



HAL
open science

Frottement en hydroformage de tube : caractérisation du frottement par le test d'expansion en matrice carrée

Abir Abdelkefi

► To cite this version:

Abir Abdelkefi. Frottement en hydroformage de tube : caractérisation du frottement par le test d'expansion en matrice carrée. Génie des procédés. Université de Franche-Comté; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2016. Français. NNT : 2016BESA2006 . tel-01459067

HAL Id: tel-01459067

<https://theses.hal.science/tel-01459067>

Submitted on 7 Feb 2017

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.

SPIM

Thèse de Doctorat

UFC

école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

PROJET DE THESE

Présentée à

L'U.F.R DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE

L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE- COMTÉ

Pour obtenir le

GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE

FRANCHE-COMTÉ

Spécialité **SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR**

**Frottement en hydroformage de tube : Caractérisation du
frottement par le test d'expansion en matrice carrée**

Par

Abir ABDELKEFI

Soutenu le 21 juillet 2016 devant la commission d'examen

Directeur de thèse : **Nathalie BOUDEAU & Nader HADDAR**

Co-encadrement de la thèse : **Pierrick MALECOT & Noamen GUERMAZI**

Jury

Mme. Marie-Ange BUENO (Professeur)

Président

Mme. Pascale BALLAND (Professeur)

Rapporteur

M. Bassem ZOUARI (Professeur)

Rapporteur

M. Carl LABERGERE (Maître de conférences)

Examineur

— SPIM

■ École doctorale SPIM 16 route de Gray F - 25030 Besançon cedex

■ tél. +33 (0)3 81 66 66 02 ■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr

Frottement en hydroformage de tube : Caractérisation du frottement par le test d'expansion en matrice carrée

n Abir ABDELKEFI

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire est le fruit d'une collaboration entre le Laboratoire de Génie des matériaux et Environnement (LGME) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS – Tunisie) et le département de mécanique appliquée (FEMTO-ST) de l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM-France).

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à l'égard de ma directrice de thèse Madame Nathalie BOUDEAU, Professeur à l'ENSMM, pour ses qualités professionnelles et humaines auxquelles j'ai été très sensible. Sa disponibilité et ses encouragements chaleureux, son regard incisif et ses longues années d'expérience me furent très enrichissants. Elle m'a permis de mener à bien cette étude.

Je souhaite aussi exprimer ma gratitude à mon directeur de thèse Monsieur Nader HADDAR, Maître de conférences à l'ENIS, qui a su me laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de mes travaux, tout en y gardant un œil critique et avisé.

Toute ma reconnaissance va particulièrement à mon co-encadrant de thèse Monsieur Noamen GUERMAZI, Maître assistant à l'ENIS, pour ses conseils avisés et ses remarques pertinentes. Je lui exprime ma reconnaissance pour avoir encadré cette thèse.

Je remercie également mon Co-encadrant Monsieur Pierrick MALECOT, Maître de conférences à l'ENSMM, pour ses idées, l'intérêt qu'il a porté à mon travail, son accessibilité et ses qualités humaines.

Egalement, je tiens à exprimer mes remerciements à Madame Pascale BALLAND et Monsieur Bassem ZOUARI d'avoir accepté de rapporter ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à Madame Marie-Ange BUENO, Professeur à l'université de Haute Alsace, pour avoir accepté de présider ce jury et à Monsieur Carl LABERGÈRE, Maître de conférences à l'université de technologie Troyes pour en être l'examineur.

Merci à mon collègue Ludovic VITU, doctorant au sein du département de mécanique appliquée pour ses aides.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Monsieur Sébastien THIBAUD, Professeur à l'ENSMM, pour sa collaboration.

J'exprime également ma gratitude à Monsieur Gérard MICHEL, ingénieur de recherche de département de mécanique appliquée (ENSMM) pour sa collaboration.

Je témoigne ici de ma plus grande reconnaissance et profonde gratitude à mes parents pour leur soutien continu et leur appui à toute épreuve. Cette thèse leurs est dédiée...

A mes chers frères mes chaleureux remerciements pour leur appui, leur encouragement.

Merci à l'ensemble des personnes du LGME et du FEMTO-ST ,enseignants, chercheurs et techniciens- qui ont partagé mes moments de doute et de bonne humeur et rendu ces années si agréables.

Table des matières

LISTE DES FIGURES	4
LISTE DES TABLEAUX	9
INTRODUCTION GENERALE.....	11
CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART	14
1.1 . Introduction	15
1.2 Le procédé d'hydroformage de tubes	16
1.2.1 Principe du procédé.....	16
1.2.2 Avantages et inconvénients de l'hydroformage de tubes.....	17
1.2.3 Classifications des formes géométriques	18
1.3 Les paramètres importants du procédé	19
1.3.1 Formabilité dans le procédé d'hydroformage de tubes	19
1.3.2 Les modes d'obtention des tubes	23
1.3.3 Le comportement plastique des matériaux.....	25
1.3.4 Influence du coefficient de frottement quasi-statique ' μ ' et de la lubrification.	29
1.4 Les tests spécifiques développés pour la caractérisation du comportement plastique des tubes et la caractérisation du frottement.....	37
1.4.1 Caractérisation du comportement plastique des tubes	37
1.4.2 Caractérisation du frottement	39
1.5 Les modèles semi-analytiques traitant du "corner filling test"	44
1.6 Conclusions intermédiaires et présentation de la suite	45
CHAPITRE 2 : VALIDATION NUMERIQUE DU MODELE D'ORBAN-HU.....	47
2.1 Introduction	48
2.2 Présentation du modèle d'Orban-Hu et de sa programmation	48

2.2.1	Présentation du modèle d'Orban-Hu.....	48
2.2.2	Modèle théorique.....	50
2.2.3	Résolution numérique	56
2.3	Modélisation numérique et validation de la programmation du modèle d'Orban-Hu 56	
2.3.1	Présentation des modèles éléments finis	56
2.3.2	Validation de la programmation du modèle d'Orban-Hu	59
2.4	Recherche d'un paramètre discriminant lié aux conditions de frottement	64
2.5	Vers une procédure expérimentale	67
2.6	Synthèse.....	68
CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT		70
3.1	Introduction	71
3.2	Le matériau d'étude, sa préparation et sa caractérisation mécanique.....	71
3.2.1	Préparation du matériau	73
3.2.2	Caractérisation mécanique des tubes dans le domaine plastique	73
3.3	Les essais expérimentaux et les techniques de mesures	75
3.3.1	Description du test "pion sur disque"	75
3.3.2	Presse de mise en forme et outillage	77
3.3.3	Les techniques de mesures	80
3.4	Résultats et discussion	82
3.4.1	Influence de la pression interne sur la distribution de l'épaisseur	83
3.4.2	Influence de la lubrification sur la distribution d'épaisseur.....	84
3.4.3	Evaluation du coefficient de frottement	86
3.5	Simulation éléments finis du test d'expansion en matrice carrée	90
3.5.1	Simulation du test "à sec"	91
3.5.2	Simulation du test avec lubrification.....	92

3.6	Bilan intermédiaire et présentation de la suite.....	93
CHAPITRE 4 : APPLICATIONS A L'HYDROFORMAGE DE PIECES DE FORMES COMPLEXES		
95		
4.1	Introduction	96
4.2	Les différentes configurations testées.....	96
4.3	Essais expérimentaux	98
4.3.1	Déroulement des essais	98
4.3.2	Essais préliminaires jusqu'à rupture	100
4.3.3	Tests de mise en forme.....	101
4.3.4	Synthèse	109
4.4	Simulations EF des tests et comparaison.....	109
4.4.1	Post-traitement des résultats.....	111
4.4.2	Comparaisons numérique/expérimentale	112
4.4.3	Synthèse	119
4.5	Bilan et synthèse	119
CONCLUSIONS & PERSPECTIVES.....		121
ANNEXE		126
BIBLIOGRAPHIE		131
Références néto-graphiques :		132
Références bibliographiques:		132

LISTE DES FIGURES

Figure.1.1. Exemples de pièces obtenues par hydroformage [Maki et Walter 2007].	P.17
Figure.1.2. (a) Exemples des pièces sanitaires obtenues par hydroformage de tubes [1], (b) vases obtenues par hydroformage [Chen et al. 2014].	P.18
Figure.1.3. Procédé d'hydroformage de tubes [Ben Abdesslem 2011].	P.19
Figure.1.4. Différentes formes en hydroformage : (a) saillie de forme en Y et (b) gonflement de tube [Strano 2002].	P.20
Figure.1.5. Modes de défaillances : (a) Flambement du tube,(b) Plissement de tube, (c) Striction de tubes. (de gauche à droite : tube original, tube hydroformé en expansion simple, tube hydroformé avec de faibles forces de compression puis avec d'importantes forces de compression)	P.24
Figure.1.6. Diagramme du procédé d'hydroformage [Singh, 2003].	P.25
Figure.1.7. Schéma illustrant l'extrusion du tube [2].	P.26
Figure.1.8. (a) roulage de tube, (b) soudage électrique par résistance,(c) soudage électrique par induction [3].	P.27
Figure.1.9. Effet du coefficient d'érouissage sur le rapport d'expansion (rapport entre le rayon courant du tube gonflé et le rayon initiale du tube) dans un test de gonflement axisymétrique de tube pour un maximum d'amincissement de 25% [Koc 2003a].	P.28
Figure.1.10. Influence du coefficient d'érouissage sur la distribution d'épaisseur dans un tube à section circulaire hydroformé dans une matrice à section carrée [Zribi et al, 2013].	P.29
Figure.1.11. Influence du coefficient d'anisotropie sur la distribution d'épaisseur dans une section carrée [Zribi et al. 2013].	P.30
Figure.1.12. Distribution de déformation pour un test d'expansion libre pour différents coefficients de frottement [Carleer et al. 2000].	P.31
Figure.1.13. Influence du frottement sur la distribution d'épaisseur dans une section carrée [Zribi et al, 2013].	P.32
Figure.1.14. (a) Manifestation d'un excès de lubrification (b) la même pièce réalisée avec un lubrifiant sec (PTFE) [Fironetino et al, 2009].	P.34
Figure.1.15. Effet de l'excès de lubrification [Fironetino et al, 2009].	P.35
Figure.1.16. Zones de frottement dans le procédé d'hydroformage pour une forme en T [Ngaile et al. 2006].	P.37

Figure.1.17. (a)Trois zones principales de frottement [Koc 2003] (b) test de la zone de guidage [Costello et Riff 2005] (c) test de zone d'expansion [Costello et Riff 2005].	P.37
Figure.1.18. Distribution du coefficient de frottement avec différents lubrifiants en fonction de la pression interne [Yi et al. 2011].	P.38
Figure.1.19. (a) gonflement libre en expansion seule, (b) gonflement libre en combinant la force axiale et la pression interne [Imaninejad et al. 2004b].....	P.39
Figure.1.20. Exemple de tribomètre pion sur disque rotatif [Guermazi et al. 2009].....	P.42
Figure.1.21. Principe du test de refoulement pour la mesure du coefficient de frottement [Vollertsen et Plancak 2002].	P.43
Figure.1.22. Test de compression de torsion (a) la surface de contact, (b) l'équipement d'essai, (c) Condition du chargement d'un échantillon [Barcelik 2006].....	P.44
Figure.2.1. Modèle 2D utilisé pour l'étude de l'hydroformage de tube dans une section carrée par [Orban et Hu 2007].....	P.52
Figure.2.2. Les variables géométriques [Orban et Hu 2007].....	P.54
Figure.2.3. Coin de tube.....	P.54
Figure.2.4. Equilibre d'un élément de la paroi droite.	P.56
Figure.2.5. Calcul de la longueur de la zone de collage.	P.58
Figure.2.6. (a) modèle de déformation plane 2D, (b) modèle 3D solide et (c) modèle 3D coque.	P.61
Figure.2.7. Conditions aux limites pour les différents modèles EF.....	P.62
Figure.2.8. Variation de l'épaisseur du coin par rapport au rayon du coin pour une condition donnée du frottement ($\mu = 0,1$) lorsque la pression interne augmente de 0 à 28 MPa.....	P.63
Figure.2.9. Evolution de la longueur de contact tube/matrice pour un coefficient de frottement donné ($\mu = 0,1$), lorsque la pression interne augmente de 0 à 28 MPa.....	P.64
Figure.2.10. Evolution de la longueur de contact contre la pression interne pour un coefficient de frottement donné ($\mu = 0,1$).	P.64
Figure.2.11. Distribution de l'épaisseur le long de la section transversale du tube à une pression interne de 28 MPa et un coefficient de frottement donné ($\mu = 0,1$).....	P.65
Figure.2.12. Répartitions d'épaisseur le long du tube après calcul pour différents coefficients de frottement, obtenues avec modèle analytique.	P.67
Figure.2.13. L'épaisseur minimale pour les différents coefficients de frottement.....	P.68

Figure.2.14. La variation de l'épaisseur globale pour les différents coefficients de frottement obtenus avec le modèle Urban-Hu.	P.68
Figure.2.15. Organigramme de la procédure expérimentale et du modèle analytique.....	P.69
Figure 2.16. Evaluation du coefficient de frottement avec l'épaisseur minimale - courbe du coefficient de frottement.....	P.70
Figure.3.1. Déformation sous l'action d'une même pression interne d'un tube écroui et d'un tube ayant subi le recuit à 450°C pendant 30 minutes suivi d'un refroidissement à l'air ambiant. P.77	
Figure.3.2. (a) Courbe pression – hauteur (P,h) de gonflement obtenue au cours du test de gonflement libre de tube (b) Courbe contrainte – déformation obtenue à partir des données de la courbe (a) post-traitée à l'aide du modèle de Boudeau – Malécot.	P.78
Figure.3.3. Interface de l'outil de post-traitement des courbes (P,h) par le modèle de Boudeau – Malécot [Vitu 2014].	P.79
Figure.3.4. Tribomètre "pion sur disque" installé au laboratoire LGME.....	P.80
Figure.3.5. Machine d'hydroformage de tubes.	P.81
Figure.3.6. Outillage modulaire installé dans la presse du laboratoire FEMTO-ST (a) avant expansion, (b) durant le test de gonflement (b) durant l'hydroformage de tubes.	P.82
Figure 3.7. Sections de matrices : (a-b) de gonflement libre, (c-d) matrice carrée.	P.82
Figure.3.8. Définition de différentes zones dans l'hydroformage de tubes (a) avant expansion(b) après expansion.	P.83
Figure.3.9. (a) Localisation des trois capteurs de déplacement : (a) pour le test de gonflement libre, (b) pour le test d'hydroformage de tubes, (c) Evolution de l'expansion pour le capteur 3.	P.84
Figure.3.10. Tubes après expansion pour différentes valeurs de pression interne.....	P.85
Figure.3.11. Machine de métrologie sans contact (Werth IP 250).	P.86
Figure.3.12. (a) Procédé disponible sur l'appareil de métrologie 250 Werth IP (b) Différentes étapes de traitement d'image à balayage.....	P.86
Figure.3.13. Distribution de l'épaisseur pour différents points de mesure et différentes pressions interne à sec.....	P.87
Figure.3.14. Distribution de l'épaisseur pour différents points de mesure.....	P.89
Figure.3.15. Distribution d'épaisseur le long de la section transversale du tube déformé obtenu à partir du modèle théorique pour une épaisseur initiale du tube $t_0 = 0,9$ mm et différents coefficients de frottement μ où les mesures expérimentales (essais à sec) sont superposées. L'état final correspondant à une pression interne de 28 MPa est considéré ici.	P.89

Figure 3.16. Effet de la force normale sur l'échantillon de cuivre lors d'un test "à sec" ...	P.91
Figure.3.17. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour une charge de 5N.....	P.91
Figure.3.18. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour une charge de 2N.....	P.91
Figure.3.19. Evaluation du coefficient de frottement à l'aide du graphe épaisseur minimale - coefficient de frottement construit à l'aide du modèle d'Orban-Hu pour la pression maximale de 28 MPa.....	P.94
Figure.3.20. Comparaison de la variation d'épaisseur résultante le long de la section transversale du tube pour différents modèles EF avec des mesures expérimentales.....	P.95
Figure.3.21. Comparaison de la variation d'épaisseur résultante le long de la section transversale du tube pour différents modèles EF avec des mesures expérimentales.	P.97
Figure.4.1. Les demi-matrices utilisées (a) demi-matrice carrée (b) demi-matrice rectangulaire (c) demi-matrice trapézoïdale.....	P.102
Figure. 4.2. Les différentes configurations d'hydroformage de forme (a) matrice rectangulaire (configuration n°1) (b) matrice trapézoïdale (configuration n°2) (c) matrice résultant de l'association d'une demi-matrice carrée et d'une demi-matrice trapézoïdale (configuration n°3).	P.102
Figure.4.3. Points initiaux de contact entre le tube et la matrice pour les différentes configurations testées (a) 2 point de contact pour la configuration n° 1 (b) 2points de contact pour la configuration n°2 où ($\alpha=58,68^\circ, \beta=63.35^\circ$) (c) 3 points de contact pour la configuration n°3	P.103
Figure.4.4. Suivi de la déformée du tube en fonction de l'évolution de la pression interne dans une mise en forme sans lubrification	P.104
Figure.4.5. Suivi de la déformée du tube en fonction de l'évolution de la pression interne dans une mise en forme avec lubrification	P.104
Figure.4.6. Tubes en fin de mise en forme.....	P.105
Figure.4.7. Eclatement des tubes lors des tests préliminaires	P.105
Figure.4.8. Distribution d'épaisseur le long de la section transversale du tube en fin de procédé dans le cas d'un hydroformage en matrice rectangulaire, avec ou sans lubrification.....	P.107
Figure.4.9. Courbes pression – déformation du tube dans le cas de l'hydroformage en matrice rectangulaire avec et sans lubrification (point B) (capteur3).	P.109
Figure.4.10. Effet de la lubrification sur la distribution de l'épaisseur le long de la section transversale du tube hydroformé dans une matrice de forme trapézoïdale.....	P.111

Figure.4.11. Courbes pression – déformation du tube dans le cas de l'hydroformage en matrice trapézoïdale avec et sans lubrification (point D) (capteur3).....	P.111
Figure.4.12. Effet de la lubrification sur la distribution de l'épaisseur le long de la section transversale du tube hydroformé dans une matrice de forme trapèze-carrée.....	P.113
Figure.4.13. Courbes pression – déformation du tube dans le cas de l'hydroformage en matrice trapèze-carrée avec et sans lubrification(D) (capteur3).....	P.113
Figure 4.14 Tubes déformés obtenus par des simulations 3D coque pour les différentes configurations	P.114
Figure 4.15 Tubes déformés obtenus par des simulations 3D solide pour les différentes configurations	P.115
Figure.4.16. Distribution d'épaisseur pour différents points de mesure pour une section rectangulaire avec lubrification.	P.118
Figure.4.17. Distribution d'épaisseur pour différents points de mesure pour une section rectangulaire à sec.	P.119
Figure.4.18. Distribution d'épaisseur pour différents points de mesure pour une section trapézoïdale avec lubrification.	P.121
Figure.4.19. Distribution d'épaisseur pour différents points de mesure pour une section trapézoïdale à sec.....	P.122
Figure.4.20. Distribution d'épaisseur pour différents angles de mesure pour une section trapèze-carrée avec lubrification.....	P.123
Figure.4.21. Distribution d'épaisseur pour différents angles de mesure pour une section trapèze-carrée à sec.....	P.123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.3.1. Composition chimique du tube en cuivre (% en poids).....	P.76
Tableau.3.2. Propriétés mécaniques du Cu-DHP.).....	P.76
Tableau 3.3. Dimensions de tubes.).....	P.76
Tableau.3.4. Dimensions de matrice du gonflement libre.	P.82
Tableau.3.5. Dimensions de section de matrice carrée.....	P.83
Tableau.3.6. Coefficients de frottements obtenus pour les différentes conditions expérimentales	P.92
Tableau.3.7. Comparaison entre les résultats numériques et les mesures de l'épaisseur minimale et la variation d'épaisseur.....	P.96
Tableau.3.8. Comparaison entre les résultats numériques et les mesures de l'épaisseur minimale et la variation d'épaisseur.	P.96
Tableau.4.1. Variations de la réduction de l'épaisseur dans la matrice de section rectangulaire.	P.107
Tableau.4.2. Variations de la réduction d'épaisseur dans la section transversale du tube hydroformé dans la matrice trapézoïdale.	P.109
Tableau.4.3. Description des principales conditions de simulations.....	P.115
Tableau.4.4. Comparaison entre les résultats numériques et les mesures de l'épaisseur minimale et la variation d'épaisseur (matrice rectangulaire).	P.120

Tableau.4.5. Comparaison entre les résultats numériques et les mesures de l'épaisseur minimale et la variation d'épaisseur (matrice trapézoïdale).
.....P.121

Tableau.4.6. Comparaison entre les résultats numériques et les mesures de l'épaisseur minimale et la variation d'épaisseur (matrice trapèze-carré).
.....P.122

INTRODUCTION GENERALE

Au cours du procédé d'hydroformage de tubes, les conditions de frottement entre le tube et la matrice ont une grande influence sur la distribution d'épaisseur de la pièce finale. Cependant, la complexité du contact surfacique empêche certains tests tels que le 'pion sur disque' de bien caractériser les conditions de frottement. Dans la littérature, l'expansion d'un tube dans une matrice de section carrée a été proposée et certains chercheurs ont mis au point des modèles analytiques de ce test spécifique. Le but de ce travail est de valider ou déduire la capacité de ces modèles à évaluer le coefficient de Coulomb pour représenter les conditions de frottement pendant l'hydroformage de tubes. Une fois qu'il a été vérifié que le test d'expansion en matrice carrée peut constituer un test de caractérisation du coefficient de frottement valable pour tout type d'opérations d'hydroformage, il est possible d'étudier l'expansion en matrices de formes variées.

Le recours à la détermination de l'amincissement localisé pour différentes formes de matrice fondée sur un modèle analytique et numérique et validé, par des essais expérimentaux a été parmi les objectifs de ce sujet de thèse. De même, la caractérisation du coefficient de frottement et l'effet de la lubrification a été étudié et discuté. C'est dans ce cadre que s'inscrit le sujet de cette thèse intitulée :

"Frottement en hydroformage de tube : Caractérisation du frottement par le test d'expansion en matrice carrée".

Ce mémoire de thèse s'articule autour des quatre chapitres. Le premier s'attache à une étude bibliographique générale relative au procédé d'hydroformage, ses paramètres importants, les tests qui caractérisent le coefficient de frottement, les modèles analytiques traitant le remplissage des coins. Nous finissons ensuite par une conclusion intermédiaire et présentation de la suite.

Le deuxième chapitre présente en premier lieu, une étude et validation numérique du test d'expansion dans une matrice à section carrée, et en deuxième lieu, une méthodologie pour caractériser le coefficient de frottement de Coulomb à partir de mesures réalisées au cours de ce test.

Au niveau du troisième chapitre, le but est de caractériser le coefficient de frottement par différentes méthodologies et de valider la discrimination de ces méthodes vis-à-vis des conditions de frottement. Pour identifier le coefficient de frottement, deux méthodes sont considérées. En premier lieu, le test classique de ‘pion sur disque’ est utilisé pour mesurer le coefficient de frottement entre le cuivre (matériau de tube) et l’acier (matériau de la matrice). En deuxième lieu, le test d'expansion dans une matrice carrée est utilisé. Les deux coefficients de frottement déduits par ces deux approches sont utilisés pour réaliser des simulations éléments finis. Ensuite, les résultats obtenus lors des essais expérimentaux et par les simulations numériques ont été comparés.

Le dernier chapitre consiste à appliquer les coefficients de frottement obtenus à partir du modèle analytique et du test de ‘pion sur disque’ pour d’autres configurations par simulation numérique. L'accent sera également mis sur l’étude de l’influence de la lubrification durant l’essai de remplissage du coin.

In fine, une conclusion et les perspectives ouvertes par ce travail clôturent le présent mémoire.

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

1.1 . Introduction

Actuellement, les industries déploient des efforts considérables de recherche et développement pour pouvoir satisfaire aux nouvelles normes environnementales et répondre aux attentes d'une clientèle devenue de plus en plus exigeante. Afin de rester compétitives, les entreprises sont obligées de réduire leurs coûts et de maîtriser leur production. Le procédé d'hydroformage de tubes est un procédé de fabrication utilisé depuis seulement une quinzaine d'années de manière opérationnelle. Comme toute nouvelle technologie, l'hydroformage a d'abord été réservé aux industries de hautes technologies comme l'aérospatiale qui ont permis sa mise au point et son développement. Aujourd'hui l'hydroformage est couramment utilisé dans l'industrie automobile et dans l'industrie aéronautique. La **Figure.1.1** montre quelques pièces fabriquées par hydroformage pour des applications automobiles.



Figure.1.1. Exemples de pièces obtenues par hydroformage [Maki et Walter 2007].

Ce procédé est également employé pour des applications domestiques comme de la tuyauterie et des raccords [Ceretti et al. 2010 ; Ceretti et al. 2013 ; Chen et al. 2014] (**Figure.1.2**).

Les chercheurs ont contribué à l'industrialisation de ce procédé en menant des travaux tant au niveau technologique (études expérimentales) qu'au niveau scientifique (proposition de modèles numériques et analytiques). A titre d'exemple, on peut citer les travaux de [Kridli et al. 2003 ; Koç et al. 2002a ; Imaninejad et al. 2004a ; Hwang et Chen. 2005 ; Manabe et Amino 2002 ; Lang et al. 2004]. D'autres travaux consacrés à la modélisation et l'optimisation

du procédé ont également été réalisés comme [Asnafi 2003 ; Oh et al. 2006 ; Yuan et al. 2006a ; Lee et al. 2002].

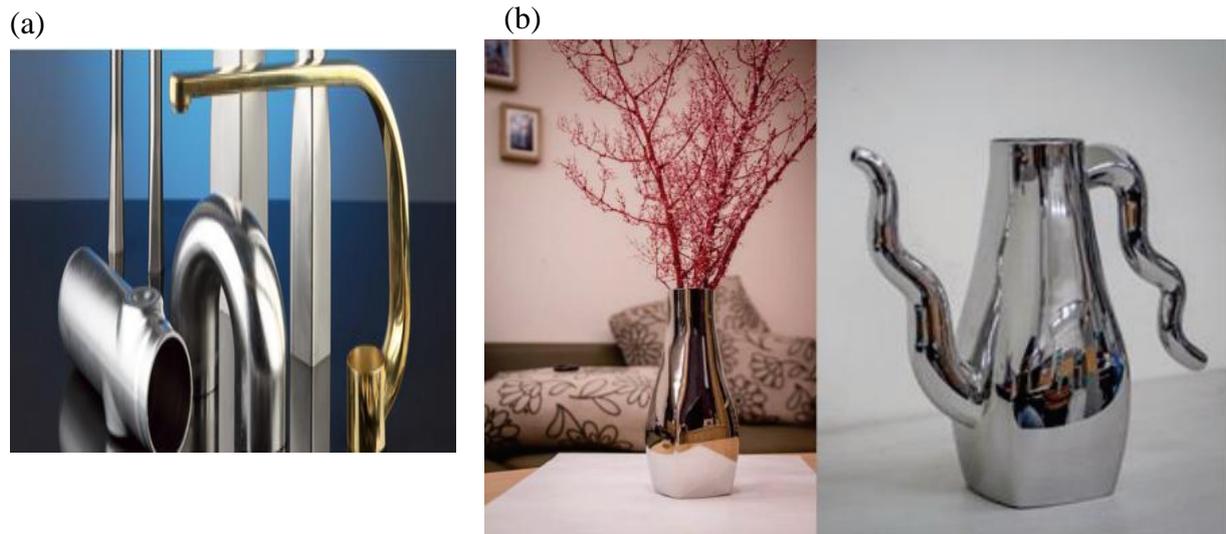


Figure.1.2. (a) Exemples des pièces sanitaires obtenues par hydroformage de tubes [1], (b) vases obtenus par hydroformage [Chen et al. 2014].

Les logiciels de calcul par éléments finis développés pour simuler les procédés de mise en forme par déformation plastique, en particulier l'emboutissage, sont utilisés pour simuler le procédé d'hydroformage de tube. Parmi les principaux logiciels commerciaux citons ABAQUS, LS DYNA et AUTOFORM. Les algorithmes de résolution employés peuvent être de type statique implicite ou dynamique explicite.

Ce chapitre met l'accent sur les notions de base liées à l'hydroformage de tubes. Le principe du procédé, ses domaines d'application, ses avantages et inconvénients, ainsi que les paramètres les plus influents seront présentés. Enfin, on se concentrera sur l'influence du frottement, sur les différents tests utilisés pour sa caractérisation et les modèles analytiques développés pour l'identification du coefficient de frottement de Coulomb.

1.2 Le procédé d'hydroformage de tubes

1.2.1 Principe du procédé

L'hydroformage de tubes consiste à déformer plastiquement un tube, dans une matrice de forme, en lui appliquant une pression interne ; on parle alors d'hydroformage par chargement en

pression interne (**Figure.1.3**). De plus, des forces de compression axiale peuvent être appliquées aux extrémités du tube pour faciliter l'écoulement du matériau et ainsi avoir une meilleure distribution de la déformation. En effet, la présence de forces de compression axiale favorisent l'apport de la matière à la zone expansée et ainsi limitent l'amincissement du tube et améliorent sa formabilité [**Gelin et Labergère. 2001**].

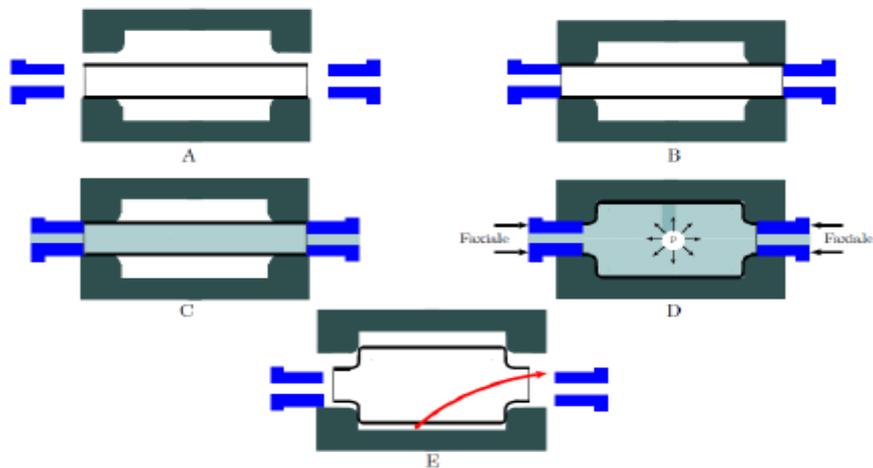


Figure.1.3. Procédé d'hydroformage de tubes [**Ben Abdesslem 2011**].

1.2.2 Avantages et inconvénients de l'hydroformage de tubes

L'hydroformage présente de nombreux avantages [**Ahmetoglu et Altan. 2000; Asnafi 1999**] à savoir :

- un bon rapport rigidité/poids,
- une réduction conséquente du nombre d'opérations et des points de soudure, et donc un gain de temps en changement d'outils et en coût de fabrication,
- des dimensions plus précises des pièces obtenues par rapport au procédé d'emboutissage,
- des propriétés mécaniques du matériau améliorées,
- une minimisation des rebuts de matière,
- la possibilité de produire des pièces avec des matériaux à haute résistance moins faciles à former avec d'autres types de procédés.

