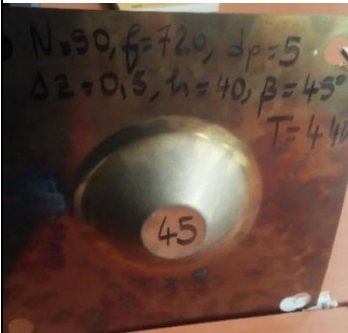
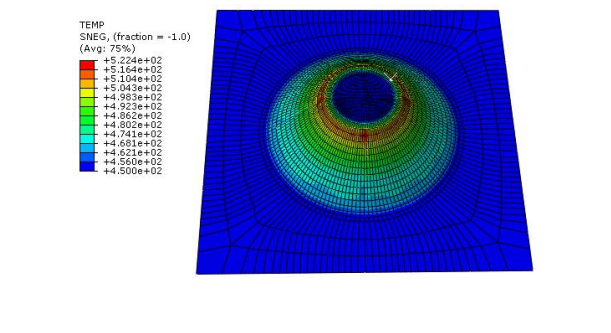

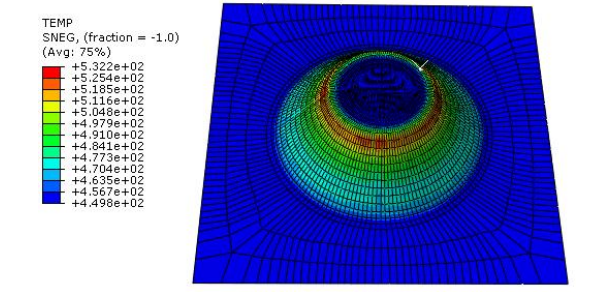

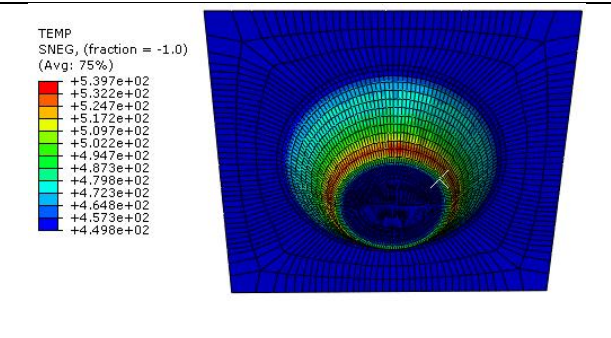
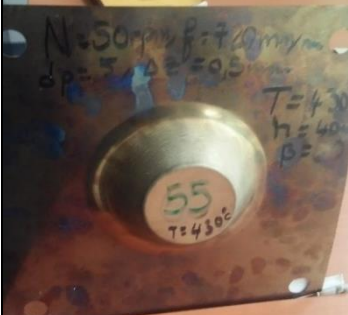
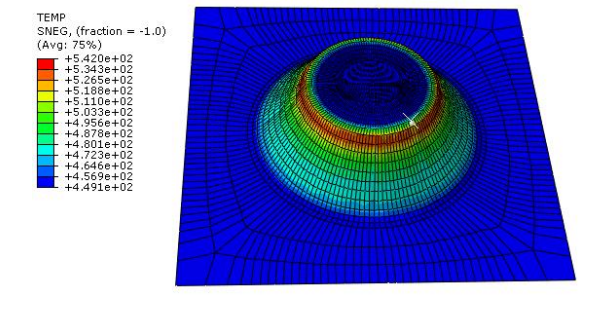

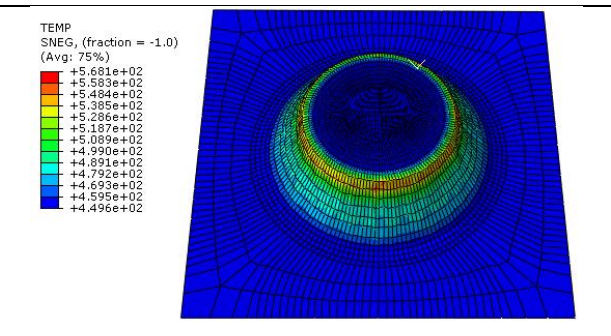


Figure IV-11. Effet de l'angle de la pièce tronconique sur l'élévation de la température

Tableau IV-7. Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation pour différents angles

α	Expérimentation	Simulation numérique
45°		
50°		
53°		
55°		
57°		

4.2. Analyse des distributions des épaisseurs

Les résultats des essais du formage incrémental à chaud $T = 450^{\circ}\text{C}$ de l'alliage de titane Ti-6Al-4V, pour des pièces coniques sont présentés en variant l'angle d'inclinaison (α) de la pièce sur les figures de IV-12 à IV-16. On constate que pour chaque angle ($\alpha = 45^{\circ}$, 50° , 53° , 55° et 57°) les résultats montrent une nette amélioration au niveau de la prédiction des épaisseurs minimales atteintes en comparaison avec les travaux publiés de M. Honarpisheh et al [12]. Les comparaisons sont effectuées au niveau de trois zones. Une partie relative à la zone 1 de fixation entre le serre-flan et la matrice où l'épaisseur reste invariable et il n'y a pas d'amincissement de la tôle. La zone 2 c'est la zone affectée par le formage incrémental elle est relative à la partie oblique de la pièce conique où l'épaisseur chute jusqu'à une valeur minimale puis elle remonte pour avoir la valeur initiale de l'épaisseur. C'est dans cette zone que s'enclenche la rupture de la tôle lorsque la contrainte dépasse la limite plastique de la tôle. La troisième zone 3 représente le fond de la pièce qui n'est pas effectué par le formage, même ce fond ne rentre pas souvent en contact avec le poinçon, l'épaisseur est constante et garde sa valeur initiale. Les figures de IV-12 à IV-16 illustrent les évolutions des épaisseurs expérimentales et du modèle EF pour ($\alpha = 45^{\circ}$, 50° , 53° , 55° et 57°).

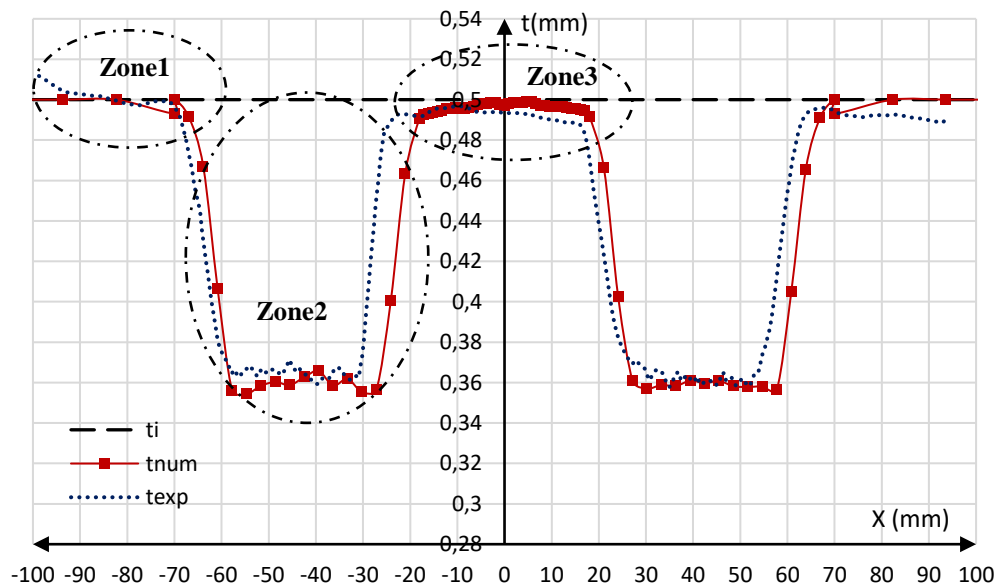


Figure IV-12. Distributions des épaisseurs expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=45^{\circ}$)

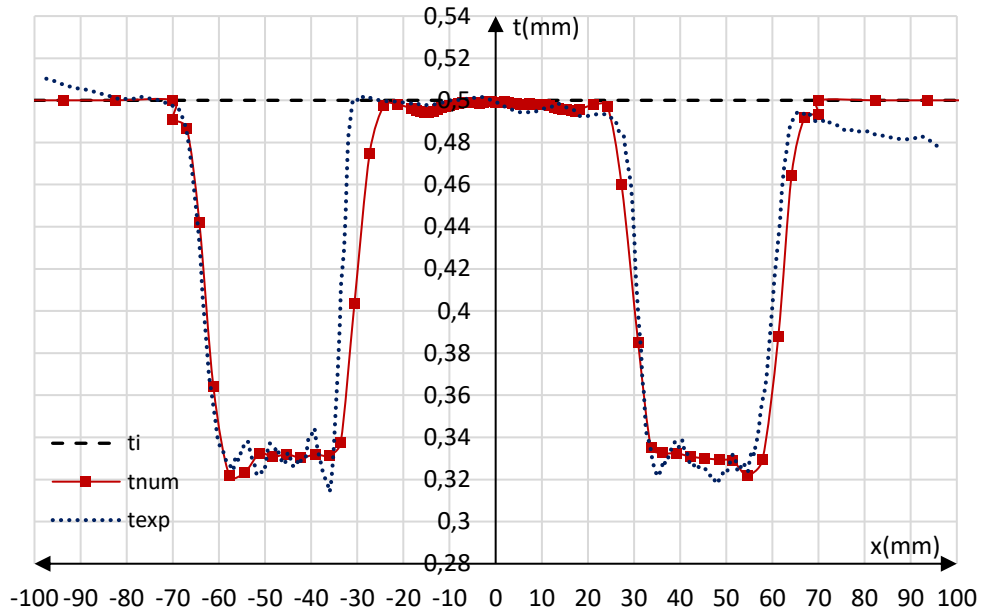


Figure IV-13. Distributions des épaisseurs expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$)

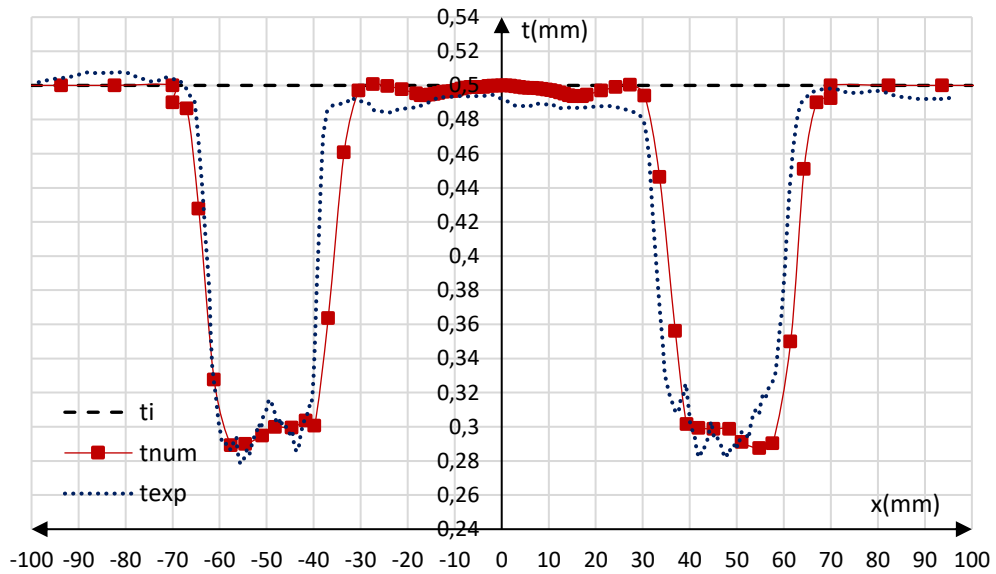


Figure IV-14. Distributions des épaisseurs expérimentale et numérique : ($h=40\text{ mm}$, $\alpha=53^\circ$)

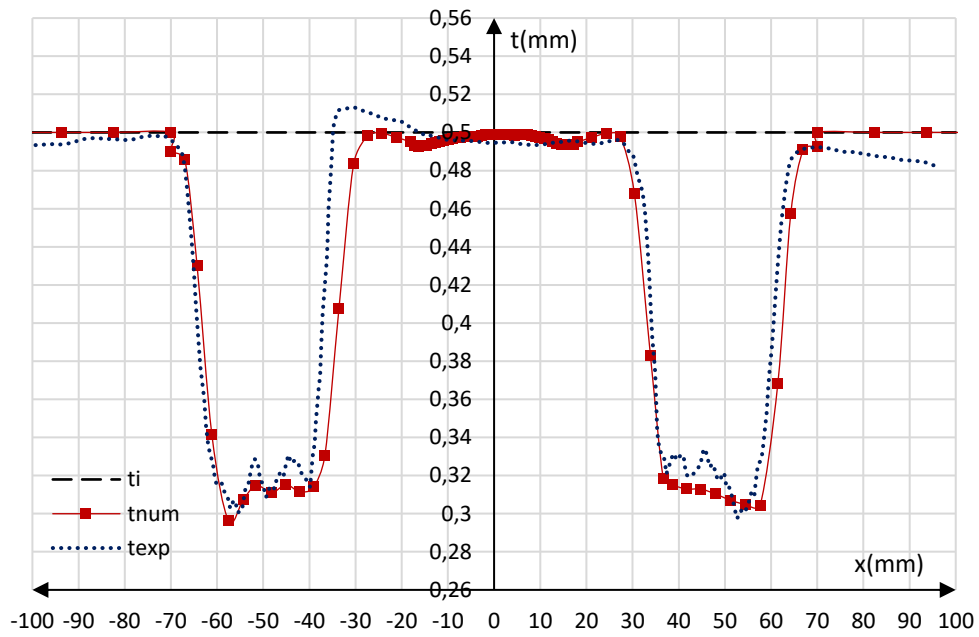


Figure IV-15. Distributions des épaisseurs expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=55^\circ$)

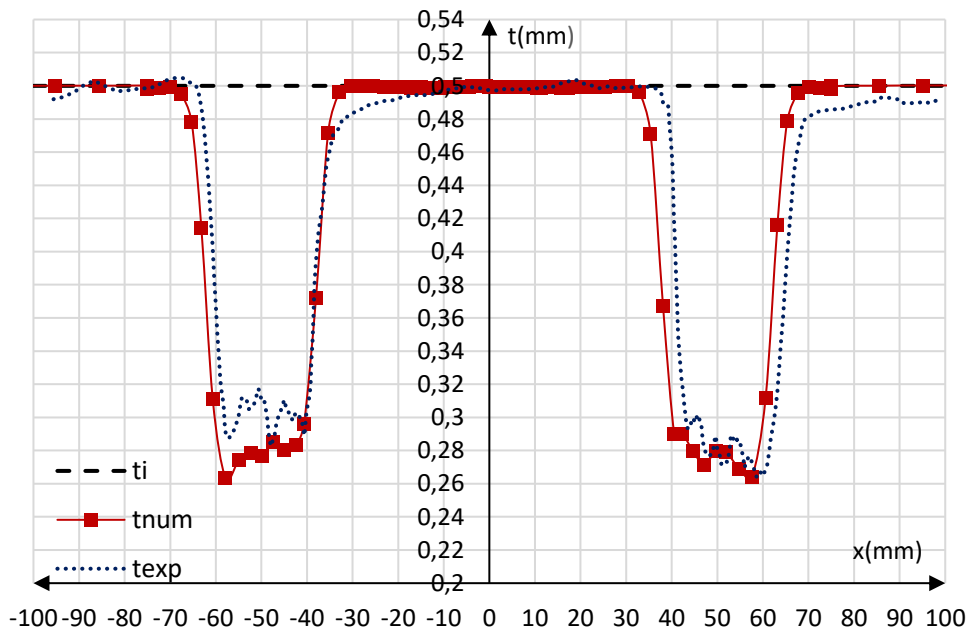


Figure IV-16. Distributions des épaisseurs expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=57^\circ$)

Les résultats numériques obtenus montrent que lorsque l'angle d'inclinaison du cône α augmente, l'épaisseur minimale mesurée dans la zone 2 diminue (très forte amincissement), jusqu'à atteindre une valeur critique ou il y a début de rupture (voir figure IV-17). Une bonne corrélation entre l'expérience et numérique est observée.

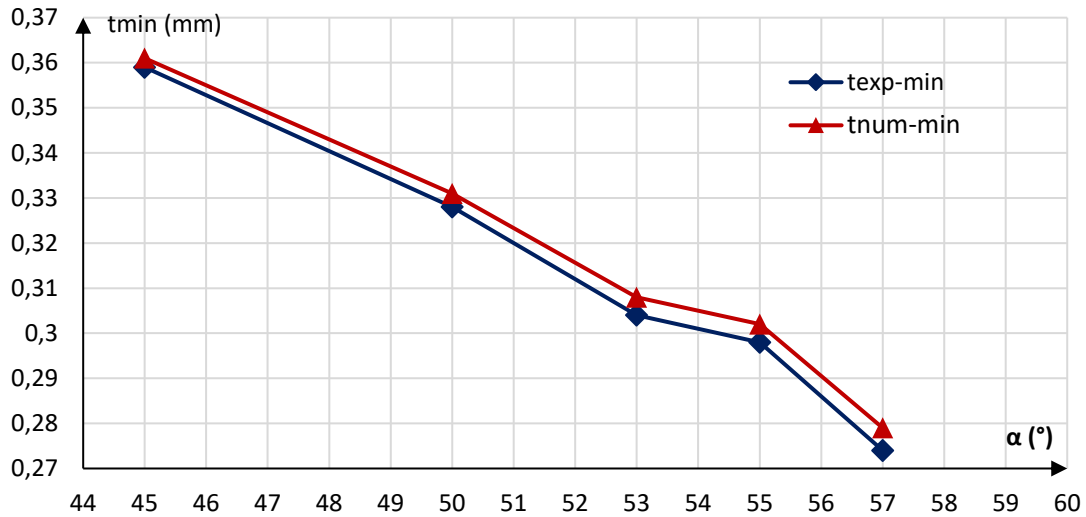


Figure IV-17. Évolution de t_{min} (expérimentale et numérique) en fonction de l'angle

Une comparaison présentée sous forme d'erreur relative entre l'épaisseur minimale mesurée (t_{exp}) et simulée (t_{num}) est donnée sur la figure IV-18. On note que l'erreur relative augmente en fonction de l'angle de cône mais elle reste faible et ne dépasse pas les 2%.

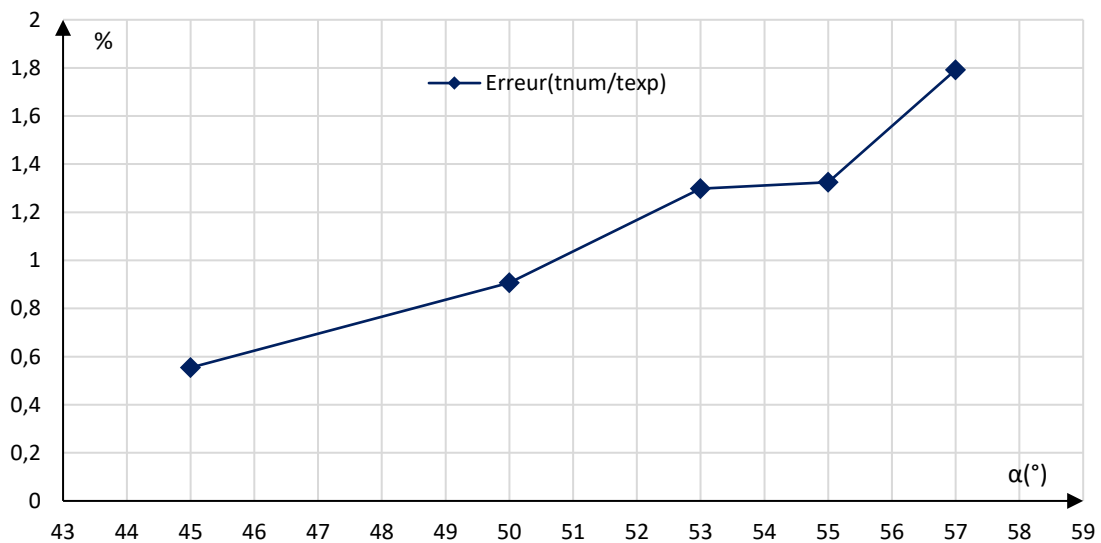


Figure IV-18. Erreur relative entre les épaisseurs minimales (t_{num}) et (t_{exp})

4.3. Analyse des profils des géométries des pièces tronconiques

Dans cette section, on analyse les résultats des déplacements axiaux des pièces formées à $T=450^{\circ}\text{C}$ pour différents angles ($\alpha=45^{\circ}, 50^{\circ}, 53^{\circ}, 55^{\circ}$ et 57°). On s'intéresse aux profils des pièces sur un seul plan de coupe (-X, X). Pour chaque angle le profil expérimental (U_{exp}) et le profil numérique (U_{num}) sont comparés par rapport à celui utilisé pour la programmation du formage sur la machine CNC (U_{theo}). Les résultats discutés sont illustrés par les figures IV-19 à IV-23. Le premier constat dégagé à travers ce résultat est la bonne prédiction de forme des pièces coniques obtenues par simulation EF à chaud. Lorsque l'angle de cône augmente on remarque quelques gauchissements de la partie oblique par rapport au profil théorique du au chauffage. Les profils prédits sont en conformité dimensionnelle avec les profils expérimentaux et l'erreur relative est de l'ordre de 10 % surtout au niveau des congés. La conformité dimensionnelle est vérifiée par l'erreur relative entre le profil théorique, expérimental et numérique. Principalement ces erreurs sont rencontrées sur les congés de la pièce déformée.

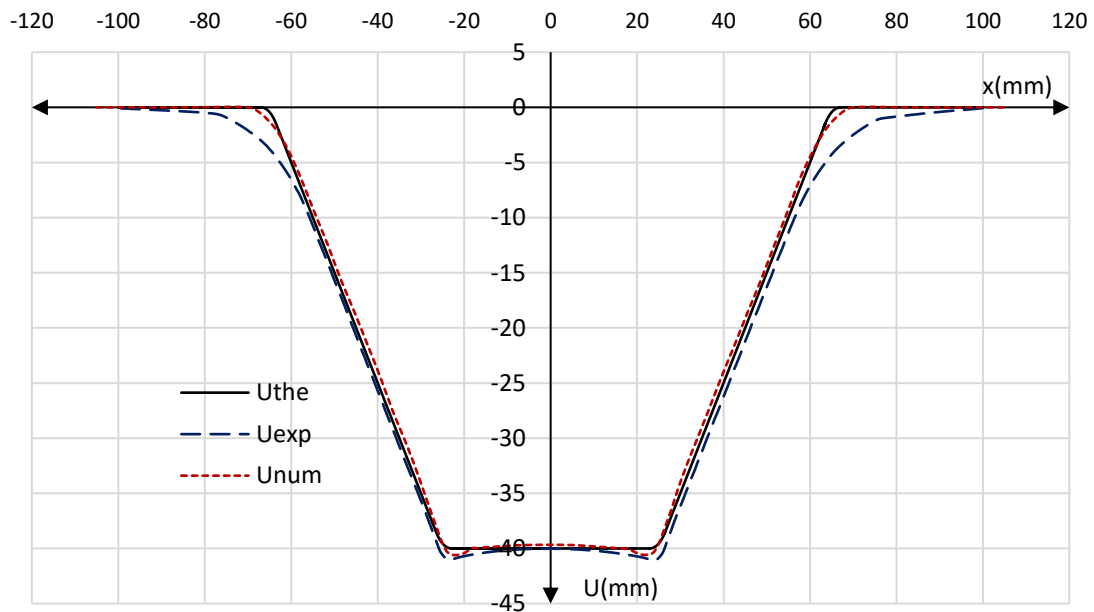


Figure IV-19. Profils des formes théorique, expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=45^{\circ}$)

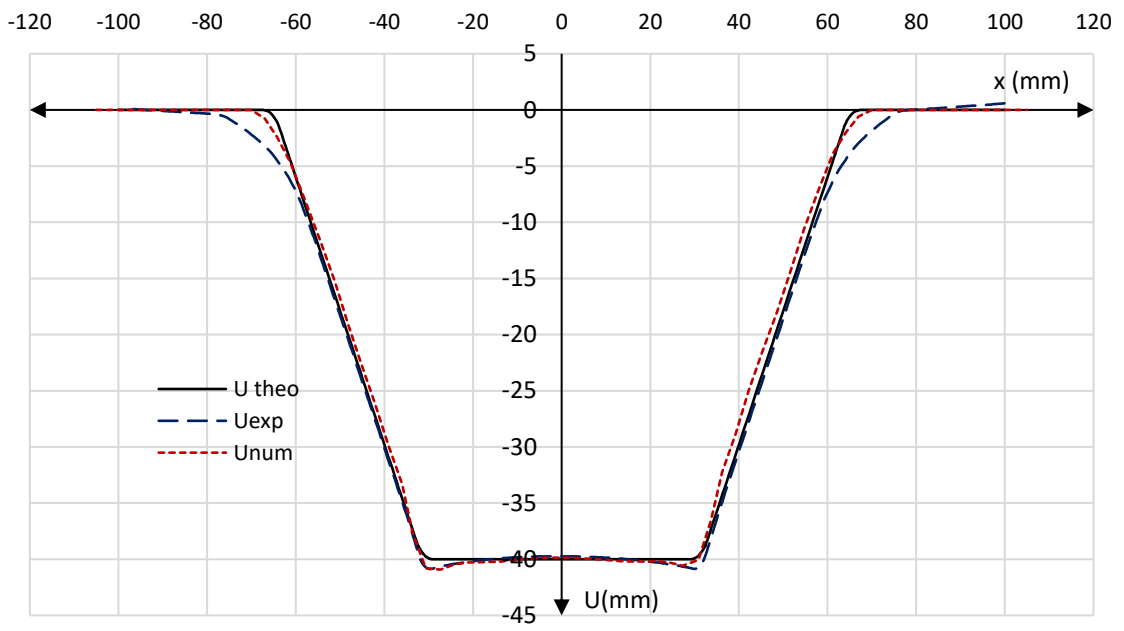


Figure IV-20. Profils des formes théorique, expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$)

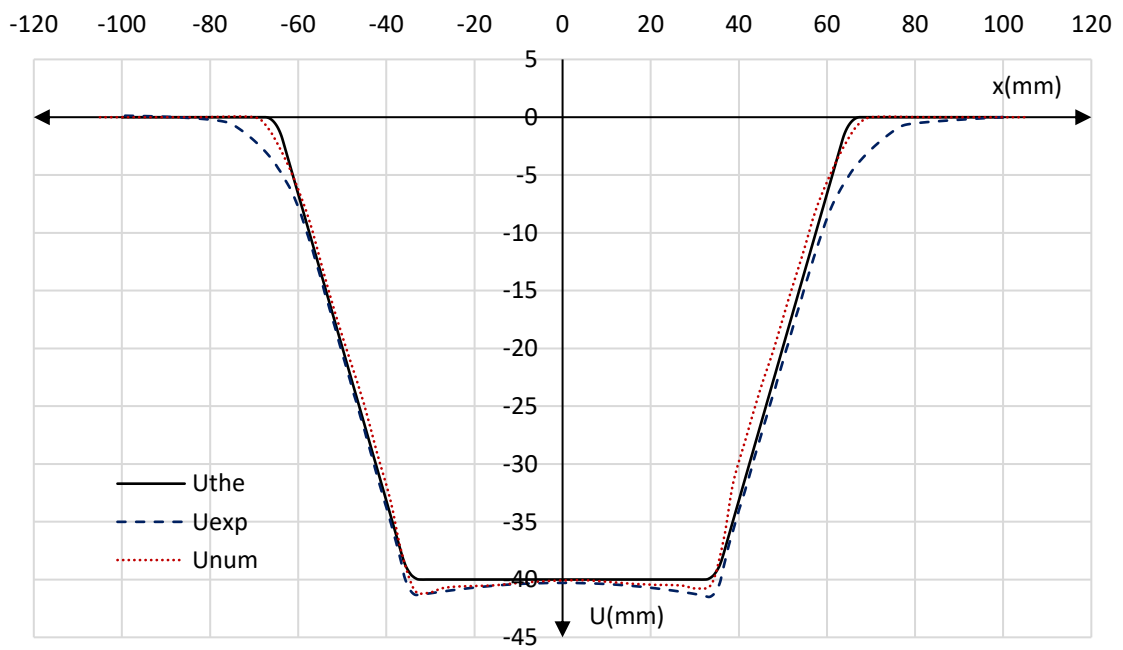


Figure IV-21. Profils des formes théorique, expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=53^\circ$)

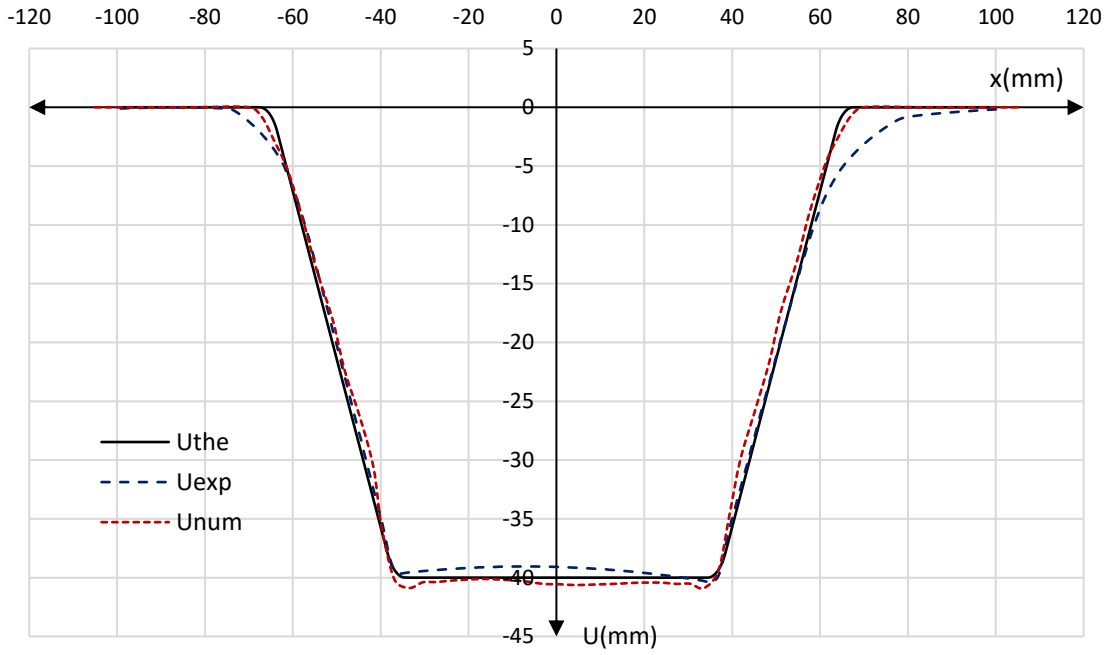


Figure IV-22. Profils des formes théorique, expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=55^\circ$)

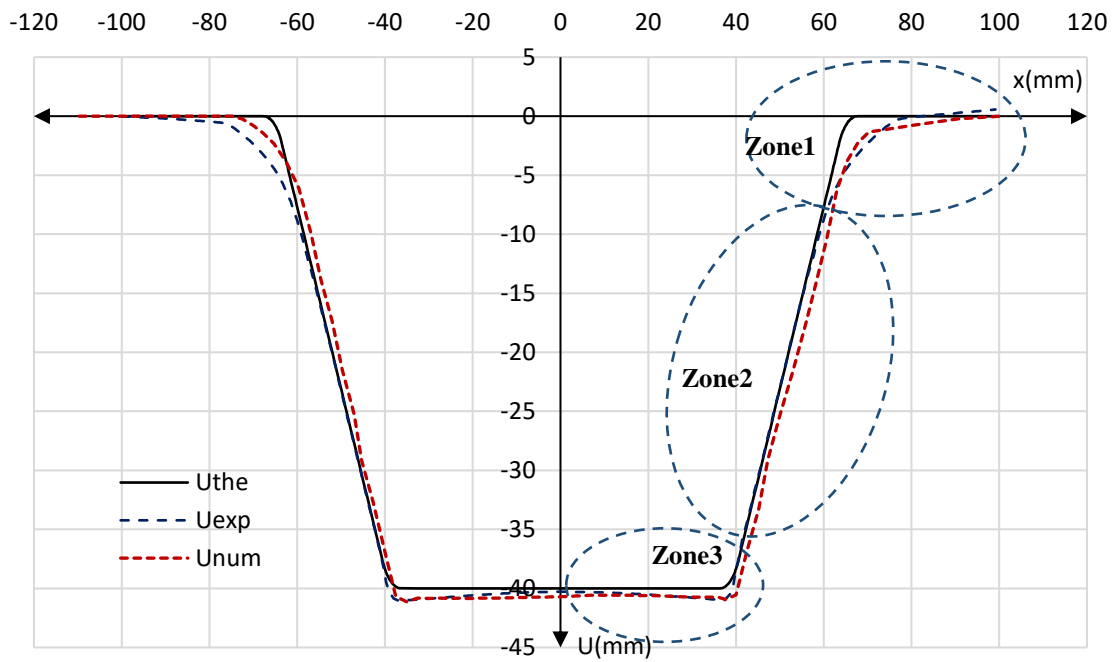


Figure IV-23. Profils des formes théorique, expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=57^\circ$)

L'analyse des trois zones présentées et discutées sur les figures IV-24 et IV-25. On présente une comparaison d'une part entre l'erreur sur les profils du modèle EF par rapport au profil réel et de l'autre part l'erreur entre le profil expérimental par rapport le profil réel.

La zone 1 : Elle présente les erreurs au niveau du congé d'entrée du cône pour différents angles ($\alpha=45^\circ, 50^\circ, 53^\circ, 55^\circ$ et 57°) figure IV-23. Pour le rapport de l'erreur numérique/théorique, on a un écart avec une valeur moyenne de (5,5%). La valeur maximale de 10% est atteinte pour le cas d'angle ($\alpha=53^\circ$). Pour l'erreur numérique/expérimentale est entre 10% et 12%. Cette erreur expérimentale s'explique par notre démarche de prise de mesure par machine à mesure tridimensionnelle MMT. Vu la complexité du montage les pièces sont démontées du dispositif WSPIF pour la numérisation avec la MMT. La pièce une fois débridée, le retour élastique a un effet sur le profil final de la pièce.

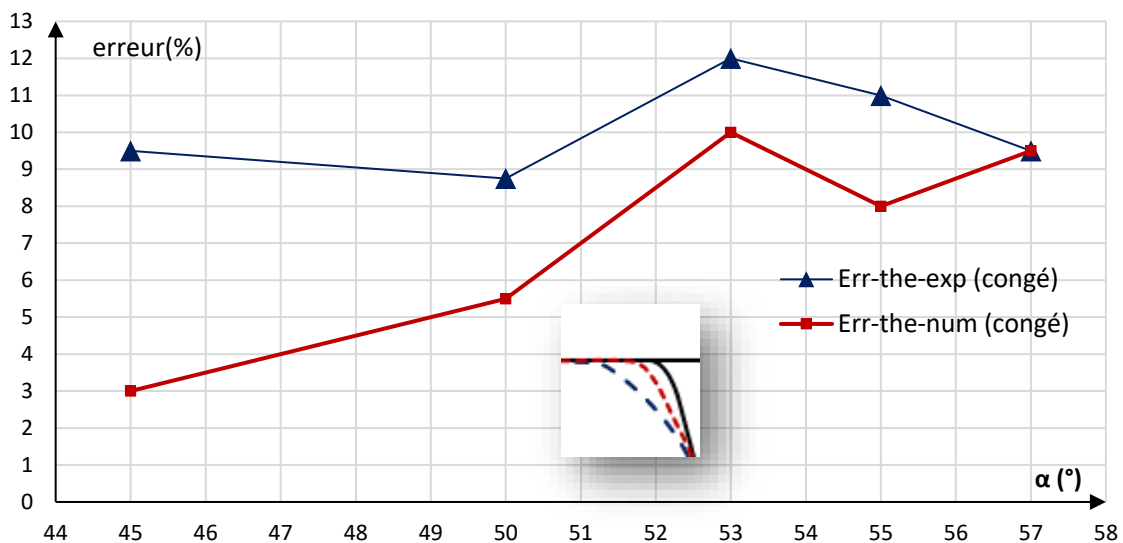


Figure IV-24. Erreurs relatives entre (U_{num}/U_{the}) et (U_{exp}/U_{the}) au niveau du congé

La zone 2 : On vérifie qu'on a presque une conformité totale entre le profil trouvé et celui souhaité pour les deux résultats expérimental et numérique. La bonne répartition et l'uniformité de la température sur le flan a un effet important sur la formabilité du titane. Néanmoins pour cette zone oblique du cône on remarque des gauchissements ou

altération de la forme de la pièce surtout pour des angles importants ($\alpha=57^\circ, 60^\circ$). Ce gauchissement causé par la différence des gradients de la température élevée dû à la friction qui se traduit par des contraintes variables appliqué sur le flan.

La zone 3 : Les deux profils expérimental et numérique présentent un bombage au niveau de fond de la pièce, dû aux contraintes de compression appliquées sur la partie centrale libre flan. Ce bombage présente une erreur par rapport au profil réel. Cette erreur relative est nettement diminuée par rapport à ce qu'a été trouvé par les chercheurs [12, 41, 56] l'erreur numérique a une valeur moyenne 3%, et l'erreur expérimentale moyenne est de 3,25% (figure IV-25).

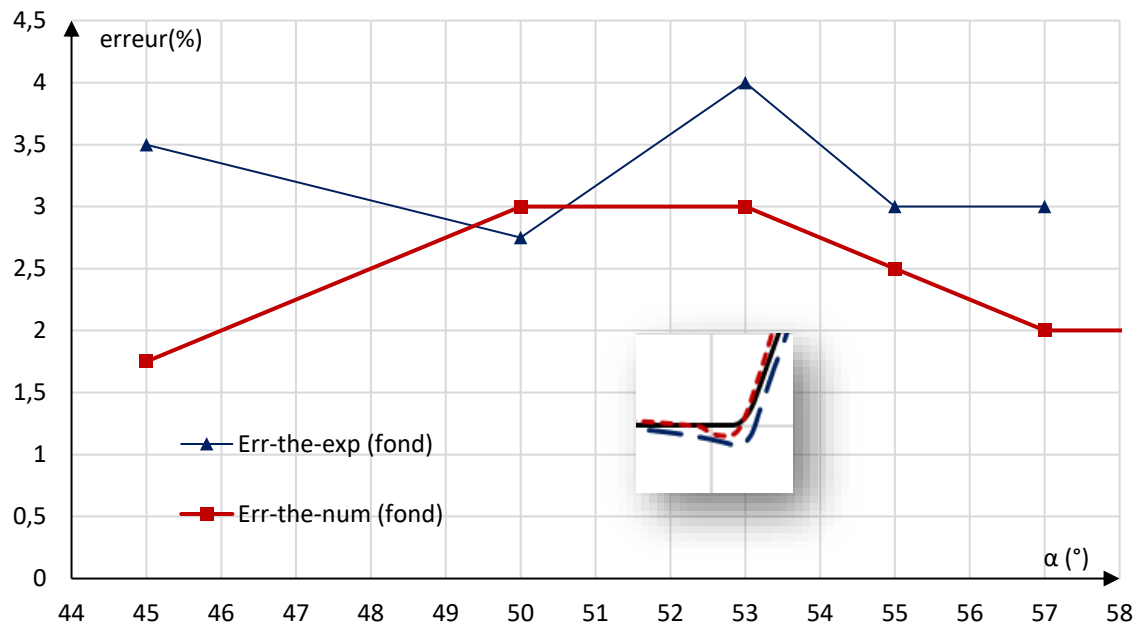


Figure IV-25. Erreurs relatives entre (U_{num}/U_{the}) et (U_{exp}/U_{the}) au niveau du fond de la pièce

4.4. Analyse des efforts de formage incrémental

Les résultats des simulations numériques avec couplage déplacement-température améliore nettement la ductilité de l'alliage du titane TI-6AL-4V par le formage des pièces de profondeurs importantes. Les efforts développés sont diminués d'une manière significative par rapport au formage du même matériau à froid. Dans la plupart des travaux menés sur le formage incrémental, la composante axiale de l'effort (F_z) est retenu comme paramètre de jugement [9, 68]. Cette composante est souvent la plus importante

en valeur par rapport aux autres composantes (F_x et F_y) et elle permet aux industriels de calculer l'énergie nécessaire de formage et de choisir la machine pour la fabrication.

Pour les essais expérimentaux menés avec le dispositif du formage incrémental à chaud, le capteur des efforts nous a permis de suivre l'effort (F_z). On observe que l'effet de chauffage lors des essais améliore la formabilité de l'alliage de titane Ti-6Al-4V, cela associé à une uniformité de la température sur le flan permet de diminuer l'effort de formage d'une manière significative. Ce résultat est confirmé par les mesures des efforts prédites. Pour différents angles simulés, l'effort augmente pour atteindre une valeur maximale une fois le formage se stabilise, la courbe devient monotone et garde un niveau d'évolution stable jusqu'à la fin du formage. Comme illustrés par les figures (de IV-26 à IV-30) pour tous les angles ($\alpha=45^\circ, 50^\circ, 53^\circ, 55^\circ$ et 57°) la superposition des courbes expérimentales et numériques montre une bonne corrélation des valeurs maximales atteintes pour les deux courbes. On vérifie aussi que ces allures ont les mêmes formes des courbes de l'effort axial à $T = 450^\circ\text{C}$ présenté par les auteurs [12, 17, 95].