L'hydroformage de tubes offre donc un large domaine de formabilité en comparaison avec d'autres procédés. De plus, il limite les problèmes de contact et de frottement grâce à l'usage d'une pression exercée par le fluide en lieu et place d'un poinçon (cas de l'emboutissage).

Mais cette technique présente quelques limitations aussi bien au niveau technologique qu'économique [Ahmetoglou et Altan, 2000], à savoir : une cadence de production faible par rapport au procédé classique (emboutissage), des risques de rupture si les matrices ne présentent pas un bon état de surface ou ne sont pas correctement lubrifiées. Enfin, des amincissements de parois importants peuvent être observés et des ruptures peuvent se produire si la rugosité des matrices est trop importante.

1.2.3 Classifications des formes géométriques

Lors de l'hydroformage de tubes, on distingue différents modes de déformation géométriques tels que :

‘la saillie’ : l'expansion du tube s'effectue d'une façon asymétrique dans une branche latérale, comme une forme en T ou en Y (Figure.1.4(a)).

‘le gonflement’ : le périmètre du tube se déforme selon la forme de matrice comme par exemple une section carrée ou une forme irrégulière (Figure.1.4(b)).

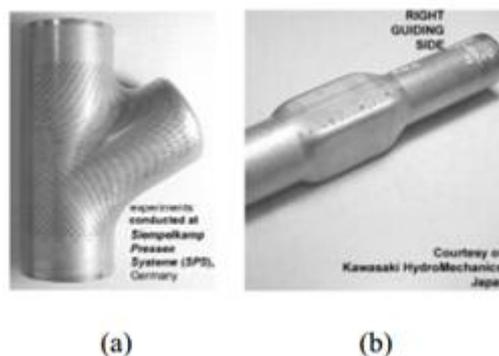


Figure.1.4. Différentes formes en hydroformage : (a) saillie de forme en Y et (b) gonflement de tube [Strano 2002].

Il est important de noter que l'hydroformage de tubes peut être effectué avec ou sans forces de compression axiale. Sans l'action de ces forces, on parle d'hydroformage en expansion où seule

l'action de la pression interne est utilisée pour la mise en forme. Dans les autres cas, on peut encore faire une distinction suivant que ces forces axiales sont faibles ou importantes. En hydroformage en simple expansion ou avec des forces axiales de compression faibles, l'hypothèse de déformations planes peut être faite. Dans les autres cas, le tube est en état de contraintes tridimensionnel. Le choix de travailler ou non avec des forces de compression dépend de la forme de la pièce à obtenir. Une pièce en T ou en Y nécessitera d'importantes forces de compression pour avoir un avalement suffisant de la matière permettant d'obtenir la protubérance sans risque de rupture. Pour une pièce initialement cintrée, comme un berceau moteur, ou pliée, le travail se fera essentiellement en expansion [Strano 2002].

1.3 Les paramètres importants du procédé

La réussite d'une opération d'hydroformage de tubes dépend d'un grand nombre de paramètres à savoir :

- la combinaison de la pression interne et des forces de compression axiales doit être correctement réalisée afin d'éviter certains défauts tels que le flambage du tube ou son éclatement,
- le mode d'obtention du tube est également important. En effet, les tubes dédiés à l'hydroformage peuvent être obtenu par roulage-soudage, étirage ou extrusion,
- les dimensions (diamètre, épaisseur et longueur) doivent être adaptées à la pièce à hydroformer,
- le matériau constitutif du tube doit posséder des caractéristiques mécaniques adéquates pour subir des déformations plastiques importantes,
- enfin, les conditions de contact et de frottement auront leur importance quant à la qualité de la pièce finale obtenue par hydroformage.

1.3.1 Formabilité dans le procédé d'hydroformage de tubes

Dans le procédé d'hydroformage, les modes d'instabilités classiquement rencontrés sont le flambement, le plissement et la striction [Koç et al. 2002b ; Asnafi 2003]. Ces modes de défaillances ont lieu dès que la structure change du mode de déformation les contraintes et les déformations dépassent des valeurs critiques pour lesquelles l'équilibre entre les efforts extérieurs appliqués et la résistance interne du matériau n'est plus respecté.

1.3.1.1 Flambement

Ce mode de défaillance est spécifique à l'hydroformage de tubes. Généralement, le flambement (Figure.1.5(a)) est rencontré pour des tubes longs de faible épaisseur (i.e. faible rapport D/t , D étant le diamètre et t l'épaisseur). Il s'agit d'une instabilité de structure qui apparaît le plus souvent au début du procédé pour un effort de compression axial excessif. Le flambement dépend essentiellement des dimensions du tube et le risque d'apparition de ce défaut augmente avec l'augmentation de la longueur du tube comme rapporté dans [Asnafi 2003]. Si ce mode de défaillance apparaît, il devient impossible de contrôler le procédé et de corriger cette instabilité par une variation de la pression ou du déplacement axial.

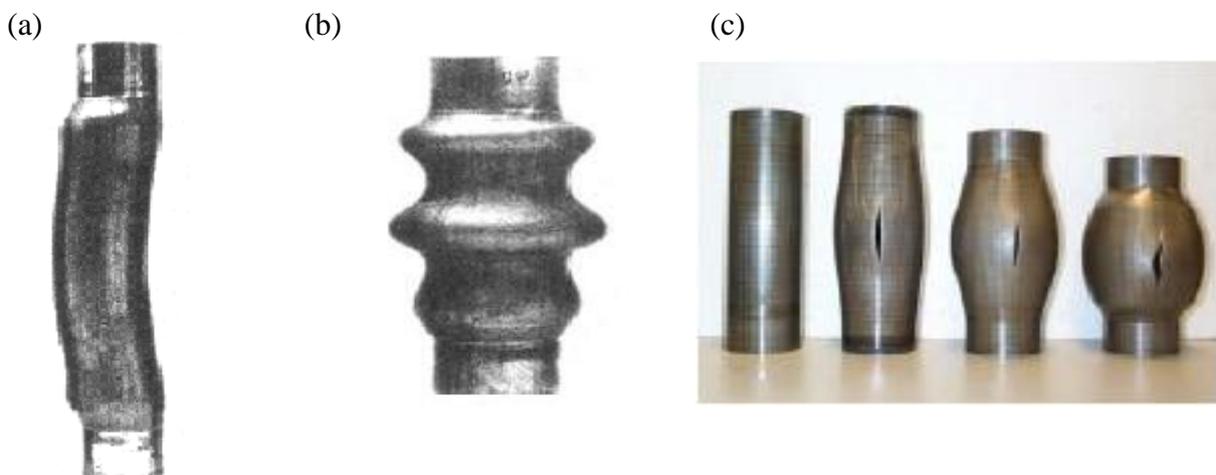


Figure.1.5. Modes de défaillances : (a) Flambement du tube, (b) Plissement de tube, (c) Striction de tubes. (de gauche à droite : tube original, tube hydroformé en expansion simple, tube hydroformé avec de faibles forces de compression puis avec d'importantes forces de compression).

1.3.1.2 *Plissement*

Le plissement constitue un cas particulier du flambement. Généralement ce mode de défaillance apparaît au début du procédé. La **Figure.1.5(b)** révèle cette instabilité plastique dans le cas de la mise en forme de tubes. Ce défaut de forme est dû essentiellement à une force axiale trop élevée par rapport à la pression interne appliquée. Contrairement au phénomène de flambement, le plissement peut être corrigé par une légère augmentation de la pression s'il est détecté suffisamment tôt. Ce phénomène est particulièrement complexe à étudier pour les formes tubulaires complexes. Anafi **[Asnafi 2003]** a révélé l'importance de bien contrôler l'avancement des poinçons en fonction de la montée en pression interne au cours du procédé d'hydroformage de tubes sur l'apparition de plissement. Dans leurs travaux, **[Yuan et al. 2006b]** distinguent trois modes de plissement :

- un plissement bénéfique : le plissement peut être autorisé, contrôlé puis annulé. En effet, il peut améliorer la formabilité du matériau en faisant varier les chemins de déformation,
- un plissement permanent (« dead wrinkles ») qui ne peut être résorbé et mène au rebut de la pièce formée,
- un plissement qui provoque l'éclatement de tube où la striction apparaît au niveau des plis.

1.3.1.3 *Striction localisée*

La striction localisée est le défaut majeur qui mène à l'éclatement des tubes au cours de l'hydroformage. La striction localisée correspond à une localisation des déformations qui précède généralement la rupture. Le procédé d'hydroformage dépend essentiellement des propriétés du matériau, des caractéristiques géométriques de la pièce à fabriquer, ainsi que la pression optimale. Dans la littérature, certains modèles ont été proposés permettant d'estimer le niveau de pression nécessaire pour des géométries simples. Altan et al **[Altan et al. 2001]** suggèrent des niveaux de pression convenable pour la mise en forme d'un tube axisymétrique qui sont fonctions des caractéristiques géométriques. Toutefois, ces modèles montrent leurs

limites lorsqu'il s'agit de réaliser des géométries complexes et le recours à des simulations numériques est de ce fait indispensable pour déterminer les niveaux de pression maximaux tolérables. Très souvent, l'analyse est fondée sur la valeur des amincissements localisés. Par exemple, des amincissements critiques de 15%, 25%, 30% sont respectivement préconisés dans le cas d'alliages d'aluminium, d'aciers à faible taux de carbone et d'aciers inoxydables [Liu et al. 2006]. Pour les tubes courts soumis à des sollicitations biaxiales, le critère de Hill n'est pas valable pour la prédiction de la striction localisée. Boumaiza et al [Boumaiza et al. 2006] ont proposé un critère qui tient compte des caractéristiques géométriques de tubes. La **Figure.1.5(c)** présente l'éclatement de tubes pour trois configurations différentes du procédé.

1.3.1.4 La fenêtre d'hydroformage

La formabilité est influencée par l'état de contraintes et de déformations dans le matériau. Par conséquent, la réussite d'une opération d'hydroformage de tubes dépend du choix du matériau, du chemin de chargement et de la géométrie désirée pour le produit final.

Asnafi, [Asnafi 2003] a introduit la notion de "fenêtre de formage de tube". Dans un système d'axes représentant d'une part la pression interne appliquée et d'autre part la force axiale de compression, la zone de réussite d'une opération d'hydroformage est définie par les différentes courbes ou droites illustrées sur la **Figure.1.6** :

- la droite 1 représente la force de compression minimale requise pour assurer l'étanchéité alors que la pression interne augmente,
- la droite 2 correspond à la force de frottement, croissante avec l'augmentation de la pression interne, au niveau de la zone en expansion,
- la courbe 3 représente la combinaison force axiale de compression – pression interne qui permet d'assurer la déformation plastique du tube,
- la droite 4 représente la pression d'éclatement du tube,
- la courbe 5 correspond à la limite de risque de flambement et de plissement.

L'ensemble de ces lignes et de ces courbes délimite la zone de sécurité de formage [Singh 2003]. Pour un procédé de fabrication robuste, la zone de sécurité doit être aussi grande que possible. En effet, un matériau de tube approprié, une meilleure lubrification, une meilleure

qualité du tube et l'optimisation du trajet de chargement sont des moyens pour améliorer l'aptitude au formage. La géométrie désirée est également un facteur important. Lorsqu'une géométrie avec de petits rayons de coin est souhaitée, la pression interne nécessaire est plus grande, et le risque d'éclatement augmente.

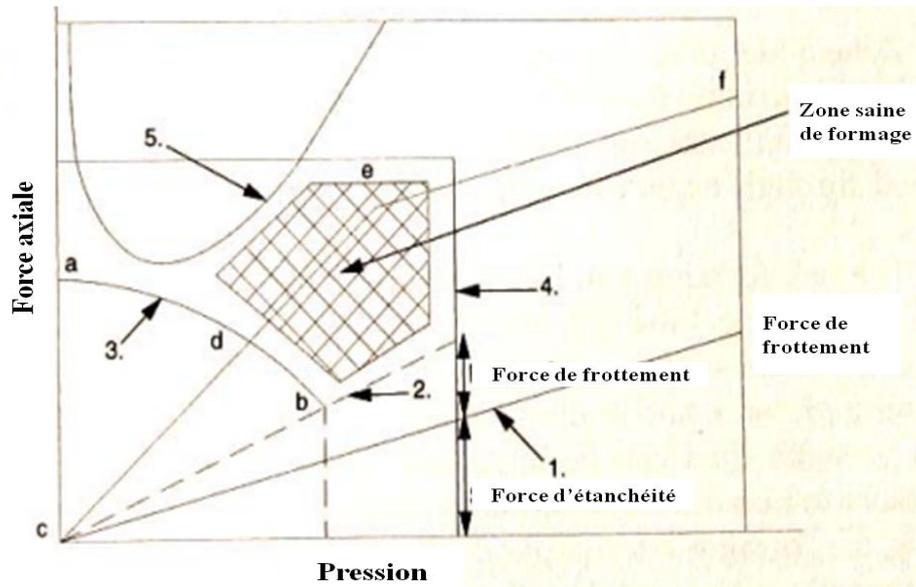


Figure.1.6. Diagramme du procédé d'hydroformage [Singh, 2003].

1.3.2 Les modes d'obtention des tubes

Différentes modes d'obtention de tubes ont été développés. A titre d'exemple, l'extrusion et le roulage-soudage de tubes peuvent être cités. L'extrusion est un procédé de fabrication (thermo)mécanique par lequel un matériau est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir (Figure.1.7). On forme en continu un produit long (tube, tuyau, profilé, fibre textile) et plat (plaque, feuille, film). Les cadences de production sont élevées. L'extrusion donne des pièces aux formes encore plus précises que celles qui sont réalisées avec l'estampage ou le matriçage. De plus, les pièces présentent des bons états de surface, ce qui permet souvent de les utiliser sans usinage complémentaire [2].

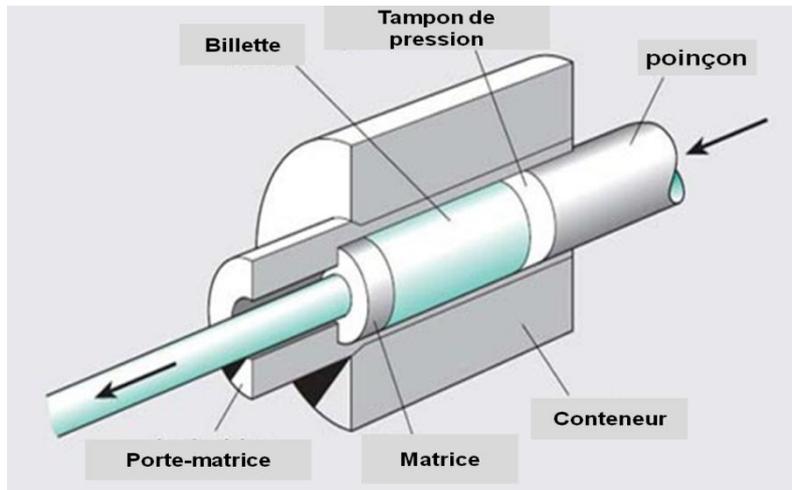


Figure.1.7. Schéma illustrant l'extrusion du tube [2].

D'autre part, on trouve le procédé du roulage comme phase préliminaire du mode d'obtention d'un tube. En effet, le roulage est une opération de mise en forme des métaux par déformation plastique consistant en une succession d'écrasements à chaud, avec rotation de la pièce entre impacts, ou en un forgeage avec rotation de la pièce par passage entre deux matrices, ou encore en une opération de cintrage de tôles réalisée par passage entre cylindres mobiles (**Figure.1.8(a)**). Ensuite, une opération de soudage sera appliquée à la surface de tubes. Généralement, on distingue deux types de soudage :

- Soudage électrique par résistance : où deux électrodes, en forme de disques, sont placées de part et d'autre du joint à souder. Le courant de basse fréquence arrive par une électrode et repart par l'autre (**Figure.1.8(b)**).
- Soudage électrique par induction : où le tube à souder (a) est placé à l'intérieur d'une spire de cuivre (b) parcourue par le courant primaire. En fréquence radio, les courants induits suivent les chemins de moindre impédance : un impédeur (c) placé dans le tube permet d'orienter le passage du courant là où son action sera utile. Le courant est en outre localisé sur une profondeur de quelques dixièmes de millimètres seulement ("effet de peau") : c'est un véritable film de métal liquéfié qui assure la soudure (**Figure.1.8(c)**).

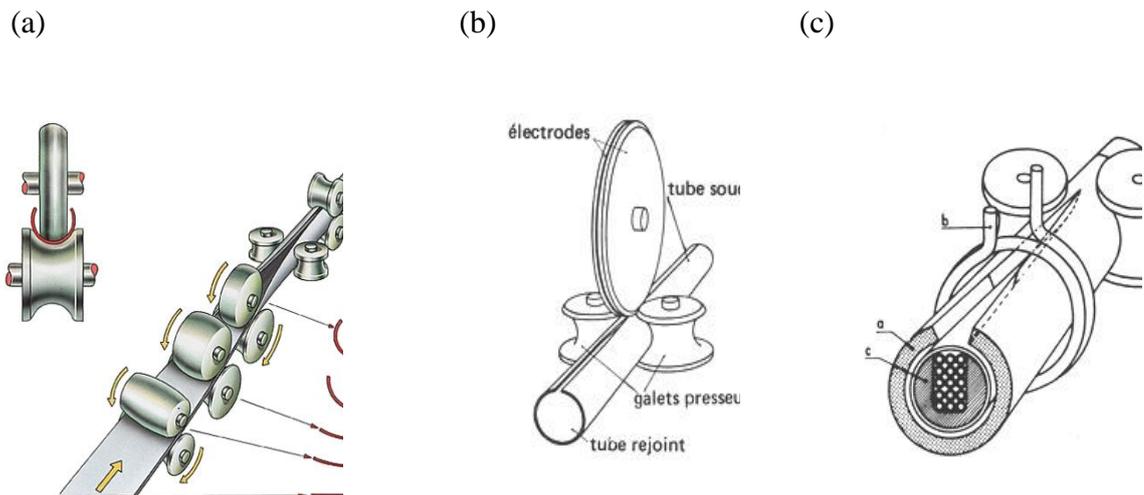


Figure.1.8. (a) roulage de tube, (b) soudage électrique par résistance, (c) soudage électrique par induction [3].

1.3.3 Le comportement plastique des matériaux

1.3.3.1 Influence du coefficient d'écroutissage isotrope en hydroformage

Le coefficient d'écroutissage isotrope du matériau, noté "n", représente le durcissement du matériau au fur et à mesure qu'il se déforme plastiquement. Il correspond ainsi à une augmentation de la contrainte avec la déformation plastique. Selon Manabe et Amino [Manabe et Amino 2002], ce coefficient n'a pas d'influence sur le déplacement axial (avalemt) du tube lors de l'hydroformage, ni sur la distribution d'épaisseur pour des matériaux possédant une bonne ductilité (n compris entre 0,2 et 0,4). Par contre, pour des matériaux présentant un faible coefficient "n", on constate des amincissements importants. [Kridli et al. 2003] ont constaté les mêmes tendances lors de simulations numériques d'opérations d'hydroformage de tubes. Koç [Koç 2003a] a révélé que, pour des valeurs de "n" variant de 0,16 à 0,22, on observait une différence de seulement 7% pour l'expansion radiale du tube, pour un même amincissement de 25% (Figure.1.9). [Zribi et al, 2008] ont étudié, à partir de simulations numériques, l'influence de "n" sur la formabilité des tubes dans le cas d'une expansion libre. Ils ont montré que plus "n" est important, plus l'apparition de déformation localisée est retardée. Selon [Alaswad et al.

2012], une augmentation de "n" conduit à une épaisseur plus homogène dans le tube hydroformé ; l'amincissement dans le coin lors de l'expansion d'un tube à section circulaire dans une matrice carrée est donc moins critique pour les matériaux à fort coefficient d'érouissage.

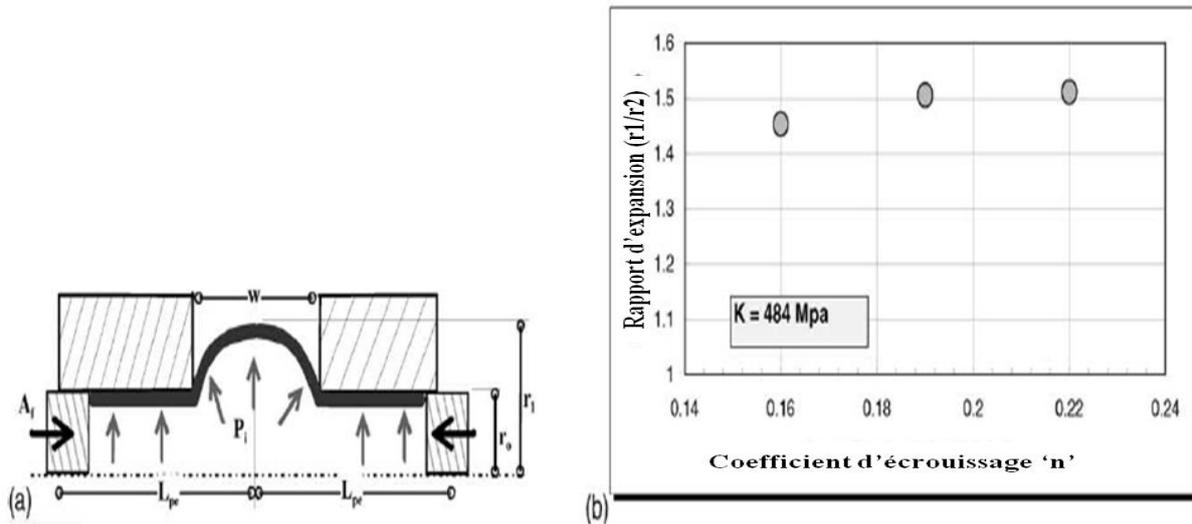


Figure.1.9. Effet du coefficient d'érouissage sur le rapport d'expansion (rapport entre le rayon courant du tube gonflé et le rayon initial du tube) dans un test de gonflement axisymétrique de tube pour un maximum d'amincissement de 25% [Koç 2003a].

Xu et al [Xu et al. 2009a] ont étudié l'influence du coefficient d'érouissage sur la distribution d'épaisseur dans une matrice de section carrée. Ils ont montré via des simulations numériques que pour de faibles valeurs de "n", la zone la plus épaisse se localise dans la zone tangentielle (zone de contact) : au niveau de la zone libre, la distribution d'épaisseur révèle un amincissement important pour des faibles valeurs de "n". En conclusion, une valeur élevée du coefficient d'érouissage favorise l'uniformité de la distribution de l'épaisseur [Xu et al. 2009a].

Dans les travaux de [Zribi et al. 2013], une étude numérique de l'influence des paramètres du matériau sur le procédé d'hydroformage de tubes dans une section carrée a été développée. En particulier, l'influence du coefficient d'érouissage a été étudiée (Figure.1.10). Deux zones critiques telles que la paroi droite et la zone d'expansion ont été discutées. Les principaux résultats révèlent que le coefficient d'érouissage a une influence plus remarquable pour le

comportement dans la zone d'expansion que sur le comportement dans la paroi droite. Au niveau de la paroi droite (zone de contact), la distribution de l'épaisseur est moins sensible aux faibles coefficients d'écroutissage, alors que dans la zone d'expansion, la distribution d'épaisseur est importante pour des faibles coefficients d'écroutissage. Par conséquent, plus le coefficient d'écroutissage est important plus l'épaisseur diminue. Ces résultats rejoignent les conclusions de [Xu et al. 2009a].

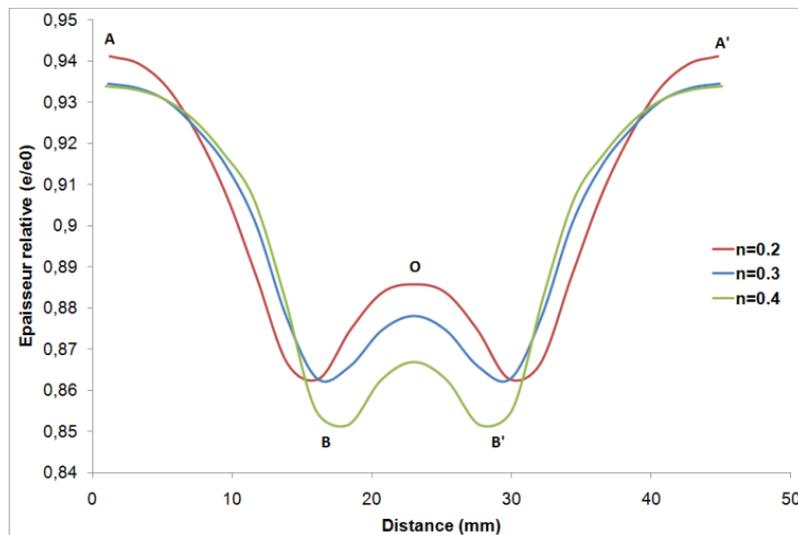


Figure.1.10. Influence du coefficient d'écroutissage sur la distribution d'épaisseur dans un tube à section circulaire hydroformé dans une matrice à section carrée [Zribi et al, 2013].

1.3.3.2 Influence du coefficient d'anisotropie initiale en hydroformage

Le coefficient d'anisotropie " r " est l'un des paramètres les plus importants dans l'hydroformage de tubes. Différentes configurations ont été utilisées pour étudier l'influence de ce paramètre comme le test d'expansion libre (matrice ouverte) ou le test d'hydroformage de tubes dans une section carrée (matrice fermée).

Il importe de retenir suite à une revue bibliographique que le coefficient d'anisotropie " r " présente un effet remarquable sur la distribution de la déformation lors d'un essai d'expansion libre. Autrement dit, l'amincissement est d'autant plus important que la valeur de " r " est faible. Par conséquent, afin de garantir une distribution d'épaisseur uniforme, un matériau avec une

valeur élevée de "r" doit être choisi [Carleer et al. 2000 ; Imaninejad et al. 2004a,b ; Zribi et al. 2008] . Quel que soit le matériau utilisé : aluminium [Imaninejad et al, 2004a,b] ou acier [Carleer et al. 2000], des résultats similaires sont obtenus. Différentes approches ont été exploitées : des simulations numériques combinées aux essais expérimentaux [Carleer et al. 2000 ; Imaninejad et al. 2004a], ou purement expérimentales [Imaninejad et al. 2004b], ou encore purement numériques [Zribi et al. 2008].

Lors d'un essai d'hydroformage de tubes dans une section carrée, il a été montré dans la littérature [Manabe et Amino 2002 ; Xu et al. 2009a ; Zribi et al. 2013], que l'augmentation du coefficient d'anisotropie diminue l'amincissement et améliore l'uniformité de la distribution d'épaisseur (Figure.1.11). De même, différents moyens ont été exploités pour étudier l'influence de ce paramètre soit par une combinaison des simulations numériques avec les essais expérimentaux [Manabe et Amino 2002 ; Zribi et al. 2013] ou soit par une conjonction entre un modèle analytique, numérique et essais expérimentaux [Xu et al. 2009a].

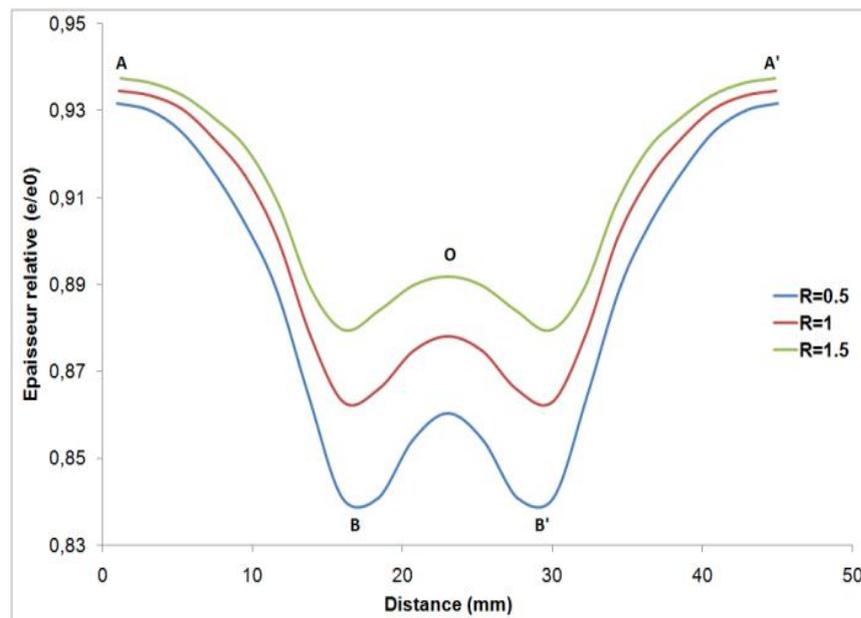


Figure.1.11. Influence du coefficient d'anisotropie sur la distribution d'épaisseur dans une section carrée [Zribi et al. 2013].

1.3.4 Influence du coefficient de frottement quasi-statique ' μ ' et de la lubrification

1.3.4.1 Influence du coefficient de frottement

Comme nous trouvons dans le cas de pressions de contact élevées avec d'importantes surfaces de contact, des forces de frottement importantes prennent naissance entre le tube et la matrice. Il paraît donc cohérent que les conditions de frottement aient une influence significative sur l'hydroformage de tubes. Ces forces n'affecteront pas seulement les paramètres du procédé mais également la qualité de la pièce finale, en particulier, en termes de distribution d'épaisseur au sein du tube mis en forme. Par conséquent, il est intéressant de réduire le frottement dans la mesure du possible et ses effets néfastes comme rapporté dans la littérature [Plancak et al. 2005 ; Ngaile et al. 2006].

Selon les travaux de [Carleer et al. 2000], il a été montré que le coefficient de frottement " μ " influe sur la distribution de la déformation. En effet, une faible valeur du coefficient de frottement " μ " diminue la pente du chemin de déformation au niveau du diagramme de formage (Figure.1.12). Alors que pour des valeurs élevées du coefficient de frottement, la pente traverse le diagramme limite de formage à des valeurs négatives de déformations mineures et des déformations majeures positives.

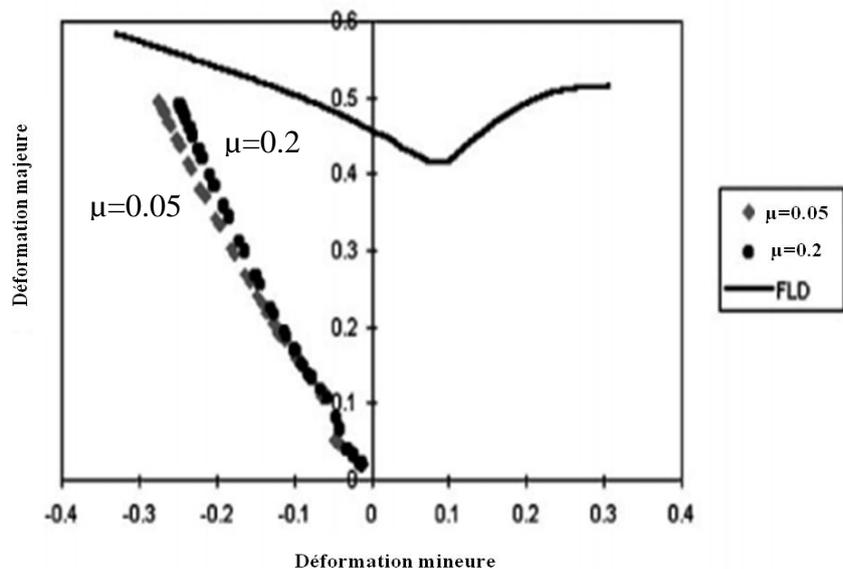


Figure.1.12. Distribution de déformation pour un test d'expansion libre pour différents coefficients de frottement [Carleer et al. 2000].

Les travaux de [Cherouat et al. 2002 ; Imaninjead et al. 2004a,b] ont traité de l'influence du coefficient de frottement sur l'épaisseur de tube, et ce, lors d'un essai d'expansion libre. Ces derniers ont constaté que " μ " influe fortement sur la distribution d'épaisseur. En effet, plus " μ " est élevé, plus on aura une réduction d'épaisseur importante. D'une autre manière, l'augmentation du coefficient de frottement favorise l'apparition de l'amincissement localisé. De même, au cours d'un essai d'hydroformage de tube dans une section carrée, les résultats obtenus permettent de déduire qu'une augmentation du coefficient de frottement s'accompagne d'une épaisseur élevée dans la zone de contact et une épaisseur faible dans la zone d'expansion. Par voie de conséquence, une augmentation du coefficient de frottement favorise l'amincissement et perturbe l'uniformité de l'épaisseur comme rapporté dans les travaux [Zribi et al. 2013] (Figure.1.13). Plus μ est élevé, plus la différence d'épaisseur sur l'ensemble du tube est significative et donc l'amincissement est important. [Manabe et Amino 2002 ; Xu et al. 2009a,b ; Korolis et al. 2011 ; Zribi et al. 2013]. Dans la littérature, il est généralement mentionné que l'obtention de ces résultats se fait par différentes méthodes soit par une combinaison entre des simulations numériques et des tests expérimentaux [Manabe et Amino 2002 ; Cherouat et al. 2002 ; Imaninjead et al. 2004a,b ; Korolis et al. 2011 ; Zribi et al. 2013] ou par l'usage des trois approches : analytique, numérique et expérimentale [Xu et al. 2009a,b].

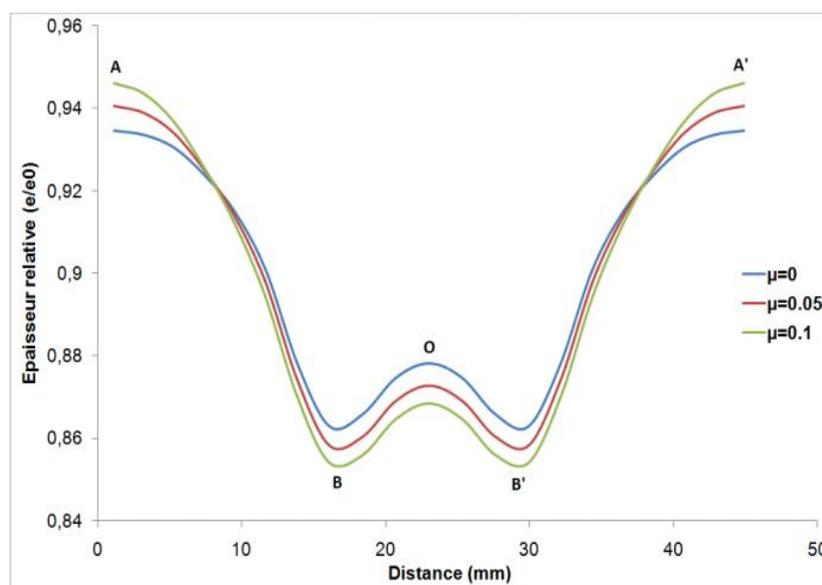


Figure.1.13. Influence du frottement sur la distribution d'épaisseur dans une section carrée [Zribi et al, 2013].

1.3.4.2 *Influence de la lubrification*

Les recherches traitant de la lubrification durant le procédé d'hydroformage ont été menées aussi bien pour déterminer le coefficient de frottement que pour classer les lubrifiants pour des applications d'hydroformage spécifiques. On peut distinguer plusieurs classes de lubrifiant : (a) les lubrifiants secs (lubrifiants solides), (b) des lubrifiants humides (solutions ou émulsions synthétiques ou naturelles) (c) des pâtes, des cires, des savons. Chaque groupe a ses propres avantages et inconvénients en termes de performance, d'application, de nettoyage, et de coût. Les lubrifiants secs sont généralement plus efficaces en termes de performances pour réduire le frottement et augmenter la durée de vie des outillages, et sont plus faciles à mettre en œuvre. Par contre, le nettoyage nécessite l'utilisation de produits de lavage spéciaux. Compte tenu des étapes de séchage et de nettoyage, leur coût d'utilisation peut s'avérer élevé comparé à des lubrifiants humides. Les lubrifiants humides sont eux rentables faciles à nettoyer, compatibles avec le procédé mais ils sont moins efficaces qu'un lubrifiant sec. Par conséquent, un compromis doit être fait en fonction de la complexité de la pièce et les exigences de qualité [Koç et al. 2001]. Une bonne lubrification doit être sélectionnée en fonction des critères suivants :

- elle doit réduire le frottement de glissement entre l'outillage et la surface du tube, assurer sa fonction sous haute pression avec des valeurs allant jusqu'à 40-100 MPa au niveau de l'interface tube / matrice afin d'éviter tout grippage et collage [Koç 2003b],
- elle doit être le moins abrasive possible pour éviter une usure prématurée des outils,
- elle doit répondre aux exigences environnementales,
- son application et son nettoyage doivent être aisés,
- enfin son coût doit être compétitif.

Le principal objectif d'une bonne lubrification est d'éviter l'apparition de défauts tels que le flambage du tube ou l'apparition de plis localisés (Kang et al. 2007).

La lubrification joue en fait un rôle majeur dans le procédé d'hydroformage de tubes, car elle réduit les contraintes de frottement à l'interface tube / matrice et peut aider à améliorer la qualité des produits [Ngai et al. 2004a,b].

Malgré les avantages offerts par le lubrifiant, l'excès de ce dernier peut provoquer des problèmes au niveau de pièces hydroformées tels que la présence de plis (**Figure.1.14**). Dans la **Figure.1.14**, l'hydroformage a été réalisé avec le tube placé à l'horizontal. Le lubrifiant, initialement réparti sur toute la surface de la matrice, a coulé sous l'effet de la pesanteur pour se retrouver concentré dans la moitié inférieure de la matrice. Il en résulte un manque de lubrification dans la partie supérieure qui se traduit dans cette zone par des rayures et une usure plus rapide de la matrice. Le lubrifiant qui s'est concentré dans la partie inférieure de la matrice va engendrer une sur-lubrification dans la partie basse de l'outillage. Ce surplus de lubrifiant entraîne une lubrification moins homogène avec création de poches de lubrifiant qui, sous l'action de la pression interne dans le tube, vont générer des fortes pressions externes au tube (**Figure.1.15**). Il en résulte des déformations locales de la surface externe du tube qui vont engendrer l'apparition de défauts comme ceux illustrés sur la **Figure.1.14a**.

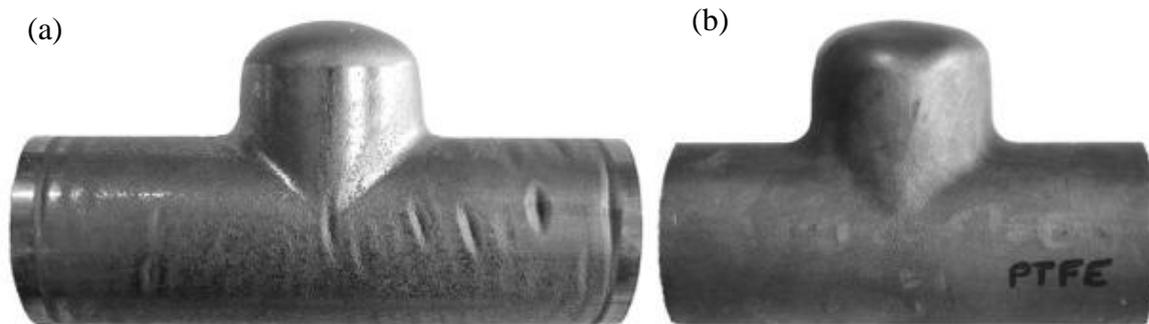


Figure.1.14. (a) Manifestation d'un excès de lubrification (b) la même pièce réalisée avec un lubrifiant sec (PTFE) [**Fironetino et al, 2009**].

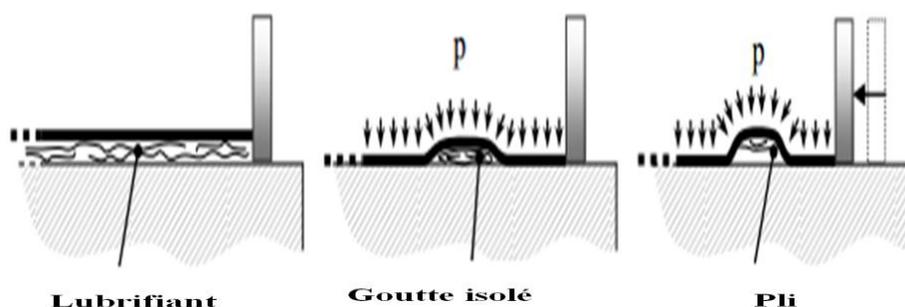


Figure.1.15. Effet de l'excès de lubrification [Fironetino et al, 2009].

Pour évaluer l'impact des lubrifiants (et revêtements) sur le coefficient de frottement, plusieurs tests ont été développés. Ces tests sont utilisés pour i) identifier le lubrifiant approprié et ii) estimer le coefficient de frottement [Strano et al. 2004].

Parmi les tests développés, le test de limitation de hauteur du dôme (LDH), le test d'expansion des tubes en forme de poire (PET) et le test d'expansion dans une matrice de section carrée ou triangulaire (avec des surfaces planes ou courbes) [Ngaile et al. 2004a,b] peuvent être cités. En fait, les critères pris en compte sont le remplissage du coin, l'épaisseur de la paroi, le rayon du coin et la pression d'éclatement (pression à striction). En se basant sur les résultats expérimentaux et les simulations numériques, le coefficient de frottement peut être déterminé par suite et les lubrifiants peuvent être classés.

D'autres études ont été développées pour discuter diverses zones de frottement. Dans le procédé d'hydroformage en 'T', Ngaile et al [Ngaile et al. 2006] ont évalué la lubrification dans trois zones : la zone de transition, celle de guidage et celle d'expansion. Grâce à la différence dans l'écoulement du matériau et l'état de contrainte, les trois zones peuvent présenter différentes conditions de frottement. Par conséquent la lubrification peut fonctionner différemment et ces trois zones vont être étudiées séparément pour déterminer les caractéristiques de frottement (Figure.1.16).

Au niveau de la zone de guidage, un jeu fonctionnel existe entre le tube et l'outillage en début d'opération qui facilite l'insertion du tube à l'intérieur de la matrice. En effet, la vitesse à l'interface tube / matrice est élevée en utilisant une lubrification liquide.

Par conséquent, les mécanismes de lubrification (MPHS : micro-plasto-hydrostatique, micro-élasto-hydrodynamique) peuvent être facilement activés, et le coefficient de frottement à l'interface diminue [Ngaile et al. 2006]. Pour améliorer les performances du lubrifiant dans la zone de guidage, Ngaile et al ont proposé d'utiliser des tubes texturés où les surfaces texturées présentent des «poches» qui faciliteront le blocage mécanique du lubrifiant.

Dans la zone de guidage, Koç [Koç 2003b] a étudié l'évaluation du frottement et de la lubrification pendant le procédé d'hydroformage de tubes. Il existe des forces de frottement élevées à cause du contact entre le tube et la matrice (Figure.1.17a). Une valeur élevée de cette force empêche une alimentation suffisante (avalem) en matériau et conduit à l'amincissement excessif dans les zones de transition et d'expansion qui finalement, conduit à la rupture. Un faible coefficient de frottement est nécessaire pour permettre à la matière d'être introduite dans la zone d'expansion de la matrice.

Prier et Schmoeckel [Prier et Schmoeckel 1999] ont développé le test de la zone de guidage pour mesurer expérimentalement le coefficient de frottement et pour évaluer la performance des lubrifiants. Un tube est mis sous pression dans une matrice et il est déplacé axialement d'une distance donnée avec une certaine vitesse. La charge axiale est mesurée en tenant compte de la pression permettant d'évaluer le coefficient de frottement.

La deuxième zone est la zone de transition, située entre les zones de guidage et d'expansion. Dans cette zone, le tube se déforme et se trouve sous un état de contrainte tri-axiale en raison du contact avec la matrice. Le déplacement et la vitesse du tube sont souvent plus faibles que dans la zone de guidage et sont négligeables à l'intérieur de cette zone. Cette zone se caractérise par un faible coefficient de frottement comme pour la zone de guidage.

Pour la zone d'expansion, le tube est sous l'effet d'un chargement bi-axial sans effet sur l'alimentation axiale. Le déplacement du matériau de tube par rapport à la matrice est faible et dans la direction circonférentielle, avec une vitesse de glissement négligeable. Un test de la zone d'expansion [Ngaile et al. 2004a,b] est représenté dans la Figure.1.17c. Un tube est expansé dans une cavité triangulaire (ou une autre forme) jusqu'à atteindre la rupture (éclatement). Différents lubrifiants sont appliqués et en fonction du coefficient de frottement résultant, la distance entre le sommet du triangle et la hauteur de gonflement de tube est

modifiée. Les bons lubrifiants permettent des hauteurs de gonflement importantes, car l'écoulement du matériau le long de la paroi de la cavité triangulaire est facilité. Il n'y a aucune mesure quantitative du coefficient de frottement. L'utilisation de simulations EF avec différents coefficients de frottement permet de modéliser l'essai expérimental. Le modèle qui prédit avec la meilleure précision la hauteur d'expansion donne une bonne approximation du coefficient de frottement réel.

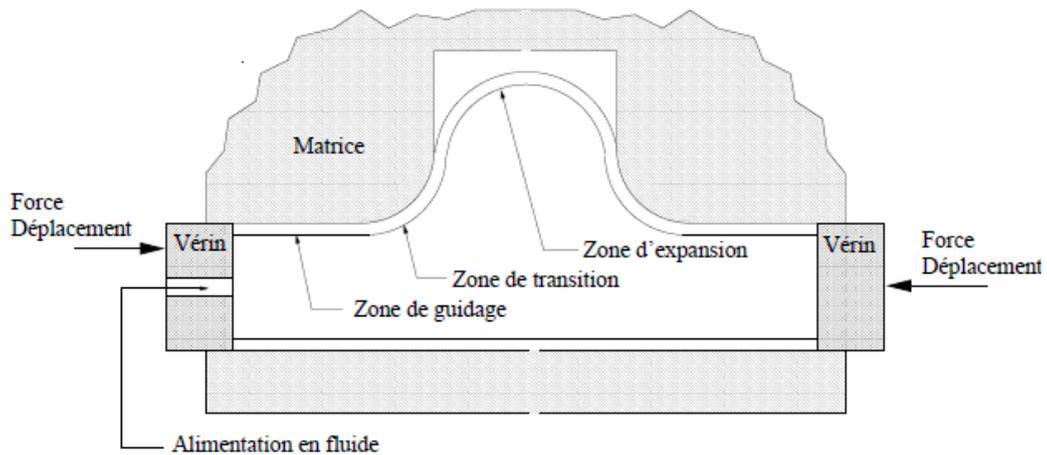


Figure.1.16. Zones de frottement dans le procédé d'hydroformage pour une forme en T [Ngaile et al. 2006].

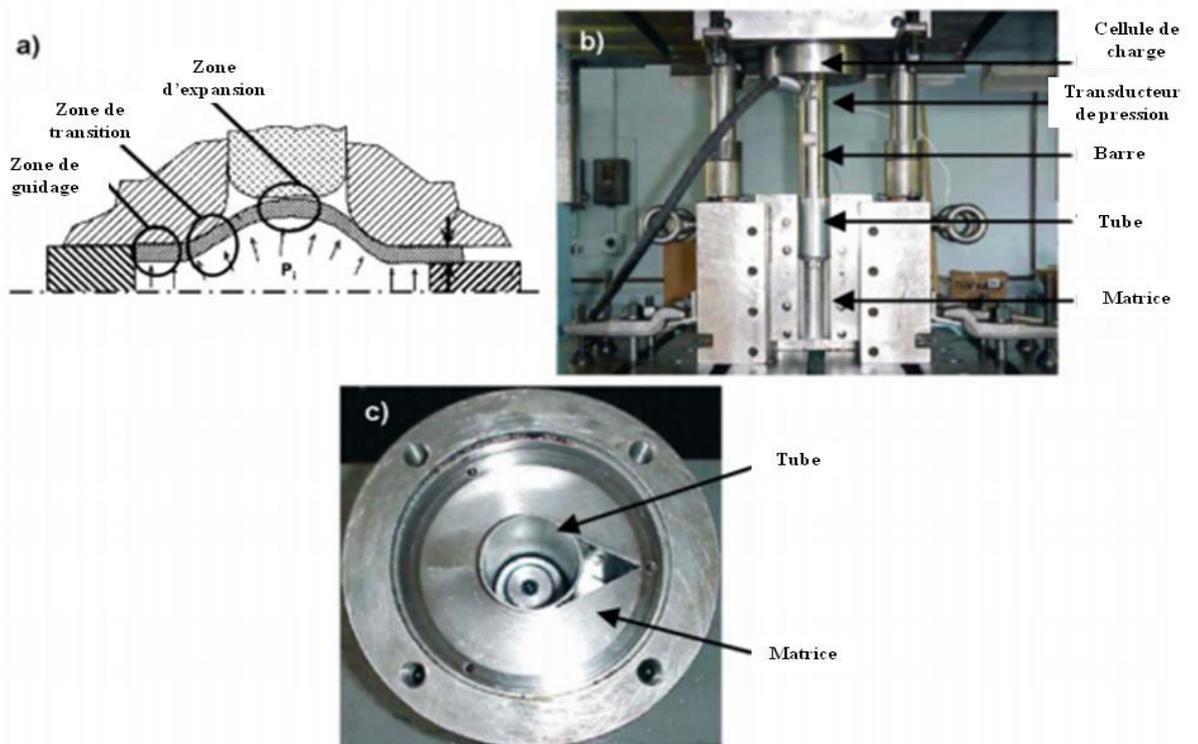


Figure.1.17.(a)Trois zones principales de frottement [Koc 2003] (b) test de la zone de guidage [Costello et Riff 2005] (c) test de zone d'expansion [Costello et Riff 2005].

Les travaux de [Yi et al. 2011] consistent à étudier l'effet du lubrifiant sur le coefficient de frottement pendant le procédé d'hydroformage. En effet, différents lubrifiants ont été utilisés afin de sélectionner celui qui optimise l'opération d'hydroformage. Deux classes de lubrifications sont distinguées : un lubrifiant à l'état solide (film de téflon) et un deuxième à l'état liquide. Pour le test de frottement dans la zone de guidage, les résultats montrent que la viscosité du lubrifiant et la pression interne augmentent avec la diminution du coefficient de frottement (Figure.1.18). Le coefficient de frottement obtenu par un test à sec est très élevé par rapport au coefficient de frottement obtenu par un test lubrifié. De plus, le coefficient de frottement obtenu à travers un test lubrifié par liquide est très élevé par rapport à la valeur obtenue par un test utilisant le film de téflon.

Pour le test de frottement dans la zone d'expansion, le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de la ductilité du matériau [Yi et al. 2011]. En effet, l'amincissement maximal se localise dans la zone du contact entre le tube et la matrice. De plus, le coefficient de frottement dans la zone d'expansion diminue avec l'augmentation de la viscosité du lubrifiant

et il n'est pas sensible à la pression interne. Enfin, le coefficient de frottement dans la zone de guidage est inférieur à celui obtenu dans la zone d'expansion.

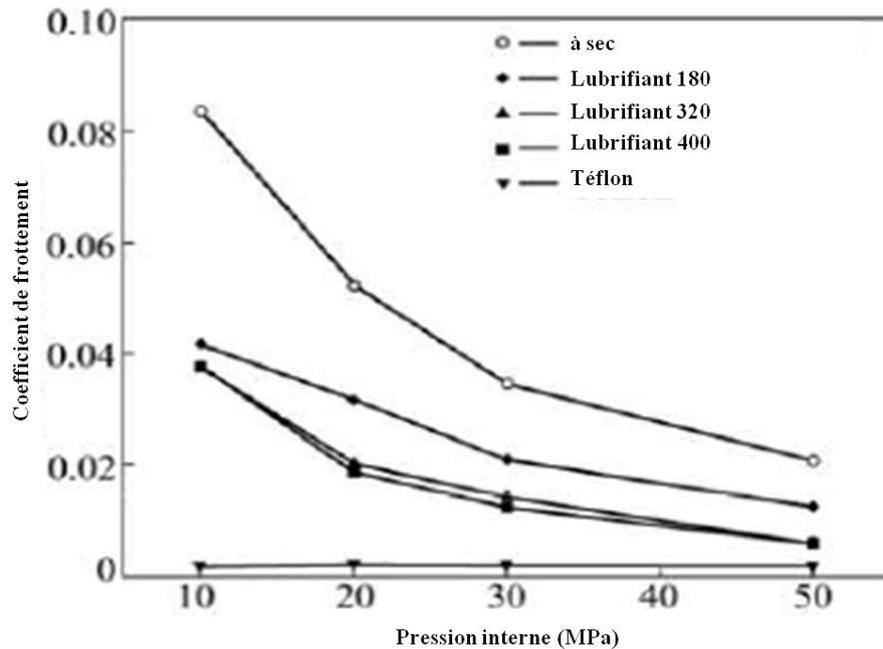


Figure.1.18. Distribution du coefficient de frottement avec différents lubrifiants en fonction de la pression interne [Yi et al. 2011].

1.4 Les tests spécifiques développés pour la caractérisation du comportement plastique des tubes et la caractérisation du frottement

1.4.1 Caractérisation du comportement plastique des tubes

La caractérisation du comportement plastique consiste à déterminer la courbe d'écroutissage du matériau. Dans le cas de structures minces planes, c'est l'essai de traction mené sur des éprouvettes plates qui est utilisé. Or, en hydroformage de tubes, l'échantillon à privilégier est un tube ; il est donc nécessaire d'envisager un autre test. De plus, les matériaux peuvent avoir des comportements plastiques différents suivant le mode de sollicitation. Afin de caractériser le matériau du tube dédié à être hydroformé, le test de gonflement libre de tube a été développé, par analogie avec le test de gonflement de flan développé pour la caractérisation des tôles dédiées à être embouties.

L'essai de gonflement libre de tube consiste à déformer un tube grâce à l'application d'une pression interne. Plusieurs variantes existent : celle où les deux extrémités du tube sont encastrées et celle où les deux extrémités du tube peuvent glisser dans la matrice. Dans ce second cas, de plus grandes déformations circonférentielles sont obtenues. Néanmoins, le trajet de déformation et le taux de triaxialité des contraintes sont différents dans ces deux configurations de test. Dans le cas où les extrémités du tube sont fixes, la caractérisation mécanique du tube est bien adaptée pour l'hydroformage en expansion seule [Velasco et al. 2008 ; Ben Ouirane et al. 2011]. Dans le second cas, elle sera plus adaptée à un hydroformage où des forces axiales de compression et une pression interne sont combinées [Imaninejad et al. 2004b ; Hashemi et al. 2015] (Figure.1.19).

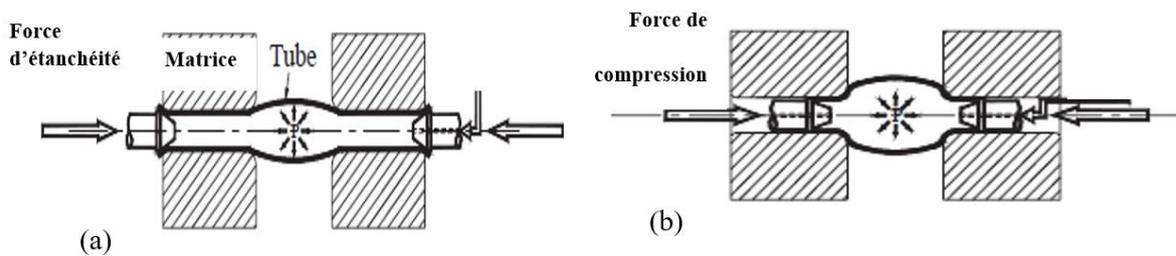


Figure.1.19. (a) Gonflement libre en expansion seule, (b) gonflement libre en combinant la force axiale et la pression interne [Imaninejad et al. 2004b].

Les essais de gonflement libre de tubes permettent d'obtenir l'évolution de la hauteur de gonflement au pôle en fonction de la pression. Pour obtenir la courbe contrainte- déformation, il est nécessaire de recourir à des modèles analytiques. Plusieurs auteurs se sont penchés sur la question et, à ce stade, deux grandes classes d'approches expérimentales se distinguent :

- celles fondées sur des mesures d'échantillons post-mortem,
- celles fondées sur des mesures "on-line".

Les premières nécessitent la réalisation de nombreux essais et l'utilisation d'un grand nombre d'échantillons. Les secondes sont beaucoup moins coûteuses en temps et matériaux.

Les modèles permettant de remonter aux contraintes - déformations à partir de la courbe pression interne – hauteur de gonflement peuvent être :

- des modèles semi-analytiques,

- des modèles complètement analytiques,
- des méthodes d'identification.

La dernière méthode, qui consiste à minimiser la différence entre les résultats d'une simulation numérique par éléments finis et ceux expérimentaux, est efficace mais nécessite de faire une hypothèse sur la loi d'érouissage.

Les deux premières méthodes sont assez proches dans leurs fondements. Elles sont basées sur une représentation géométrique du tube déformé pour l'évaluation des déformations et sur la méthode des tranches pour l'évaluation des contraintes. Les modèles semi-analytiques nécessitent la résolution d'équations non linéaires [Hwang et al. 2007 ; Velasco et Boudeau 2008], alors que les modèles complètement analytiques permettent de déterminer les contraintes et déformations à l'aide d'un simple tableur [Boudeau et Malécot 2012]. Ces deux familles de modèles sont intéressantes car elles permettent d'évaluer indépendamment les composantes des tenseurs contrainte et déformation ; ainsi aucune hypothèse n'est faite quant au critère de plasticité et à la loi d'érouissage.

1.4.2 Caractérisation du frottement

1.4.2.1 Le test de frottement de pion sur disque et ses limitations

Le test "pion-sur-disque" est un essai permettant, entre autres, l'évaluation du coefficient de frottement entre un couple de matériaux en contact sous différentes conditions de lubrification (à sec ou lubrifié). L'appareillage utilisé est un tribomètre permettant de simuler diverses configurations de contact à savoir plan/plan ou sphère/plan. En effet, le test "pion sur disque" permet d'appliquer directement une charge normale (F_n) et de mesurer l'effort tangentiel (F_t) par un couple de surfaces en contact. Ainsi il y a moins de paramètres qui risquent d'affecter le test [Klock et Raedt 2001]. La première configuration de ce test a été mise en place par [Kawai et Doha 1987] pour simuler les conditions de frottement fondamentales en prenant en compte (1) la quantité de déformation plastique, (2) la pression à l'interface, (3) la distance de glissement (4), la vitesse de glissement (5), la compatibilité des matériaux en contact et (6) la température de l'essai.

[Fiorentino et al. 2009] ont utilisé un tribomètre pion-sur-disque afin d'évaluer le coefficient de frottement entre le cuivre recuit et l'acier H13 dans des conditions lubrifiées. Différentes lubrifications ont pu être testés (à sec, téflon, téflon avec de l'huile...).

Un système fondé sur des cellules de charge et un système d'acquisition de données, mesure l'effort normal appliqué et l'effort tangentiel résultant. Le coefficient de frottement de Coulomb est estimé comme le rapport entre ces deux efforts :

$$\mu = \frac{F_t}{F_n}$$

(1.1)

Une autre configuration du tribomètre a été présentée dans les travaux de [Guermazi et al. 2009]. Une bille d'acier 100Cr6 ayant un diamètre de 10 mm est utilisée comme corps antagoniste. Une telle bille en acier est fixée dans un porte-échantillon monté sur un bras servant à appliquer les charges normales (Figure.1.20). Les échantillons à tester sont fixés sur la surface du disque rotatif qui est entraîné par un moteur à vitesse variable. La force de frottement est mesurée à partir des valeurs de déformation obtenues à l'aide d'une paire de jauges montées sur le bras vertical supportant la bille d'acier.

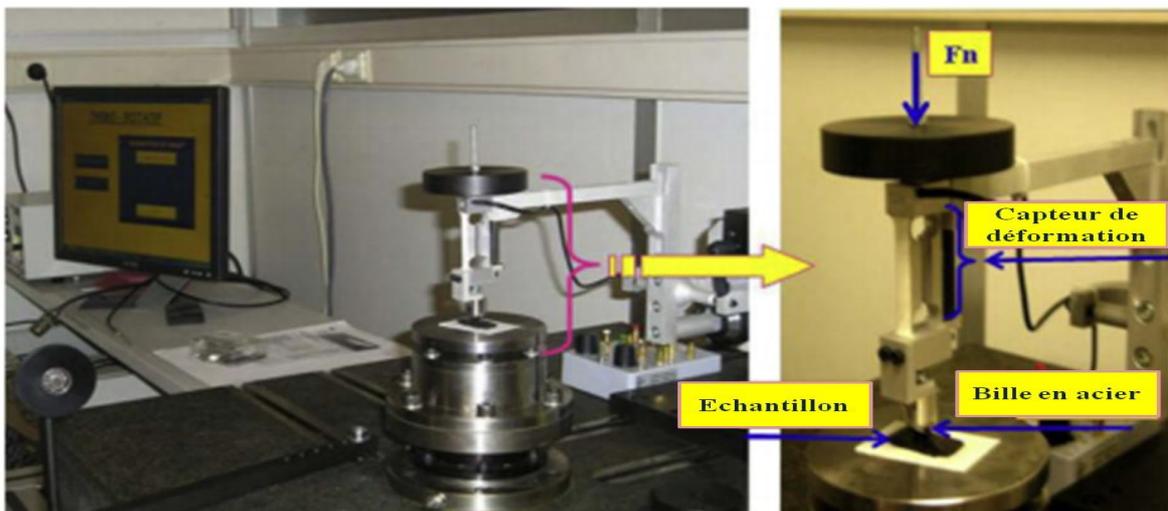


Figure.1.20. Exemple de tribomètre pion sur disque rotatif [Guermazi et al. 2009].

1.4.2.2 Les tests spécifiques pour l'hydroformage de tubes

Les conditions de frottement ont une influence significative sur le procédé d'hydroformage de tubes. Donc il est important de contrôler le frottement dans l'hydroformage de tubes comme signalé dans la littérature [Vollertsen et Plancak 2002 ; Plancak et al. 2005; Ngaile et al. 2006].