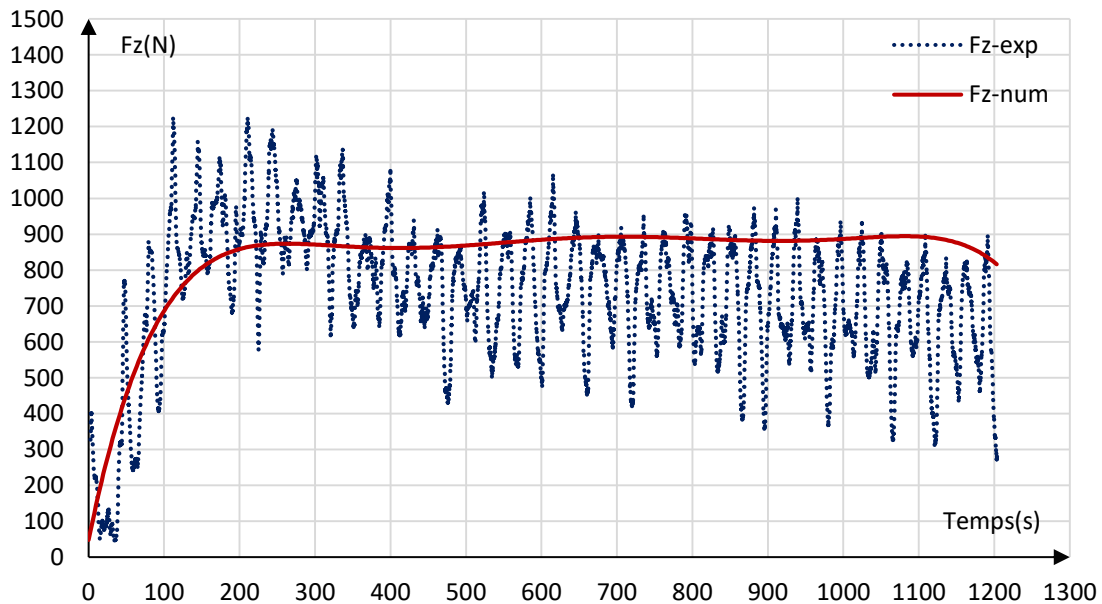


Figure IV-26. Courbes des efforts F_z , expérimentale et numérique $\alpha=45^\circ$

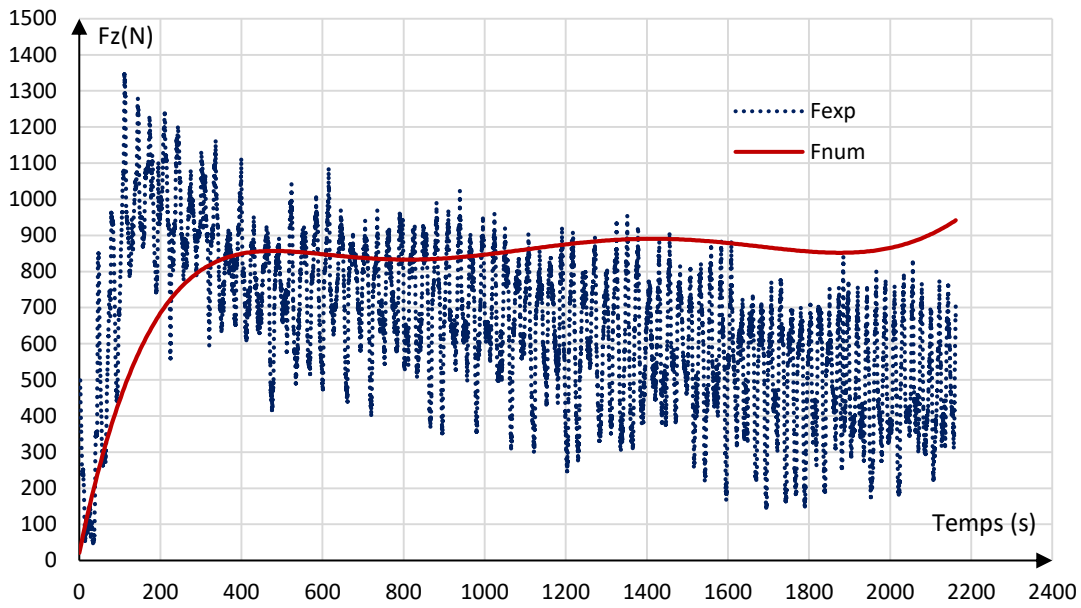


Figure IV-27. Courbes des efforts F_z , expérimentale et numérique $\alpha=50^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$

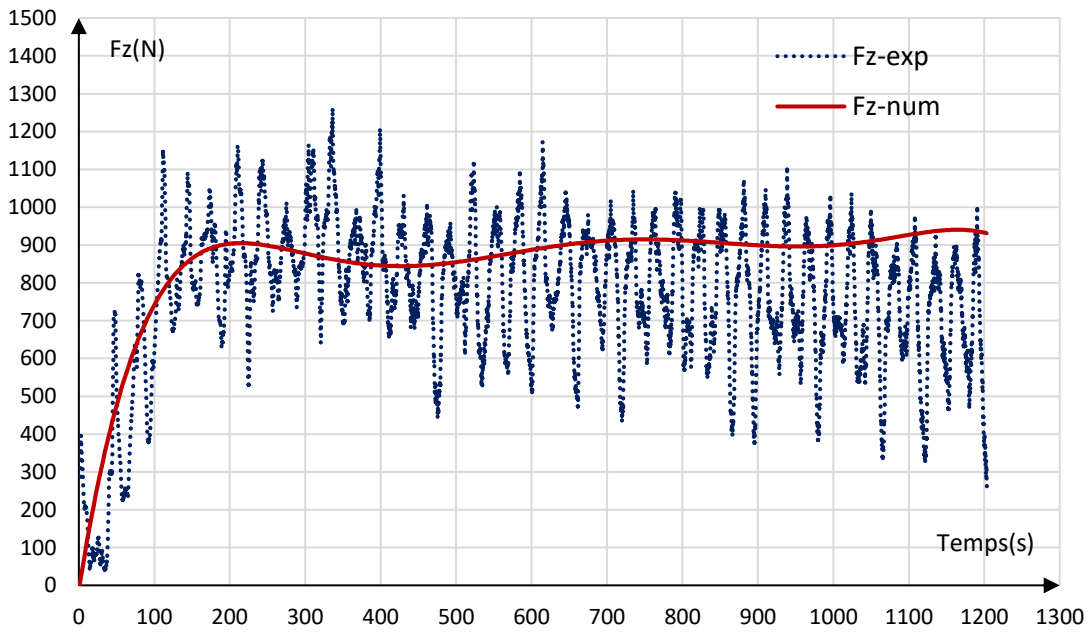


Figure IV-28. Courbes des efforts F_z , expérimentale et numérique $\alpha=53^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$

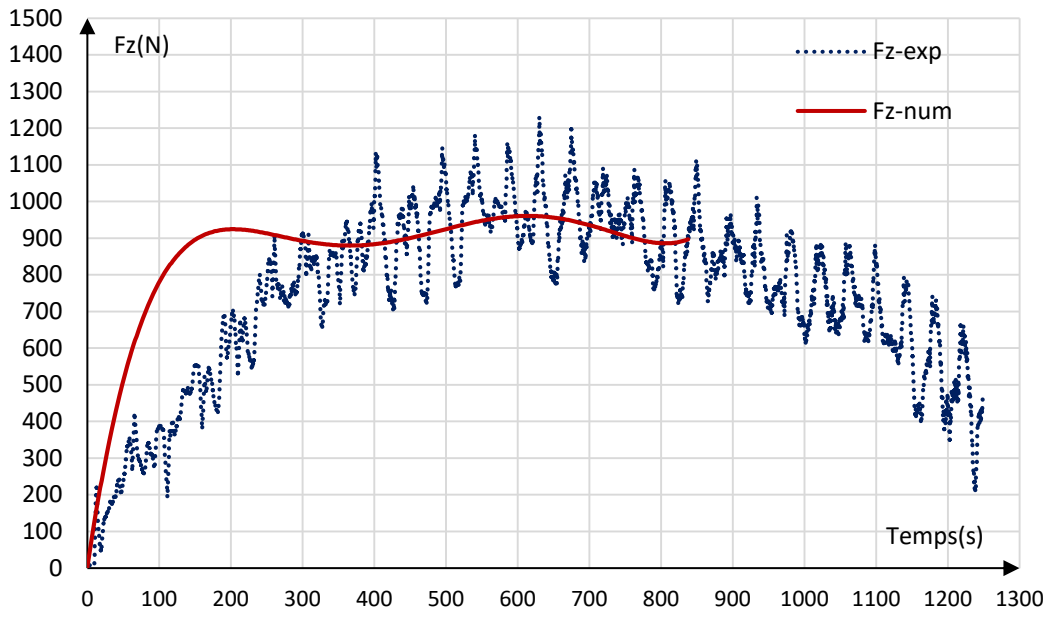


Figure IV-29. Courbes des efforts F_z , expérimentale et numérique $\alpha=55^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$

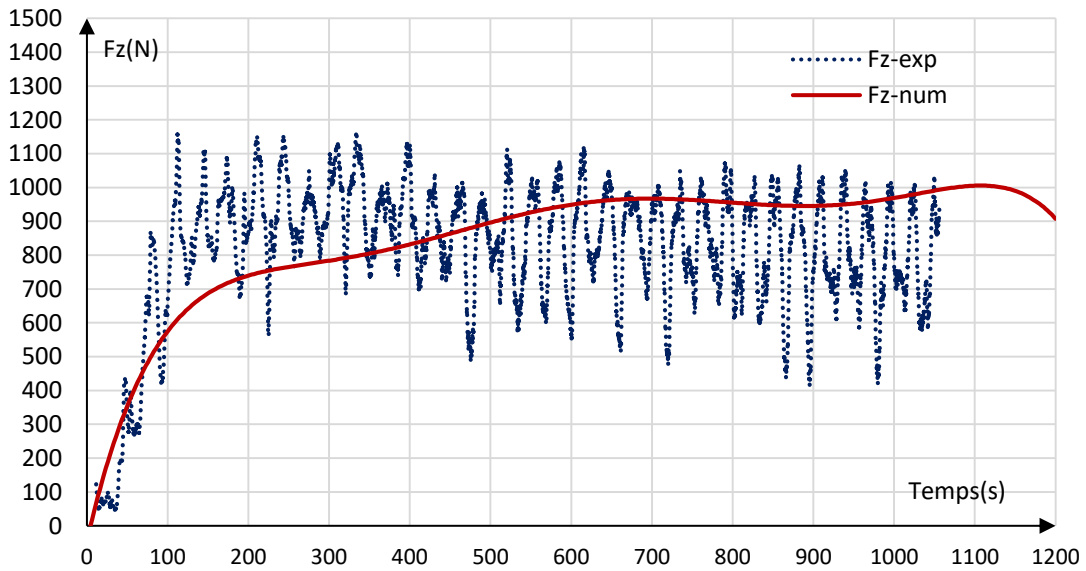


Figure IV-30. Courbes des efforts F_z , expérimentale et numérique $\alpha=57^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$

Les résultats expérimentaux et numériques s'alignent et ils montrent que pour le formage incrémental à chaud du Ti-6Al-4V. Lorsque l'angle d'inclinaison (α) de la pièce conique augmente l'effort de formage (F_z) augmente. Les valeurs des efforts maximums atteints pour chaque angle de formage sont illustrées dans la figure IV-31 et montre cette relation. On remarque une augmentation remarquable de l'effort pour l'angle de 55° ce qui correspond à l'angle maximale de formage et puis apparition de la rupture pour l'angle 57° . M. Honarpisheh [12] confirme ce même résultat pour un angle limite de formage de 56° .

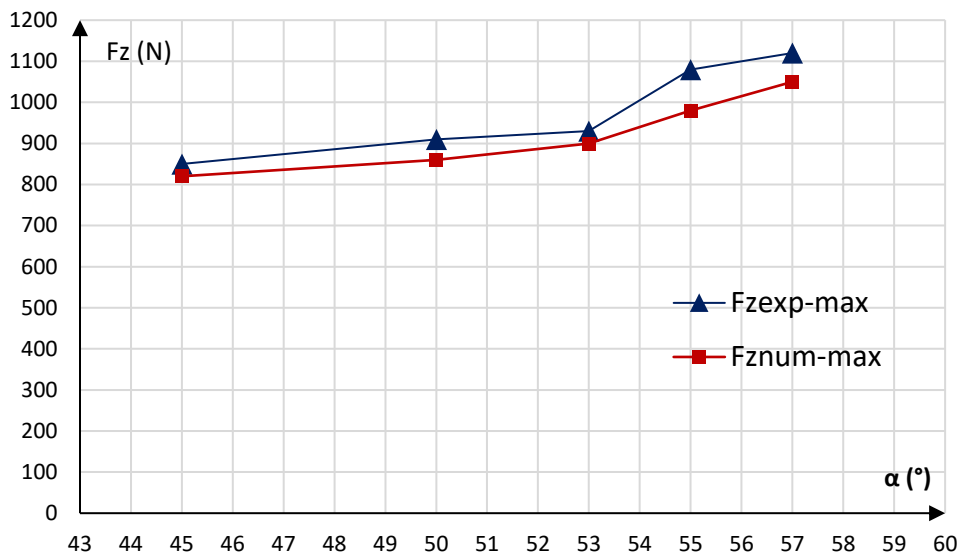


Figure IV-31. Evolution des efforts expérimental et numérique maximums en fonction de l'angle

On constate que pour le présent modèle en EF avec couplage déplacement-température une nette amélioration de la ductilité de l'alliage du titane TI-6AL-4V par le formage des pièces de profondeurs importantes. Les efforts développés sont diminués d'une manière significative par rapport au formage du même matériau à froid. Ce qui confirme les résultats expérimentaux. L'erreur relative mesurée entre les efforts maximums expérimentale et numérique pour chaque angle est illustrée sur la figure IV-32 et elle ne dépasse pas le 10%.

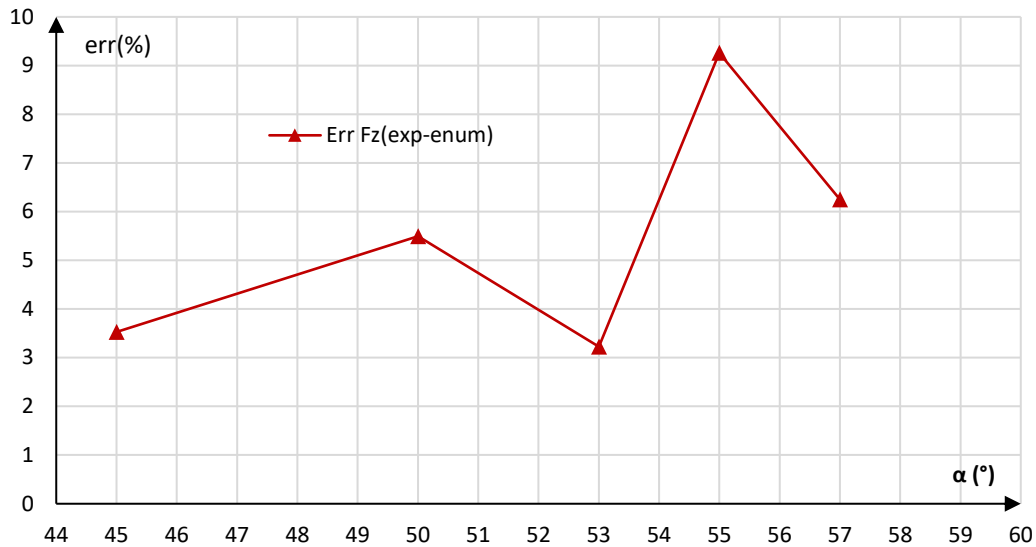


Figure IV-32. Erreur relative entre les efforts (F_{z-num} , F_{z-exp}) en fonction de l'angle (α)

4.5. Les principaux résultats de la comparaison numérique/expérimentale

Dans cette étude qui vise à prédire l'effet de l'angle de la pièce tronconique en formage incrémental à chaud. Une confrontation des résultats des prédictions numériques avec les valeurs obtenues par les essais expérimentaux faite. La comparaison porte sur la formabilité des pièces obtenues par mesure de la distribution de l'épaisseur, des profils des déformée et les efforts de formage. L'analyse de la comparaison des différents résultats (tableau IV-8) obtenus montre que le modèle EF du WSPIF permet de prédire le comportement des tôles en alliage de Titane Ti-6Al-4V.

Tableau IV-8.Principaux résultats de la comparaison numérique/expérimentale du WSPIF

Angle de la pièce conique(α)	45°	50°	53°	55°	57°	Moyenne
Epaisseur numérique minimale : t_{num} [mm]	0,361	0,331	0,308	0,302	0,279	0,3162
Taux de réduction de l'épaisseur numérique : Taux t_{num}/t_i [%]	0,278	0,338	0,384	0,396	0,442	0,3676
Epaisseur expérimentale minimale : t_{exp} [mm]	0,359	0,328	0,304	0,298	0,274	0,3126
Taux de réduction de l'épaisseur expérimentale : Taux t_{exp}/t_i [%]	0,282	0,344	0,392	0,404	0,452	0,3748
Erreur entre les épaisseurs minimales numérique et expérimentale : t_{num}/t_{exp} [%]	0,554	0,906	1,298	1,324	1,792	1,1751
Effort maximal expérimental : F_{exp} [N]	850	910	930	1080	1120	978
Effort maximal numérique : F_{num} [N]	820	860	900	980	1050	922
Erreur entre les efforts expérimental et numérique : F_{exp}/F_{num} [%]	3,529	5,494	3,225	9,259	6,25	5,551
Erreur entre les déplacements expérimental et théorique (fond) : U_{exp}/U_{the} [%]	3,5	2,75	4	3	3	3,25
Erreur entre les déplacements numérique et théorique (fond) : U_{num}/U_{the} [%]	1,75	3	3	2,5	2	2,45
Erreur entre les déplacements expérimental et théorique (congés) : U_{exp}/U_{the} [%]	9,5	8,75	12	11	9,5	10,15
Erreur entre les déplacements numérique et théorique (congé) : U_{num}/U_{the} [%]	3	5,5	10	8	9,5	7,2

5. Etude de l'effet de la profondeur de la pièce tronconique

Les résultats obtenus par les essais menés avec le banc d'essai du formage incrémental à chaud de l'alliage de titane Ti-6Al-4V, montrent qu'on peut obtenir des pièces seines sans rupture pour un angle ne dépassant pas 56° comme il a été vérifié par M. Honarpicheh et al[12,62] . Le résultat obtenu par l'expérience on vient de la confirmer par les mesures prédites parle modèle EF de la simulation numérique du SPIF à chaud. Un autre critère retenu par les auteurs[2, 58] pour vérifier la formabilité des métaux en formage

incrémental c'est la profondeur maximale qu'on peut atteindre lors du formage incrémental d'une pièce conique. Pour voir le comportement du Ti-6Al-4V formé à chaud on a choisi de faire une pièce conique profonde ou la profondeur est fixé de 60mm, pour un angle ($\alpha=50^\circ$) relativement important mais qui nous permet de s'éloigner de la limite de formage en angle ($\alpha=56^\circ$).

Dans cet objectif de voir le comportement de l'alliage de titane Ti-6Al-4V, pour des pièces profondes un programme de formage pour une pièce d'angle ($\alpha=50^\circ$) et de profondeur ($h=60\text{mm}$) utilisant un poinçon de diamètre ($d_p=5\text{mm}$) avec un incrément axial ($\Delta Z=0,5\text{mm}$) est créé. Le flan en Ti-6Al-4V monté sur le dispositif du formage incrémental à chaud et chauffé à ($T=450^\circ\text{C}$) le formage est effectué et on arrive à réaliser cette pièce avec cette profondeur ($h=60\text{mm}$) sans qu'il ait rupture. La figure IV 33 présente la pièce conique obtenue ou il montre la qualité de la pièce sans rupture ou brulure.

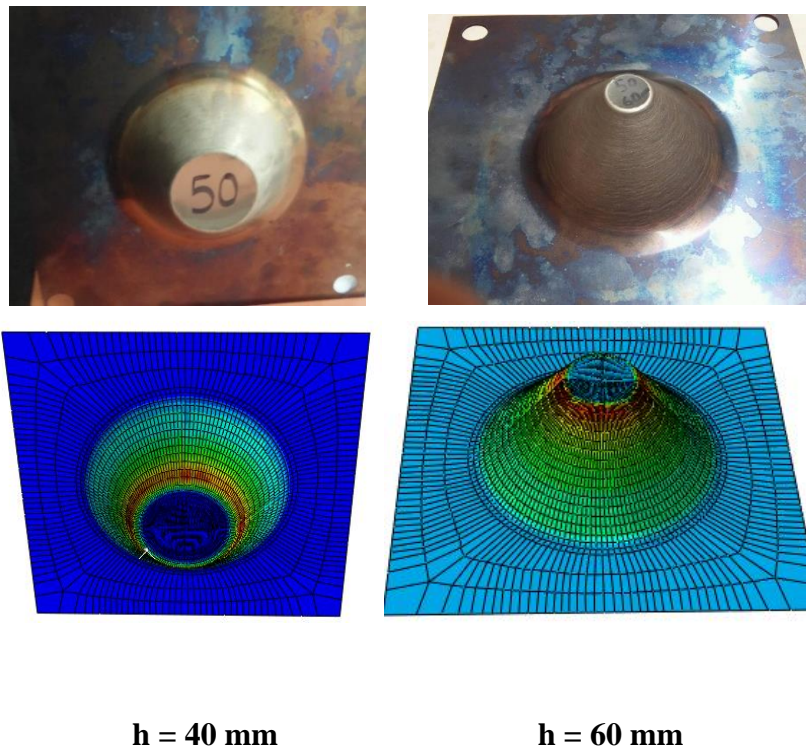


Figure IV-33. Pièces coniques en Ti-6Al-4V obtenu par WSPIF ($T=450^\circ\text{C}$, $\alpha=50^\circ$)

Dans le même élan pour pouvoir faire des comparaisons entre les résultats de l'expérience et ceux des prédictions numériques sur le profil de forme et la distribution de l'épaisseur. Le modèle EF est utilisé pour simuler la même pièce conique ($h=60\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$) et dans les mêmes conditions ($T=450^\circ\text{C}$). Un extrait des résultats de la simulation qui donne la

forme de la pièce obtenue et la distribution de la température à la fin de la simulation est donné par la figure suivante.

Pour voir la distribution de l'épaisseur ainsi que la forme du profil, des mesures selon le plan (plan1) de coupe passant par l'axe (-X, X) sont faites. Pour la pièce réalisée par l'essai expérimentale une machine MMT est utilisée pour palper et donner ces mesures moyennant un programme dédié. Pour les prédictions numériques du modèle EF, une trajectoire de direction (-X, X) est créée sur le flan et utilisé pour prendre les mesures de l'épaisseur et du profil.