Vollertsen et Plancak ont proposé un test de refoulement pour la mesure du coefficient de frottement (Figure.1.21) [Vollertsen et Plancak 2002]. Ce test consiste à déformer un tube à l'aide d'une pression interne dans une matrice. En poussant le tube dans la matrice à l'aide d'un poinçon, une force de frottement à la surface de contact entre le tube et la matrice apparaît. Cette force peut être mesurée soit en faisant la différence entre les forces de compression mesurées aux deux extrémités, soit en mesurant la force résultante sur la matrice. La force de frottement mesurée est divisée par la force de contact nominale pour obtenir le coefficient de frottement. Ce dernier ainsi évalué est utilisé pour mener des simulations numériques du test de refoulement.

Plancak et Vollertsen [Plancak et al. 2005] ont proposé un nouveau modèle analytique pour déterminer le coefficient de frottement μ dans la zone d'expansion dans le cas de l'hydroformage de tubes. Ce modèle est basé sur les résultats obtenus par le test de refoulement décrit au paragraphe précédent. Selon le modèle développé, le coefficient de frottement peut être calculé sur la base des propriétés du matériau, de la géométrie de tube avant et après déformation et sans tenir compte de la force mesurée. La méthode proposée a été validée par comparaison entre des résultats obtenus par simulation EF et des résultats issus d'essais expérimentaux.

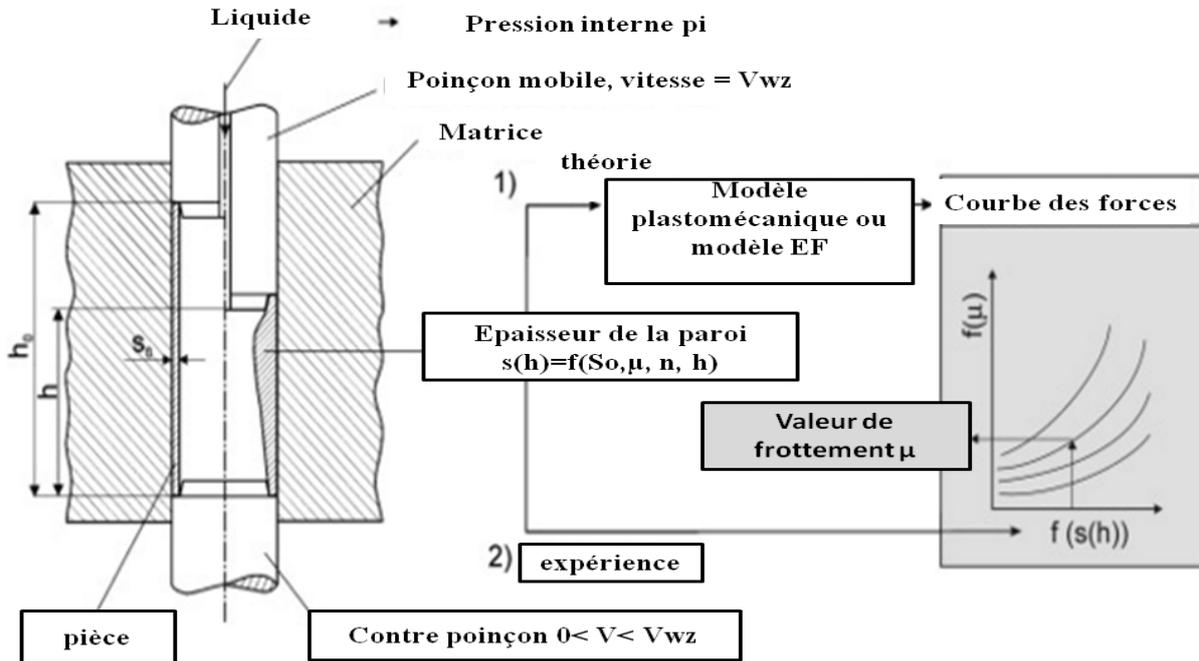


Figure.1.21. Principe du test de refoulement pour la mesure du coefficient de frottement

[Vollertsen et Plancak 2002].

D'autres tests ont été développés afin d'évaluer le coefficient de frottement. Le test de compression -torsion (TCT) par [Kawai et Doha 1987] peut être cité à titre d'exemple. Ce test permet d'évaluer le coefficient de frottement dynamique et statique mais il ne peut pas prendre en considération la répartition de la lubrification à cause d'une distance de glissement limitée (demi-tour). Pour ce faire, deux indenteurs, de section annulaire, sont appliqués sur un échantillon de tôle métallique lubrifiée (Figure.1.22 (a)). La charge est ajustée de façon à créer une pression inter-faciale entre l'outil et l'échantillon. L'échantillon-outil fait une rotation d'un demi-tour contre une tôle fixée (Figure.1.22 (b)). Le couple imposé sur l'échantillon tôle est mesuré. En fonction de la charge normale donnée, le coefficient de frottement est calculé conformément à la Figure.1.22 (c).

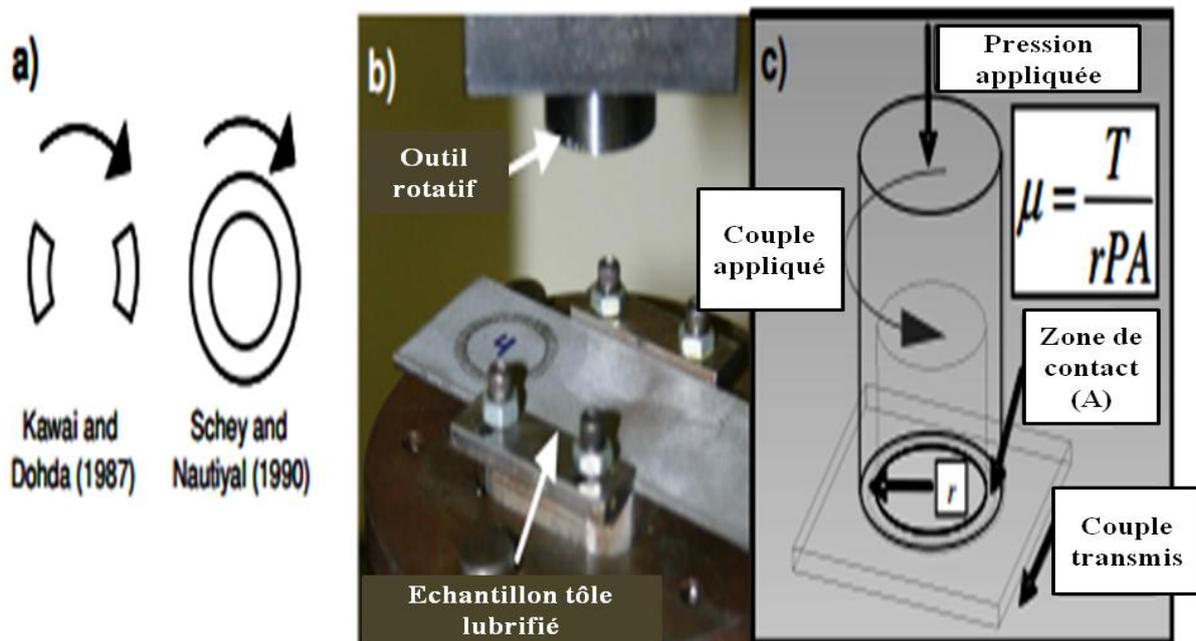


Figure.1.22. Test de compression de torsion (a) la surface de contact, (b) l'équipement d'essai, (c) Condition du chargement d'un échantillon [Barcelik 2006].

Des travaux plus récents [Khodayari et al. 2002] montrent que le coefficient de frottement déterminé par le test de compression -torsion (TCT) corrèle bien les résultats expérimentaux obtenus par l'évaluation de lubrification dans un procédé d'hydroformage.

Costello et Riff [Costello et Riff 2005] ont évalué la lubrification dans le procédé d'hydroformage en utilisant le test de la zone de guidage, l'essai d'expansion et le TCT. Ils ont conclu que pour le TCT, le coefficient de frottement initial a une faible corrélation avec celui obtenu avec le test de zone de guidage, tandis qu'à l'instant de la rupture, le coefficient de frottement obtenu affiche une légère corrélation avec celui obtenu avec le test de la zone d'expansion. Bien que certaines corrélations puissent être faites entre les essais, il n'y a pas de test unique qui permet de reproduire fidèlement les conditions tribologiques complexes rencontrées dans l'hydroformage.

Dans les travaux de Fiorentino et al [Fiorentino et al. 2013a, b], un test de compression a été développé, pour reproduire les conditions de glissement tube-matrice au cours du procédé d'hydroformage de tubes. Lors de l'essai, un tube en aluminium (Al6060) sous pression

interne est placé dans une matrice cylindrique. Ensuite, les deux poinçons se déplacent avec une vitesse constante et compriment les bords du tube. De cette manière, aucune expansion de tube ne se produit et l'écoulement de matière est influencé seulement par le frottement agissant sur les parois du tube. Un modèle numérique a été développé à partir des résultats expérimentaux en utilisant le code DEFORM2D. La combinaison des résultats obtenus lors du test de compression avec un modèle numérique permet d'estimer le coefficient de frottement dans le procédé d'hydroformage de tubes.

1.5 Les modèles semi-analytiques traitant du "corner filling test"

Afin d'étudier la distribution d'épaisseur dans un tube soumis à une pression interne et à différentes conditions de frottement dans une matrice de section carrée, un test d'expansion où comme on l'appelle "corner filling test" a été étudié. C'est dans ce cadre que s'installe une revue bibliographique de différents modèles analytiques qui s'intéressent à l'étude de ce test spécifique et qui va être présenté en détail dans le prochain chapitre.

Certains modèles ont été utilisés dans l'optique de prédire la pression de formage nécessaire pour atteindre un rayon du coin désiré et la distribution d'épaisseur de la paroi de la partie hydroformée [Marciniack 2002 ; Hwang et Chen 2005]. Les travaux de [Hwang et Chen 2005] ont traité l'effet du coefficient de frottement sur la pression et la répartition d'épaisseur. Par contre, le modèle de [Marciniack 2002] néglige le frottement à l'interface tube/ matrice. Par conséquent, le procédé d'expansion est supposé être uniforme avec une épaisseur constante le long de la circonférence. D'autres modèles s'attachent à l'étude de la distribution d'épaisseur et la prédiction d'amincissement localisé à savoir [Orban et Hu 2007 ; Xu et al. 2009(a)]. Ces derniers tiennent compte de l'effet du coefficient de frottement et les paramètres du matériau. Toutefois, il faut noter que le modèle d'Orban et Hu 2007 tient compte de la zone de collage et de glissement contrairement aux modèles précédents. Il est également à distinguer d'autres modèles s'inspirant de l'idée d'un ancien modèle avec quelques modifications à savoir [Bunget 2008]. Ce dernier met l'accent sur la prédiction de la pression de formage. Il reste à noter que le modèle de [Bunget 2008] prend en considération l'effet du frottement contrairement au modèle de [Marciniack 2002] qui le néglige.

Toutefois et malgré la diversité de tels modèles analytiques traitant du "corner filling test", certaines limitations freinent encore l'application de certains modèles à savoir celui de [Marciniak 2002] et celui de [Hwang et Chen 2005]. Le modèle développé par [Marciniak 2002] ne peut pas être appliqué que dans les cas idéaux. De plus, il présente une applicabilité limitée dans la pratique. Ainsi, les limitations du modèle développé par [Hwang et Chen 2005] est en raison du fait qu'il i) est unidirectionnel et ii) ne peut pas être utilisé pour la détermination du stade d'expansion pour une certaine pression imposée.

1.6 Conclusions intermédiaires et présentation de la suite

A l'issue de ce premier chapitre, nous avons introduit toutes les notions de base en relation avec la thématique. Ce chapitre met en évidence pour le procédé d'hydroformage de tubes : la technique de mise en forme, les principales définitions liées au procédé, ses avantages et ses inconvénients et les paramètres qui peuvent influencer la formabilité. Concernant le mode d'obtention des tubes, deux cas sont distingués : l'extrusion et le roulage-soudage. Concernant l'érouissage du matériau les résultats montrent qu'une valeur importante du coefficient d'érouissage 'n' ou du coefficient d'anisotropie 'r' favorise la résistance à l'amincissement. Quant au coefficient de frottement, son augmentation favorise l'apparition d'un amincissement localisé. Dans ce cadre, l'usage de la lubrification se révèle primordiale. En effet, avec une bonne lubrification, les problèmes de production tels que le plissement, le flambage et la défaillance prématurée peuvent être réduits ou éliminés. Dans le cadre de l'hydroformage de tubes une étude bibliographique concernant plusieurs tests spécifiques ou non a été réalisée. En premier lieu, a été étudié le test de gonflement libre qui permet de caractériser les propriétés mécaniques du matériau. En deuxième lieu, différents tests ont été présentés pour évaluer le coefficient de frottement tel que le pion sur disque pour différentes conditions (à sec et lubrifié). De plus, d'autres tests ont été développés pour évaluer la performance des lubrifiants et le frottement dans les zones de transition et d'expansion : le test de limitation de hauteur du dôme (LDH), le test d'expansion des tubes en forme de poire (PET), le test de la géométrie de la filière carrée et la matrice triangulaire, essai avec des surfaces planes ou courbes ainsi que le test de compression de torsion(TCT).

Dans le prochain chapitre, un modèle analytique du « corner filling test », le modèle d'Orban-Hu, sera présenté et utilisé pour caractériser la déformation plastique d'un tube soumis à une pression interne et à différentes conditions de frottement à l'interface tube /matrice dans une section carrée. Ce modèle peut être utilisé pour prédire la corrélation entre la pression interne et le rayon du coin final, la distribution d'épaisseur, et l'état de déformation et de contrainte dans le tube. L'influence de certains paramètres du procédé, telles que la déformation et coefficient de frottement peut être étudiée à l'aide de ce modèle analytique.

En conclusion, le modèle peut être utilisé pour établir des lignes directrices pour la conception du procédé d'hydroformage de tubes dans une matrice de section carrée, en aidant aussi à la sélection des conditions de lubrification du matériau.

*CHAPITRE 2 : VALIDATION NUMERIQUE DU MODELE
D'ORBAN-HU*

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est, d'une part d'étudier et valider numériquement une modélisation du test d'expansion d'un tube cylindrique sous pression interne dans une matrice à section carrée, et d'autre part de proposer une méthodologie pour la caractérisation du coefficient de frottement de Coulomb à partir de mesures réalisées au cours de ce test.

Dans un premier temps, le modèle analytique choisi, à savoir le modèle d'Orban-Hu est présenté. Afin de valider sa programmation dans le logiciel Matlab©, certains résultats obtenus à l'aide de ce modèle seront confrontés à ceux obtenus par simulation éléments finis d'un test d'hydroformage. Plusieurs modélisations seront également proposées et évaluées. Enfin, on recherchera des variables suffisamment discriminantes pour l'évaluation du coefficient de frottement dans le but de proposer une méthodologie pour le post-traitement des résultats expérimentaux des tests d'expansion en matrice carrée.

2.2 Présentation du modèle d'Orban-Hu et de sa programmation

2.2.1 Présentation du modèle d'Orban-Hu

Le modèle d'Orban et Hu [Orban et Hu 2007] consiste à étudier la déformation plastique d'un tube circulaire dans une matrice de section carrée, sous l'action d'une pression interne, en présence de frottement à l'interface tube/ matrice. Les équations d'écoulement de la matière lors de l'expansion et le remplissage du coin sont donc étudiées sur la base des relations géométriques, des forces d'équilibre et des propriétés du matériau. Comme le problème présente des symétries, les développements théoriques sont réalisés en ne considérant qu'un quart du tube. Les équations sont résolues pour déterminer la distribution de la contrainte et de la déformation dans la section transversale du tube ainsi que la distribution de l'épaisseur du tube.

A ce stade, des hypothèses simplificatrices sont formulées pour réduire le problème à un problème 2-D :

- la contrainte et la déformation sont constantes dans l'épaisseur du tube,

- la flexion est négligée dans la zone du rayon,
- l'écoulement plastique du matériau est caractérisé par une loi de Swift $\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n$, où $\bar{\sigma}$ est la contrainte équivalente, $\bar{\varepsilon}$ est la déformation équivalente, n le coefficient d'écrouissage, k le module d'écrouissage, et ε_0 est la déformation initiale.
- des conditions de déformation plane sont considérées,
- le matériau du tube possède un comportement rigide-plastique,
- les distributions de déformation et de contrainte le long de la zone du coin sont uniformes à tout instant.

Ces hypothèses, permettent d'étudier l'influence du frottement sur la déformation du tube. Le modèle spécifie deux parties distinctes nommées le coin et le mur, le mur étant la partie du tube en contact avec la matrice. L'équilibre mécanique est uniquement lié à la pression interne. Cette pression interne crée une force radiale au niveau du coin, cette force est orientée vers l'extérieur du tube. Elle engendre un état de traction dans la zone du mur. Le frottement présent à l'interface tube/matrice entraîne alors des forces tangentielles variables le long de la zone rectiligne qui viennent s'opposer à l'effort de traction. Lorsque la pression augmente et que l'expansion continue, la surface en contact entre le tube et la matrice devient de plus en plus importante et une zone de collage se développe où les forces de frottement compensent intégralement l'effort de traction engendré par le gonflement. Dans la zone de collage, le matériau ne se déforme pas davantage. La [Figure.2.1](#) illustre les différentes zones lors de la déformation.

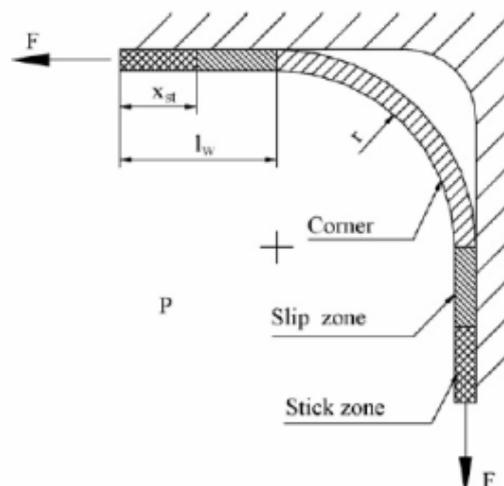


Figure.2.1. Modèle 2D utilisé pour l'étude de l'hydroformage de tube dans une section carrée par [Orban et Hu 2007].

Avec ce modèle mathématique, il est alors possible d'évaluer l'évolution du rayon et de l'épaisseur du coin, la longueur et l'épaisseur du mur lorsque la pression interne augmente.

2.2.2 *Modèle théorique*

Les développements théoriques pour l'élaboration du modèle d'Orban-Hu sont de deux ordres. Tout d'abord, des relations géométriques sont établies afin de décrire la déformation du tube dans la matrice carrée au fur et à mesure que la pression interne augmente. Ensuite, les équilibres mécaniques des différentes régions (coin et mur) du tube déformé sont étudiés. Les principales équations décrivant le modèle sont décrites dans la suite.

2.2.2.1 *Relations géométriques*

La longueur totale du quart de la section est calculée à partir de la **Figure.2.2**

$$L=2\left(\frac{a}{2} - r\right) + \frac{\pi}{2} r \quad (2.1)$$

La variation de longueur résultant de l'expansion subie est obtenue par différentiation de l'équation (2.1) :

$$dL = -\left(2 - \frac{\pi}{2}\right) dr \quad (2.2)$$

dL est le résultat de l'allongement de la matière dans le coin dl_c et de celui dans les deux parois $2dl_w$:

$$dL = 2dl_w + dl_c \quad (2.3)$$

L'allongement dans le coin dl_c s'exprime en fonction du taux de déformation circonférentielle $d\varepsilon_c$ dans le coin :

$$dl_c = \frac{\pi}{2} r d\varepsilon_c \quad (2.4)$$

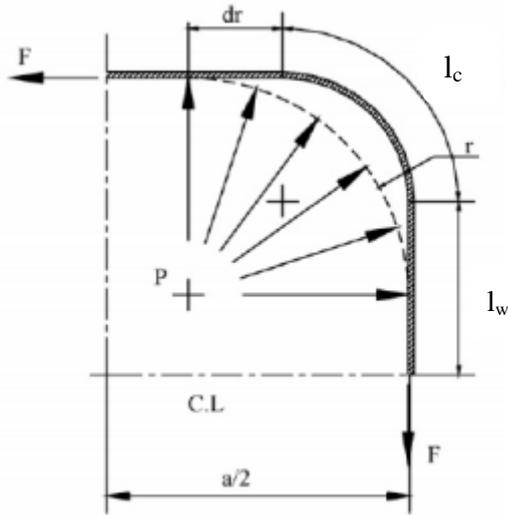


Figure.2.2. Les variables géométriques [Orban et Hu 2007].

En combinant les équations (2.2), (2.3) et (2.4), il vient :

$$-(2 - \frac{\pi}{2})dr = 2dl_w + \frac{\pi}{2} r d\varepsilon_c \quad (2.5)$$

Ainsi, l'équation (2.5) montre que l'évolution du rayon du coin (dr), celle de la longueur de la zone de contact tube/matrice (dl_w) et celle de la déformation circonférentielle dans le coin ($d\varepsilon_c$) sont interdépendantes.

2.2.2.2 Equilibre du coin

La zone "coin" est illustrée à la **Figure.2.3** où les différents efforts en présence sont représentés.

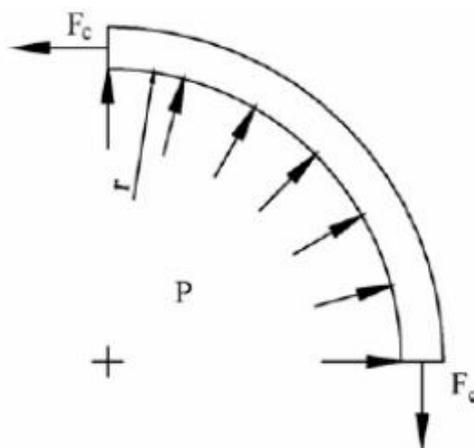


Figure.2.3. Coin de tube

La force transmise à partir du coin jusqu'à la paroi droite est, pour une pression interne courante P et un rayon courant r :

$$F_c = P r \quad (2.6)$$

Sa différentiation donne :

$$dF_c = P dr + r dP \quad (2.7)$$

La contrainte dans la zone "coin" est :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{t_c} \quad (2.8)$$

La différentiation de l'équation (2.8) donne :

$$d\sigma_c = \frac{dF_c}{t_c} - \frac{F_c}{t_c^2} dt_c \quad (2.9)$$

Sous l'hypothèse de déformation plane, la condition d'incompressibilité s'exprime :

$$d\varepsilon_c = - \frac{dt_c}{t_c} \quad (2.10)$$

L'incrément de contrainte dans le coin s'exprime quant à lui :

$$d\sigma_c = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon_c} d\varepsilon_c \quad (2.11)$$

où :

$$\left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon_c} = \frac{2}{\sqrt{3}} n k \left(\varepsilon_0 + \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_c \right)^{n-1} \quad (2.12)$$

Tenant compte des équations (2.10) et (2.11), la relation (2.9) devient alors :

$$d\varepsilon_c = \beta_c dF_c \quad (2.13)$$

avec :

$$\beta_c = \frac{1}{t_c \left(\left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon_c} \right) - F_c} \quad (2.14)$$

L'incrément de déformation dans la zone "coin" est relié à l'incrément de la force F_c par l'intermédiaire du coefficient β_c lié à l'écrouissage du matériau ainsi qu'à l'épaisseur courante, la déformation courante et l'effort courant au niveau du coin.

2.2.2.3 Equilibre du mur

L'allongement de la paroi, dl_w , dépend du frottement à l'interface tube /matrice. S'il n'y avait pas de frottement, la déformation dans la paroi droite serait égale à la déformation du coin. La présence du frottement conduit à une épaisseur non uniforme de la paroi le long de la circonférence. Un coefficient de frottement important se traduit par des conditions de collage ; une section de la paroi se colle alors à la matrice et ne se déforme plus.

La relation entre l'allongement total dans la paroi droite et la force dans le coin est déterminée pas à pas. A chaque incrément de pression le tube se déforme, la taille du coin se réduit et un nouveau point de transition entre le mur et le coin est calculé. Chaque point de transition est conservé et constitue une discrétisation du mur. L'équilibre du mur est réalisé par l'équilibre de chaque élément de mur. La **Figure.2.4** représente un élément du mur où les efforts en jeu sont représentés.

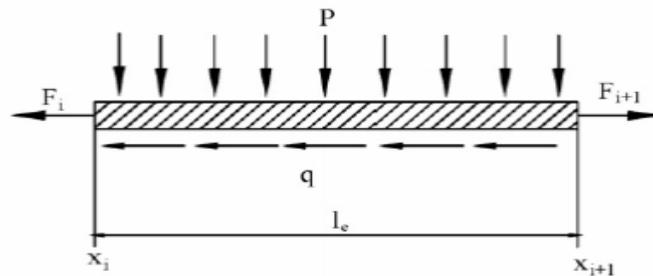


Figure.2.4. Equilibre d'un élément de la paroi droite.

Pour un élément du mur, les forces d'expansion gauche (F_i) et droite (F_{i+1}) sont liées entre elles comme le montre l'équation ci-dessous :

$$F_{i+1} - F_i = \mu P l_e \quad (2.15)$$

où P est la pression interne courante, l_e la longueur de l'élément de mur et μ le coefficient de frottement entre le tube et la matrice.

La différentiation de l'équation (2.15) donne :

$$dF_{i+1} - dF_i = \mu P dl_e + \mu l_e dP \quad (2.16)$$

Pour calculer la variation de longueur dl_e on utilise la déformation moyenne de l'élément, à savoir :

$$dl_e = l_e d\varepsilon_{av} \quad (2.17)$$

$$\text{où } d\varepsilon_{av} = \frac{d\varepsilon_{i+1} + d\varepsilon_i}{2}$$

En combinant les équations (2.16) et (2.17), on obtient alors une relation itérative entre les forces nodales de l'élément du mur considéré :

$$dF_i = \alpha_i dF_{i+1} + \gamma_{i+1} dP \quad (2.18)$$

avec :

$$\alpha_i = \frac{2 - \mu (X_{i+1} - X_i) \beta_{i+1} P}{2 + \mu (X_{i+1} - X_i) \beta_i P} \quad (2.19)$$

$$\gamma_i = \frac{-2\mu (X_{i+1} - X_i)}{2 + \mu (X_{i+1} - X_i) \beta_i P} \quad (2.20)$$

Le dernier nœud correspond à la transition entre le mur et le coin. Pour ce point particulier, d'indice m , on a :

$$dF_m = dF_c \quad (2.21)$$

La relation entre la force nodale et la force du coin peut être introduite comme suit :

$$dF_i = \eta_i dF_c + \lambda_i dP \quad (2.22)$$

où

$$\eta_i = \alpha_i \eta_{i+1} \quad (2.23)$$

$$\lambda_i = \alpha_i \lambda_{i+1} + \gamma_i \quad (2.24)$$

La frontière entre la partie droite et le coin est située au dernier nœud m . Par conséquent, la force à ce nœud est égale à la force du coin ($F_m = F_c$) qui se traduit par les conditions aux limites suivantes pour les paramètres η et λ :

$$\eta_m = 1 \text{ et } \lambda_m = 0$$

La déformation nodale en chaque nœud du mur se calcule à l'aide de l'équation (2.25) :

$$d\varepsilon_i = \beta_i dF_i \quad (2.25)$$

$$\text{où } \beta_i = \frac{1}{t_i \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon_i} - F_i} \text{ par analogie avec le } \beta_c \text{ introduit en (2.15)}$$

A partir de la connaissance de la déformation courante, il est possible de déterminer l'allongement de la partie mur :

$$dl_w = \sum dl_e = \sum d\varepsilon_{av} l_e = \sum \frac{d\varepsilon_{i+1} + d\varepsilon_i}{2} (x_{i+1} - x_i) \quad (2.26)$$

L'équation (2.26) peut être réécrite comme suit :

$$dl_w = C_2 dF_c + C_1 dP \quad (2.27)$$

où

$$C_1 = \sum \frac{\beta_{i+1}\lambda_{i+1} + \beta_i\lambda_i}{2} (X_{i+1} - X_i) \quad (2.28)$$

$$C_2 = \sum \frac{\beta_{i+1}\eta_{i+1} + \beta_i\eta_i}{2} (X_{i+1} - X_i) \quad (2.29)$$

2.2.2.4 Gestion de la transition contact glissant/collant

La transition contact glissant / contact collant n'est pas connu a priori. A chaque itération, les incréments de force nodale dans le mur sont calculés à l'aide de l'équation (2.22). Si dF_i est négatif, cela signifie que le nœud i est dans une zone où il y a collage. Il est alors nécessaire de trouver un nœud intermédiaire entre les nœuds $i+1$ et i correspondant au début de la zone de collage (**Figure.2.5**). Le nœud courant i est renommé i_s et le nœud intermédiaire recherché est noté i_{s+1} et la position de la fin de la zone de collage est déterminée par l'équation (2.30) :

$$x_{st} = x_{i_s} - \frac{dF_{i_s}}{dF_{i_{s+1}} - dF_{i_s}} (x_{i_{s+1}} - x_{i_s}) \quad (2.30)$$

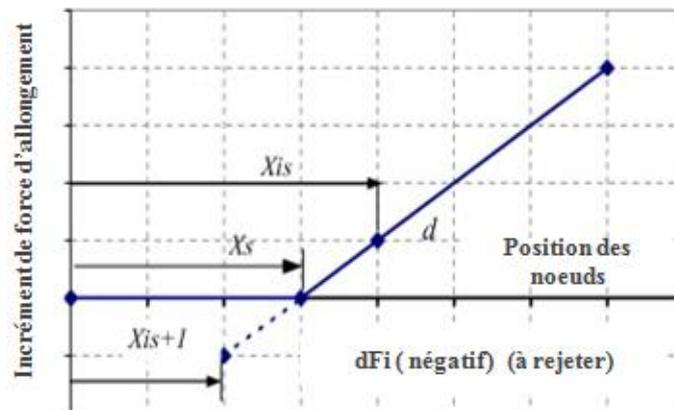


Figure.2.5. Calcul de la longueur de la zone de collage.

2.2.3 Résolution numérique

La procédure de résolution est résumée par le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} 2 - \frac{\pi}{2} & 2 & \frac{\pi r}{2} & 0 \\ -P & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -\beta_c \\ 0 & 1 & 0 & -C_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta r \\ \Delta l_w \\ \Delta \varepsilon_c \\ \Delta F_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ r\Delta P \\ 0 \\ C_1\Delta P \end{pmatrix}$$

où ΔP est l'incrément de pression interne, r le rayon du coin courant, β_c le paramètre défini par l'équation (2.15), C_1 et C_2 deux "constantes" définies par les équations (2.28) et (2.29). La résolution de ce système d'équations permet de calculer l'accroissement du rayon de coin Δr , la longueur de contact avec la matrice dans le mur Δl_w , la déformation dans le coin $\Delta \varepsilon_c$ et la force due au frottement ΔF_c . Le pilotage est assuré par une loi de pression linéaire qui évolue de 0 à la valeur maximale correspondant à la fin du procédé. Il a été choisi d'utiliser Matlab© pour résoudre le problème.