Afin de faire une confrontation entre les différents résultats, expérimentaux et numériques la figure IV-33, présente la distribution des épaisseurs expérimentale et numérique ($h=60\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$) et la figure IV-34, présente les profils expérimental et numérique de la pièce conique selon le plan de coupe (-xx).

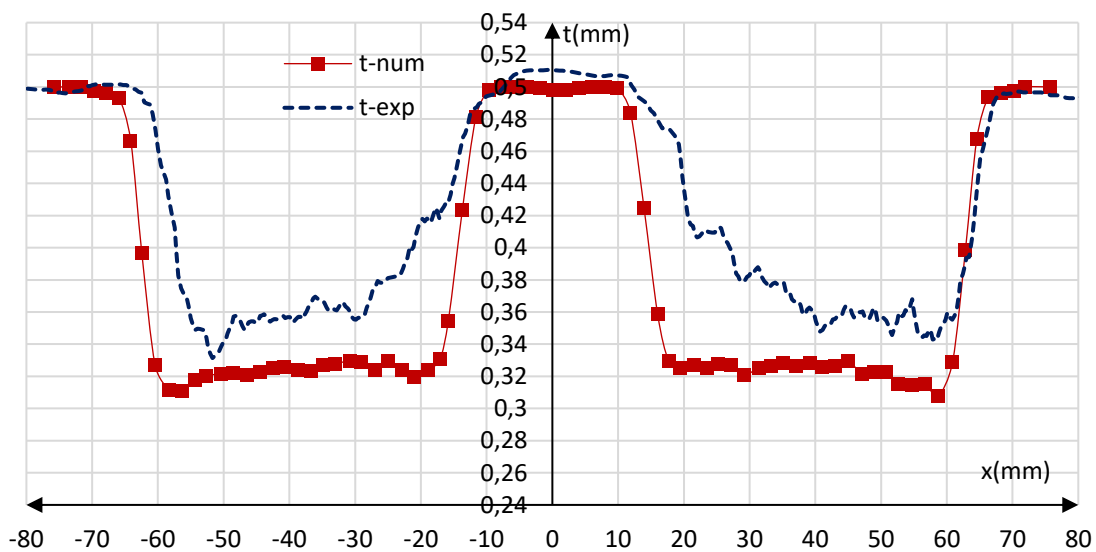


Figure IV-34. Distribution des épaisseurs expérimentale et numérique ($h=60\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$)

Les résultats de la distribution de l'épaisseur pour le cas d'une pièce conique profonde ($h=60\text{mm}$) montrent une bonne corrélation expérience-numérique. Cela montre que le chauffage améliore la ductilité du matériau, et on arrive à obtenir des pièces profondes allant jusque $h = 60\text{mm}$ sans rupture ou défaut de plis de la tôle. L'épaisseur minimale expérimentale atteinte est de $t_{\min}=0,332\text{mm}$ par contre celui prédit est ($t_{\min}=0,31\text{mm}$) comme le montre la figure IV-34. L'erreur relative entre ces résultats est de l'ordre de 7%

relativement faible par rapport aux résultats obtenus par M.Honapsheh et al [12]. Les profils obtenus donnent des formes correctes ou il n'y a pas de gauchissement souvent provoqué par le chauffage. L'uniformité du chauffage assurée par le dispositif nous permet d'obtenir des pièces en conformité dimensionnelle. Cela est jugé comme un avantage de ce type de chauffage, car souvent on remarque que le chauffage associé au phénomène de retour élastique provoque une altération au niveau des dimensions finales de la pièce réalisée [23]. La conformité dimensionnelle est vérifiée dans un premier temps par les profils obtenus (figure IV-35) et dans un deuxième temps par le calcul de l'erreur relative des profils obtenus comparé au profil réel ou théorique (voir la figure IV-36).

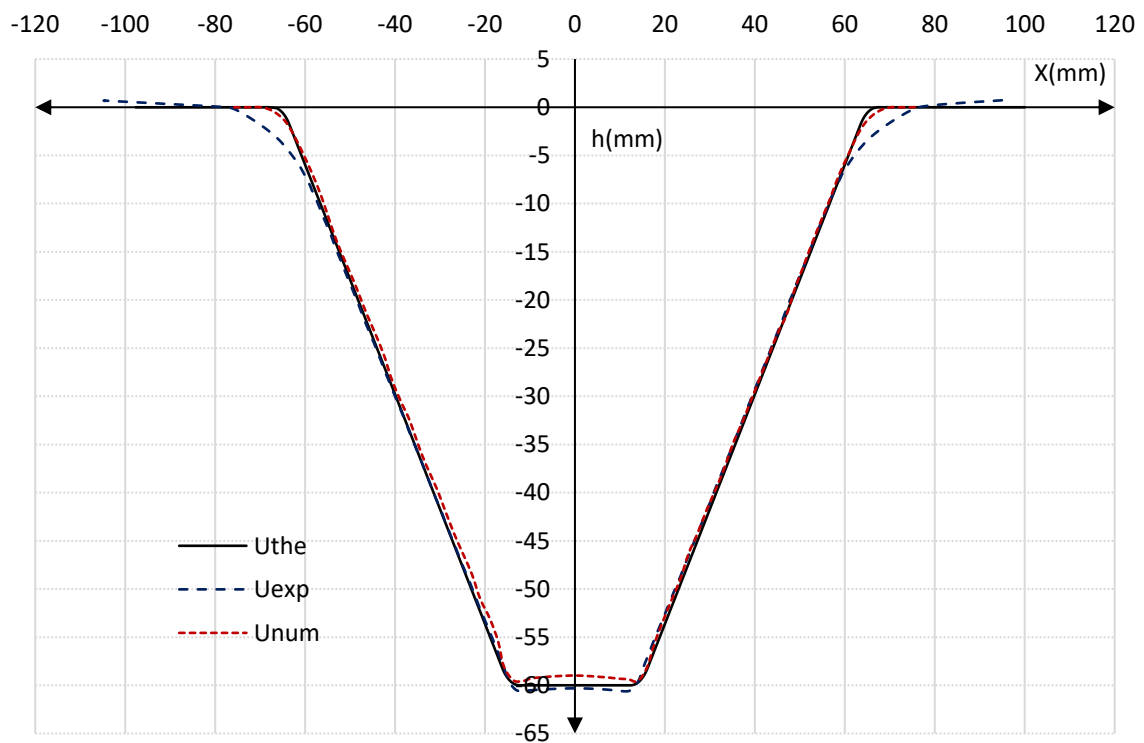


Figure IV-35. Profils expérimental et numérique ($h=60\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$)

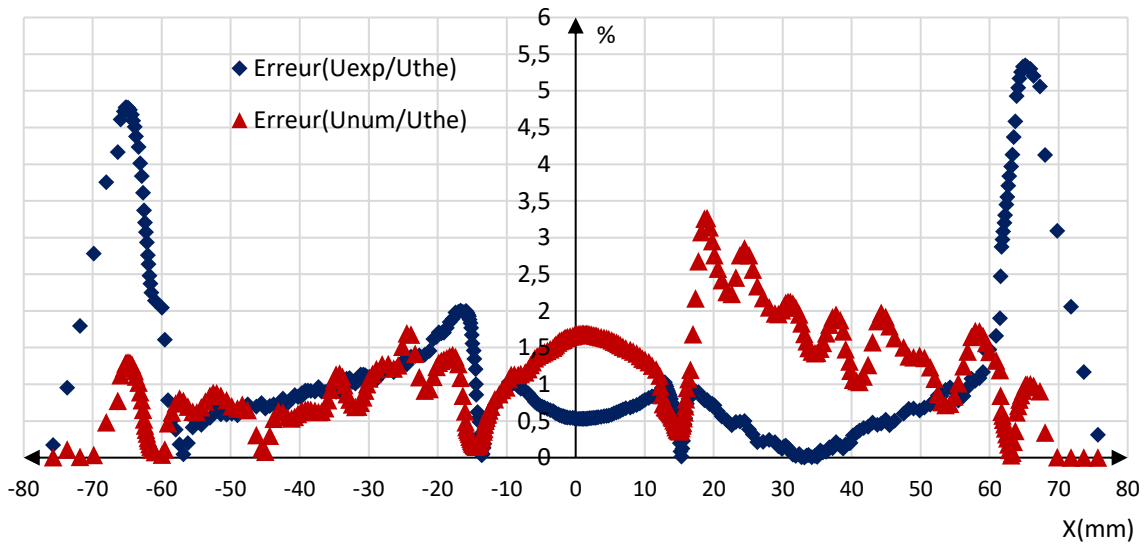


Figure IV-36. Erreur relative U_{exp}/U_{the} et U_{num}/U_{the} cas ($h=60\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$)

Comme le montre le tableau récapitulatif (Tableau IV-9) des résultats de comparaison, l'erreur maximale ne dépasse pas les 6% pour l'erreur théorique/expérimentale (Erreur U_{the}/U_{exp}) au niveau des congés du cône cela est dû à la partie libre du flan qui se trouve affectée par le poinçon lors du début du formage et on obtient un rayon de congé (r_c) supérieur à celui programmé ($r_c=5\text{mm}$). Par contre au niveau du fond de la pièce le résultat expérimental est en agréable adéquation avec le modèle programmé et l'erreur ne dépasse pas le 1%.

Le profil obtenu par la prédiction du modèle EF, comparé à celui programmé donne une erreur relativement satisfaisante (Erreur U_{the}/U_{num}) de 3%. Le modèle numérique permet de prédire les déplacements de la pièce et donne lieu à une forme presque en conformité dimensionnelle avec celui programmé, l'erreur au niveau des congés est de 2%, par contre au niveau du fond elle atteint 3% ce qui pourrait être amélioré en apportant des modifications au modèle EF dans des futurs travaux. Une comparaison des deux profils réalisés avec des profondeurs différentes, prouve la forme n'est pas affecté par la profondeur et les courbes sont en conformités comme le montre la figure IV-37.

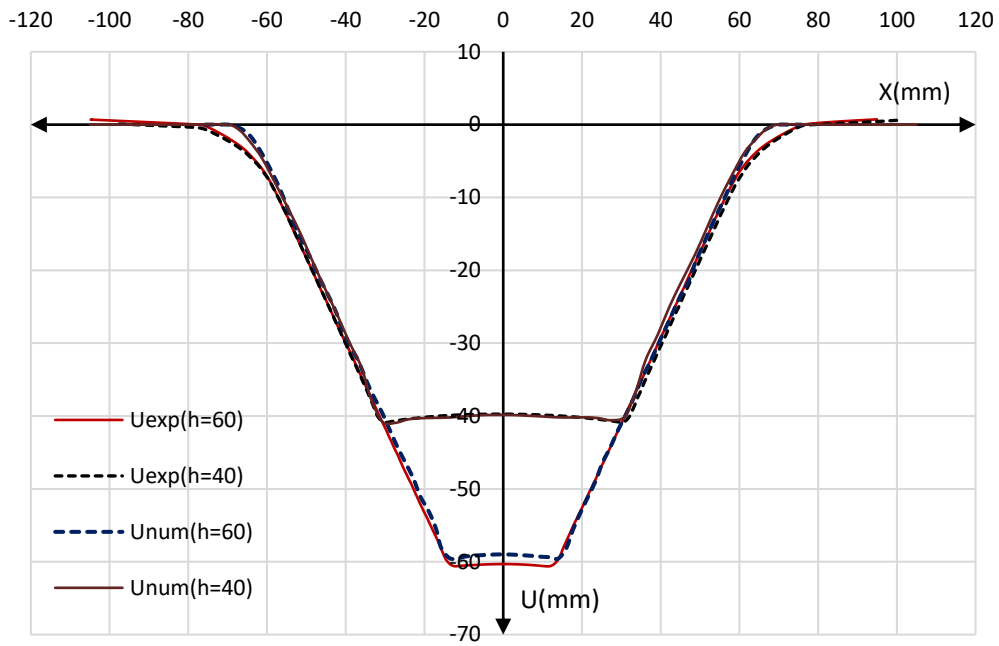


Figure IV-37. Comparaison des profils expérimental et numérique (h=40mm, h=60mm)

Tableau IV-9. Comparaison des résultats de la pièce conique en Ti-6Al-4V (h=60mm, $\alpha=50^\circ$)

Angle du cône $\alpha = 50^\circ$, h=60mm	Résultat expérimental	Prédiction numérique
Épaisseur numérique minimale : t_{\min} [mm]	0,332	0,31
Taux de réduction de l'épaisseur : t/t_i [%]	33,6%	38%
Erreur par rapport au profil théorique (fond) : U/U_{the} [%]	1	3
Erreur par rapport au profil théorique (congé) : U/U_{the} [%]	6	2

6. Formage incrémental d'une prothèse crânienne

6.1. Introduction

Le procédé du formage incrémental des tôles, utilise des trajectoires des outils similaires à celles de l'usinage pour fabriquer des produits sur mesure dans les industries automobile et aéronautique. Le formage incrémental est un procédé à faible coût approprié pour une production pour les faibles séries [3, 63] et des pièces complexes de prototypage [8, 108]. En raison de la nécessité de la personnalisation des produits pour chaque patient, la fabrication de produits médicaux généralement des prothèses de genou, de cranes ou

autres applications, sont l'un des domaines d'application potentiels de cette technique présentée par G. Ambrogio et al [1] et I. Bagudanch et al[39].

Actuellement, les nouvelles technologies apportées aux procédés de formage incrémental combinent de nouvelles procédures de fabrication et des machines avec des techniques assistées par ordinateur pour améliorer la fiabilité de ce procédé. Cela permet la conception d'une grande variété de produits médicaux complexes avec un haut degré de précision. En utilisant la technologie de balayage par un scanner Laser pour reproduire une partie exacte de la géométrie du crâne, puis reconstruire le modèle CAO après traitement du nuage de points obtenu. Le modèle est utilisé pour générer le programme de la trajectoire de l'outil pour la fabrication de prothèse crânienne en alliage de titane sur mesure. On utilise le dispositif expérimental du formage incrémental à pour maintenir une température de travail de l'alliage de titane (Ti-6Al-4V) pendant la réalisation de la prothèse crânienne. Tout au long des opérations de formage on assure une surveillance de la force axiale du poinçon, et on examine la distribution de l'épaisseur et le profil de la prothèse obtenue à différentes températures de réalisation.

6.2. Demarche de la rétroconception du crane

Dans le domaine médical, les implants médicaux sont fabriqués pour remplacer les parties du corps après des blessures, des accidents ou des maladies. Les implants crâniens personnalisés sont des dispositifs médicaux dont la taille et la configuration diffèrent (qui dépendent directement de la taille et de l'emplacement de la perte osseuse) et qui sont utilisés dans la cranioplastie pour corriger la perte osseuse de la boîte crânienne. Plusieurs tailles existent pour ces produits mais elles ne conviennent parfois pas à l'anatomie du patient en raison des différences anthropométriques naturelles entre chaque individu M. Gulati et al [109]. Les produits personnalisés qui sont spécifiques au patient peuvent mieux s'adapter à la géométrie du patient. Ils sont plus confortables et garantissent de meilleures performances.

L'approche de la rétro-conception est largement appliquée pour cette personnalisation optimisée. Les implants crâniens fabriqués sont conçus à partir de modèles anatomiques du patient recréé à partir de nuages de points obtenus par balayage laser. Basé sur des analyses détaillées, des modèles CAO personnalisés sont montés pour une reconstruction chirurgicale adéquate. La technique la rétro-conception basée sur le «design-rond»

proposé par G. Ambrogio et al [1] est appliquée dans cette étude pour fabriquer par formage incrémental à chaud les prophéties de crâne humain comme le montre la démarche suivante illustré par la figure IV-38.

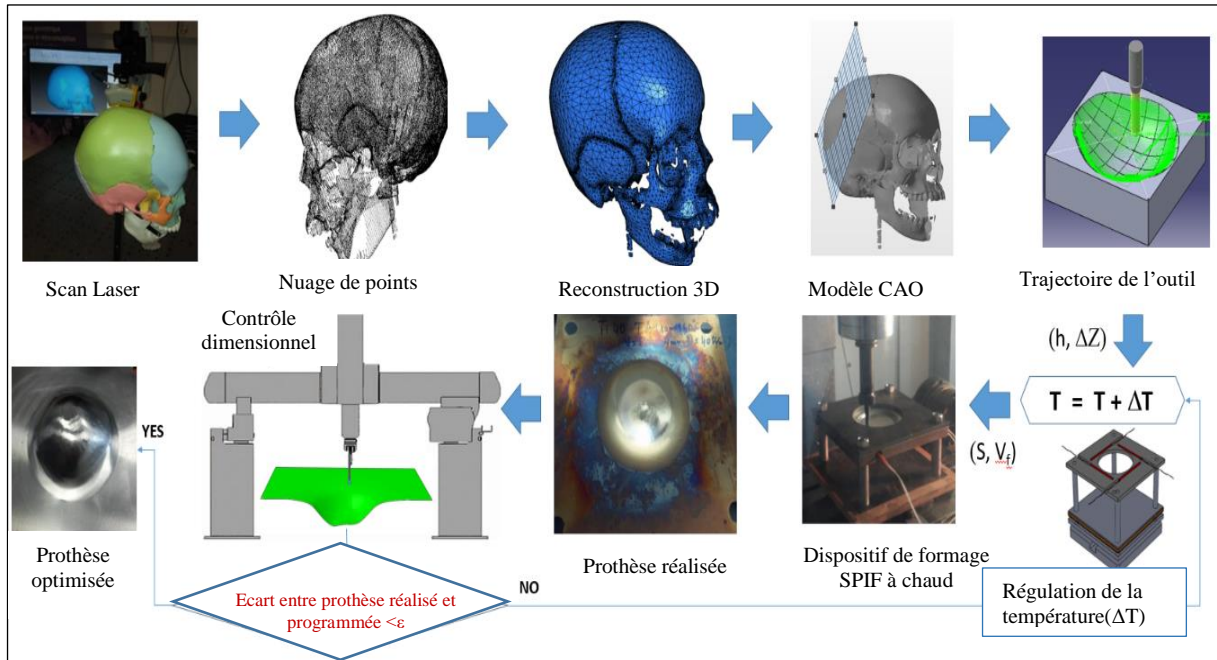


Figure IV-38. Démarche de rétro-conception de prothèse de crâne avec WSPIF

Étape 1 : La forme du crâne obtenue dans ce travail est scannée à partir d'un crâne humain par l'intermédiaire d'un bras portable Laser de mesure METRIS-MCA-203D, elle permet de faire un balayage sans contact tridimensionnel. Le logiciel FOCUS associé à ce scanner permet de recueillir un nuage de point (190683 points) de la surface balayée de la tête du patient (maquette) comme le montre la figure IV-39.

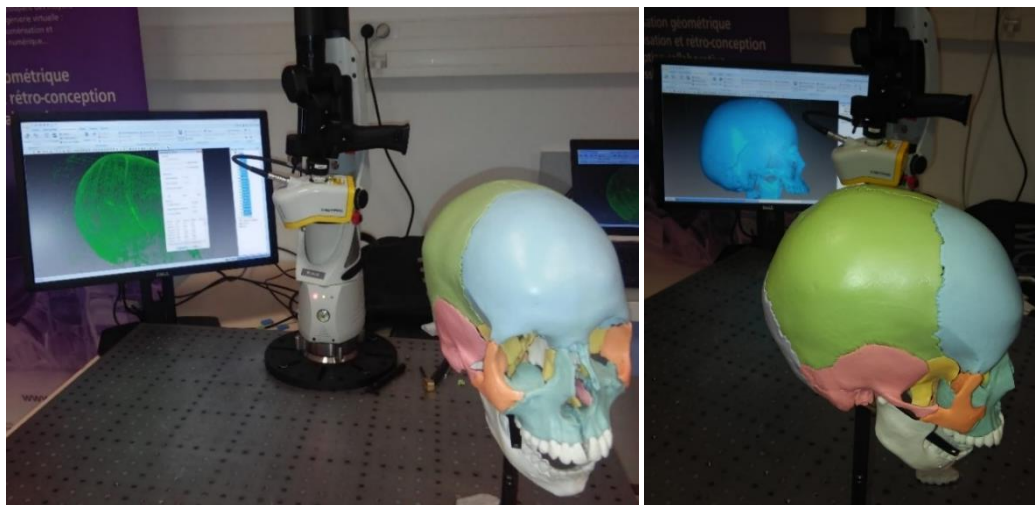


Figure IV-39. Scan 3D du crâne par le scanner Laser METRIS-MCA-20

Etape 2 : Dans cette étape on s'intéresse à la préparation de la prothèse crânienne à réaliser. Le nuage de points obtenu à l'étape 1 est lissé et les points indésirables sont éliminés, on garde uniquement les points relatifs à la prothèse crânienne qu'on désire fabriquer. La reconstruction de la surface de la prothèse crânienne est obtenue par le logiciel CATIA à partir du nuage de points. Le modèle de surface de crâne 3D construit est converti en un modèle STL comme le montre la figure IV-40 ci-dessous.