2.3 Modélisation numérique et validation de la programmation du modèle d'Orban-Hu

Afin de valider la programmation du modèle d'Orban-Hu, nous allons comparer les résultats obtenus à l'aide du programme Matlab avec des résultats de simulations par éléments finis du test d'expansion en matrice carrée.

Pour les simulations éléments finis, nous utiliserons la version explicite de LS-Dyna© et plusieurs maillages vont être confrontés.

2.3.1 Présentation des modèles éléments finis

Tout d'abord, afin de se rapprocher le plus possible du modèle mathématique d'Orban-Hu, une modélisation 2D avec une hypothèse de déformation plane sera faite. Nous explorerons également deux autres modélisations : une modélisation 3D à l'aide d'éléments finis de type coque et une modélisation 3D à l'aide d'éléments finis de type solide. Ces trois modélisations

sont illustrées à la **Figure.2.6**. Le choix de la taille de maille, se base sur la dimension du plus petit détail, correspondant ici au rayon de la matrice carrée ; celui-ci est de 5 mm. On choisit d'avoir 10 éléments finis au niveau de ce détail menant à une taille de maille de l'ordre de 0,5 mm. En fait, ce choix est basé, d'une part sur la qualité des résultats, et d'autre part sur le temps de calcul.

Pour le modèle 2D avec hypothèse de déformation plane, deux versions ont été considérées : une première qui présente 2 éléments finis dans l'épaisseur du tube, une seconde qui présente 4 éléments finis dans l'épaisseur. Le nombre total d'éléments est alors de 108 ou 432 suivant le cas considéré.

Le modèle 3D coque est réalisé à l'aide de 53714 nœuds et 53500 éléments. L'élément coque choisi est l'élément coque de Belytschko-Tsay avec 5 points d'intégration dans l'épaisseur.

Pour plus d'explication, il est important de noter que le choix du type d'élément est basé sur des considérations géométriques et de formulation. En particulier, le choix du l'élément coque de Belytschko-Tsay est justifié pour les raisons suivantes :

- 1) c'est l'élément de référence en explicite
- 2) c'est l'élément le plus rapide et le plus économique : il fonctionne comme une plaque, il est insensible au verrouillage et continue de fonctionner même pour d'importantes distorsions, c'est l'élément de référence en crash et pour la majeure partie des études ; par contre, il supporte très mal des sollicitations en torsion,
- 3) c'est l'élément préconisé pour mener des simulations de mise en forme de tôles et de tubes

Pour le modèle 3D solide, le choix est fait d'avoir 4 éléments dans l'épaisseur, menant à 52000 éléments et 65647 nœuds. Ce type d'élément possède 8 nœuds et est totalement intégré. Le choix du nombre d'éléments dans l'épaisseur est fondé d'une part sur la précision du calcul (malgré le temps de calcul) et nous avons choisi un nombre pair d'éléments dans l'épaisseur afin de faciliter l'exploitation des résultats sur la fibre neutre.

Le matériau du tube est considéré élasto-plastique isotrope ; son comportement plastique est modélisé par la loi de Swift suivante :

$$\bar{\sigma} = 263.63(0.0043 + \bar{\epsilon})^{0.287}$$

Les coefficients de cette loi ont été déterminés en utilisant un test d'expansion de tube (voir [chapitre 3 section 3.2.2](#)).

La pression interne suit une loi linéaire de 0 à 28 MPa sur un temps virtuel de 0,01s. Le coefficient de frottement de Coulomb considéré pour étudier la distribution de l'épaisseur dans le tube mis en forme est égal à 0,1. Cette valeur correspond au coefficient de frottement classiquement utilisé dans des simulations de mise en forme des métaux. Les autres paramètres sont issus de données expérimentales qui feront l'objet du prochain chapitre. Le post-traitement des résultats numériques consiste à analyser l'évolution de la réduction d'épaisseur, la répartition de l'épaisseur et l'évolution du rayon du coin.

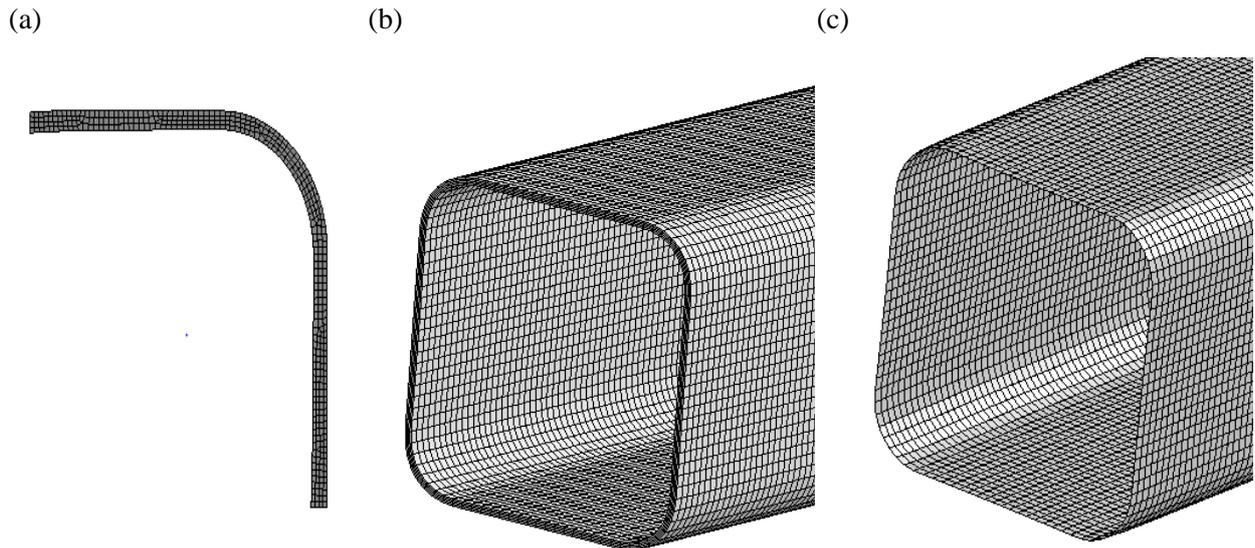


Figure.2.6. (a) Modèle de déformation plane 2D, (b) modèle 3D solide et (c) modèle 3D coque.

Conditions aux limites

Différents conditions aux limites ont été considérées afin de mettre en relief l'opération d'hydroformage de tubes ([Figure.2.7](#)). En effet, comme récemment indiqué trois modèles éléments finis sont utilisés. Pour le modèle 2D avec l'hypothèse de déformation plane, des conditions de symétrie ont été déployés au niveau du point de contact. Alors que, pour les différents modèles 3D, des conditions d'encastrement sont utilisés au niveau de l'extrémité droite de tube afin d'empêcher son déplacement et de l'extrémité gauche des conditions de symétries sont considérés.

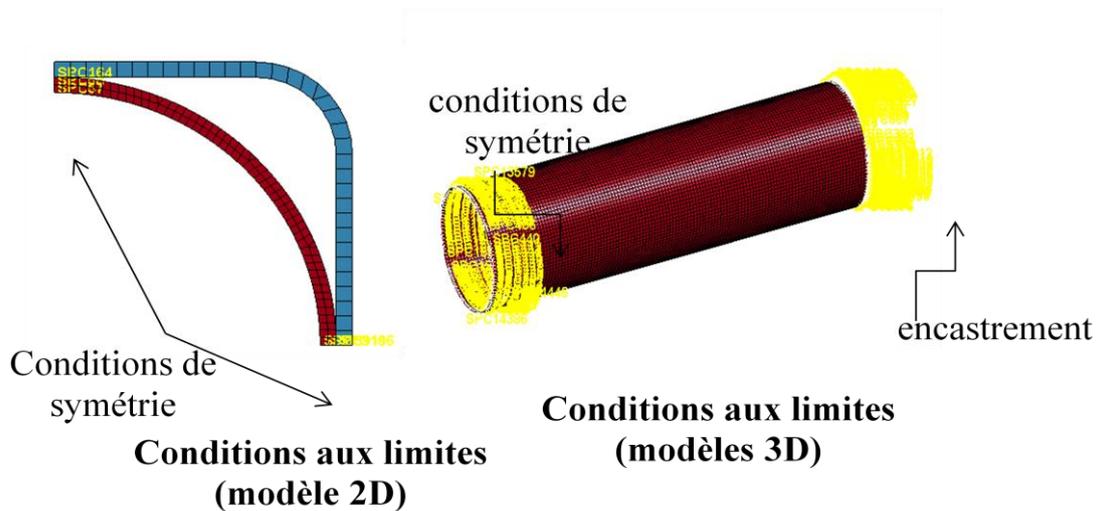


Figure.2.7. Conditions aux limites pour les différents modèles EF

2.3.2 Validation de la programmation du modèle d'Orban-Hu

Toutes les simulations présentées dans cette section ont été réalisées pour des tubes de longueur 250 mm, de rayon extérieur de 17,5 mm et d'épaisseur 1 mm.

Il a été choisi de tracer les mêmes courbes de résultats que celles présentées dans la publication d'Orban et Hu [Orban et Hu 2007] comme l'épaisseur du coin en fonction du rayon du coin (Figure.2.8) et la longueur de mur en fonction de la pression interne (Figure.2.9).

La Figure.2.8 représente l'évolution de l'épaisseur du coin en fonction du rayon du coin, lorsque la pression interne augmente de 0 à 28 MPa. Chaque point de la courbe correspond à un niveau donné de pression. Le résultat obtenu avec le modèle d'Orban-Hu est représenté par la courbe noire épaisse dont le tracé est cohérent avec les courbes publiées dans [Orban et Hu 2007]. Cette courbe est comparée aux résultats obtenus avec les simulations réalisées pour les différents modèles éléments finis. Le modèle de déformation plane 2D a été exécuté pour 2 (repéré 2D-2E) ou 4 (repéré 2D-4E) éléments dans l'épaisseur. Il peut être observé que le nombre des éléments finis dans l'épaisseur mène à des résultats différents, en particulier à la fin du procédé de mise en forme. En comparant entre le modèle de déformation plane 2D avec 2 et 4 éléments dans l'épaisseur, on trouve que le modèle avec 2 éléments diverge dès le début du

procédé et surestime toujours l'épaisseur du coin. Cependant, le modèle 2D avec 4 éléments est très proche des résultats obtenus avec le modèle d'Orban-Hu au cours de la première partie du test d'expansion de tube mais il diverge en fin du procédé. Le modèle 3D coque surestime toujours l'épaisseur du coin. En effet, la différence entre le modèle analytique et le modèle 3D coque peut être liée aux différentes raisons : 1) le modèle d'Orban-Hu est basé sur l'hypothèse de déformation plane alors que le modèle numérique est un modèle 3D coque 2) l'incrément de la pression interne n'est pas similaire pour le modèle analytique et la simulation numérique.

Le modèle 3D solide avec 4 éléments dans l'épaisseur sous-estime légèrement l'évolution de l'épaisseur du coin, mais finalement c'est celui qui présente la meilleure corrélation avec les résultats théoriques. En effet, le modèle 3D solide respecte bien la configuration géométrique proposée par le modèle analytique en tenant compte de l'épaisseur et de sa distribution. Ce qui révèle la meilleure corrélation entre le modèle analytique et le modèle 3D solide au niveau de l'épaisseur du coin en comparaison avec les autres modèles numériques.

La **Figure.2.9** représente l'évolution de la longueur de contact avec l'évolution de la pression interne. La courbe noire épaisse correspond de nouveau au résultat obtenu avec le modèle d'Orban-Hu et sa forme générale est en accord avec les courbes similaires publiées dans **[Orban et Hu 2007]**. Ici, il est évident que les modèles de déformation plane 2D ne permettent pas une bonne représentation de l'évolution de la longueur de contact avec la pression interne. Les modèles 3D coque et 3D solide présentent un très bon accord avec le modèle théorique.

La validation est complétée par d'autres comparaisons présentées dans les **Figures.2.10** et **2.11**. Sur la **Figure.2.10** est portée l'évolution du rayon du coin avec la pression interne. La **Figure.2.11** représente la répartition de l'épaisseur le long de la section transversale du tube pour un niveau de déformation donné, correspondant à un niveau de pression interne donnée.

Dans la **Figure.2.10**, les conclusions sont très semblables à celles faites lors de l'analyse de la **Figure.2.9**. Les modèles éléments finis 2D ne permettent pas une bonne représentation de l'évolution du rayon du coin avec la pression interne. Les modèles 3D coque et 3D solide sont plus adaptés pour une telle prédiction. De plus, il peut être observé que le modèle 3D solide est celui qui fournit les résultats les plus proches de ceux obtenus avec le modèle d'Orban-Hu.

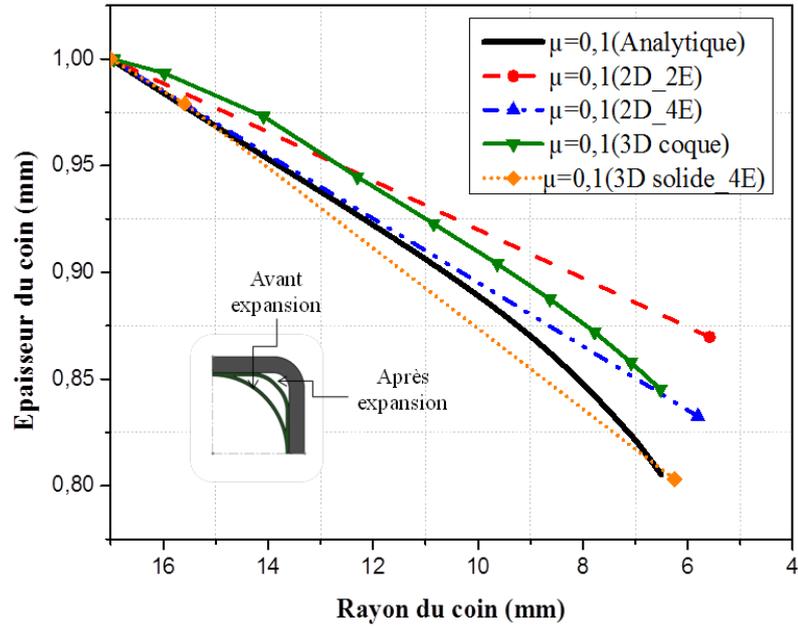


Figure.2.8. Variation de l'épaisseur du coin par rapport au rayon du coin pour une condition donnée du frottement ($\mu = 0,1$) lorsque la pression interne augmente de 0 à 28 MPa.

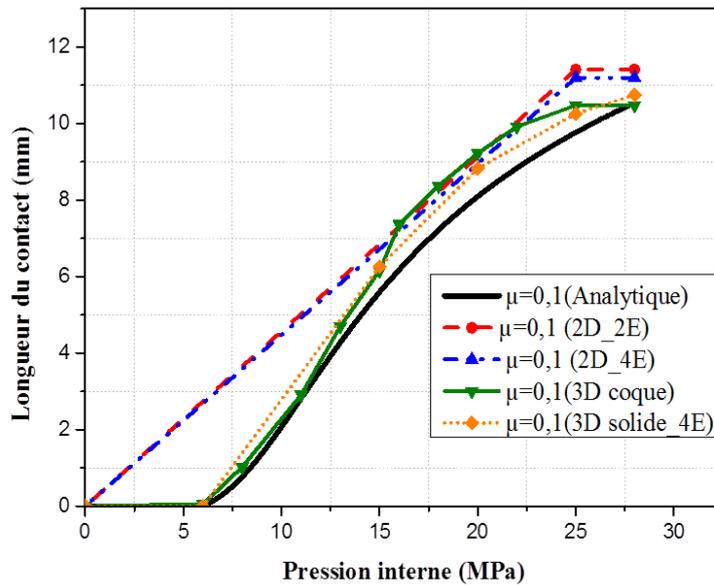


Figure.2.9. Evolution de la longueur de contact tube/matrice pour un coefficient de frottement donné ($\mu = 0,1$), lorsque la pression interne augmente de 0 à 28 MPa.

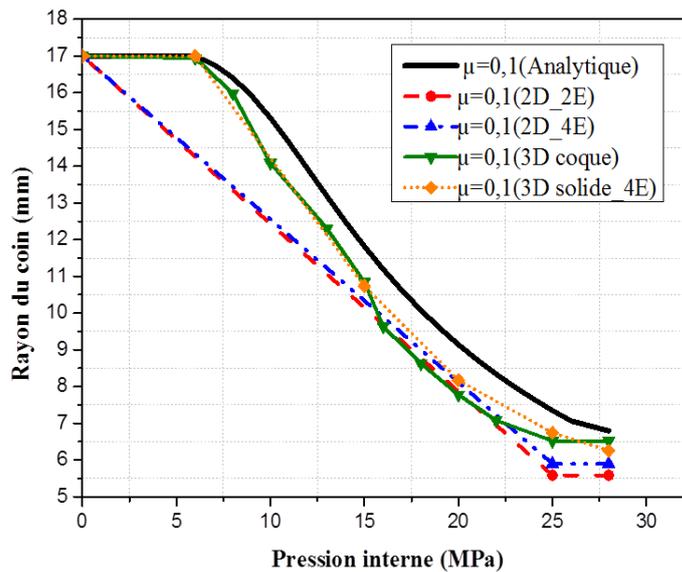


Figure.2.10. Evolution du rayon du coin contre la pression interne pour un coefficient de frottement donné ($\mu = 0,1$).

La **Figure.2.11** donne la répartition de l'épaisseur le long de la section transversale carrée du tube déformé en fonction des mesure angulaires (allant de 0 à 90°). Cette répartition est représentée seulement sur un quart de tube en raison des conditions de symétrie utilisées dans les modèles théoriques et éléments finis. Les résultats d'analyse révèlent que c'est au niveau de la zone de transition entre la paroi droite et le rayon du coin que l'amincissement maximal a lieu. Ce résultat est en accord avec les observations rapportés dans plusieurs études [Liu et al. 2006 ; Yuan et al. 2006a ; Xu et al. 2009a ; Cui et al. 2014 ; Daly et al. 2007]. Relativement au tube initial (épaisseur 1mm) le tube gonflé présente une diminution d'épaisseur au niveau des points de contact initiaux entre le tube et la matrice (points 1 et 26 le long de la section). Au niveau du rayon du coin (point 12), l'épaisseur est moins critique que dans les zones de transition (point 7). Les modèles de déformation plane 2D révèlent aussi ces zones critiques, mais ils surestiment l'amincissement dans le coin. En fait, ils présentent une épaisseur constante dans la zone du coin qui n'est pas réaliste. Le modèle éléments finis 3D coque est le modèle numérique qui montre le meilleur accord avec les résultats théoriques basés sur le modèle Orban-Hu. Même si l'amincissement se déroulant dans la zone du coin est surestimé (5,7%) ; une différence de seulement 1,6% est observée dans la zone de transition. Enfin, le modèle éléments finis 3D solide donne les moins bons résultats ; la zone de transition n'est pas du tout

différenciée de la zone de rayon ; toutefois, l'épaisseur minimale reste en accord avec celle obtenue par le modèle théorique : une différence de seulement 1,4% est observée avec la prédiction analytique.

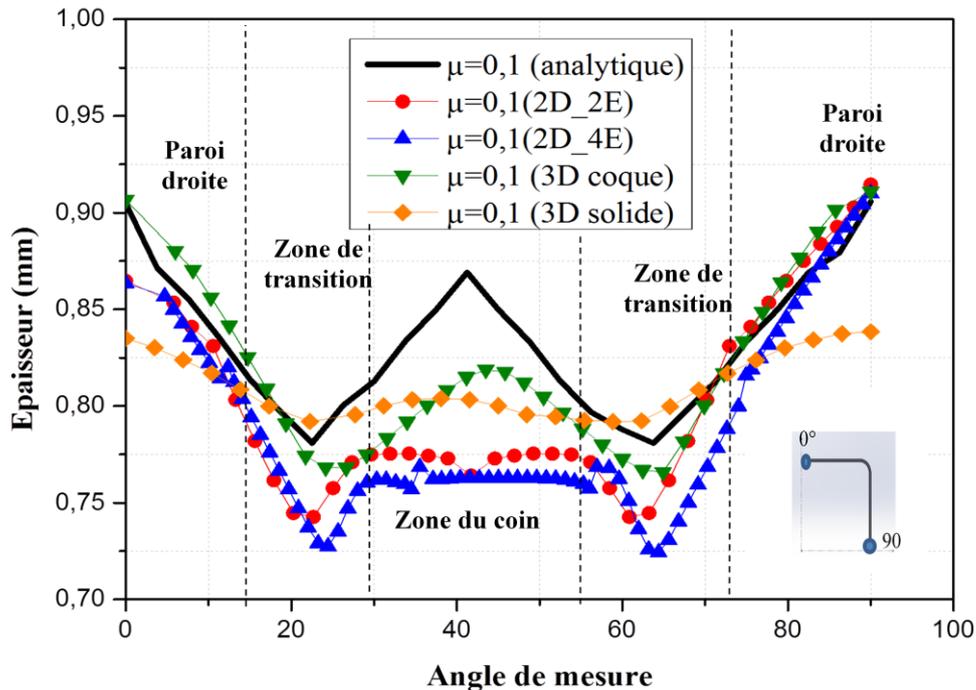


Figure.2.11. Distribution de l'épaisseur le long de la section transversale du tube à une pression interne de 28 MPa et un coefficient de frottement donné ($\mu = 0,1$).

L'ensemble de ces résultats préliminaires permet de valider notre programmation du modèle d'Orban-Hu. Les résultats obtenus sont très semblables à ceux publiés dans [Orban et Hu, 2007]. Les comparaisons effectuées avec les différents modèles éléments finis montrent généralement une analogie satisfaisante. Ainsi, un modèle de déformation plane 2D, même s'il est certainement le plus proche du modèle utilisé par Orban et Hu pour leurs développements théoriques, ne permet pas de reproduire les résultats obtenus avec le modèle théorique. Les modèles 3D coque et solide semblent être plus appropriés pour étudier les conditions de frottement sur l'écoulement de la matière lors de l'hydroformage d'un tube dans une matrice de section carrée. Par contre, le modèle 3D solide ne semble pas apte à représenter la distribution de l'épaisseur le long de la section transversale du tube déformé.

A ce stade, il peut être conclu que notre programmation du modèle Hu-Orban est validée et que les modèles 3D basés sur les éléments finis coque et solide permettent une meilleure corrélation avec le modèle théorique.

2.4 Recherche d'un paramètre discriminant lié aux conditions de frottement

Il convient maintenant d'examiner s'il existe un paramètre discriminant permettant de corréler l'amincissement observé et le coefficient de frottement. Rappelons que nous cherchons à mettre au point une procédure expérimentale de caractérisation du coefficient de frottement dédiée à l'hydroformage de tubes. Nous cherchons, à partir de l'amincissement observé lors du test d'expansion d'un tube dans une matrice à section carrée, à caractériser le coefficient de frottement en utilisant des simulations réalisées à l'aide du modèle d'Orban-Hu.

La **Figure.2.11** telle qu'elle est présentée, peut être considérée comme une signature caractéristique des conditions de frottement. Avec le modèle d'Orban-Hu, il est possible de construire de telles figures pour différents coefficients de frottement comme cela peut être observé à la **Figure.2.11**. Il est possible de constater que, en accord avec les résultats de la littérature [**Zribi et al. 2013 ; Xu et al. 2009a ; Korolis et al. 2011**], l'épaisseur minimale est obtenue pour le coefficient de frottement maximal. De plus, la variation d'épaisseur est d'autant plus importante que le coefficient de frottement est élevé. Néanmoins, il est évident qu'il serait très difficile d'exploiter la **Figure.2.12** pour évaluer le coefficient de frottement. Il est alors décidé d'étudier d'une part l'épaisseur minimale et d'autre part la variation d'épaisseur sur l'ensemble du profil en fonction du coefficient de frottement. Ces résultats sont visibles à la **Figure.2.13** et la **Figure.2.14** respectivement.

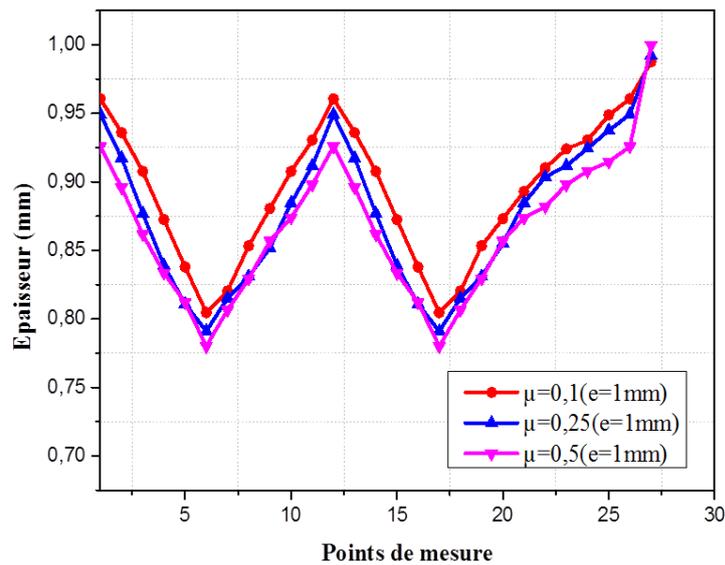


Figure.2.12. Répartitions d'épaisseur le long du tube après calcul pour différents coefficients de frottement, obtenues avec modèle analytique.

La **Figure.2.13** illustre l'évolution de l'épaisseur minimale le long du profil en fin de procédé (pression interne de 28 MPa) pour différents coefficients de frottement et différentes épaisseurs initiales. Il peut être observé qu'on obtient des courbes similaires qui sont seulement décalées, ce décalage étant quasiment égal à la différence d'épaisseur initiale. Il peut également être constaté que l'épaisseur minimale dans le contour dépend de la valeur du coefficient de frottement.

La **Figure.2.14** représente la variation d'épaisseur $t_{\max} - t_{\min}$ le long du contour transversal en fonction de coefficient de frottement, et ce, pour deux valeurs d'épaisseurs initiales. Encore une fois, les courbes obtenues dépendent de l'épaisseur initiale, mais il est plus difficile de les distinguer l'une de l'autre. La variation d'épaisseur $t_{\max} - t_{\min}$ est donc un paramètre moins discriminant que l'épaisseur minimale vis-à-vis du coefficient de frottement.

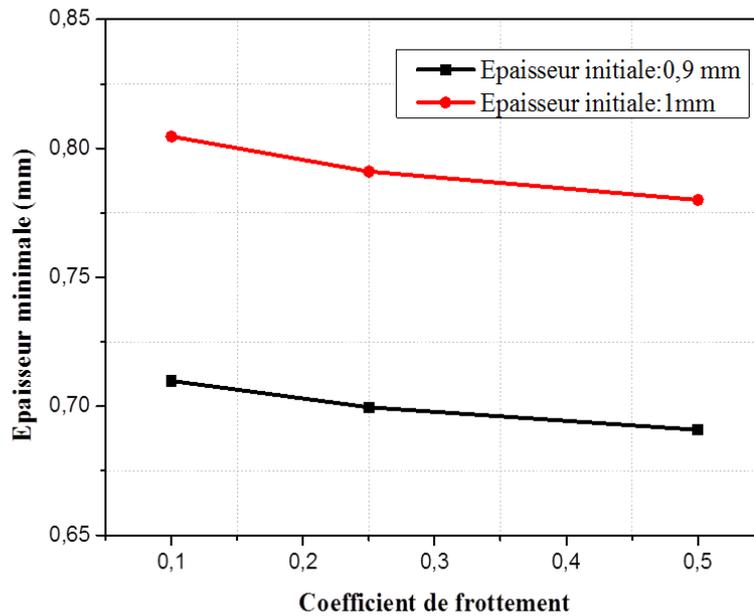


Figure.2.13. L'épaisseur minimale pour les différents coefficients de frottement.

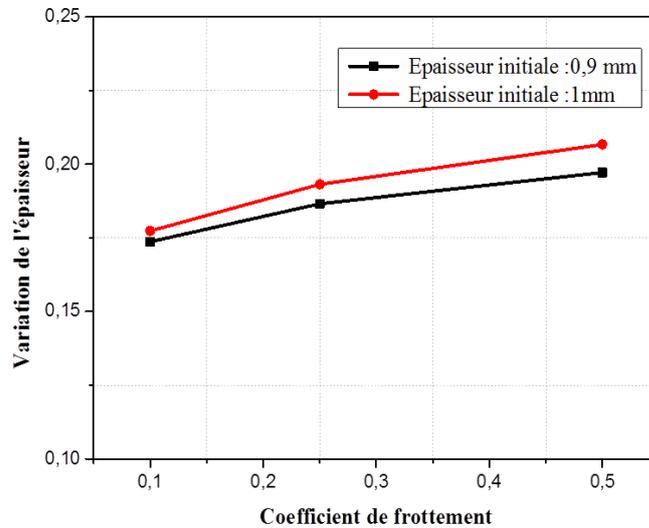


Figure.2.14. La variation de l'épaisseur globale pour les différents coefficients de frottement obtenus avec le modèle Orban-Hu.

A partir de graphiques tels ceux présentés à la [Figure.2.13](#), il semble donc possible d'évaluer le coefficient de frottement. Cette méthode pour évaluer le coefficient de frottement sera développée et illustrée sur un cas concret dans le chapitre suivant.

2.5 Vers une procédure expérimentale

A l'aide du modèle d'Orban-Hu, il est possible de construire des courbes du type de celles montrées à la **Figure.2.13**. Il est nécessaire de connaître le rayon extérieur du tube, son épaisseur initiale et sa loi d'écoulement décrite par une loi de Swift. Il est également nécessaire de connaître la loi d'évolution de la pression interne. La courbe est ensuite construite en faisant varier le coefficient de frottement de Coulomb.

La dernière étape pour identifier le coefficient de frottement est de réaliser expérimentalement un essai de gonflement dans une matrice à section carrée à la pression souhaitée. Le tube formé est ensuite découpé transversalement et mesuré afin de déterminer l'épaisseur minimale. Enfin, en utilisant la **Figure.2.13**, cette épaisseur minimale expérimentale est comparée graphiquement aux épaisseurs minimales obtenues avec le modèle d'Orban-Hu et un coefficient de frottement est identifié. Les **Figures.2.15** et **2.16** récapitulent la procédure expérimentale et l'identification du coefficient de frottement à l'aide du modèle d'Orban-Hu 2007.

Notons que la courbe de la **Figure.2.13** est particulièrement sensible à la valeur de l'épaisseur initiale, il est donc nécessaire de mesurer précisément l'épaisseur initiale du tube avant sa mise en forme.