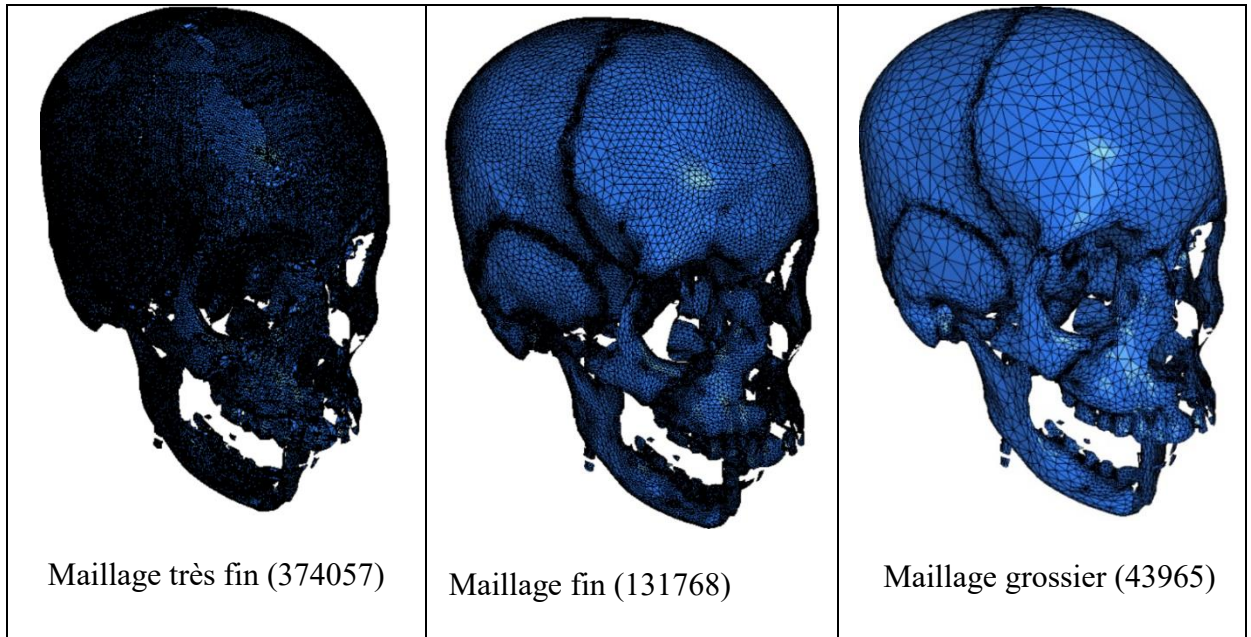


Figure IV-40.Reconstruction de la prothèse crânienne par le nuage de points

Etape 3 : La troisième étape commence par la création de la partie femelle de la prothèse à partir du modèle CAO avec le logiciel de CFAO (CATIA V5). Cette partie femelle est utilisée pour générer la trajectoire de l'outil d'outil. Un programme en code G est généré pour contrôler la trajectoire de l'outil sur la machines CNC (figure IV-41).

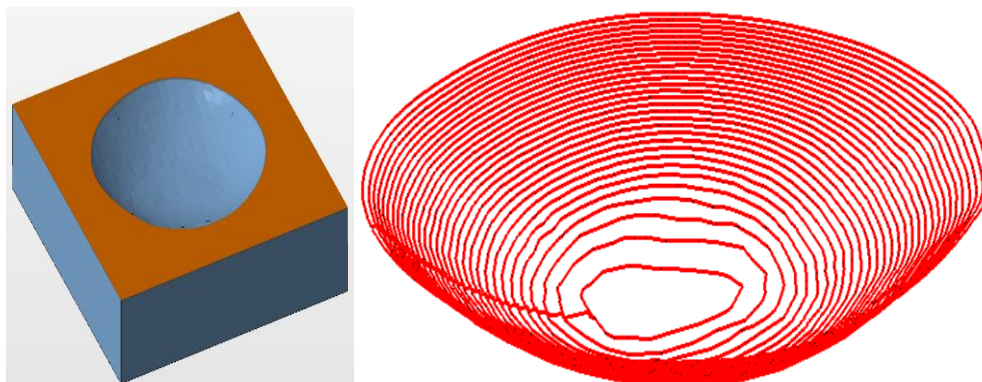


Figure IV-41.Modèle CAO de la prothèse crânienne et de la trajectoire du poinçon

Etape 4 : Dans cette étape on procède à la réalisation de la prothèse crânienne, selon la trajectoire obtenue du poinçon en tôle en alliage de titane Ti 6Al-4V d'épaisseur ($t=0,5\text{mm}$), avec les conditions de travail détaillées dans le tableau IV-10.

Tableau IV-10. Conditions de réalisation de la prothèse crânienne

t[mm]	dp[mm]	ΔZ[mm]	h[mm]	N[trs/mn]	Vf[mm/mn]
0,5	10	0,5	14,5	40	600

La prothèse crânienne est fabriquée à différentes températures afin de voir l'effet de la température, sur la géométrie de la prothèse obtenue. Pour chaque cas, la force de formage verticale (F_z), la distribution d'épaisseur finale (t) et le profil de la pièce (U) sont mesurés et comparés afin d'améliorer les performances du procédé de formage incrémental à chaud.

Etape 5 : Pour cette dernière étape, on effectue un contrôle dimensionnel de prothèses crâniennes réalisées à différent température, de la distribution de l'épaisseur finale (t) et du profil des déplacements (U). Les mesures sont effectuées par une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), un programme dédié à la prothèse crânienne est mis en place pour faire le balayage comme. La mesure de l'effort axial est assurée par le capteur d'effort monté dans le dispositif de formage. On effectue contrôle visuel de toutes les pièces fabriquées dans le but de détecter d'éventuels défauts rencontrés (endommagement, gauchissement de la surface, amincissement excessif et rugosité) et évaluer la surface déformée obtenue.

6.3. Discussion des résultats

Cette partie présente l'application de la démarche de rétro-conception pour la réalisation expérimentale des prothèses crâniennes par le procédé de formage incrémental à chaud. Quatre essais sont effectués pour différentes températures ($T=30, 60, 100$ et 130°C). Le suivi des distributions des différentes températures est assuré par une caméra infrarouge amovible IRISYS 4000 sont présentés sur la figure IV-43.

Le dispositif de formage incrémental à chaud est équipé d'un régulateur en température lié à un thermocouple monté sur le flan. Une fois que la température désirée a été atteinte,

le chauffage est arrêté. Comme le montre la figure IV-42, l'amplitude de la température de la zone de travail efficace est constante pendant la phase de formage de la prothèse.

On a également observé des températures élevées, des taches orange apparaissent à la surface de la prothèse, cela est dû au chauffage, qui a brûlé la surface de la feuille. Cependant, le centre de la partie qui est la surface utile de la prothèse après la coupe est propre. Pour les faibles températures, le seul problème identifié était une légère augmentation de la rugosité interne et externe et l'apparition de plis.

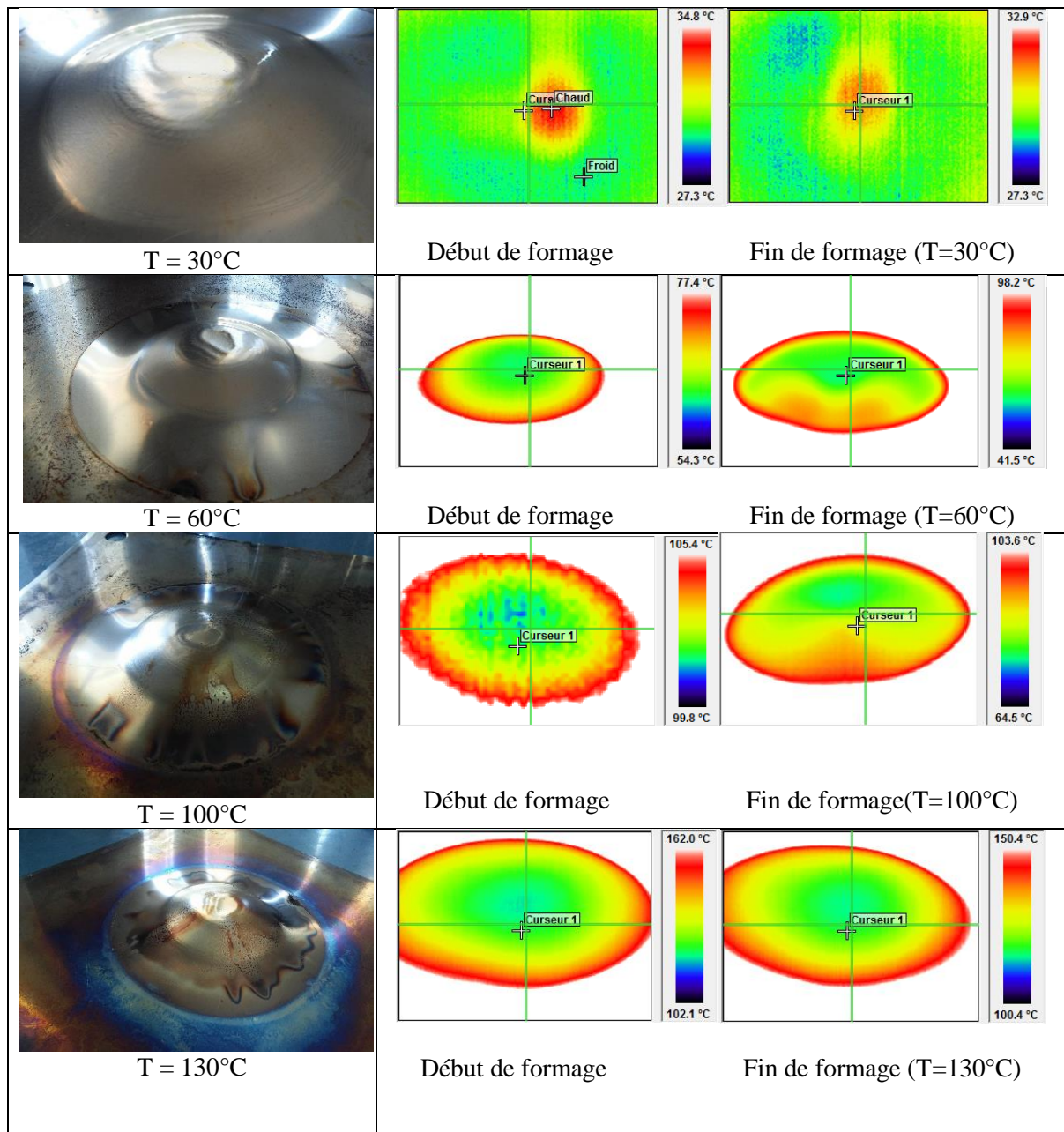


Figure IV-42. Prothèses réalisées et répartition de la température lors du formage

6.3.1. Effet de la température sur l'effort de formage

La figure IV-43 présente les allures des efforts de formage axial pour différentes températures d'essais ($T=30, 60, 100$ et 130°C). On peut le constater que les force augmente au début pour atteindre une valeur maximale, pour une profondeur de l'ordre de ($h=10\text{mm}$), (tableauIV-11) puis elle diminue. On déduit de ces allures que la génération de chaleur due au frottement et à la température de formage a un grand effet sur la force de formage maximale, ce qui est présent.

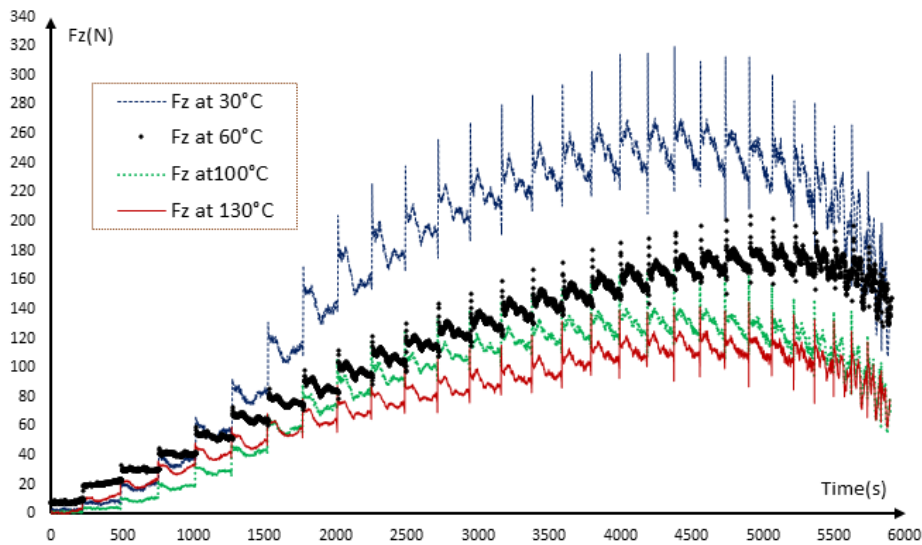


Figure IV-43. Les allures des efforts de formage axial pour différentes températures

Tableau IV-11. Valeur des Forces maximales de formage pour différentes températures

Température T	30°C	60°C	100°C	130°C
Force maximale de formage : Fz(N)	266	183	135	118

6.3.2. Effet de la température sur la distribution de l'épaisseur(t).

On s'intéresse à présenter par la figureIV-44 la distribution de l'épaisseur le long de l'axe (-X, X) fournie par le balayage avec la machine MMT pour les températures ($T=30^{\circ}\text{C}$ et $T=130^{\circ}\text{C}$). On constate qu'une réduction de l'épaisseur plus importante pour la température de de chauffage la plus élevée. L'amincissement du flan est localisé dans le

coin inférieur de la partie finale de la prothèse. La réduction d'épaisseur montre l'efficacité du montage expérimental proposé. L'introduction des cartouches de chauffage a permis de maintenir une température homogène pendant le processus de formage et donc une formabilité accrue du matériau.

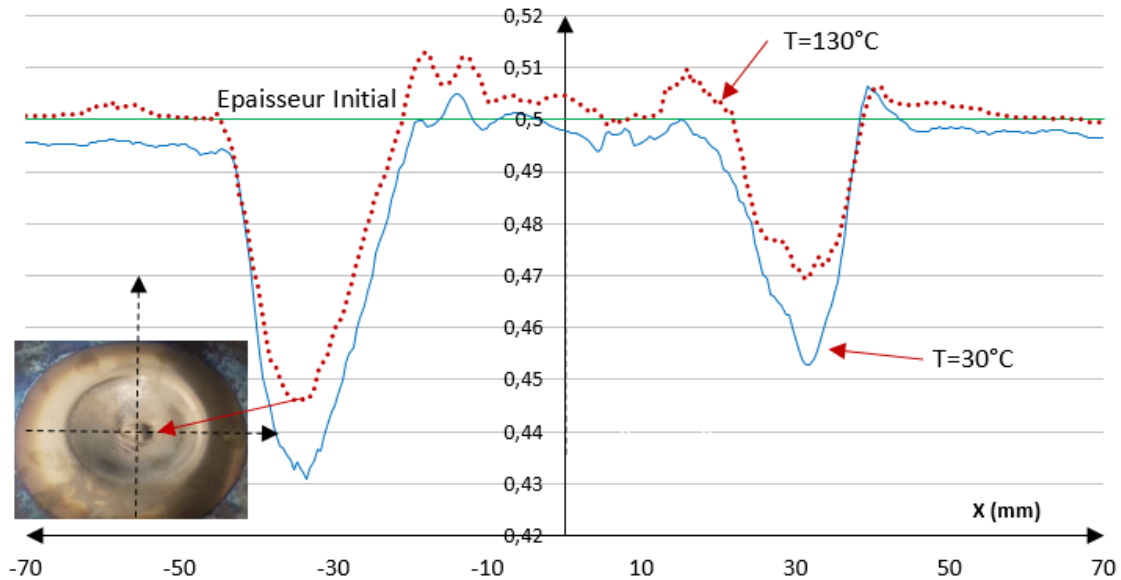


Figure IV-44. La distribution de l'épaisseur pour ($T = 30^{\circ}\text{C}$ et $T = 130^{\circ}\text{C}$)

6.3.3. Effet de la température sur le profil des déplacements (U)

La machine à mesurer tridimensionnelle MMT utilisée, permet d'acquérir les dimensions de de la prothèse pour chaque température d'essais. Le profil des déplacements à différentes température d'essais ($T=30, 60, 100$ et 130°C) est comparé le long de l'axe X par rapport au profil théorique pour quantifier les écarts et présenté par la figure IV-45.

Le tableau IV-12, montre que le chauffage permet de réduire l'écart moyen entre le profil expérimental et théorique ($U_{\text{exp}}/U_{\text{theo}}$). Des écarts importants entre (2,3 à 3mm) sont observés dans la zone oblique de la prothèse où on a plus d'amincissement. Dans la zone centrale, les écarts sont plus faibles pour ($T = 130^{\circ}\text{C}$) et plus homogènes, entre (0,4 et 1,4 mm). Pour $T = 30^{\circ}\text{C}$, les écarts sont plus importants entre (0,84 et 1,95 mm).

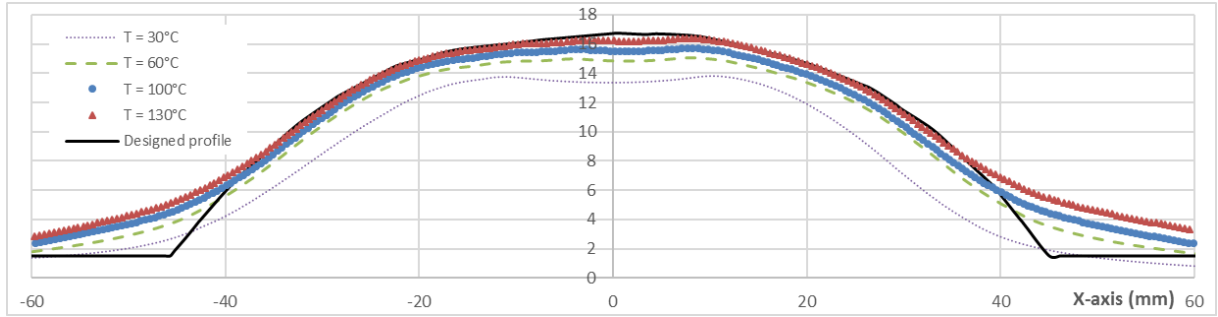


Figure IV-45. Profils des déplacements à différentes température d’essais

Tableau IV-12. écart moyen entre le profil expérimentale et théorique (U_{exp}/U_{theo})

Température T [°C]	30°C	60°C	100°C	130°C
Distance moyenne (U_{exp}/U_{theo})[mm]	1,9385	1,0854	0,9943	0,9025

6.4. Simulation numérique de la prothèse crânienne

Pour faire une comparaison des résultats expérimentaux relatifs à la réalisation de la prothèse crânienne, on mène une simulation numérique de ce dernier en utilisant le modèle élément finis du WSPIF. Des petites modifications de maillage sont apportées au modèle pour qu’il permette la simulation de la prothèse. Comme toute la partie intérieure de la prothèse entre en contact avec le poinçon, inversement pour les pièces coniques traitées précédemment (cf-IV-2), on retient cette partition comme une surface en contact avec la surface du poinçon.

On retient les mêmes conditions de réalisation de la prothèse crânienne et Ti-6Al-4V à la température de 130°C et on mène la simulation comme il le montre la figure IV-46.

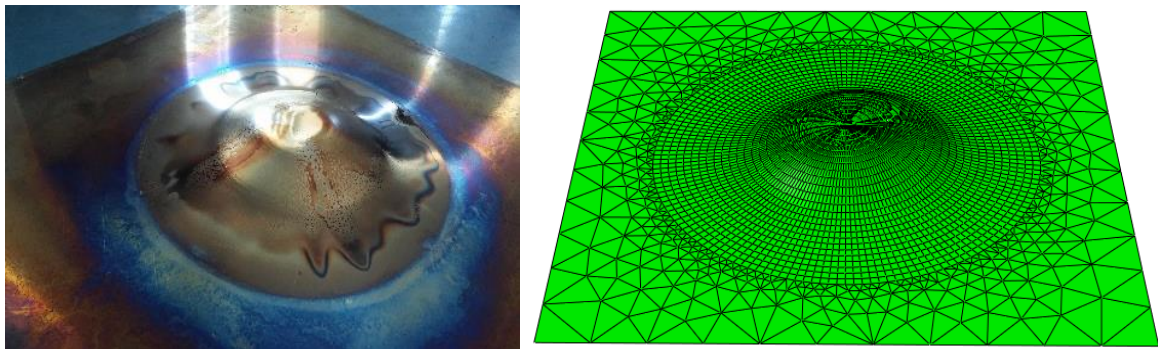


Figure IV-46. Simulation de la prothèse crânienne à la température de 130°C

Pour comparer les résultats de la simulation et de l'expérience, on crée une trajectoire (path) selon un plan de coupe sur la prothèse déformée au même endroit réalisé en expérimental. On détermine la distribution de l'épaisseur (t_{num}) et du profil de déplacement (U_{exp}) selon ce plan de coupe.

La figure IV-47 présente une comparaison entre la distribution de l'épaisseur numérique et expérimentale. Les deux distributions ont la même forme et elles fournissent des valeurs minimales très proche ($t_{num}=0,435\text{mm}$) par contre celui de de l'expérience ($t_{exp}=0,428\text{mm}$). Le modèle est fiable à prédire l'épaisseur minimale pour la prothèse crânienne.

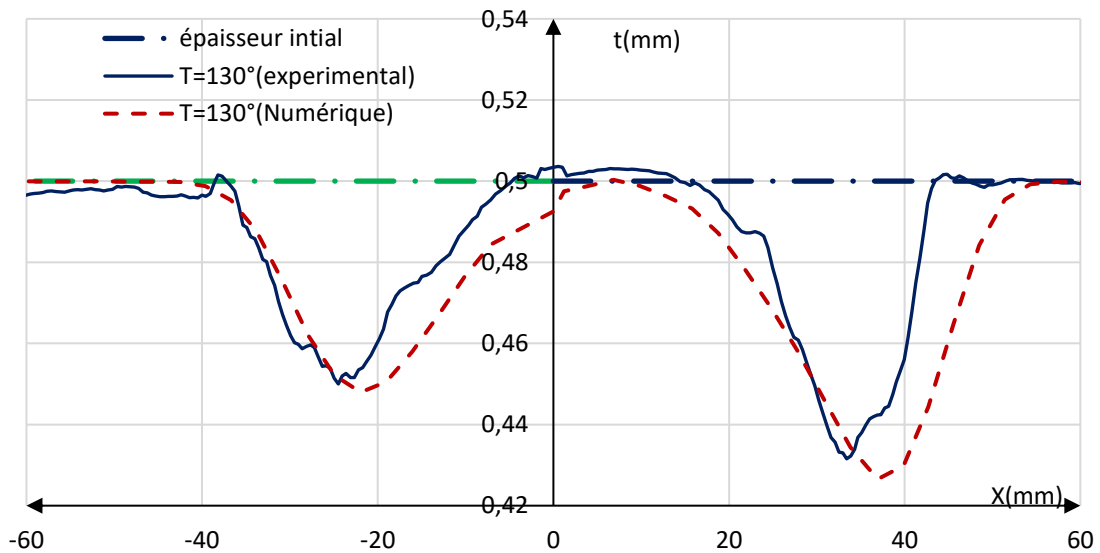


Figure IV-47. Distributions des épaisseurs, numérique et expérimentale selon l'axe x

Une comparaison entre le profil numérique et du profil expérimental est fournie dans la figure IV-48. Elle montre une non-conformité surtout au niveau des congés d'attaque de l'outil. Cette erreur est due au modèle qui demande plus d'investigation pour qu'on puisse prédire des formes de crâne avec une erreur raisonnable.

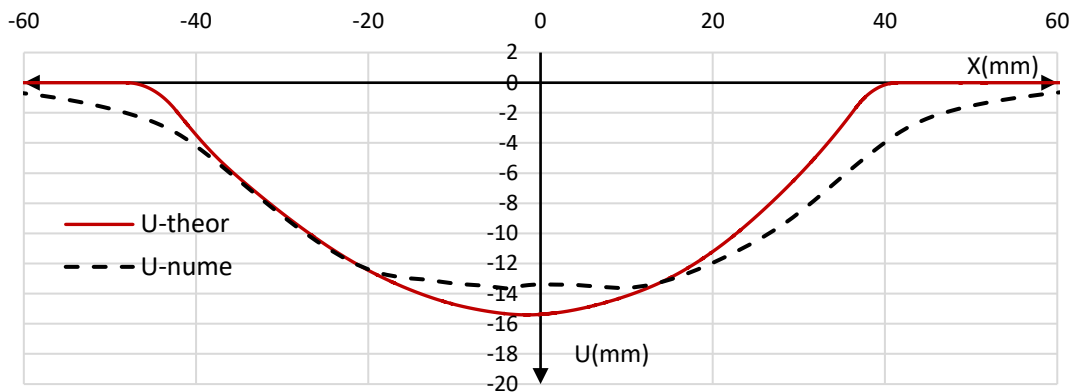


Figure IV-48. Comparaison entre le profil théorique et le profil numérique

7. Conclusion

Dans cette confrontation entre les résultats expérimentaux et des prédictions de la simulation numérique, une investigation sur le formage incrémental à chaud des tôles en alliage de titane Ti-6Al-4V, a été menée. Une comparaison de la formabilité des pièces obtenues par des mesures de la distribution de l'épaisseur et des profils de déplacement ainsi que des efforts mise en jeux sont faites.

- Le modèle EF à chaud développé vérifie sa capacité à prédire le comportement des tôles en alliage de Titane Ti-6Al-4V travaillées par le procédé du formage incrémental à chaud.
- La simulation en EF montre que la formabilité des alliages de titane est améliorée pour une température supérieure à 400°C. Pour une plage de température 450°C on obtient des pièces en conformité dimensionnelle avec le profil programmé.
- Les résultats de la simulation EF du formage incrémental à chaud (WSPIF) confirme les résultats expérimentaux du formage du Ti-6Al-4V. L'angle de formage limite est de 57°, au-delà de cette valeur les ruptures commencent à avoir lieu.
- L'effort de formage incrémental à chaud prédit par le modèle en EF sont en conformité avec les efforts des essais expérimentaux dans les mêmes conditions pour l'alliage de titane Ti-6Al-4V. les efforts augmentent lorsque l'angle d'inclinaison de la pièce augmente. L'erreur relative moyenne des efforts expérimentaux et numérique est de l'ordre de 5%.

- L'épaisseur minimum prédit par le modèle EF diminue lorsque l'angle augmente pour atteindre des taux de réduction de 27,8 % et 44,2% respectivement pour les angles 45° et 57°. Ces résultats confirment les résultats numériques avec une erreur moyenne de l'ordre de 1.25%.
- L'amélioration de la formabilité prédite est vérifiée par des erreurs des profils prédits par le modèle en EF comparés par rapport aux profils théoriques implémentés dans le modèle. Ce qui rejoint les résultats des essais expérimentaux. Les moyennes des erreurs pour l'ensemble des pièces simulées pour différents angles ($\alpha=45^\circ, 50^\circ, 53^\circ, 55^\circ$ et 57°) sont au niveau de la base (fond de la pièce) de 2,45%, et au niveau du congé coté serre-flan est de l'ordre de 7,2%, ce qui est en agréable conformité avec les erreurs des déplacements expérimentaux au niveau de la base (fond de la pièce) de 3,25%, par contre au niveau du congé coté serre-flan est de l'ordre de 10%.
- Les résultats de la distribution de l'épaisseur pour le cas d'une pièce profonde ($h=60\text{mm}$) montrent un bon agrément pour le formage à chaud des alliages de titane. Cela vérifie que le chauffage améliore la ductilité du matériau, et on arrive à faire des pièces profondes allant jusque 60 mm sans rupture de la tôle.
- Pour la réalisation des prothèses crâniennes, Les principales contributions de cette partie expérimentale est l'intégration de l'approche de rétro-conception utilisant le procédé de formage incrémental à chaud afin de produire une prothèse de crâne personnalisé. Comme nous l'avons déjà observé par plusieurs auteurs, le chauffage en formage incrémental a permis d'augmenter formabilité de titane et de diminuer la réduction d'épaisseur, améliorer la conformité des produit réalisés avec ceux programmer. Il a permis aussi de diminuer l'effort de formage, ce qui permet de choisir les machines adéquates pour l'industrialisation.

Conclusion générale et Perspectives

Le formage incrémental est un procédé récent, qui s'avère particulièrement intéressant pour la petite série, le prototypage ou la réalisation de pièce à usage unique. Le manque de garantie dimensionnel des pièces formées ainsi que leur mauvais état de surface ont poussé plusieurs chercheurs à étudier ce procédé et s'investir dans la recherche des facteurs permettant son industrialisation, compte tenu de son fort potentiel en termes de flexibilité et coût,

Le domaine bio-médicale est un des domaines pour lequel le procédé de formage incrémental est très prometteur. Il permet en effet de réaliser des prothèses uniques, adaptées à chaque individu. Les alliages de titane sont très utilisés dans le domaine médical or ce matériau est très difficile à former. Les efforts de formage nécessaires lors du formage incrémental de pièces en titane étant très importants, ils limitent les possibilités de géométrie de pièces. Une des solutions pour former des pièces en titane grâce à ce procédé est de réaliser l'essai à chaud.

C'est dans ce cadre que nos recherches ont été réalisées. Le présent manuscrit présente les travaux expérimentaux et numériques menés dans ce travail de doctorat dans le but d'étudier l'effet de chauffage associé au procédé de formage incrémental pour former des pièces en alliage de titane Ti-6Al-4V. Dans ce travail une solution de chauffage du procédé est expérimentée et une modélisation en élément finis est proposée.

Le chapitre 1, réservé à la revue bibliographique porté sur la présentation du procédé de formage incrémental, l'effet de certains facteurs du procédé, et les équipements généralement utilisés pour la réalisation de ce procédé (montage ; machine ; robot). Les problèmes rencontrés par différents auteurs et les solutions qu'ils ont apportées ont été détaillés et les différentes techniques proposées dans la littérature pour rechercher les valeurs optimales des paramètres influents pour ce procédé, ont été présentées. La méthode des plans d'expérience est la plus souvent utilisée pour optimiser ces facteurs.

On a montré à travers cette revue que les alliages de titane utilisés dans le secteur médical présentent des problèmes de mise en forme avec ce procédé. La faible limite de formage à froid empêche la réalisation des pièces de géométries complexes avec des angles

d'inclinaisons importants. La solution envisagée par les chercheurs pour vaincre ce handicap est l'intégration de différentes solutions de chauffage pour le procédé de formage incrémental.

Dans le chapitre 2, on a étudié les différentes solutions expérimentales de chauffage lors du formage incrémental proposées dans la littérature. Trois familles de solutions existent :

- Des systèmes de chauffage local de la zone à déformer.
- Des systèmes de chauffage total de la tôle.
- Des systèmes de chauffage combiné.

Suite aux constats des différentes solutions évoquées, nous avons proposé un nouveau dispositif de formage incrémental à chaud. Ce dispositif utilise des cartouches chauffantes implantées dans la matrice. Le dispositif est équipé d'un thermocouple permettant la régulation en température. La solution assure un chauffage uniforme du flan jusqu'à une température de 800°C. Une campagne d'essais expérimentaux à chaud avec des tôles en alliage de titane Ti-6Al-4V a été menée en considérant une pièce de référence de forme tronconique. Les principaux résultats sont :

- La formabilité des alliages de titane est améliorée par la température ($T = 450^{\circ}\text{C}$), on obtient des pièces saines sans brulures ni ruptures et en conformités dimensionnelles avec le profil souhaité.
- La variation de l'angle d'inclinaison de la pièce pour un diamètre de l'outil et un incrément de déplacement vertical optimisés, montre que l'angle limite de formage est de $\alpha = 57^{\circ}$.
- L'effort de formage a été remarquablement diminué par l'effet du chauffage par rapport au formage à froid. L'élévation de la température de formage améliore la formabilité ainsi que la conformité des godets réalisés.
- L'épaisseur minimale diminue lorsque l'angle d'inclinaison augmente pour atteindre des taux de réduction de 28,2% et 45,2% pour les angles respectivement de 45° et 57° . Les écarts entre les profils obtenus comparés aux profils théoriques sont faibles. Cette erreur au niveau du fond du godet est de l'ordre de 3%, et au niveau du congé coté serre-flan de l'ordre de 10%.

Le chapitre 3 a été réservé à la modélisation numérique du procédé du formage incrémental des tôles minces. Une simulation par Eléments Finis sur Abaqus du procédé de formage incrémental à froid est mise en place pour optimiser les facteurs affectants le procédé. On a montré que le diamètre du poinçon et l'incrément axial ont un impact sur l'effort axial et l'épaisseur minimale atteinte. On vérifie aussi que le formage de cet alliage de titane TI-6AL-4V ayant une mauvaise ductilité s'avère délicat et on ne peut pas atteindre de grandes profondeurs lors du formage incrémental à froid d'un cône tronqué.

Le chapitre 4 a porté sur la modélisation Eléments finis du procédé à chaud et la confrontation entre les prédictions de la simulation numérique et les résultats expérimentaux. Le modèle retenu pour la simulation numérique du formage incrémental à chaud (WSPIF) est un modèle dynamique explicite avec couplage thermomécanique. On utilise le modèle de Johnson-Cook comme loi de comportement de l'alliage de titane Ti-6Al-4V à chaud. La comparaison des résultats obtenus numériquement et expérimentalement est réalisée à partir des mesures de la distribution de l'épaisseur, des profils de déplacements et de l'effort axial mis en jeu. L'analyse des différents résultats montre que :

- Le modèle EF à chaud (WSPIF) est capable de prédire correctement le comportement des tôles en alliage de titane Ti-6Al-4V mises en forme par le procédé du formage incrémental à chaud.
- Les efforts prédits par le modèle EF sont en conformité avec ceux obtenus lors des essais expérimentaux dans les mêmes conditions. Les efforts (numériques et expérimentaux) augmentent lorsque l'angle d'inclinaison de la pièce augmente. L'erreur relative moyenne entre les efforts expérimentaux et numérique est de l'ordre de 5%.
- Les résultats de la simulation E.F. montrent qu'il est possible d'améliorer la formabilité des alliages de titane grâce à une élévation de la température, ce qui avait été démontré expérimentalement.
- Les erreurs des profils prédits par le modèle en EF comparés aux profils théoriques sont faibles (2,45%, et au niveau du congé et 7,2% pour le fond). Ce résultat est cohérent avec l'expérience (3,25%, et au niveau du congé et 10% pour le fond).

Cette comparaison montre la fiabilité des résultats numériques et permet de valider le modèle EF.

Dans ce dernier chapitre, on s'est ensuite intéressé au formage incrémental à chaud d'une prothèse de crâne humain en titane en utilisant une approche d'ingénierie inverse. On part d'un crâne humain (nécessitant une reconstruction chirurgicale) que l'on scanne pour obtenir un modèle CAO personnalisé, à partir duquel on réalise par formage incrémental à chaud la prothèse crânienne en alliage de titane spécifique au patient. Le contrôle dimensionnel de la prothèse crânienne fabriquée à différentes températures a permis de vérifier que le chauffage lors du formage incrémental permet de diminuer l'effort de formage, d'augmenter la formabilité de titane, diminuer la réduction d'épaisseur, et améliorer la conformité des pièces réalisées.

Perspectives

La synthèse des différents résultats évoqués dans ce manuscrit nous permet d'envisager des perspectives qui pourront faire l'objet de futurs travaux. Ces perspectives peuvent être classées en trois catégories.

- Une étude microstructurale des pièces réalisées avec le procédé de formage incrémental à chaud pour vérifier l'intégrité des pièces soumises à des grandes déformations associées à un gradient de température. Des essais de caractérisation mécanique (dureté...) permettraient aussi de contrôler l'état de surface des pièces produites.
- Une paramétrisation du procédé de formage incrémental à chaud. Une campagne d'essais pourrait être menée en exploitant le dispositif expérimental pour déterminer les paramètres optimums associés à chaque matériau. Une base de données pourrait ainsi être créée et permettrait de choisir les facteurs adéquats au procédé.

- L'amélioration du modèle utilisé lors de la simulation numérique. Le modèle ne tient pas compte de l'anisotropie plastique de l'alliage de titane. Il serait nécessaire de l'intégrer dans le modèle. De plus le modèle de comportement était de type thermo-élasto-plastique. Un modèle de Johnson-Cook a été utilisé mais elle ne prend pas en compte l'endommagement. Un modèle de comportement avancé avec endommagement permettra de prédire l'amorce de rupture.

Nomenclature et lexique

Nomenclature

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$: Déformations principales maximales
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Contraintes principales
 Δz : Incrément axial du poinçon
 $\Delta x, \Delta y$: Incréments horizontaux du poinçon
 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$: Contraintes normale
 τ : Contrainte de cisaillement
 σ : Limite d'élasticité vraie
 σ_0 : La limite élastique initiale
 σ_{eq} : Contrainte équivalente
 σ_y : la limite d'élasticité critique
 $R_{p0.2}$: Limite d'élasticité conventionnelle
 R_m : Contrainte avant striction
 $A\%$: Allongement à rupture
 $\bar{\varepsilon}^{pl}$: La déformation plastique équivalente
 $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$: le taux de déformation plastique équivalente
 $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$: le taux de déformation plastique équivalente de référence
 ν : Coefficient de poisson
 n, K : Paramètres de la loi d'érouissage de Swift
 A, B, C, n, m : Paramètres du modèle de Johnson-Cook
 d_p : Diamètre du poinçon
 α : Angle d'inclinaison de la pièce conique
 β : Angle d'inclinaison extérieur de la pièce conique ($\beta = 90 - \alpha$)
 t : Epaisseur de la tôle
 t_i : Epaisseur initiale de la tôle
 t_f : Epaisseur de la tôle après formage
 t_{exp} : épaisseur expérimentale (mm)
 t_{num} : épaisseur numérique (mm)
 r_c : Rayon de congés de la pièce conique
 h : La profondeur de la pièce
 $\varnothing D$: Le grand diamètre de la pièce conique
 F_x, F_y, F_z, F_{resul} : Composantes de la force de formage
 P_{sflan} : Pression du serre flan
 F_{sflan} : Effort du serre flan
 $U_{exp}, U_{num}, U_{the}$: Déplacement, théorique, expérimentale et numérique(mm)
 N : Vitesse de rotation de l'outil en(tr/mn)
 V_f : Vitesse d'avance de l'outil en (mm/mn)
 R_a, R_z : La rugosité
 T, T_r, T_m : Températures
 ε_f : la valeur de la déformation plastique de la rupture
 Q_E : Le flux de chaleur généré
 I : le courant appliqué
 $R_{contact}$: la constante de résistance
 $a_i ; b_i$: coefficient de polynômes

Lexique

SPIF	: Single Point Incremental Forming
TPIF	: Two Point Incremental Forming
WSPIF	: Warm Single Point Incremental Forming
CAO	: Fabrication Assistée par Ordinateur
FAO	: Conception Assistée par Ordinateur
CFAO	: Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur
MOCN	: Machine-Outil à Commandes Numériques
CNC	: Calculateur de Commande Numérique
AISF	: Asymetric Incremental Sheet Forming
EF	: Élément finis
CLF	: Courbes Limites de Formage
MMT	: Machine à Mesurer Tridimensionnelle
CFC	: Cubique face centré
J-C	: Johnson Cook

Table des figures

Figure I-1. Schéma de principe du procédé de formage incrémental à un point SPIF	6
Figure I-2. Principe du formage incrémental	7
Figure I-3. Principe du formage incrémental à un point	8
Figure I-4. Formage incrémental asymétrique : (a)-Principe du formage négatif SPIF (b)-Principe du formage positif TPIF	9
Figure I-5. Principe du formage incrémental à deux points TPIF	10
Figure I-6. Dispositif et chaîne d'acquisition des efforts de formage incrémental [18]	11
Figure I-7. Quelques dispositifs utilisés par les chercheurs lors des essais	12
Figure I-8. Dispositif de formage incrémental à deux points TPIF [31]	12
Figure I-9. poinçon en acier X160CrMoV12 de dureté 55HRC	13
Figure I-10. Exemple de montage SPF et structure de la machine associée	13
Figure I-11. Montage de SPIF sur une MOCN [18]	14
Figure I-12. Montage de TPIF sur une MOCN	14
Figure I-13. La machine de formage incrémental développée par AMINO	15
Figure I-14. Robot à structure en série d'usinage CETIM S4	16
Figure I-15. Robot à structure parallèle Tricept H1	16
Figure I-16. Poinçons avec des rouleaux sphériques et cylindriques [12, 13]	17
Figure I-17. Poinçons avec des rouleaux sphériques et cylindriques [36]	18
Figure I-18. Variations de la forme et des dimensions de la tête du poinçon [37]	19
Figure I-19. Les parcours possibles de l'outil [59]	21
Figure I-20. jauges de mesurage de forces et évolution des forces de formage SPIF [8]	24
Figure I-21. Evolution des composantes de force F_x , F_y et F_z [74]	24
Figure I-22. Influence de l'angle d'inclinaison α et du diamètre de l'outil D_p sur la force	24
Figure I-23. Erreurs des profils en fonction du diamètre du poinçon [77]	25
Figure I-24. Les trois zones de la distribution de l'épaisseur cas d'une pièce conique ($\alpha=55^\circ$)	26
Figure I-25. Application de la loi sinus sur l'épaisseur dans la zone déformée [8]	27
Figure I-26. Courbe limite de formage CLF du formage incrémental [8]	29
Figure I-27. Influence de l'incrément axial Δz sur la formabilité [8]	30
Figure I-28. Influence de diamètre de l'outil sur la formabilité [8]	30
Figure I-29. Influences des facteurs (Δz), (D_p) et (α) sur la rugosité [8]	31
Figure II-1. Système de chauffage du montage de formage SPIF [17]	35
Figure II-2. Allure des efforts à des températures différentes [17]	35
Figure II-3. Améliorations de la formabilité au niveau du fond par l'effet de la température. [89]	37
Figure II-4. Comparaison des profondeurs maximale des deux alliages de titane [92]	38