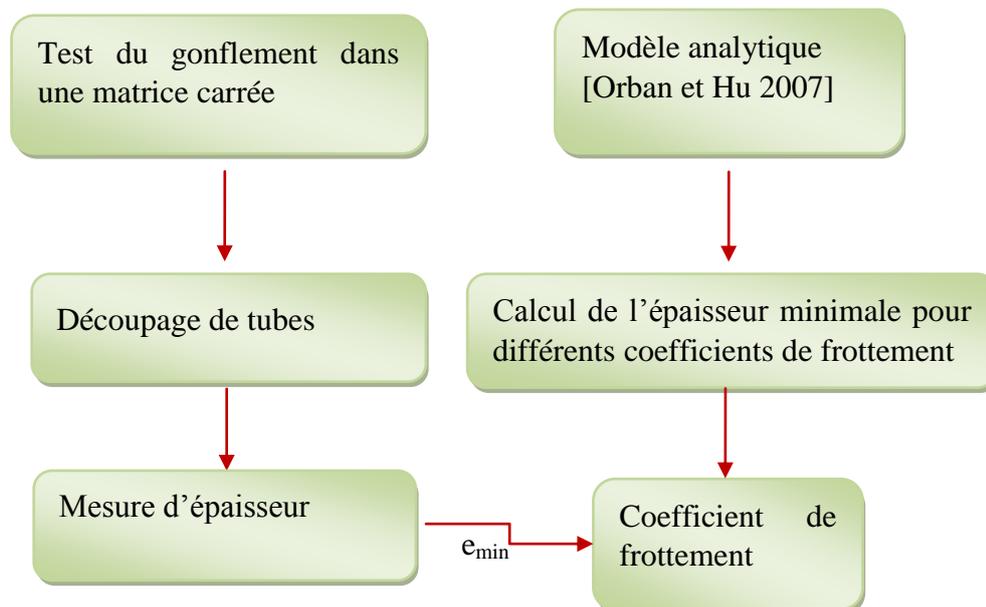


Figure.2.15. Organigramme de la procédure expérimentale et du modèle analytique.

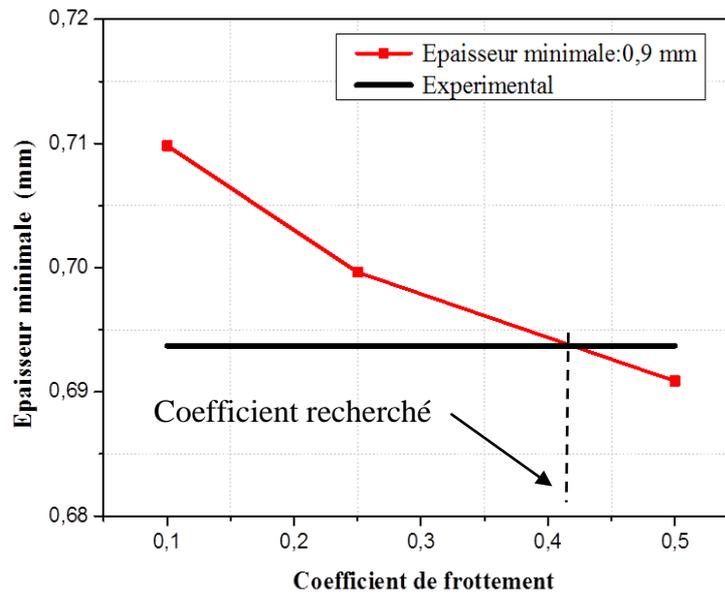


Figure 2.16. Evaluation du coefficient de frottement avec l'épaisseur minimale - courbe du coefficient de frottement.

2.6 Synthèse

Dans ce chapitre, le modèle d'Orban et Hu a été programmé et validé en comparant ses résultats à ceux obtenus par des simulations par éléments finis. Plusieurs modélisations ont été proposées: modèle 2D avec hypothèse de déformation plane avec 2 E et 4E, modèle 3D coque et modèle 3D solide. Tout d'abord, la capacité du modèle théorique à bien représenter l'effet de frottement sur l'écoulement du matériau dans un test d'expansion dans une matrice carrée a été montrée. La comparaison entre les résultats analytiques et numériques a permis de distinguer deux modèles éléments finis adaptés pour l'étude de l'amincissement en lien avec les conditions de frottement. De plus, c'est le modèle 3D coque qui permet la meilleure représentation du profil d'épaisseur le long de la section droite du tube, où la zone de transition est la zone d'amincissement critique décrite dans de nombreuses publications. Enfin, il a été mis en évidence que le paramètre le plus discriminant pour caractériser les conditions de frottement, est l'épaisseur minimale, et une procédure expérimentale pour la caractérisation du coefficient de frottement pour l'hydroformage de tube a été proposée.

Les principaux résultats de ce travail ont permis de publier un article dans une revue internationale :

Abir Abdelkefi, Pierrick Malécot, Nathalie. Boudeau , Noamen Guermazi, N.Haddar
“Evaluation of the friction coefficient in tube hydroforming with the "corner filling test" in a square section die”, International Journal Advanced Manufacturing Technology, DOI: 10.1007/s00170-016-8945-1.

*CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DU COEFFICIENT
DE FROTTEMENT*

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de déterminer le coefficient de frottement par différentes méthodologies et de valider la discrimination de ces méthodes vis-à-vis des conditions de frottement. Pour identifier le coefficient de frottement, deux méthodes sont considérées. En premier lieu, le test 'pion sur disque' est utilisé pour mesurer le coefficient de frottement entre le cuivre et l'acier. En deuxième lieu, la méthode basée sur un test d'expansion dans une matrice carrée et présentée au chapitre précédent est utilisée. Les deux coefficients de frottement déduits par ces deux approches sont utilisés pour mener des simulations éléments finis. Ensuite, les résultats obtenus lors des essais expérimentaux et par les simulations numériques sont comparés. Enfin, il est important de noter qu'au cours de ce travail, on a travaillé sur deux séries de tubes dont la première a été utilisée pour mettre au point le modèle d'Orban-Hu ([chapitre 2](#)). Alors que la deuxième, a été utilisée pour tous les travaux expérimentaux des [chapitres 3](#) et [4](#).

Le chapitre est organisé comme suit. Dans un premier temps, le matériau d'étude est présenté avec sa préparation et sa caractérisation ([section 3.2](#)). Les essais expérimentaux sont décrits en [section 3.3](#) et les mesures obtenues présentées en [section 3.4](#) ; dans cette dernière section, deux coefficients de frottement sont identifiés. Enfin, une corrélation entre les résultats expérimentaux et des simulations fondées sur la méthode des éléments finis est proposée en [section 3.5](#).

3.2 Le matériau d'étude, sa préparation et sa caractérisation mécanique

Le matériau utilisé dans cette étude est le cuivre désoxydé (Cu-DHP) dont la composition chimique est donnée dans le [Tableau.3.1](#). Ce cuivre K20/K21 Cu-DHP présente une teneur en phosphore résiduelle limitée et possède d'excellentes propriétés pour le soudage et pour la résistance à la fragilisation par l'hydrogène. Il possède également une excellente formabilité et il est utilisé où les exigences pour la conductivité électrique n'est pas élevée. Le grade K21 présente un faible niveau d'impuretés par rapport au K20 lui permettant de présenter des valeurs de limite d'élasticité particulièrement faibles. Les caractéristiques mécaniques de ce matériau

peuvent être trouvées dans le **Tableau.3.2**. Les échantillons sont des tubes dont les dimensions sont répertoriées dans le **Tableau.3.3**.

Tableau.3.1. La composition chimique du tube en cuivre (% en poids).

Cu (%)	99.9
P (%)	0.015 – 0.040

Tableau.3.2. Propriétés mécaniques du Cu-DHP.

Masse volumique (kg/m ³)	8490
Rm (MPa) (avant recuit)	440
Rp _{0.1} (MPa) (avant recuit)	420
A (%) (avant recuit)	2
E (GPa)	132
Coefficient de poisson ν	0.34
Module d'écrouissage K (MPa)	441.97
Coefficient d'écrouissage n	0.349
Contrainte de limite élastique σ_Y (MPa)	80
Déformation initiale ϵ_0	0.0075

Tableau 3.3. Dimensions de tubes.

Longueur (mm)	250
Rayon extérieur (mm)	17.325 – 17.675
Epaisseur (mm)	0.9 – 1.0

3.2.1 Préparation du matériau

Les tubes de Cu-DHP initiaux étant fortement écrouis, il n'était pas possible de les déformer. Afin qu'ils retrouvent une ductilité suffisante pour être mis en forme, un traitement de recuit à 450°C pendant 30 minutes, suivi d'un refroidissement à l'air ambiant a été réalisé. On peut observer la différence de formabilité entre le tube écroui et celui ayant subi un recuit à la **Figure. 3.1**.



Figure.3.1. Déformation sous l'action d'une même pression interne d'un tube écroui (a) et d'un tube ayant subi le recuit à 450°C pendant 30 minutes suivi d'un refroidissement à l'air ambiant (b).

3.2.2 Caractérisation mécanique des tubes dans le domaine plastique

Les tubes recuits ont été caractérisés à l'aide du test de gonflement libre disponible au Département mécanique appliquée. Ce test a été choisi car il fournit des données matériau plus appropriées pour l'hydroformage de tube par rapport à l'essai de traction classique [Chen et al. 2004 ; Koç et al. 2001 ; Kalfallah 2014 ; Zribi et al. 2013]. Durant ce test, la pression interne et la hauteur de gonflement sont mesurées (Figure.3.2 (a)) et un post-traitement (Figure.3.3) à l'aide du modèle de Boudeau-Malécot [Boudeau et Malécot 2012] permet d'obtenir la courbe contrainte-déformation (Figure.3.2 (b)), à partir de laquelle les coefficients de la loi d'écrouissage de Swift (K , n , ϵ_0) fournis dans le Tableau.3.2 peuvent être déduits.

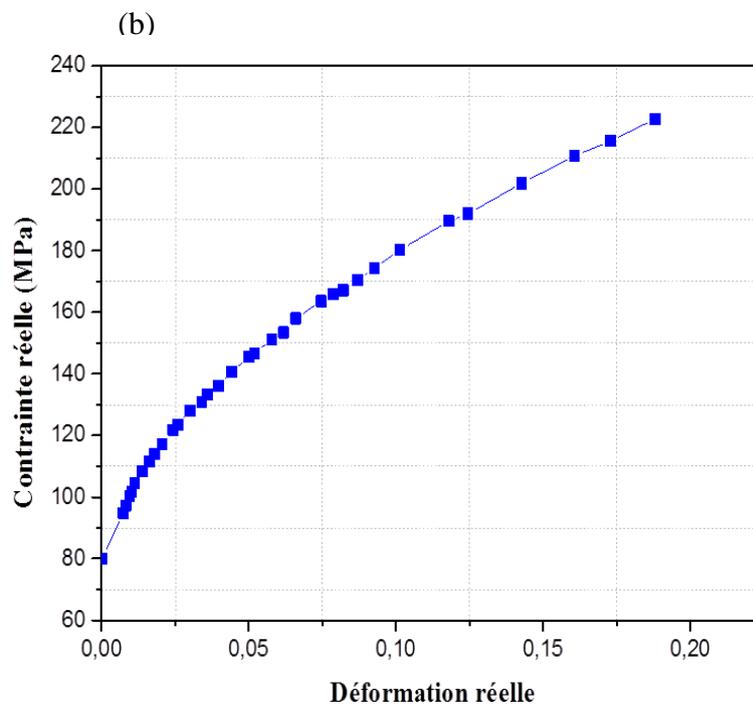
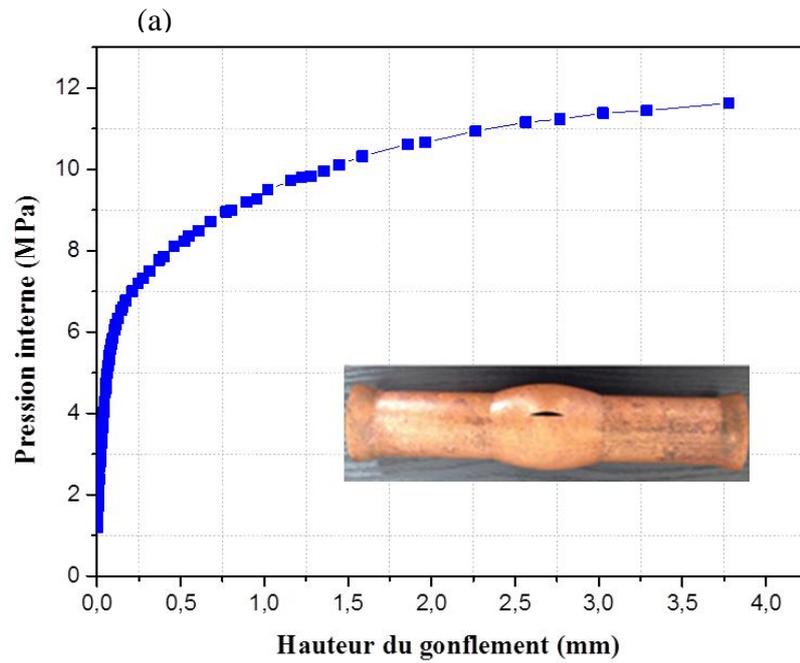


Figure.3.2. (a) Courbe pression – hauteur (P,h) de gonflement obtenue au cours du test de gonflement libre de tube (b) Courbe contrainte – déformation obtenue à partir des données de la courbe (a) post-traitée à l'aide du modèle de Boudeau – Malécot.

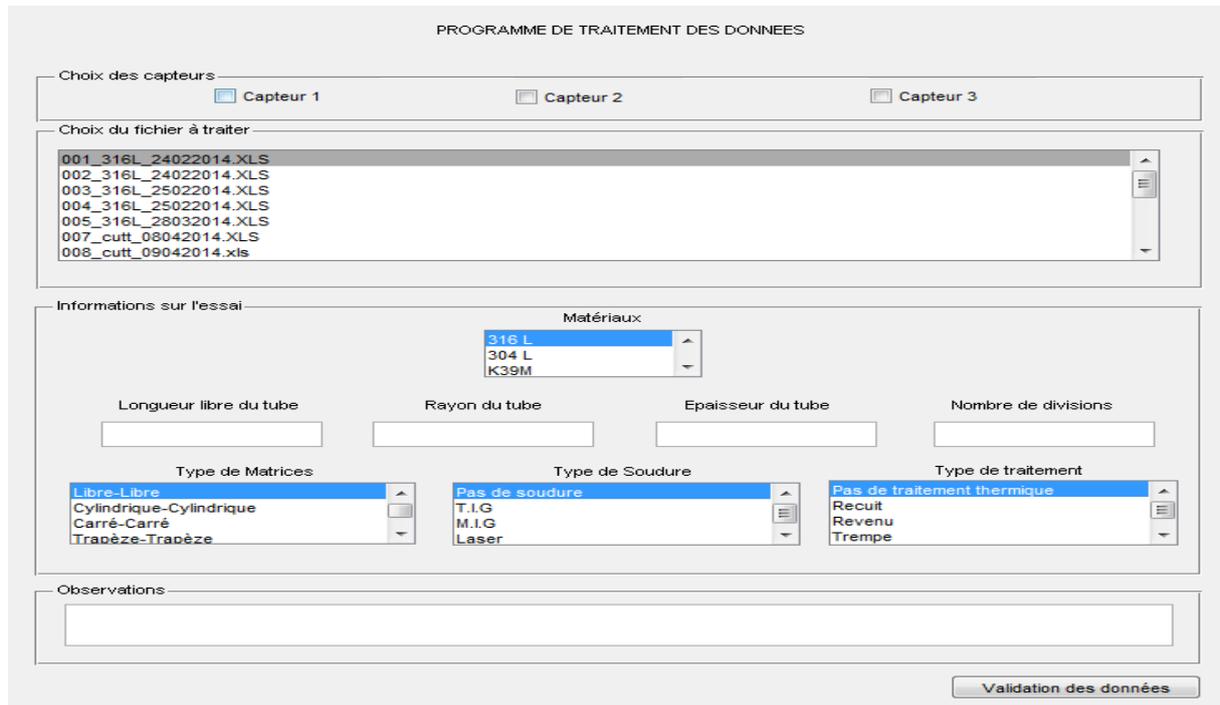


Figure.3.3. Interface de l'outil de post-traitement des courbes (P,h) par le modèle de Boudeau – Malécot [Vitu 2014].

3.3 Les essais expérimentaux et les techniques de mesures

Rappelons que nous cherchons à évaluer le coefficient de frottement de type Coulomb pour améliorer les ingrédients nécessaires à la simulation des procédés de mise en forme de tube par hydroformage. Nous allons dans cette partie décrire les essais expérimentaux ainsi que les techniques de mesures mises en œuvre.

Tout d'abord, le test classique "pion sur disque" pour évaluer le coefficient de frottement de Coulomb sera décrit ([section 3.3.1](#)) et celui de l'expansion d'un tube sous pression interne dans une cavité à section carrée ([section 3.3.2](#)) sera présenté. Les techniques de mesure utilisées pour le post-traitement expérimental des résultats du test d'expansion en matrice carrée sont également présentées à la [section 3.3.3](#).

3.3.1 Description du test "pion sur disque"

Un tribomètre a été utilisé pour identifier le coefficient de frottement entre le cuivre et l'acier ([Figure.3.4](#)). Différentes charges ont été appliquées pour étudier leur influence sur le

coefficient de frottement. Les échantillons sont préalablement dégraissés et nettoyés à l'éthanol et à l'acétone. Les échantillons plats en cuivre désoxydé (Cu-DHP), de dimensions 70 mm x 25 mm sont fixés horizontalement sur un support rotatif. Des charges normales (F_n) de 2, 5 et 9 N ont été appliquées et une vitesse de rotation de 150 tours par minute a été utilisée pour tous les tests. Une bille en acier (100 cr 6) de diamètre 10 mm frotte sur l'échantillon de cuivre (Cu-DHP) (**Figure.3.4**).

Un capteur de frottement / charge permet de mesurer la force tangentielle (F_t) au niveau du contact entre l'échantillon et la bille. Les essais sont effectués à l'ambiante (22°C, 40% l'humidité relative). Pour une bonne répétabilité des résultats, tous les tests ont été triplés et les résultats présentés correspondent à une moyenne de ces trois tests.

Le coefficient de frottement apparent (μ) est donc déterminé par le rapport entre les deux forces normale (F_n) et tangentielle (F_t)

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (3.1)$$

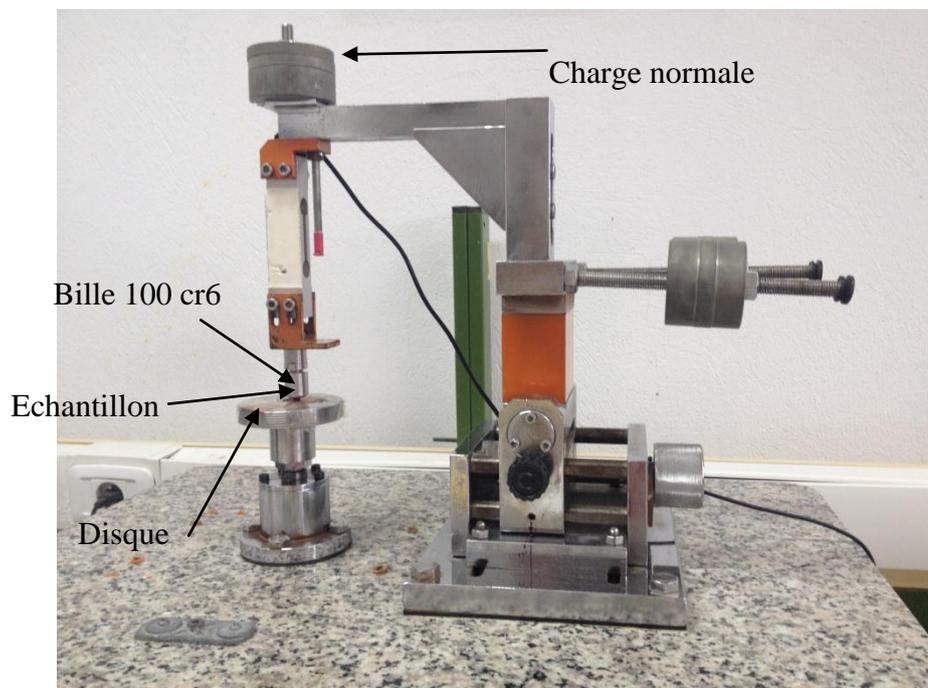


Figure.3.4. Tribomètre "pion sur disque" installé au laboratoire LGME

3.3.2 Presse de mise en forme et outillage

Un outil modulaire a été conçu afin de pouvoir réaliser d'une part le test de gonflement libre pour la caractérisation du matériau tube ([section 3.2.2](#)) et d'autre part, réaliser la mise en forme de tubes en matrices de forme. Cet outil est installé dans une presse comme le montre la [Figure.3.5](#) et le dispositif expérimental est représenté sur la [Figure.3.6](#). Le procédé se déroule comme suit : (1) les pistons coniques entrent en contact avec les extrémités du tube afin de réaliser l'étanchéité et l'encastrement aux deux extrémités du tube ; (2) un fluide est pompé dans l'échantillon à travers un des pistons coniques aboutissant à une pression de plus en plus importante à l'intérieur du tube ; (3) le tube se déforme et prend progressivement la forme de la matrice.



Figure.3.5. Machine d'hydroformage de tubes.

Pour le procédé de gonflement libre ainsi que le procédé d'hydroformage de tubes, la pression interne et la déformation du tube sont mesurées. Comme le montrent les figures [.3.6 \(b-c\)](#) et [.3.9](#) trois capteurs de déplacement suivent la déformation du tube. Dans les [Tableaux.3.4](#) et [3.5](#), on fournit les principales dimensions des matrices utilisées et présentées dans la [Figure.3.7](#). Les pressions internes maximales pour le test de gonflement libre et le test

d'hydroformage de tubes sont respectivement de 12.5 et 28 MPa. En effet, pour le test d'hydroformage de tubes la pression maximale de 28 MPa permet une expansion de tubes sans risque de fissuration.

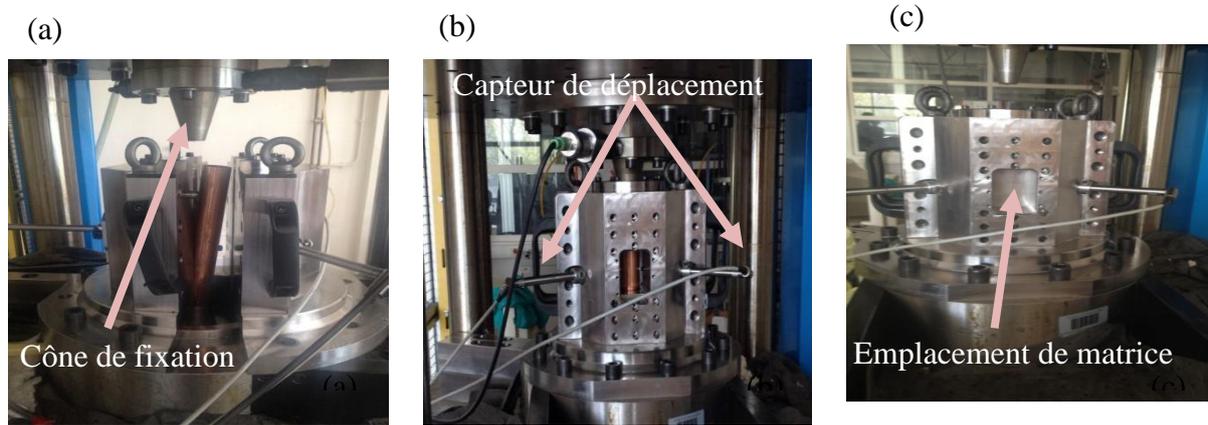


Figure.3.6. Outillage modulaire installé dans la presse du laboratoire FEMTO-ST (a) avant expansion, (b) durant le test de gonflement (c) durant l'hydroformage de tubes.

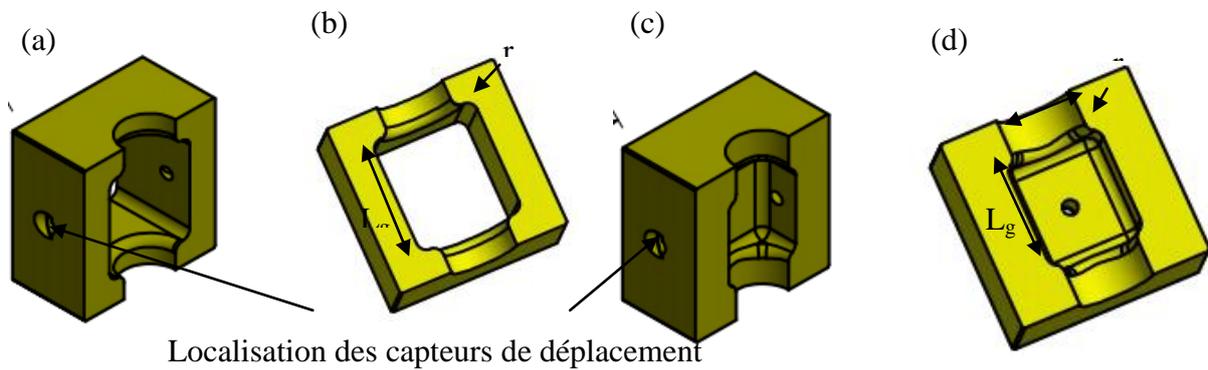


Figure 3.7. Sections de matrices : (a-b) de gonflement libre, (c-d) matrice carrée.

Tableau.3.4. Dimensions de matrice du gonflement libre.

Longueur (mm)	Largeur (mm)	Rayon du coin (mm)
L_g	D	r
60	35	5

Tableau.3.5. Dimensions de section de matrice carrée.

Longueur (mm)	largeur (mm)	Rayon du coin (mm)
L_g	D	r
50	35	5

Pour le test d'expansion en matrice carrée, un déplacement de 18 mm et une force de 40 kN ont été appliqués sur les pistons illustrés dans la **Figure.3.8** pour réaliser l'étanchéité en début de test, puis la force a été augmentée jusqu'à 75 kN pour assurer l'encastrement du tube.

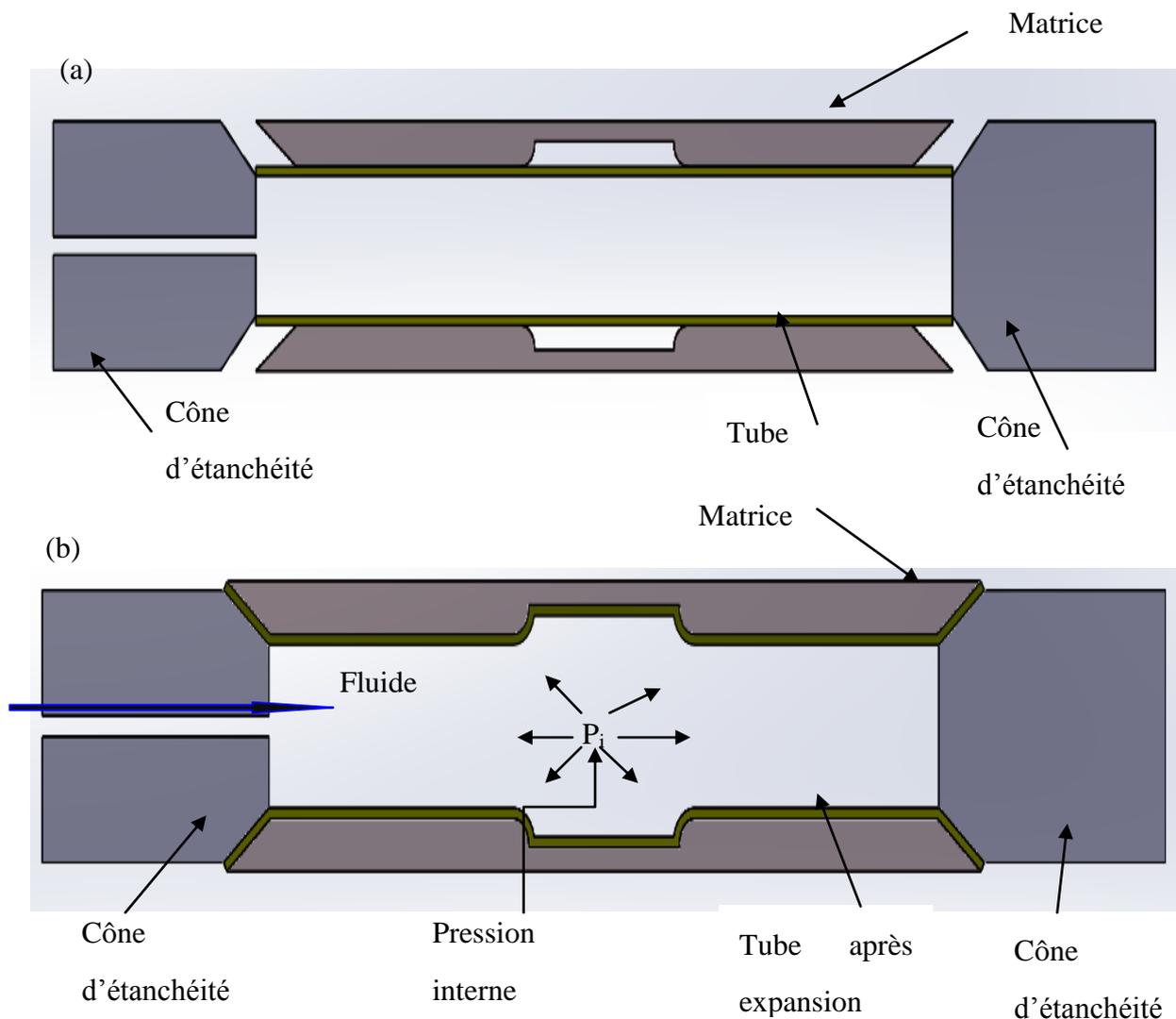


Figure.3.8. Définition de différentes zones dans l'hydroformage de tubes (a) avant expansion(b) après expansion.

3.3.3 Les techniques de mesures

3.3.3.1 Les mesures effectuées au cours du procédé

L'expansion du tube est contrôlée par trois capteurs de déplacement placés à 120° les uns par rapport aux autres (Figure.3.9). Il est ainsi possible de tracer l'expansion du tube le long de la direction du capteur en fonction de la pression pour les trois capteurs (Figure.3.9). Vu la configuration de la matrice et la localisation des capteurs, seuls les capteurs numérotés 2 et 3 sont considérés pour suivre la déformation du tube lors de son expansion dans la matrice carrée.

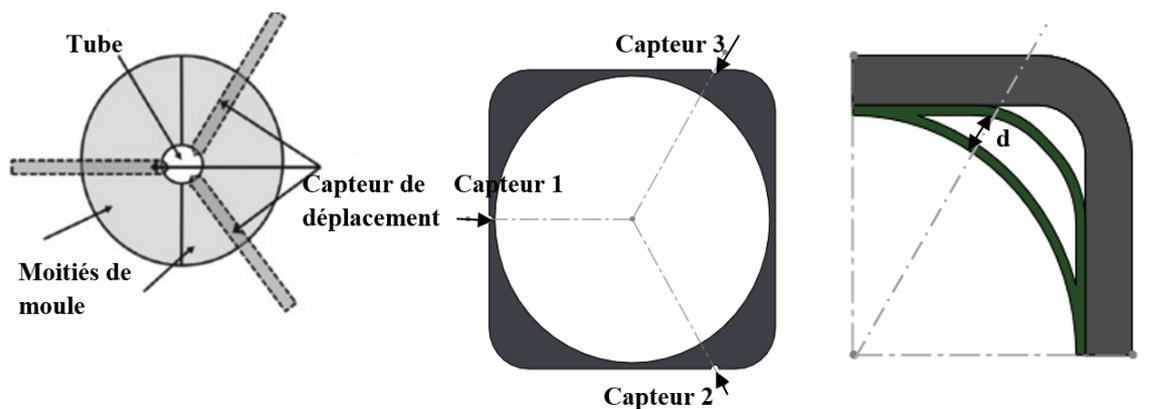


Figure.3.9. (a) Localisation des trois capteurs de déplacement : (a) pour le test de gonflement libre, (b) pour le test d'hydroformage de tubes, (c) Evolution de l'expansion pour le capteur 3.