Figure II-5. Pièces obtenues avec variation des paramètres de travail [12]	42
Figure II-6. Variation des efforts en fonction de la variation des paramètres d'essais [12]	42
Figure II-7. Technique de chauffage combinée du procédé SPIF [46]	43
Figure II-8. Les profils des pièces coniques obtenues sous diverses vitesses de rotation [46]	44
Figure II-9. Montage de formage incrémental à chaud avec des cartouches chauffantes	48
Figure II-10. Les différents composants du montage de formage incrémental à chaud	49
Figure II-11. Montage du Dispositif (WSPIF) sur le centre d'usinage CNC	50
Figure II-12. Schéma de montage et de régulation du dispositif WSPIF	50
Figure II-13. Montage et essai mené par le dispositif de formage incrémental à chaud	51
Figure II-14. Le capteur de force multi-composant FN7325	51
Figure II-15. Les poinçons utilisés, de diamètres ($d_p = 5, 8, 10, 15$ et 20)	52
Figure II-16. Le centre d'usinage CNC MAHO- MH 1000 E	53
Figure II-17. Tôle de l'alliage de titane Ti-6Al-4V 2 ($e = 0.5\text{mm}$)	53
Figure II-18. La caméra infrarouge IRISYS 4000 et le logiciel de traitement d'image	54
Figure II-19. Le scanner Laser METRIS MCA 24 Portable Measuring	54
Figure II-20. La machine MMT-ALTERA-10.7.6- Ceramic Technology	55
Figure II-21. Pièce de référence de forme d'un cône tronqué	56
Figure II-22. Génération de la trajectoire à implémenter sur la machine CNC à partir de la pièce	56
Figure II-23. Effort axial de formage du Ti-6Al-4V à froid cas ($\Delta z = 1\text{mm}$, $d_p = 10\text{mm}$)	57
Figure II-24. Effort axial de formage du Ti-6Al-4V à froid ($\Delta z = 0,5\text{mm}$, $d_p = 15\text{mm}$)	57
Figure II-25. Dessin montrant la mesure de l'angle (θ)	59
Figure II-26. Courbe des efforts axiaux des essais E1, E2, E3 et E4	61
Figure II-27. Courbes des efforts axiaux des essais E5, E6, E7 et E8	62
Figure II-28. Diagramme de Pareto standardisé des effets des 4 facteurs et leurs interactions	62
Figure II-29. Vérification de normalité des facteurs du plan et leurs interactions	63
Figure II-30. Pièces en alliage d'aluminium obtenues par formage incrémental à chaud	64
Figure II-31. Pièces obtenues par le dispositif (WSPIF) à différentes températures	65
Figure II-32. Pièces réalisées à une température de 450°C	66
Figure II-33. Pièces obtenues avec formage incrémental à chaud à différents angles d'essais	67
Figure II-34. Les quatre plans de palpation avec la MMT	68
Figure II-35. Palpation et mesure des deux faces de la pièce selon les quatre plans	68
Figure II-36. Distribution des épaisseurs expérimentales (t) selon les 4 plans de coupes	69
Figure II-37. Profils des déplacements (U) selon les 4 plans de coupe	70
Figure II-38. Erreurs relatives des déplacements (U) comparés à $U-x, x$ selon les plans de coupe	70
Figure II-39. Distribution des épaisseurs pour $\alpha = 45^\circ$; $h = 40\text{mm}$; $T = 450^\circ\text{C}$	71
Figure II-40. Distribution des épaisseurs pour $\alpha = 50^\circ$; $h = 40\text{mm}$; $T = 450^\circ\text{C}$	71
Figure II-41. Distribution des épaisseurs pour $\alpha = 53^\circ$; $h = 40\text{mm}$; $T = 450^\circ\text{C}$	72

Figure II-42. Distribution des épaisseurs pour $\alpha=55^\circ$; $h=40\text{mm}$; $T=450^\circ\text{C}$	72
Figure II-43. Distribution des épaisseurs pour $\alpha=57^\circ$; $h=40\text{mm}$; $T=450^\circ\text{C}$	73
Figure II-44. Evolution de l'épaisseur minimale (t_{\min}) en fonction de l'angle(α)	73
Figure II-45. Profils des formes réelles - expérimentales pour $\alpha=45^\circ$	74
Figure II-46. Profils des formes réelles - expérimentales pour $\alpha=50^\circ$	75
Figure II-47. Profils des formes réelles - expérimentales pour $\alpha=53^\circ$	75
Figure II-48. Profils des formes réelles - expérimentales pour $\alpha=55^\circ$	76
Figure II-49. Profils des formes réelles - expérimentales pour $\alpha=57^\circ$	76
Figure II-50. Erreurs relatives entre ($U_{\text{exp}}/U_{\text{the}}$) au niveau du congé	77
Figure II-51. Erreurs relatives entre ($U_{\text{exp}}/U_{\text{the}}$) au niveau du fond de la pièce	77
Figure II-52. Courbe des efforts F_z pour $\alpha=45^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$	78
Figure II-53. Courbe des efforts F_z pour $\alpha=50^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$	78
Figure II-54. Courbe des efforts F_z pour $\alpha=53^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$	79
Figure II-55. Courbe des efforts F_z pour $\alpha=55^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$	79
Figure II-56. Courbe des efforts F_z pour $\alpha=57^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$	80
Figure II-57. Évolution de l'effort maximale de formage en fonction de l'angle	80
Figure III-1. Modèle EF de micro SPIF avec un flan en éléments solides 3D [82]	85
Figure III-2. Simulation numérique en éléments de coque utilisant le code LS-DYNA[64]	86
Figure III-3. Les pièces constituant la modélisation du SPIF	88
Figure III-4. Modélisation en EF du procédé de formage incrémental à froid	89
Figure III-5. Courbe de traction contrainte-déformation de l'alliage de titane Ti-6Al-4V	90
Figure III-6. Génération de la Trajectoire de l'outil par Catia	91
Figure III-7. Répartition de l'épaisseur sur la pièce conique	91
Figure III-8. Répartition des déplacements axiaux sur la pièce conique	92
Figure III-9. Effet du diamètre du poinçon sur l'effort de formage F_z	92
Figure III-10. Effet du diamètre du poinçon sur la distribution de l'épaisseur	93
Figure III-11. La pièce de référence retenue pour la simulation numérique	94
Figure III-12. Schéma de la simulation, création de la trajectoire et obtention des résultats	95
Figure III-13. La distribution de l'épaisseur selon un plan radial ($d_p=10\text{ mm}$ et $\Delta z=0,5\text{mm}$)	95
Figure III-14. Courbe de l'effort axial et la valeur maximale atteinte cas ($d_p=12,5\text{mm}$ et $\Delta Z=0,5\text{mm}$)	96
Figure III-15. Surface de réponse de la force maximale	98
Figure III-16. Surface de réponse de l'épaisseur minimale	98
Figure III-17. Effet du diamètre (d_p) et de l'incrément axial (Δz) l'effort maximal	99
Figure III-18. Effet du diamètre (d_p) de l'incrément (Δz) du poinçon sur l'épaisseur minimale	99
Figure III-19. PARETO de l'effet du diamètre (d_p) et de l'incrément (Δz) sur l'effort (F_z)	100
Figure III-20. PARETO de l'effet du diamètre (d_p) et de l'incrément (Δz) sur l'épaisseur (t)	100

Figure III-21. Distributions de probabilités normales pour le cas de la force et l'épaisseur.	101
Figure IV-1. Forme de la pièce et trajectoire en spirale de l'outil [12].	105
Figure IV-2. Distribution de la température et de l'effort de formage [12].	106
Figure IV-3. Modèle EF du SPIF avec chauffage focalisé laser [23].	107
Figure IV-4. Modèle en EF du formage incrémental à chaud.	109
Figure IV-5. Dessin de définition de la matrice.	111
Figure IV-6. Géométrie de la pièce tronconique.	112
Figure IV-7. Simulation numérique de la pièce tronconique.	113
Figure IV-8. Les plans de coupe de la pièce conique d'angle ($\alpha = 50^\circ$).	114
Figure IV-9. Épaisseurs prédites de la pièce tronconique sur les quatre plans ($\alpha=50^\circ$).	114
Figure IV-10. Les profils prédits de la pièce tronconique selon les quatre plans ($\alpha=50^\circ$).	115
Figure IV-11. Effet de l'angle de la pièce tronconique sur l'élévation de la température.	116
Figure IV-12. Distributions des épaisseurs expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=45^\circ$).	118
Figure IV-13. Distributions des épaisseurs expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$).	119
Figure IV-14. Distributions des épaisseurs expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=53^\circ$).	119
Figure IV-15. Distributions des épaisseurs expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=55^\circ$).	120
Figure IV-16. Distributions des épaisseurs expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=57^\circ$).	120
Figure IV-17. Évolution de t_{\min} (expérimentale et numérique) en fonction de l'angle.	121
Figure IV-18. Erreur relative entre les épaisseurs minimales (t_{num}) et (t_{exp}).	121
Figure IV-19. Profils des formes théorique, expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=45^\circ$).	122
Figure IV-20. Profils des formes théorique, expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$).	123
Figure IV-21. Profils des formes théorique, expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=53^\circ$).	123
Figure IV-22. Profils des formes théorique, expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=55^\circ$).	124
Figure IV-23. Profils des formes théorique, expérimentale et numérique : ($h=40\text{mm}$, $\alpha=57^\circ$).	124
Figure IV-24. Erreurs relatives entre ($U_{\text{num}}/U_{\text{the}}$) et ($U_{\text{exp}}/U_{\text{the}}$) au niveau du congé.	125
Figure IV-25. Erreurs relatives entre ($U_{\text{num}}/U_{\text{the}}$) et ($U_{\text{exp}}/U_{\text{the}}$) au niveau du fond de la pièce.	126
Figure IV-26. Courbes des efforts F_z , expérimentale et numérique $\alpha=45^\circ$	127
Figure IV-27. Courbes des efforts F_z , expérimentale et numérique $\alpha=50^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$	128
Figure IV-28. Courbes des efforts F_z , expérimentale et numérique $\alpha=53^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$	128
Figure IV-29. Courbes des efforts F_z , expérimentale et numérique $\alpha=55^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$	129
Figure IV-30. Courbes des efforts F_z , expérimentale et numérique $\alpha=57^\circ$ à $T = 450^\circ\text{C}$	129
Figure IV-31. Evolution des efforts expérimental et numérique maximums en fonction de l'angle.	130
Figure IV-32. Erreur relative entre les efforts ($F_{z\text{-num}}$, $F_{z\text{-exp}}$) en fonction de l'angle (α).	131
Figure IV-33. Pièces coniques en Ti-6Al-4V obtenu par WSPIF ($T=450^\circ\text{C}$, $\alpha=50^\circ$).	133
Figure IV-34. Distribution des épaisseurs expérimentale et numérique ($h=60\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$).	134
Figure IV-35. Profils expérimental et numérique ($h=60\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$).	135

<i>Figure IV-36. Erreur relative U_{exp}/U_{the} et U_{num}/U_{the} cas ($h=60mm$, $\alpha=50^\circ$).....</i>	<i>136</i>
<i>Figure IV-37. Comparaison des profils expérimental et numérique ($h=40mm$, $h=60mm$).....</i>	<i>137</i>
<i>Figure IV-38. Démarche de rétroconception de prothèse de crane avec WSPIF.....</i>	<i>139</i>
<i>Figure IV-39. Scan 3D du crane par le scanner Laser METRIS-MCA-20.....</i>	<i>139</i>
<i>Figure IV-40. Reconstruction de la prothèse crânienne par le nuage de points</i>	<i>140</i>
<i>Figure IV-41. Modèle CAO de la prothèse crânienne et de la trajectoire du poinçon.....</i>	<i>140</i>
<i>Figure IV-42. Prothèses réalisées et réparation de la température lors du formage</i>	<i>142</i>
<i>Figure IV-43. Les allures des efforts de formage axial pour différentes températures</i>	<i>143</i>
<i>Figure IV-44. La distribution de l'épaisseur pour ($T = 30^\circ C$ et $T = 130^\circ C$).....</i>	<i>144</i>
<i>Figure IV-45. Profils des déplacements à différentes température d'essais</i>	<i>145</i>
<i>Figure IV-46. Simulation de la prothèse crânienne à la température de $130^\circ C$.....</i>	<i>145</i>
<i>Figure IV-47. Distributions des épaisseur numérique et expérimentale selon l'axe x.....</i>	<i>146</i>
<i>Figure IV-48. Comparaison entre le profil numérique et du profil numérique</i>	<i>147</i>

Liste des tableaux

Tableau I-1. Tableau récapitulatif des diamètres de poinçons utilisés par les auteurs	19
Tableau I-2 .Les différentes valeurs de l'incrément (Δz) utilisées par les auteurs	22
Tableau I-3. Différent angles limites des métaux en formage incrémental SPIF	28
Tableau II-1. Recueil des des solutions de chauffage du procédé de formage incrémental (WSPIF)	46
Tableau II-2. Les fonctions de service du dispositif de formage incrémental à chaud.....	48
Tableau II-3. Les caractéristiques de la machine MAHO -MH 1000 E	52
Tableau II-4. Les caractéristiques mécaniques du l'alliage de titane Ti-6Al-4V.....	53
Tableau II-5. Conditions d'essais avec variation de l'incrément axial et du diamètre du poinçon	58
Tableau II-6. Les caractéristiques mécaniques de l'inox 304L	59
Tableau II-7. Les facteurs du plan d'expérience de Taguchi (L8)	60
Tableau II-8. Les contraintes du domaine d'étude relatives au plan d'expérience.....	60
Tableau II-9. Plan d'expérience de Taguchi (L8) et les valeurs maximales des forces mesurées.....	61
Tableau II-10. Les conditions d'essais en variant l'angle de pièce conique	66
Tableau II-11. Les principaux résultats expérimentaux du formage incrémental à chaud.....	82
Tableau III-1. Les propriétés mécaniques du Ti-6Al-4V.....	89
Tableau III-2. Composition chimique de l'alliage de Titane Ti-6Al-4V.....	89
Tableau III-3. Propriétés mécaniques de l'alliage de titane Ti-6Al-4V, paramètres du modèle.....	90
Tableau III-4. Plan d'expérience avec trois facteurs et deux niveaux	94
Tableau III-5. Plan d'expérience et les résultats associés	96
Tableau III-6. Les coefficients a_i et b_i des fonctions polynomiales obtenus	97
Tableau III-7. Effets des facteurs sur la force de formage et l'épaisseur.....	101
Tableau III-8. les paramètres optimums de formage retenus	103
Tableau IV-1. Composition chimique de l'alliage de Titane Ti-6Al-4V.....	110
Tableau IV-2. Propriétés mécaniques de l'alliage de titane Ti-6Al-4V[107]	110
Tableau IV-3. Les propriétés thermiques de l'alliage de titane Ti-6Al-4V[107]	110
Tableau IV-4. Les paramètres de la loi Johnson-Cook de l'alliage de titane Ti-6Al-4V [100]	111
Tableau IV-5. Les conditions de la simulation numérique du formage incrémental ($\alpha=50^\circ$).....	112
Tableau IV-6. Conditions du formage incrémental avec angle (α) variable.....	116
Tableau IV-7. Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation pour différents angles.....	117
Tableau IV-8. Principaux résultats de la comparaison numérique/expérimentale du WSPIF	132
Tableau IV-9. Comparaison des résultats de la pièce conique en Ti-6Al-4V ($h=60\text{mm}$, $\alpha=50^\circ$).....	137
Tableau IV-10. Conditions de réalisation de la prothèse crânienne	141
Tableau IV-11. Valeur des Forces maximales de formage pour différentes températures.....	143
Tableau IV-12. écart moyen entre le profil expérimentale et théorique ($U_{\text{exp}}/U_{\text{the}}$).....	145

Références Bibliographiques

- [1] G. Ambrogio, L. De Napoli, L. Filice, F. Gagliardi, et M. Muzzupappa, « Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 162-163, p. 156-162, mai 2005.
- [2] S. Gatea, H. Ou, et G. McCartney, « Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 87, n° 1-4, p. 479-499, oct. 2016.
- [3] Y. Li *et al.*, « A review on the recent development of incremental sheet-forming process », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, n° 5-8, p. 2439-2462, sept. 2017.
- [4] L. Filice, G. Ambrogio, et F. Micari, « On-Line Control of Single Point Incremental Forming Operations through Punch Force Monitoring », *CIRP Ann.*, vol. 55, n° 1, p. 245-248, 2006.
- [5] G. Ambrogio, I. Costantino, L. De Napoli, L. Filice, L. Fratini, et M. Muzzupappa, « Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 153-154, p. 501-507, nov. 2004.
- [6] M. Bambach, « A geometrical model of the kinematics of incremental sheet forming for the prediction of membrane strains and sheet thickness », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, n° 12, p. 1562-1573, sept. 2010.
- [7] Y. H. Ji et J. J. Park, « Incremental forming of free surface with magnesium alloy AZ31 sheet at warm temperatures », *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 18, p. s165-s169, déc. 2008.
- [8] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, et J. Allwood, « Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal », *CIRP Ann.*, vol. 54, n° 2, p. 88-114, 2005.
- [9] J. Jeswiet *et al.*, « Metal forming progress since 2000 », *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 1, n° 1, p. 2-17, 2008.
- [10] B. Jérémy, « Développement d'une approche couplée matériau / structure machine : application au formage incrémental robotisé », génie mécanique, INSA Rennes, Rennes, 2013.
- [11] B. Saidi, A. Boulila, M. Ayadi, et R. Nasri, « Experimental force measurements in single point incremental sheet forming SPIF », *Mech. Ind.*, vol. 16, n° 4, p. 410, 2015.
- [12] M. Honarpisheh, M. J. Abdolhoseini, et S. Amini, « Experimental and numerical investigation of the hot incremental forming of Ti-6Al-4V sheet using electrical current », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, n° 9-12, p. 2027-2037, avr. 2016.
- [13] M. Honarpisheh, M. Mohammadi Jobedar, et I. Alinaghian, « Multi-response optimization on single-point incremental forming of hyperbolic shape Al-1050/Cu bimetal using response surface methodology », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, févr. 2018.

-
- [14] L. Edward, « Apparatus and process for incremental dieless forming », *09/19/1967*, sept-1967.
- [15] H. Iseki, « An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller », *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 111, n° 1-3, p. 150-154, 2001.
- [16] H. Iseki et T. Naganawa, « Vertical wall surface forming of rectangular shell using multistage incremental forming with spherical and cylindrical rollers », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 130-131, p. 675-679, déc. 2002.
- [17] G. Ambrogio, L. Filice, et G. L. Manco, « Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31 », *CIRP Ann.*, vol. 57, n° 1, p. 257-260, 2008.
- [18] B. Saidi, *Prédiction des efforts de formage incrémental à un point SPIF*. Editions universitaires européennes, 2015.
- [19] B. Saidi, A. Boulifa, R. Nasri, et M. Ayadi, « Effets des paramètres de travail, du procédé de formage incrémental à un point SPIF sur le comportement des efforts de formage. », présenté à COTUME'2014, Sousse Tunisie, 2014.
- [20] S. Dejardin, S. Thibaud, J. C. Gelin, et G. Michel, « Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for sheet metal parts », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, n° 2, p. 363-369, janv. 2010.
- [21] M. Durante, A. Formisano, et A. Langella, « Comparison between analytical and experimental roughness values of components created by incremental forming », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, n° 14, p. 1934-1941, nov. 2010.
- [22] J. Liu, W. Zeng, Y. Lai, et Z. Jia, « Constitutive model of Ti17 titanium alloy with lamellar-type initial microstructure during hot deformation based on orthogonal analysis », *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 597, p. 387-394, mars 2014.
- [23] A. Mohammadi, H. Vanhove, A. Van Bael, et J. R. Duflou, « Towards accuracy improvement in single point incremental forming of shallow parts formed under laser assisted conditions », *Int. J. Mater. Form.*, vol. 9, n° 3, p. 339-351, juill. 2016.
- [24] N. Decultot, « Formage incrémental de tôle d'aluminium : étude du procédé à l'aide de la mesure de champs et identification de modèles de comportement », UNIVERSITE DE TOULOUSE FRANCE, 2009.
- [25] Y. Yan, « CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT D'UNE APPROCHE SIMPLIFIÉE DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE DU FORMAGE INCRÉMENTAL », Université de Lorraine France, 2014.
- [26] J. RAUJOL-VEILLÉ, « Simulation d'un procédé de formage incrémental. Application sur une étude de cas industriel. », UNIVERSITÉ DE GRENOBLE -FRANCE, 2006.
- [27] J. M. Allwood, D. Braun, et O. Music, « The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, n° 11, p. 1501-1510, août 2010.
-

-
- [28] G. Hirt, J. Ames, M. Bambach, R. Kopp, et R. Kopp, « Forming strategies and Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming », *CIRP Ann.*, vol. 53, n° 1, p. 203-206, 2004.
- [29] Y. Kim et J. Park, « Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 130-131, p. 42-46, déc. 2002.
- [30] B. Saidi, A. Boulifa, et M. Ayadi, « Prédiction des efforts de formage incrémental à un point SPIF de l'inox 304 L », présenté à CRATT 2012, Rades Tunisie, 2012.
- [31] B. T. Araghi, G. L. Manco, M. Bambach, et G. Hirt, « Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming », *CIRP Ann.*, vol. 58, n° 1, p. 225-228, 2009.
- [32] M. Sasso, M. Callegari, et D. Amodio, « Incremental forming: an integrated robotized cell for production and quality control », *Meccanica*, vol. 43, n° 2, p. 153-163, avr. 2008.
- [33] S. P. Shanmuganatan et V. S. Senthil Kumar, « Modeling of Incremental Forming Process Parameters of Al 3003 (O) by Response Surface Methodology », *Procedia Eng.*, vol. 97, p. 346-356, 2014.
- [34] C. Raju et C. Sathiya Narayanan, « Application of a hybrid optimization technique in a multiple sheet single point incremental forming process », *Measurement*, vol. 78, p. 296-308, janv. 2016.
- [35] B. Saidi, L. Giraud-Moreau, et A. Cherouat, « Optimization of the single point incremental forming process for titanium sheets by using response surface », *MATEC Web Conf.*, vol. 80, p. 10011, 2016.
- [36] B. Lu *et al.*, « Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool », *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 85, p. 14-29, oct. 2014.
- [37] Cawley B., Adams D., and Jeswiet J., « Examining Tool Shapes in Single Point Incremental Forming », présenté à Proceedings of NAMRI/SME, Vol. 41, 2013, 2013.
- [38] G. Centeno, I. Bagudanch, A. J. Martínez-Donaire, M. L. García-Romeu, et C. Vallellano, « Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming », *Mater. Des.*, vol. 63, p. 20-29, nov. 2014.
- [39] I. Bagudanch, M. L. Garcia-Romeu, G. Centeno, A. Elías-Zúñiga, et J. Ciurana, « Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 219, p. 221-229, mai 2015.
- [40] J. R. Dufloy, H. Vanhove, J. Verbert, J. Gu, I. Vasilakos, et P. Eyckens, « Twist revisited: Twist phenomena in single point incremental forming », *CIRP Ann.*, vol. 59, n° 1, p. 307-310, 2010.
- [41] C. F. Guzmán, J. Gu, J. Dufloy, H. Vanhove, P. Flores, et A. M. Habraken, « Study of the geometrical inaccuracy on a SPIF two-slope pyramid by finite element simulations », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 49, n° 25, p. 3594-3604, déc. 2012.