3.3.3.2 Les mesures effectuées sur les tubes

L'expansion en matrice carrée a été réalisée pour différents niveaux de pression : 15, 20, 25 et 28 MPa. Les différents échantillons (Figure.3.10) obtenus ont été découpés par électroérosion à fil afin d'éviter d'introduire des déformations supplémentaires au tube et pour obtenir des contours très précis.

À partir des sections des tubes formées à différents niveaux de pression, il est possible de mesurer les profils extérieurs et intérieurs. Pour cela, une machine de métrologie sans contact (Werth IP 250) associée à un logiciel de traitement d'images a été utilisée. Le capteur est une caméra analogique associée à un objectif à focale fixe telecentric 50x, menant à une répétabilité de grande précision ($\pm 1 \mu\text{m}$) (Figure.3.11).

Comme le profil ne peut pas être mesuré en une seule fois, une méthode de balayage est utilisée comme cela est illustré à la **Figure.3.12(a)**. La machine suit automatiquement le profil de l'échantillon et acquiert un nuage de points. Pour chaque point, la partie est éclairée et l'image est traitée avec les étapes décrites dans la **Figure.3.12(b)**. Pour chaque zone du contour traité, les profils intérieurs et extérieurs sont mesurés représentant en moyenne 60 000 points. Les données sont enregistrées dans un fichier texte qui est ensuite analysé à l'aide d'un programme Matlab© développé par Pierrick Malécot pour obtenir la répartition de l'épaisseur le long du profil de la section droite du tube déformé. Ce système a été utilisé pour mesurer la distribution de l'épaisseur de la paroi du tube pour différents stades de déformation. Il est ainsi possible de déterminer la zone où apparaît l'amincissement localisé. Enfin, les valeurs obtenues ont été utilisées pour tracer les courbes expérimentales qui seront présentées dans la suite.



Figure.3.10. Tubes après expansion pour différentes valeurs de pression interne.

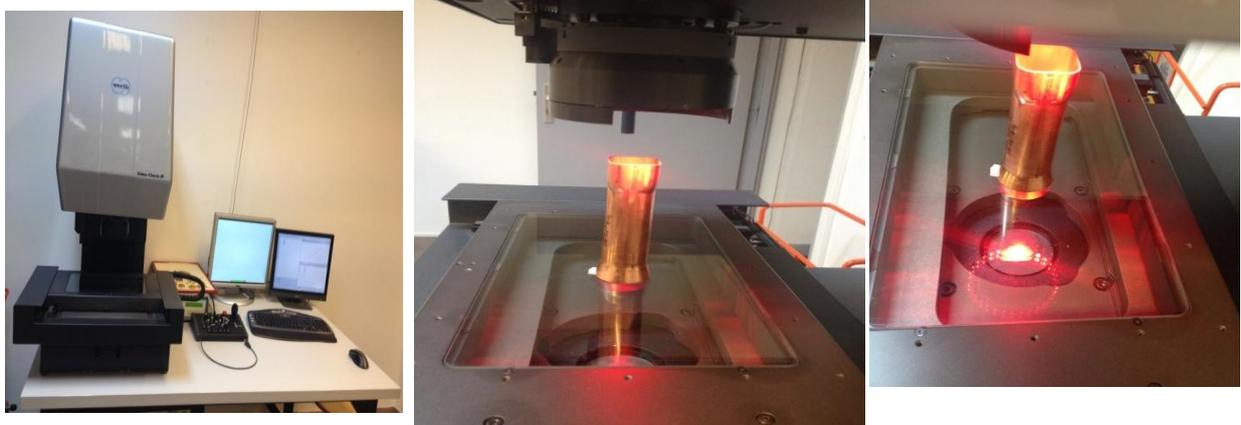
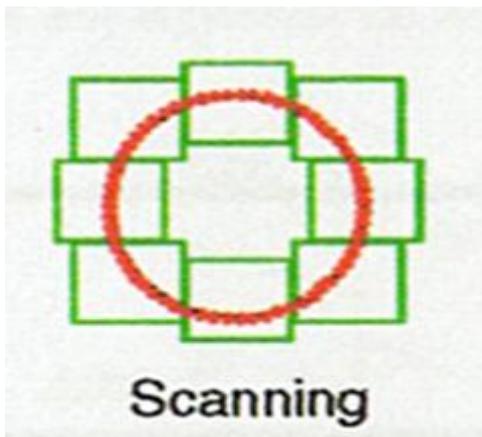


Figure.3.11. Machine de métrologie sans contact (Werth IP 250).

(a)



(b)

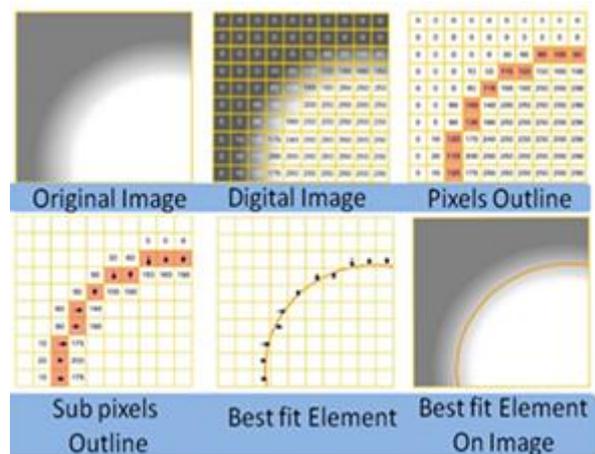


Figure.3.12. (a) Procédé disponible sur l'appareil de métrologie 250 Werth IP (b) Différentes étapes de traitement d'image à balayage.

3.4 Résultats et discussion

Dans ce paragraphe, nous allons présenter et discuter les mesures d'épaisseur réalisées sur les tubes expansés en matrice carrée à l'aide de la technique exposée en [section 3.3.3.2](#) où nous étudierons d'une part son évolution avec le niveau de pression interne appliquée et d'autre part son évolution en fonction des conditions de lubrification. Ensuite, nous évaluerons le coefficient de frottement à l'aide des deux tests envisagés dans cette thèse, à savoir le test "pion sur disque" et le test d'expansion de tube en matrice carrée.

3.4.1 Influence de la pression interne sur la distribution de l'épaisseur

La **Figure.3.13** illustre la distribution de l'épaisseur le long de la section transversale du tube pour différents points de mesure et niveaux de pression interne. L'expansion de tube est assurée sans aucun risque d'éclatement avec différents niveaux de pression variant entre 15 et 28 MPa. Trois zones, visibles à la **Figure.3.13** sont étudiées : le mur (ou paroi droite), la zone de transition, la zone du coin. Pour une faible pression ($P = 15$ MPa), on constate une épaisseur quasiment constante dans la zone coin. Plus on augmente la pression, plus des zones critiques prennent clairement place dans la zone de transition ; l'amincissement dans le coin est moindre et tend à se stabiliser ; quant à l'amincissement au niveau du mur, il devient réellement critique en fin de mise en forme, pour la pression de 28 MPa. En conclusion, les zones à risque d'éclatement du tube se situent dans la zone de transition, ce qui est conforme à la littérature scientifique sur le sujet [[Xu et al. 2009a](#) ; [Liu et al. 2006](#) ; [Cui et al. 2014](#)].

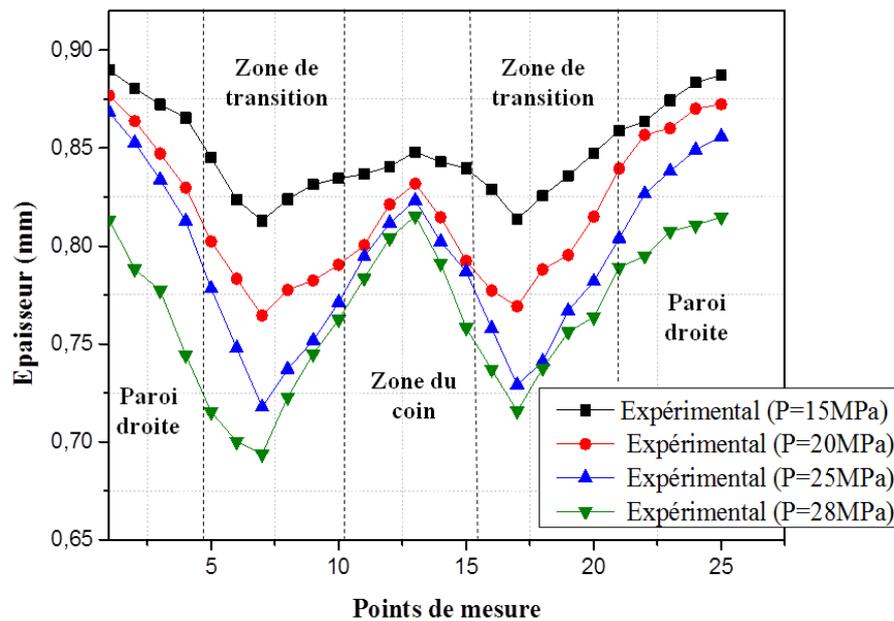


Figure.3.13. Distribution de l'épaisseur pour différents points de mesure et différentes pressions interne à sec.

3.4.2 Influence de la lubrification sur la distribution d'épaisseur

Le test d'expansion en matrice carrée a été réalisé "à sec" et avec lubrification. Dans le cas dit "à sec", aucune lubrification désirée n'a été prévue ; néanmoins, les outillages sont huilés pour ne pas se corroder et des traces du liquide, mélange d'eau et d'huile de coupe, peuvent être présentes sur les outils suite à un éclatement des tubes au cours d'essais précédents. Dans le cas lubrifié, nous avons volontairement appliqué un dépôt de téflon sur le tube.

Les profils d'épaisseur obtenus pour le test à sec et celui lubrifié sont similaires comme le montre la [Figure.3.14](#) ; on retrouve les trois zones à savoir, le mur, le coin et la zone de transition. Néanmoins, on constate un amincissement beaucoup plus important dans la zone du coin lorsque le test est réalisé "à sec". Par contre, la variation d'épaisseur sur l'ensemble du profil reste relativement proche dans les deux cas.

Il convient maintenant de contrôler que les profils d'épaisseur obtenus à l'aide du modèle théorique d'Orban-Hu sont compatibles avec ceux relevés expérimentalement. Comme cela a été mentionné précédemment, l'épaisseur initiale du tube est un paramètre important puisqu'il définit le niveau général des courbes ([chapitre2 section2.4](#)). Les tubes utilisés pour nos expérimentations ont, d'après la fiche fournisseur, une épaisseur de 1mm avec une dispersion de $\pm 10\%$. Sa mesure a révélé que les tubes utilisés avaient une épaisseur de 0,9 mm. Le modèle d'Orban-Hu a donc été utilisé avec cette valeur, et pour plusieurs valeurs du coefficient de frottement, les autres paramètres (les autres dimensions du tube et son comportement plastique, les dimensions de la matrice) restant inchangés. La [Figure.3.15](#) montre les courbes obtenues à l'aide du modèle d'Orban-Hu, pour 3 valeurs du coefficient de frottement (0,1 ; 0,25 ; 0,5) et celle mesurée sur les échantillons, pour la pression finale de 28 MPa. Même si nous n'avons pas une superposition exacte de la courbe expérimentale avec l'une des courbes obtenues avec le modèle, on remarque que le coefficient de frottement recherché se situe entre 0,25 et 0,5. Notons que c'est relativement éloigné des coefficients de frottement généralement conseillés pour mener des simulations numériques de procédés de mise en forme. Il a déjà été mentionné que ce profil n'était pas pratique pour évaluer le coefficient de frottement de Coulomb et ce point sera abordé dans la prochaine section.

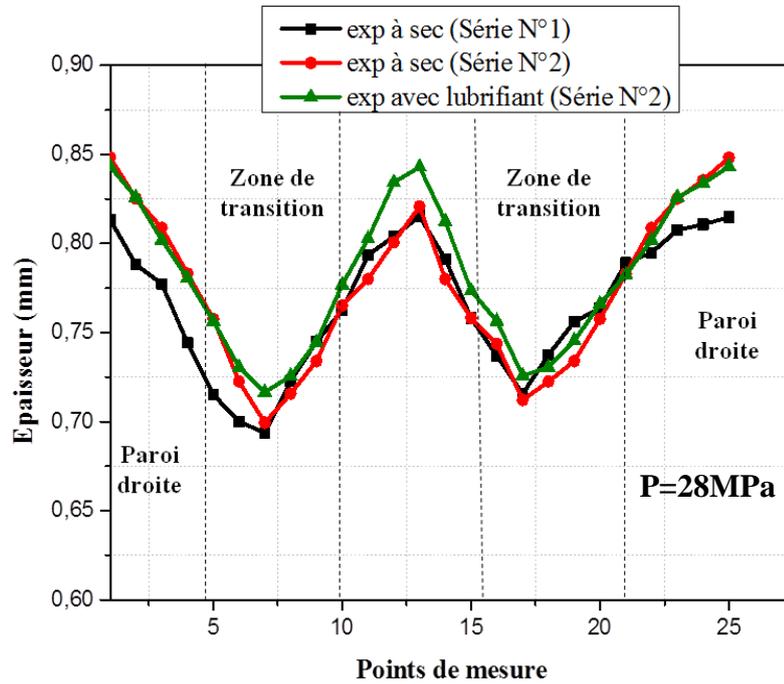


Figure.3.14. Distribution de l'épaisseur pour différents points de mesure.

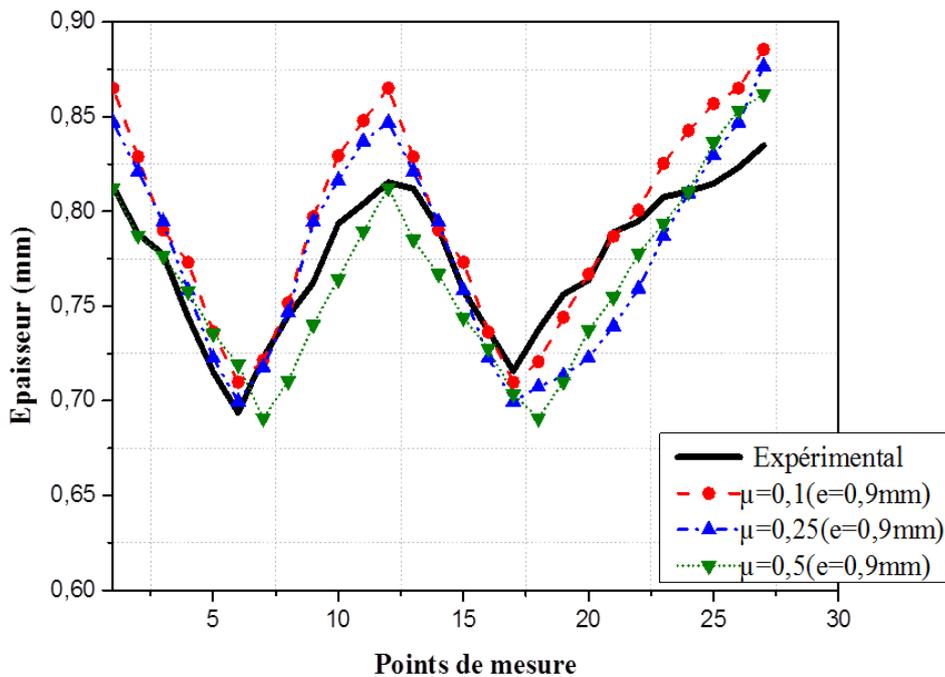


Figure.3.15. Distribution d'épaisseur le long de la section transversale du tube déformé obtenu à partir du modèle théorique pour une épaisseur initiale de tube $t_0 = 0,9$ mm et différents coefficients de frottement μ où les mesures expérimentales (essais à sec) sont superposées.

L'état final correspondant à une pression interne de 28 MPa est considéré ici.

3.4.3 Evaluation du coefficient de frottement

3.4.3.1 Caractérisation par le test "pion sur disque"

Des tests "pion sur disque" ont été réalisés sur le tribomètre du laboratoire LGME pour différentes conditions (à sec et avec lubrification au téflon). Au début des essais, les échantillons plats en cuivre désoxydé (Cu-DHP) sont préalablement dégraissés et nettoyés à l'éthanol et à l'acétone. Par suite, ils sont fixés horizontalement sur un support rotatif. Trois charges normales sont considérées : 2, 5 et 9 N et une vitesse de rotation de 150 tours par minute a été utilisée. Une bille en acier (100 cr 6) roule sur l'échantillon de cuivre (Cu-DHP) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Un capteur de frottement / charge permet de mesurer la force tangentielle (F_t) au niveau du contact entre l'échantillon et la bille. Chaque essai est triplé afin de vérifier la validité des mesures. Les données sont enregistrées dans un fichier texte qui est ensuite analysé à l'aide d'un programme Matlab© pour obtenir l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps.

Les résultats obtenus avec la charge de 9 N ont finalement été écartés car une forte usure a été constatée comme le montre la **Figure.3.16**.

Les coefficients de frottement ainsi mesurés sont fournis dans le **Tableau.3.6** et les résultats obtenus sont visibles dans les **Figures.3.17** et **3.18**. On retiendra donc un coefficient de frottement de 0,1 sans lubrification et 0 avec lubrification.

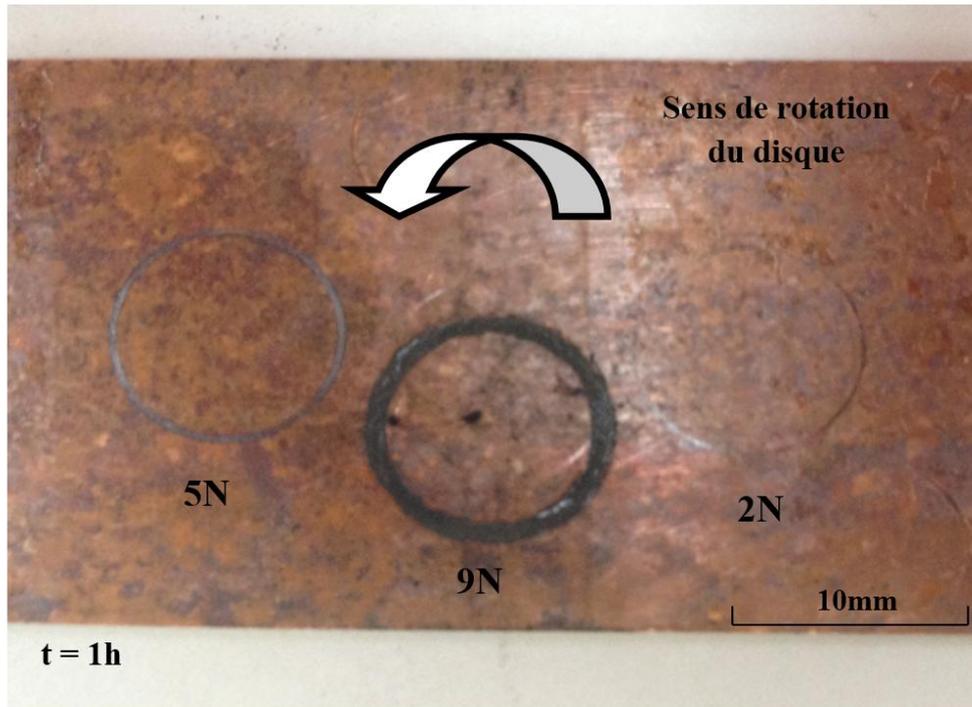


Figure 3.16. Effet de la force normale sur l'échantillon de cuivre lors d'un test "à sec".

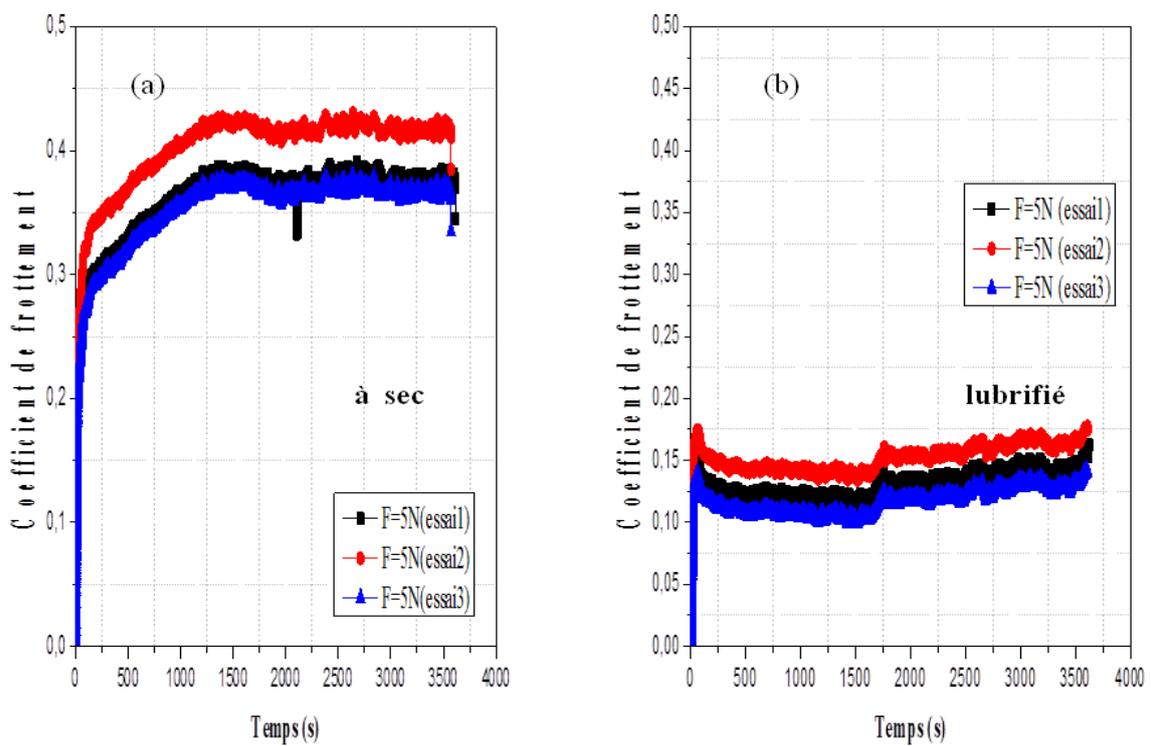


Figure.3.17. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour une charge de 5N.

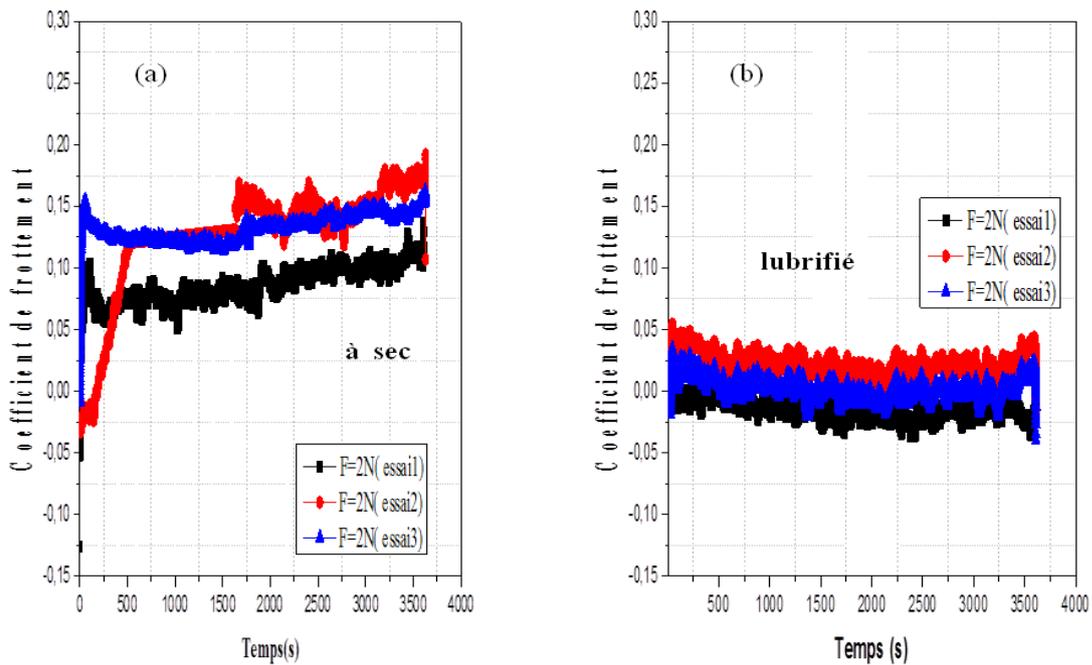


Figure.3.18. Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps pour une charge de 2N.

Tableau.3.6. Coefficients de frottements obtenus pour les différentes conditions expérimentales.

Lubrification	Charges normales	
	2 N	5N
"à sec"	0,1	0,37
Lubrifié (téflon)	~0	0,13

3.4.3.2 Utilisation du modèle d'Orban-Hu

Il s'agit maintenant de caractériser le frottement en utilisant la procédure établie au [chapitre 2](#) et fondée sur l'exploitation du modèle d'Orban-Hu.

Les tubes utilisés présentent une épaisseur de 0,9 mm et un comportement plastique qui suit la loi de Swift suivante :

$$\bar{\sigma} = 441.97 (0.0075 + \bar{\varepsilon})^{0.349}$$

Les autres paramètres nécessaires pour lancer le programme correspondant au modèle d'Orban-Hu sont les dimensions de la matrice carrée (côté de 35 mm et rayon de coin de 5 mm), l'évolution de pression qui varie de 15 à 28 MPa et la valeur du coefficient de frottement μ . Ce dernier prendra les valeurs successives de 0,1, 0,25 et 0,5. Pour chaque simulation réalisée avec les différentes valeurs de μ , on relève la valeur minimale de l'épaisseur sur le contour obtenue pour la pression maximale. Cela permet de construire une courbe épaisseur minimale en fonction du coefficient de frottement (**Figure.3.19**).

Rappelons que le test d'expansion est réalisé avec des tubes nus et des tubes revêtus par un dépôt de téflon. Les tubes déformés obtenus pour la pression de 28 MPa sont découpés puis mesurés comme cela a été décrit au chapitre précédent. On a déterminé une épaisseur minimale de 0,699 mm environ pour le cas sans lubrification et une épaisseur minimale de 0,716 mm pour le cas avec lubrification. Ces valeurs sont reportées sur le graphique de la **Figure.3.19**. L'intersection des droites parallèles à l'axe des abscisses passant par ces valeurs d'épaisseurs minimales avec la courbe établie à l'aide du modèle d'Orban-Hu permet de déterminer les coefficients de frottement correspondant. On trouve ainsi :

- $\mu = 0,05$ dans le cas d'expansion d'un tube revêtu de téflon,
- $\mu = 0,25$ dans le cas d'expansion à sec.

Notons tout d'abord que les valeurs relatives de ces deux coefficients de frottement sont cohérentes par rapport à l'effet d'une lubrification sur les conditions de frottement.

Ensuite, on constate que les valeurs déterminées avec cette méthode sont très différentes des valeurs issues du test "pion sur disque" à savoir :

- $\mu = 0$ ou 0,13 (suivant la valeur de la charge normale : 2 ou 5 N) dans le cas d'un échantillon revêtu de téflon,
- $\mu = 0,1$ ou 0,37 (suivant la valeur de la charge normale : 2 ou 5 N) dans le cas d'un échantillon nu.

Les coefficients de frottement déterminés à l'aide du modèle d'Orban-Hu correspondent à des coefficients quasi statiques puisque le procédé d'expansion est relativement lent, alors que dans

le test "pion sur disque", la bille roule pendant un certain temps sur l'échantillon. De plus, les surfaces en contact sont assez dissemblables. Le coefficient de frottement déterminé par la méthode fondée sur le modèle d'Orban-Hu ne peut être considéré comme un paramètre physique puisqu'il intègre des problématiques de structure.

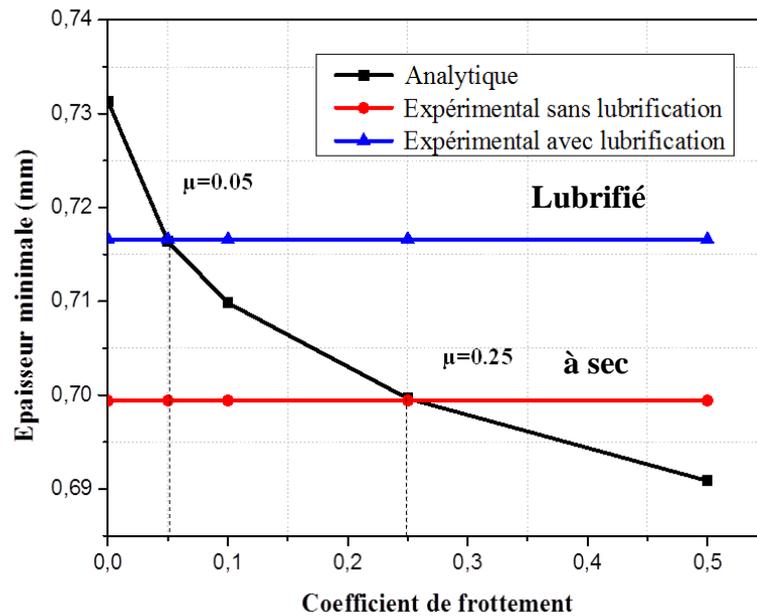


Figure.3.19. Evaluation du coefficient de frottement à l'aide du graphe épaisseur minimale - coefficient de frottement construit à l'aide du modèle d'Orban-Hu pour la pression maximale de 28 MPa.

3.5 Simulation éléments finis du test d'expansion en matrice carrée

Le test d'expansion en matrice carrée est simulé par la méthode des éléments finis à l'aide de la version explicite du logiciel LS Dyna ©. Deux modèles éléments finis sont utilisés : un modèle 3D coque et un modèle 3D solide. Le comportement plastique du tube est représenté par la loi de Swift suivante : $\bar{\sigma} = 441,97(0,0075 + \bar{\epsilon})^{0,349}$. Le frottement à l'interface tube/matrice utilisé sera d'une part le coefficient caractérisé par le test "pion sur disque" et d'autre part celui déterminé par le test d'expansion en matrice carrée.