-
- [42] R. Hino, K. Kawabata, et F. Yoshida, « Incremental Forming with Local Heating by Laser Irradiation for Magnesium Alloy Sheet », *Procedia Eng.*, vol. 81, p. 2330-2335, 2014.
- [43] D. Xu, B. Lu, T. Cao, J. Chen, H. Long, et J. Cao, « A Comparative Study on Process Potentials for Frictional Stir- and Electric Hot-assisted Incremental Sheet Forming », *Procedia Eng.*, vol. 81, p. 2324-2329, 2014.
- [44] J. M. C. Soeiro, C. M. A. Silva, M. B. Silva, et P. A. F. Martins, « Revisiting the formability limits by fracture in sheet metal forming », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 217, p. 184-192, mars 2015.
- [45] Q. Zhang *et al.*, « Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 Sheet: New lubricating method », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, n° 2, p. 323-329, janv. 2010.
- [46] G. Palumbo et M. Brandizzi, « Experimental investigations on the single point incremental forming of a titanium alloy component combining static heating with high tool rotation speed », *Mater. Des.*, vol. 40, p. 43-51, sept. 2012.
- [47] G. Ambrogio, F. Gagliardi, S. Bruschi, et L. Filice, « On the high-speed Single Point Incremental Forming of titanium alloys », *CIRP Ann.*, vol. 62, n° 1, p. 243-246, 2013.
- [48] M. Otsu, M. Yasunaga, M. Matsuda, et K. Takashima, « Friction Stir Incremental Forming of A2017 Aluminum Sheets », *Procedia Eng.*, vol. 81, p. 2318-2323, 2014.
- [49] A. Daleffe, L. Schaeffer, D. Fritzen, et J. Castelan, « Analysis of the Incremental Forming of Titanium F67 Grade 2 Sheet », *Key Eng. Mater.*, vol. 554-557, p. 195-203, juin 2013.
- [50] S. Kurra, N. Hifzur Rahman, S. P. Regalla, et A. K. Gupta, « Modeling and optimization of surface roughness in single point incremental forming process », *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 4, n° 3, p. 304-313, juill. 2015.
- [51] B. Saidi, L. Giraud-Moreau, A. Boulila, A. Cherouat, et R. Nasri, « Experimental and Numerical Study on Force Reduction in SPIF by Using Response Surface », in *Design and Modeling of Mechanical Systems—III*, Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 835-844.
- [52] J. Jeswiet, D. Adams, M. Doolan, T. McAnulty, et P. Gupta, « Single point and asymmetric incremental forming », *Adv. Manuf.*, vol. 3, n° 4, p. 253-262, déc. 2015.
- [53] D. Xu, W. Wu, R. Malhotra, J. Chen, B. Lu, et J. Cao, « Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming », *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 73, p. 37-46, oct. 2013.
- [54] K. Hamilton et J. Jeswiet, « Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences », *CIRP Ann.*, vol. 59, n° 1, p. 311-314, 2010.
- [55] K. Hamilton et J. Jeswiet, « Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences », *CIRP Ann.*, vol. 59, n° 1, p. 311-314, 2010.
-

-
- [56] M. Durante, A. Formisano, A. Langella, et F. M. Capece Minutolo, « The influence of tool rotation on an incremental forming process », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, n° 9, p. 4621-4626, mai 2009.
- [57] S. Kurra, N. Hifzur Rahman, S. P. Regalla, et A. K. Gupta, « Modeling and optimization of surface roughness in single point incremental forming process », *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 4, n° 3, p. 304-313, juill. 2015.
- [58] M. Dakhli, A. Boulila, et Z. Tourki, « Effect of generatrix profile on single-point incremental forming parameters », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 93, n° 5-8, p. 2505-2516, nov. 2017.
- [59] M. Azouazi, « modélisation et optimisation de l'emboutissage de pièces de précision en tolérances fines », Ecole doctorale EMMA Lorraine, 2007.
- [60] R. Malhotra, L. Xue, T. Belytschko, et J. Cao, « Mechanics of fracture in single point incremental forming », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, n° 7, p. 1573-1590, juill. 2012.
- [61] B. Valoppi *et al.*, « On the Fracture Characterization in Double-Sided Incremental Forming of Ti6Al4V Sheets at Elevated Temperatures », *Procedia Manuf.*, vol. 10, p. 407-416, 2017.
- [62] M. Honarpisheh et A. Gheysarian, « An Experimental Study on the process parameters of Incremental Forming of Explosively-Welded Al/Cu Bimetal », *J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng. JCARME*, n° 1, août 2017.
- [63] K. A. Al-Ghamdi et G. Hussain, « Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: Experimental and FE investigations », *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 88, p. 82-94, janv. 2015.
- [64] Y. Fang, B. Lu, J. Chen, D. K. Xu, et H. Ou, « Analytical and experimental investigations on deformation mechanism and fracture behavior in single point incremental forming », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, n° 8, p. 1503-1515, août 2014.
- [65] G. Ingarao, H. Vanhove, K. Kellens, et J. R. Dufloy, « A comprehensive analysis of electric energy consumption of single point incremental forming processes », *J. Clean. Prod.*, vol. 67, p. 173-186, mars 2014.
- [66] G. Ambrogio, G. Ingarao, F. Gagliardina, et R. Di Lorenzo, « Analysis of Energy Efficiency of Different Setups Able to Perform Single Point Incremental Forming (SPIF) Processes », *Procedia CIRP*, vol. 15, p. 111-116, 2014.
- [67] D. Xu, B. Lu, T. Cao, J. Chen, H. Long, et J. Cao, « A Comparative Study on Process Potentials for Frictional Stir- and Electric Hot-assisted Incremental Sheet Forming », *Procedia Eng.*, vol. 81, p. 2324-2329, 2014.
- [68] I. Bagudanch, G. Centeno, C. Vallellano, et M. L. Garcia-Romeu, « Forming Force in Single Point Incremental Forming under Different Bending Conditions », *Procedia Eng.*, vol. 63, p. 354-360, 2013.
-

-
- [69] Q. Zhang *et al.*, « Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 Sheet: New lubricating method », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, n° 2, p. 323-329, janv. 2010.
- [70] G. Ambrogio, V. Cozza, L. Filice, et F. Micari, « An analytical model for improving precision in single point incremental forming », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 191, n° 1-3, p. 92-95, août 2007.
- [71] A. Tabei, F. H. Abed, G. Z. Voyiadjis, et H. Garmestani, « Constitutive modeling of Ti-6Al-4V at a wide range of temperatures and strain rates », *Eur. J. Mech. - ASolids*, vol. 63, p. 128-135, mai 2017.
- [72] I. Ulacia *et al.*, « Warm Forming of Mg Sheets: From Incremental to Electromagnetic Forming », *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 45, n° 8, p. 3362-3372, juill. 2014.
- [73] K. P. Jackson, J. M. Allwood, et M. Landert, « Incremental forming of sandwich panels », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 204, n° 1-3, p. 290-303, août 2008.
- [74] J. Dufloy, Y. Tunçkol, A. Szekeres, et P. Vanherck, « Experimental study on force measurements for single point incremental forming », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 189, n° 1-3, p. 65-72, juill. 2007.
- [75] S. Boudhaouia, M. A. Gahbiche, E. Giraud, Y. Ayed, W. B. Salem, et P. D. Santo, « Experimental and Numerical Study of Single Point Incremental Forming for a Spiral Toolpath Strategy », in *Design and Modeling of Mechanical Systems—III*, M. Haddar, F. Chaari, A. Benamara, M. Chouchane, C. Karra, et N. Aifaoui, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 1007-1015.
- [76] E. H. Uheida, G. A. Oosthuizen, D. M. Dimitrov, M. B. Bezuidenhout, et P. A. Hugo, « Effects of the relative tool rotation direction on formability during the incremental forming of titanium sheets », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, mars 2018.
- [77] A. Asgari, M. Sedighi, et M. Riahi, « Investigation of dimensional accuracy in incremental sheet metal hammering process: a parametric study », *Mech. Ind.*, vol. 16, n° 3, p. 308, 2015.
- [78] M. Azaouzi et N. Lebaal, « Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method », *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 24, p. 49-58, mai 2012.
- [79] A. K. Behera, B. Lauwers, et J. R. Dufloy, « Tool path generation framework for accurate manufacture of complex 3D sheet metal parts using single point incremental forming », *Comput. Ind.*, vol. 65, n° 4, p. 563-584, mai 2014.
- [80] H. K. Nirala et A. Agrawal, « Sheet Thinning Prediction and Calculation in Incremental Sheet Forming », in *Precision Product-Process Design and Optimization*, S. S. Pande et U. S. Dixit, Éd. Singapore: Springer Singapore, 2018, p. 391-410.
- [81] M. Honarpisheh, M. Keimasi, et I. Alinaghian, « Numerical and experimental study on incremental forming process of Al/Cu bimetal: influence of process parameters on the forming force, dimensional accuracy and thickness variations », *J. Mech. Mater. Struct.*, vol. 13, n° 1, p. 35-51, avr. 2018.
-

-
- [82] S. Thibaud, R. Ben Hmida, F. Richard, et P. Malécot, « A fully parametric toolbox for the simulation of single point incremental sheet forming process: Numerical feasibility and experimental validation », *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 29, p. 32-43, déc. 2012.
- [83] G. Buffa, D. Campanella, et L. Fratini, « On the improvement of material formability in SPIF operation through tool stirring action », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 66, n° 9-12, p. 1343-1351, juin 2013.
- [84] R. Hino, K. Kawabata, et F. Yoshida, « Incremental Forming with Local Heating by Laser Irradiation for Magnesium Alloy Sheet », *Procedia Eng.*, vol. 81, p. 2330-2335, 2014.
- [85] S. Kurra et S. P. Regalla, « Experimental and numerical studies on formability of extra-deep drawing steel in incremental sheet metal forming », *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 3, n° 2, p. 158-171, avr. 2014.
- [86] S. Gatea, H. Ou, et G. McCartney, « Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 87, n° 1-4, p. 479-499, oct. 2016.
- [87] L. Giraud-Moreau, « Méthodes de remaillage et d'optimisation pour la simulation numérique », Université de Technologie de Troyes, Troyes France, 2015.
- [88] C. Jérémy, « Mise en forme par emboutissage en température d'un alliage d'aluminium AA5754-O », UNIVERSITÉ DE BRETAGNE-SUD-France, 2014.
- [89] P. J. Silva et A. J. Alvares, « Incremental sheet forming of aluminum with warm », 2015, p. 808-811.
- [90] G. Ambrogio *et al.*, « Performances Analysis of Titanium Prostheses Manufactured by Superplastic Forming and Incremental Forming », *Procedia Eng.*, vol. 183, p. 168-173, 2017.
- [91] T. H. Nguyen, K. D. Le, N. P. Nguyen, H. B. Nguyen, T. N. Nguyen, et T. Y. Vo, « The Effect of Heating to the Formability of Titanium Sheet by SPIF Technology », *Key Eng. Mater.*, vol. 749, p. 171-177, août 2017.
- [92] A. Göttmann *et al.*, « Laser-assisted asymmetric incremental sheet forming of titanium sheet metal parts », *Prod. Eng.*, vol. 5, n° 3, p. 263-271, juin 2011.
- [93] G. Buffa, D. Campanella, et L. Fratini, « On the improvement of material formability in SPIF operation through tool stirring action », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 66, n° 9-12, p. 1343-1351, juin 2013.
- [94] J. Sun et Y. B. Guo, « Material flow stress and failure in multiscale machining titanium alloy Ti-6Al-4V », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 41, n° 7-8, p. 651-659, avr. 2009.
- [95] M. Sbayti, A. Ghiotti, R. Bahloul, H. Belhadjsalah, et S. Bruschi, « Finite Element Analysis of hot Single Point Incremental forming of hip prostheses », *MATEC Web Conf.*, vol. 80, p. 14006, 2016.
- [96] J. Goupy et L. Creighton, *Introduction aux plans d'expériences*. Paris: Dunod : "L'Usine nouvelle, 2006.
-

-
- [97] S. Vivier, « Stratégie d'optimisation par la méthode des plans d'expérience et application aux dispositifs électrotechnique modélisés par éléments finis », Ecole centrale de Lille, Lille- France, 2002.
- [98] M. Honarpisheh et A. Gheysarian, « An Experimental Study on the process parameters of Incremental Forming of Explosively-Welded Al/Cu Bimetal », *J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng. JCARME*, n° 1, août 2017.
- [99] M. Moayedfar, H. Hanaei, A. M. Rani, M. A. Bin Musa, et M. S. Momeni, « Early Shear Failure Prediction in Incremental Sheet Forming Process Using FEM and ANN », *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 328, p. 012031, mars 2018.
- [100] E. Kıranlı, « DETERMINATION OF MATERIAL CONSTITUTIVE EQUATION OF A BIOMEDICAL GRADE Ti6Al4V ALLOY FOR CROSS-WEDGE ROLLING », Izmir institute of technology, Izmir, 2009.
- [101] G. . Johnson et W. . Cook, « A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures », *Proceedings 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, p. 541-547, 19-avr-1983.
- [102] S. MARTIN, « ETUDE DU COMPORTEMENT VISCOPLASTIQUE EN TRACTION ET EN FLUAGE DE L' ALLIAGE TA6V DE 20 A 600 DEGRES CELSIUS », Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), Toulouse France, 2013.
- [103] F. J. Zerilli et R. W. Armstrong, « Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations », *J. Appl. Phys.*, vol. 61, n° 5, p. 1816-1825, mars 1987.
- [104] B. Yannick, « Etude des mécanismes de déformation du titane T40 en formage incrémental », DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Toulouse France, 2013.
- [105] S. Seo, O. Min, et H. Yang, « Constitutive equation for Ti-6Al-4V at high temperatures measured using the SHPB technique », *Int. J. Impact Eng.*, vol. 31, n° 6, p. 735-754, juill. 2005.
- [106] W.-S. Lee et C.-F. Lin, « Plastic deformation and fracture behaviour of Ti-6Al-4V alloy loaded with high strain rate under various temperatures », *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 241, n° 1-2, p. 48-59, janv. 1998.
- [107] G. Chen, C. Ren, X. Yang, X. Jin, et T. Guo, « Finite element simulation of high-speed machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V) based on ductile failure model », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 56, n° 9-12, p. 1027-1038, oct. 2011.
- [108] A. Boulila, M. Ayadi, S. Marzouki, et S. Bouzidi, « Contribution to a biomedical component production using incremental sheet forming », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 95, n° 5-8, p. 2821-2833, mars 2018.
- [109] M. Gulati, V. Anand, S. Salaria, N. Jain, et S. Gupta, « Computerized implant-dentistry: Advances toward automation », *J. Indian Soc. Periodontol.*, vol. 19, n° 1, p. 5, 2015.

Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis-ENIT, 1002 Tunis-Tunisie

Université de technologie de Troyes-utt, Institut Charles Delaunay, 12, rue Marie Curie, CS 42060-France

M. SAIDI Badreddine

Doctorat de l'ENIT-Tunisie, en Génie Mécanique

Doctorat de l'utt-France, en Matériaux, Mécanique, Optique et Nanotechnologie

Etude expérimentale et numérique du procédé de formage incrémental à chaud de tôles en titane

Mots clés : Métaux-formabilité / Température / Titane-Alliages / Optimisation mathématique / Simulation par ordinateur / Eléments finis-Méthode des / Travail des métaux-Machines

Résumé :

Le formage incrémental est un procédé de mise en forme flexible, avec des outillages peu coûteux. Il est adapté pour la réalisation de pièces à usage unique comme des prothèses ou implants personnalisés en titane. Mais les efforts de formage importants avec le titane limitent les possibilités de géométries. Une solution pour diminuer les efforts de formage consiste à réaliser ce formage à chaud.

L'objectif de cette thèse était d'étudier numériquement et expérimentalement le formage incrémental à chaud de pièces en titane. Un nouveau dispositif expérimental à chaud basé sur l'utilisation de cartouches chauffantes est proposé. Une campagne d'essais expérimentaux à chaud est menée afin d'étudier l'effet de la température et de différents paramètres du procédé pour une pièce tronconique en titane (Ti-6Al-4V). On montre qu'à haute température les efforts de formage sont plus faibles, la formabilité est améliorée. A 450°C, on obtient un angle limite de formage de 57°.

La simulation numérique du formage incrémental est effectuée avec ABAQUS à température ambiante puis à chaud. On montre l'impact de certains paramètres du procédé sur l'effort axial et l'épaisseur finale. Les valeurs optimums de ces paramètres sont déterminées à partir de plans d'expériences et des surfaces de réponse. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux à chaud permet de valider le modèle numérique. On s'intéresse ensuite au formage incrémental à chaud d'une prothèse de crâne humain en titane en utilisant une approche d'ingénierie inverse.

Experimental and numerical study of the warm incremental forming process of titanium alloy sheet

Keywords: Metals-Formability / Temperature / Titanium alloys / Mathematical optimization / Computer simulation / Finite element method / Metal-working machinery

Abstract

The incremental forming process is a flexible forming process, with low cost tooling. It is perfectly suited for single use products as customized titanium implants or prosthesis. But the important forming forces with titanium limit the geometries to realize. One of the solutions consists in performing this process at hot temperature.

The objective of this work is to study numerically and experimentally the warm incremental forming process of titanium sheets. A new setup for the warm incremental forming process is proposed. It is based on the use of heating cartridges. A hot experimental test campaign with Ti-6Al-4V titanium alloy sheets is conducted in order to study the impact of the temperature and process parameters on the axial force and thickness distribution for a truncated cone. It is shown that the forming forces are lower at hot temperature and the formability is improved. For a temperature of 450°C, a forming limit angle of 57° is obtained.

Numerical simulations with Abaqus of the incremental forming process are performed at room temperature and hot temperature. We show the impact of the punch diameter and the axial step size on the axial force and thickness.

The optimum values of these parameters are determined by using an experimental design and response surfaces. The comparison between results obtained numerically and experimentally allows to validate the numerical model. We are then interested in the warm incremental forming process of a human skull prosthesis. A reverse engineering approach is used.

Badreddine SAIDI

Doctorat : Matériaux, Mécanique, Optique et Nanotechnologie

Année 2018

Etude expérimentale et numérique du procédé de formage incrémental à chaud de tôles en titane

Le formage incrémental est un procédé de mise en forme flexible, avec des outillages peu coûteux. Il est adapté pour la réalisation de pièces à usage unique comme des prothèses ou implants personnalisés en titane. Mais les efforts de formage importants avec le titane limitent les possibilités de géométries. Une solution pour diminuer les efforts de formage consiste à réaliser ce formage à chaud.

L'objectif de cette thèse était d'étudier numériquement et expérimentalement le formage incrémental à chaud de pièces en titane. Un nouveau dispositif expérimental à chaud basé sur l'utilisation de cartouches chauffantes est proposé. Une campagne d'essais expérimentaux à chaud est menée afin d'étudier l'effet de la température et de différents paramètres du procédé pour une pièce tronconique en titane (Ti-6Al-4V). On montre qu'à haute température les efforts de formage sont plus faibles, la formabilité est améliorée. A 450°C, on obtient un angle limite de formage de 57°.

La simulation numérique du formage incrémental est effectuée avec ABAQUS à température ambiante puis à chaud. On montre l'impact de certains paramètres du procédé sur l'effort axial et l'épaisseur finale. Les valeurs optimums de ces paramètres sont déterminées à partir de plans d'expériences et des surfaces de réponse. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux à chaud permet de valider le modèle numérique. On s'intéresse ensuite au formage incrémental à chaud d'une prothèse de crâne humain en titane en utilisant une approche d'ingénierie inverse.

Mots clés : métaux, formabilité - titane, alliages - simulation par ordinateur - éléments finis, méthode des - travail des métaux, machines - température - optimisation mathématique.

Experimental and Numerical Study of the Warm Incremental Forming Process of Titanium Alloy Sheet

The incremental forming process is a flexible forming process, with low cost tooling. It is perfectly suited for single use products as customized titanium implants or prosthesis. But the important forming forces with titanium limit the geometries to realize. One of the solutions consists in performing this process at hot temperature.

The objective of this work is to study numerically and experimentally the warm incremental forming process of titanium sheets. A new setup for the warm incremental forming process is proposed. It is based on the use of heating cartridges. A hot experimental test campaign with Ti-6Al-4V titanium alloy sheets is conducted in order to study the impact of the temperature and process parameters on the axial force and thickness distribution for a truncated cone. It is shown that the forming forces are lower at hot temperature and the formability is improved. For a temperature of 450°C, a forming limit angle of 57° is obtained.

Numerical simulations with Abaqus of the incremental forming process are performed at room temperature and hot temperature. We show the impact of the punch diameter and the axial step size on the axial force and thickness.

The optimum values of these parameters are determined by using an experimental design and response surfaces. The comparison between results obtained numerically and experimentally allows to validate the numerical model. We are then interested in the warm incremental forming process of a human skull prosthesis. A reverse engineering approach is used.

Keywords: metals, formability - titanium alloys - computer simulation - finite element method - metal-working machinery - temperature - mathematical optimization.

Thèse réalisée en partenariat entre :