3.5.1 Simulation du test "à sec"

Des simulations numériques du test de remplissage du coin ont été menées avec les modèles 3D solide et 3D coque, et avec les deux coefficients de frottement : celui obtenu à partir de l'essai "pion sur disque" dans les conditions d'un test à sec ($\mu=0.1$) et celui obtenu à partir du modèle d'Orban-Hu ($\mu=0.25$) (**Figure.3.20**). L'épaisseur résultante le long de la section du tube, obtenue à la fin du procédé correspondant à une pression interne de 28 MPa, est représentée sur la **Figure.3.20**. Tout d'abord, il peut être observé que des mesures expérimentales révèlent l'existence d'un amincissement au niveau de la zone de transition. Ce qui est en bon accord avec les résultats obtenus dans plusieurs études [**Liu et al. 2006 ; Yuan et al. 2006a ; Xu et al. 2009a ; Cui et al. 2014 ; Daly et al. 2007**]. Pour le modèle éléments finis 3D solide, seuls les points critiques sont tracés qui introduisent la paroi droite, la zone de transition et la zone du coin. En effet, le modèle 3D solide donne le meilleur accord avec les résultats expérimentaux en particulier dans la zone de transition lorsque le coefficient de frottement devient important ($\mu=0.25$) **Figure.3.20**. Cependant, il présente une épaisseur constante dans la zone du coin. En contre partie, le modèle 3D coque permet une meilleure représentation de la variation d'épaisseur, même s'elle n'est pas parfaite. L'amincissement de la zone de transition est sous-estimé avec $\mu = 0.1$ et $\mu=0.25$. L'ensemble des comparaisons est résumé dans le **Tableau.3.7**.

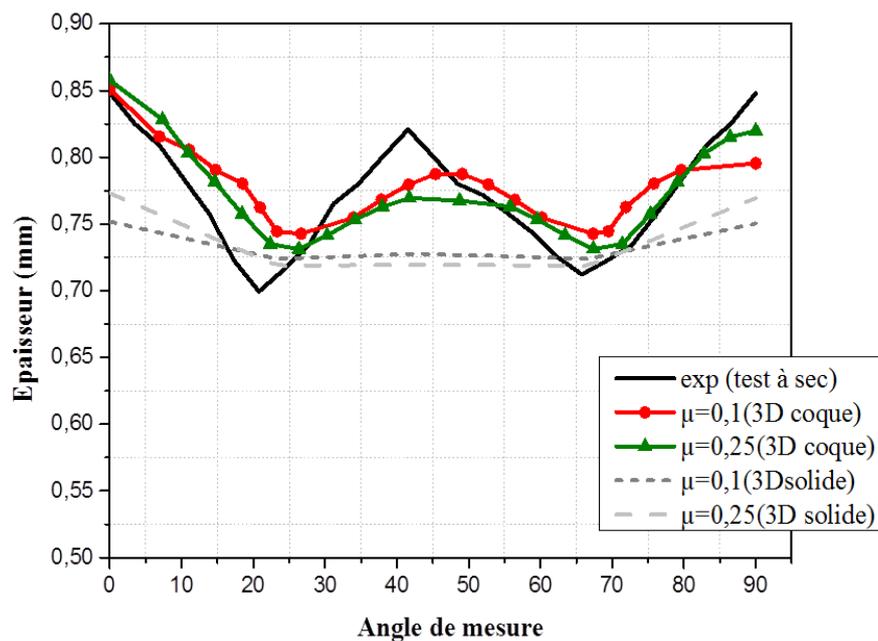


Figure.3.20. Comparaison de la variation d'épaisseur résultante le long de la section transversale du tube pour différents modèles EF avec des mesures expérimentales.

Tableau.3.7. Comparaison entre les résultats numériques et les mesures de l'épaisseur minimale et la variation d'épaisseur.

	Erreur en t_{\min}	Erreur en Δt
$\mu=0.1$ (3D coque)	-6.2%	+2.8%
$\mu=0.25$ (3D coque)	-4.6%	+1.5%
$\mu=0.1$ (3D solide)	-3.5 %	+8.4%
$\mu=0.25$ (3D solide)	-2.8%	+6.3%

3.5.2 Simulation du test avec lubrification

La **Figure.3.21** présente aussi la répartition de l'épaisseur le long de la section carrée transversale du tube déformé. En effet, deux coefficients de frottement sont considérés pour étudier la distribution de l'épaisseur: $\mu = 0$ et $\mu = 0,05$ obtenus à partir du test "pion sur disque" et le modèle théorique. Dans la **Figure.3.21**, les conclusions sont très semblables à celles obtenues à la **Figure.3.20**. En effet, l'amincissement maximal se produit dans la zone de transition. Le modèle 3D coque révèle la meilleure configuration au contraire du modèle 3D solide. L'augmentation du coefficient de frottement de $\mu = 0$ à $\mu = 0.05$ que ce soit avec un modèle 3D solide où modèle 3D coque favorise l'amincissement. Mais en contre partie, la présence de lubrification conduit en premier lieu à réduire la valeur de frottement (de $\mu=0.25$ à $\mu=0.05$ par exemple). En deuxième lieu, elle permet de réduire l'amincissement. A titre d'exemple, pour des coefficients de frottement $\mu=0.25$ et $\mu=0.05$, la différence entre les résultats obtenus à partir du modèle 3D solide et les résultats expérimentaux a été diminué de 2,8% à 1,8%. Ces comparaisons sont résumées dans le **Tableau 3.8**.

Tableau.3.8. Comparaison entre les résultats numériques et les mesures de l'épaisseur minimale et la variation d'épaisseur.

	Erreur en t_{\min}	Erreur en Δt
$\mu=0$ (3D coque)	-5.9%	+5.2%

$\mu=0.05$ (3D coque)	-4.5%	+2.8%
$\mu=0$ (3D solide)	-2.4 %	+9.6%
$\mu=0.05$ (3D solide)	-1.8%	+8.7%

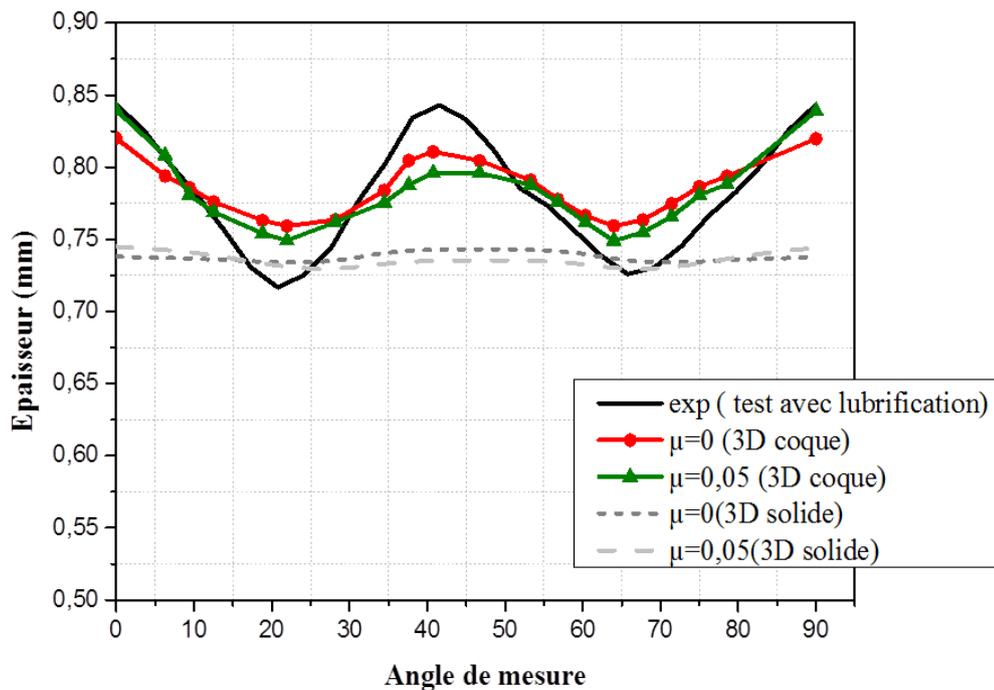


Figure.3.21. Comparaison de la variation d'épaisseur résultante le long de la section transversale du tube pour différents modèles EF avec des mesures expérimentales.

3.6 Bilan intermédiaire et présentation de la suite

Dans ce chapitre, le matériau d'étude a été caractérisé à l'aide du test de gonflement de tube, le coefficient de frottement a été déterminé de deux manières et le test d'expansion en matrice a été mené avec et sans lubrification. En parallèle, ce dernier test a été simulé à l'aide de la version explicite de Ls Dyna où un modèle 3D coque et un modèle 3D solide ont été utilisés.

Dans un premier temps, le coefficient de frottement de Coulomb a été déterminé à l'aide du test classique du "pion sur disque" sur un tribomètre développé au LGME. Les conditions avec et sans lubrification ont bien menées à des valeurs de coefficients différentes.

Dans un second temps, la procédure proposée au chapitre précédent a été exploitée pour déterminer le coefficient de frottement en utilisant d'une part le modèle d'Orban-Hu et d'autre part des mesures d'épaisseur du tube déformé obtenu lors du test d'expansion. Les coefficients de frottement obtenus dans les conditions expérimentales avec ou sans lubrification sont également bien différents. Notons qu'ils sont également différents et plus élevés de ceux obtenus à l'aide du test "pion sur disque" :

- "à sec", on a trouvé $\mu = 0,25$ au lieu de $0,1$;
- Avec lubrification, on a trouvé $\mu = 0,05$ au lieu de 0 .

Des simulations éléments finis ont été menées avec ces différents coefficients de frottement et les épaisseurs dans la section droite du tube déformé ont été analysées.

On a trouvé que :

- Le modèle 3D coque présente la meilleure configuration même si elle n'est pas parfaite,
- Le modèle 3D solide révèle des résultats proches de ceux obtenus par les essais expérimentaux en particulier dans la zone de transition,
- L'augmentation du coefficient de frottement favorise l'amincissement dans la zone de transition,
- La lubrification permet de réduire le coefficient de frottement et l'amincissement,
- Les résultats obtenus par le modèle théorique sont très proches des résultats obtenus par les tests expérimentaux.

Il s'agit maintenant de vérifier que le test d'expansion en matrice carrée peut constituer un test de caractérisation du coefficient de frottement valable pour tout type d'opérations d'hydroformage. Cela constitue notre prochaine et dernière partie où nous étudierons l'expansion en matrices de formes variées.

*CHAPITRE 4 : APPLICATIONS A L'HYDROFORMAGE
DE PIECES DE FORMES COMPLEXES*

4.1 Introduction

Ce chapitre porte sur l'application de la méthodologie proposée en fin du [chapitre 2](#) et mise en œuvre au [chapitre 3](#), dans le cas d'autres configurations de mise en forme de tubes par hydroformage en matrice fermée. Les tubes considérés sont en Cu-DHP identiques à ceux utilisés au [chapitre 3](#).

Le but est d'étudier la validité du coefficient de frottement caractérisé par le test d'expansion en matrice carrée pour d'autres configurations d'hydroformage.

Les tubes seront donc mis en forme dans des matrices de différentes géométries (rectangulaire, trapézoïdale). Des mises en forme expérimentales seront réalisées et seront simulées à l'aide du logiciel LS-Dyna pour deux coefficients de frottement : l'un obtenu à l'aide du test "pion sur disque", l'autre issu du test d'expansion en matrice carrée. On suivra pour cela le même cheminement que celui présenté au [chapitre 3](#).

Finalement, les résultats expérimentaux et numériques seront confrontés.

4.2 Les différentes configurations testées

Trois configurations sont considérées dans ce chapitre, à savoir :

- Une matrice de section rectangulaire ;
- Une matrice de section trapézoïdale ;
- Une matrice dont la section correspond à l'association de deux demi-matrices : l'une correspondant à un demi-trapèze et l'autre à un demi-carré.

Les demi-matrices utilisées sont présentées à la [Figure.4.1](#) et leurs associations sont schématisées à la [Figure.4.2](#). Notons également que la matrice trapézoïdale considérée n'est pas symétrique.

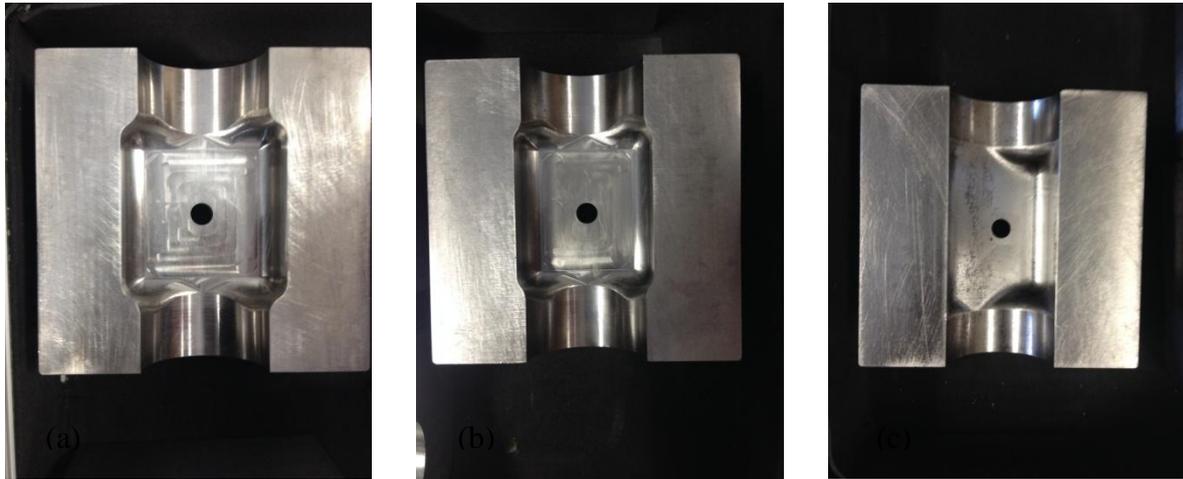


Figure.4.1. Les demi-matrices utilisées (a) demi-matrice carrée (b) demi-matrice rectangulaire (c) demi-matrice trapézoïdale.

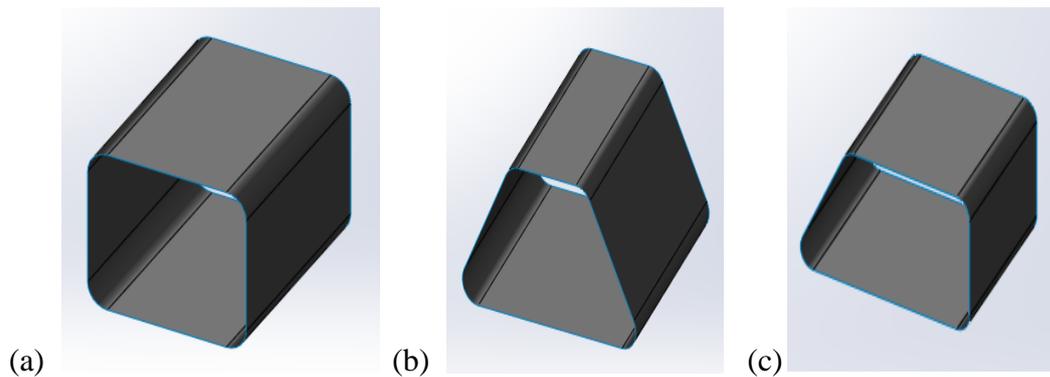


Figure. 4.2. Les différentes configurations d'hydroformage de forme (a) matrice rectangulaire (configuration n°1) (b) matrice trapézoïdale (configuration n°2) (c) matrice résultant de l'association d'une demi-matrice carrée et d'une demi-matrice trapézoïdale (configuration n°3).

Ces configurations se distinguent du test en matrice carrée, outre par la différence de géométrie, par les conditions initiales de contact entre le tube et la matrice où on constate à la [Figure.4.3](#) que le nombre de contacts initiaux sont de 2 ou 3 suivant la configuration considérée.

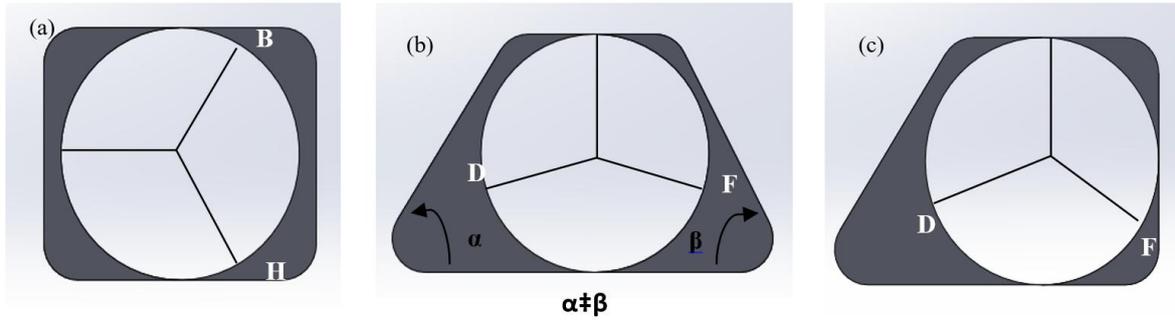


Figure.4.3. Points initiaux de contact entre le tube et la matrice pour les différentes configurations testées (a) 2 point de contact pour la configuration n° 1 (b) 2 points de contact pour la configuration n°2 où ($\alpha=58,68^\circ, \beta=63.35^\circ$) (c) 3 points de contact pour la configuration n°3.

4.3 Essais expérimentaux

4.3.1 Déroutement des essais

Pour la réalisation des différents tests de mise en forme en matrice de forme, il est nécessaire dans un premier temps de déterminer la pression interne maximale à appliquer pour obtenir la forme désirée sans éclatement du tube. Cette pression maximale étant calibrée, le test d'hydroformage est réalisé. Au cours du test, la déformation du tube est suivie grâce à trois capteurs disposés à 120° les uns des autres comme cela est illustré à la [Figure.4.3](#). On remarque alors que, suivant la configuration étudiée, les capteurs seront plus ou moins judicieux pour suivre la déformation du tube. Les résultats typiques qu'on peut obtenir sont illustrés à la [Figure.4.4](#) et [Figure.4.5](#) pour les essais sans et avec lubrification, respectivement. Ces derniers sont obtenus pour la pression optimisée et les tubes formés ne présentent pas de rupture comme on peut le voir à la [Figure.4.6](#).

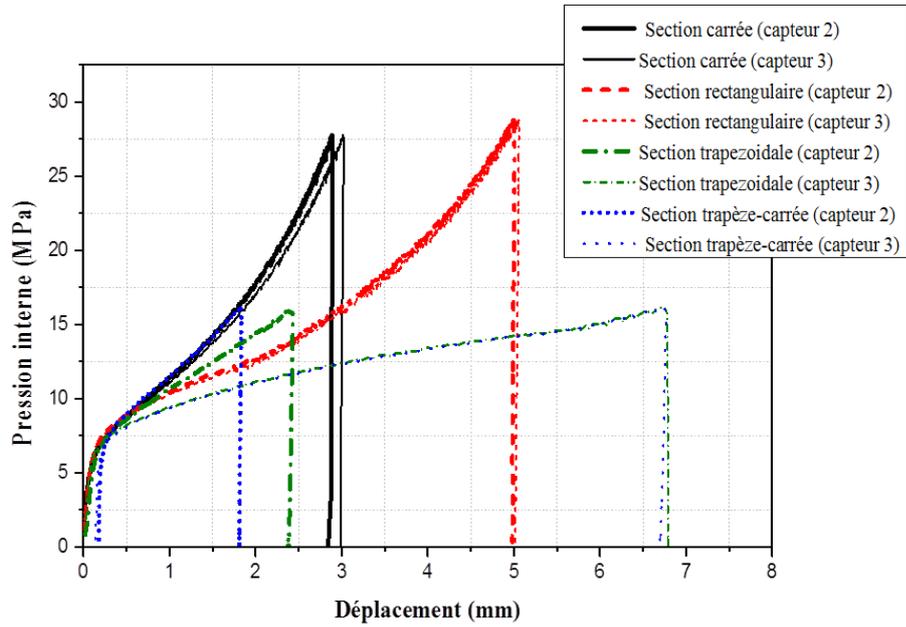


Figure.4.4. Suivi de la déformée du tube en fonction de l'évolution de la pression interne dans une mise en forme sans lubrification

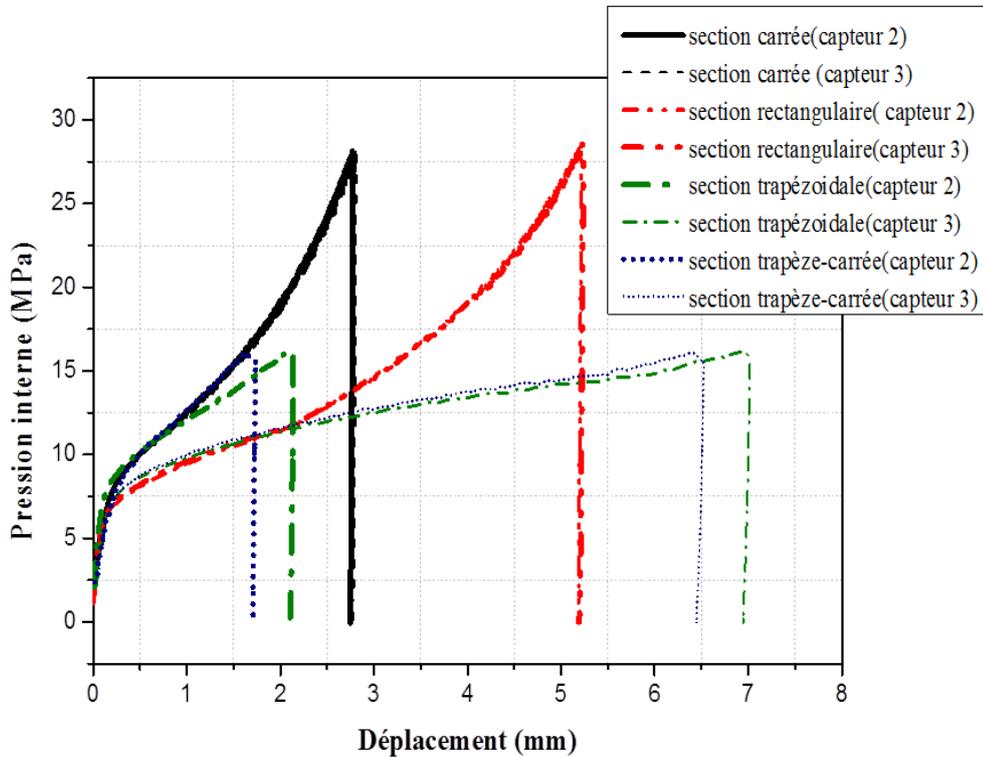


Figure.4.5. Suivi de la déformée du tube en fonction de l'évolution de la pression interne dans une mise en forme avec lubrification



Figure.4.6. Tubes en fin de mise en forme

4.3.2 Essais préliminaires jusqu'à rupture

Avant de commencer les tests, il convient de régler certains paramètres. Il faut tout d'abord déterminer la force axiale qui viendra réaliser l'étanchéité et encastrer les tubes à ses deux extrémités. Celle-ci dépend fortement de la pression interne maximale qui sera appliquée au tube pour sa mise en forme. Pour cette dernière, on doit pouvoir mettre en forme le tube sans apparition de rupture. L'évolution de la pression sera linéaire en fonction du temps. Nous avons trouvé qu'une pression de 28,5 MPa était suffisante pour mettre en forme le tube en matrice rectangulaire (notons qu'elle est proche de celle nécessaire pour une mise en forme en matrice carrée qui était de 28 MPa). Pour les deux autres configurations, une pression maximale de 16 MPa est suffisante. Ces pressions ont été déterminées en allant jusqu'à la rupture des tubes comme cela est illustré à la [Figure.4.7](#). Dans le cas de la mise en forme en matrice rectangulaire, la rupture apparaît au niveau de la zone de transition entre la partie mur et la partie rayon. Pour la matrice trapézoïdale, la rupture apparaît au niveau de l'angle le plus aigu de la matrice.

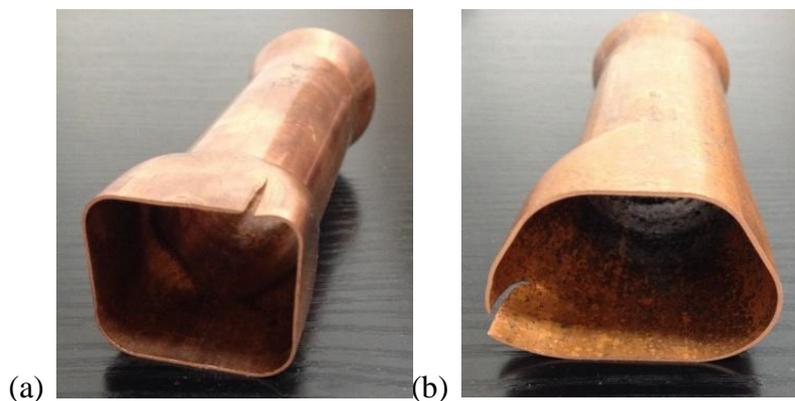


Figure.4.7. Eclatement des tubes lors des tests préliminaires

4.3.3 Tests de mise en forme

4.3.3.1 Mise en forme en matrice rectangulaire (configuration n°1)

La **Figure.4.8** présente la variation de l'épaisseur le long de la section transversale du tube déformé dans un hydroformage en matrice rectangulaire en fin de mise en forme. La pression interne maximale est dans ce cas de 28,5 MPa sans qu'il y ait amorçage de fissure. Pour la représentation de la **Figure.4.8**, seule la moitié du contour est considérée en raison des conditions de symétrie, et les mesures ont été réalisées pour deux cas d'hydroformage : à sec et avec lubrification. On pourrait s'attendre à un profil parfaitement symétrique mais des degrés de liberté existent dans les outillages pour permettre le placement du tube ; ceci est nécessaire puisque l'outillage modulaire consiste en un empilement de différents éléments indépendants.

On a également étudié la réduction d'épaisseur en utilisant la formule ci-dessous et dont les résultats sont résumés dans le **Tableau.4.1** :

$\frac{e_{initiale} - e}{e_{initiale}} \cdot 100$ (%) où $e_{initiale}$ est l'épaisseur initiale du tube et e l'épaisseur locale courante.

Le profil d'épaisseur obtenu dans la **Figure 4.8** fait apparaître quatre zones de transition (aux points B, D, F et H), deux zones de type "coin" (points C et G) et deux zones de type "mur" (points A et I). Rappelons que les points A et I correspondent aux points de contact initiaux entre le tube et la matrice.

Comme on l'a déjà observé pour la mise en forme en matrice carrée, les zones de fort amincissement sont situées dans les zones de transition. Ceci est en accord avec les observations rapportées dans la littérature [**Yuan et al. 2006a ; Wang et al.2012**]. En particulier, Yuan et al. [**Yuan et al. 2006a**] sont arrivés à la même conclusion dans le cas de l'hydroformage d'un acier inoxydable. Quant à Wang et al. [**Wang et al. 2012**], ils ont trouvé les mêmes tendances dans leurs études menées sur des tubes en alliage d'aluminium. Ces amincissements sont beaucoup plus critiques pour les points B et H. En effet, le point E n'est pas en contact avec la matrice en début de procédé ; la partie du tube correspondant aux points D, E et F est donc en gonflement libre jusqu'à ce que le point E entre en contact. De ce fait,

l'épaisseur varie de façon relativement homogène dans cette zone, alors que les points B et H constituent les points de transition entre la zone mur et la zone coin en début de déformation. Dès que le point E entre en contact avec la matrice, les points D et F deviennent également des points de transition entre les zones mur et coin. Cela explique les forts amincissements observés au niveau de ces quatre points et également le fait que les amincissements soient beaucoup plus marqués au niveau des points B et H. Enfin, la diminution d'épaisseur est la plus faible aux points A et I correspondant aux points de contact initiaux entre le tube et la matrice. Le point E présente un amincissement légèrement supérieur à celui mesuré au niveau des points A et I puisqu'il subit une déformation en début de procédé jusqu'à entrer en contact avec la matrice.

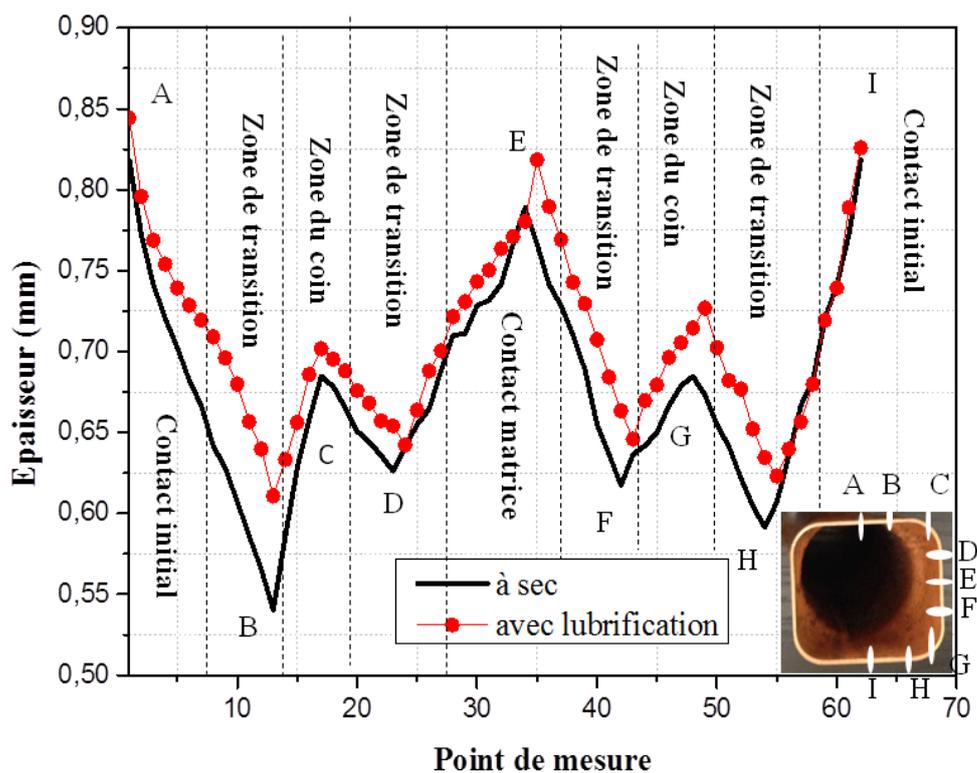


Figure.4.8. Distribution d'épaisseur le long de la section transversale du tube en fin de procédé dans le cas d'un hydroformage en matrice rectangulaire, avec ou sans lubrification.

Tableau.4.1. Variations de la réduction de l'épaisseur dans la matrice de section rectangulaire.

	* Réduction de l'épaisseur en %								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Sans lubrifiant	9	39,9	24	30,4	12,3	31,4	23,9	34,3	9,1

Avec lubrifiant	8,4	32,2	22,1	28,6	9,1	28,3	19,3	30,7	6,3
-----------------	-----	------	------	------	-----	------	------	------	-----

On remarque une nouvelle fois que les amincissements sont moindres quand il y a lubrification. Les valeurs consignées dans le **Tableau.4.1** parlent d'elles-mêmes. Les amincissements dans les zones de transition relatives aux points B et H sont nettement plus importants dans le cas d'une mise en forme à sec. Par contre, on constate assez peu de différence au niveau des points initialement en contact (points A et I) entre le cas "à sec" et le cas lubrifié. Le point E qui est en déformation libre en début de procédé puis devient un point de contact à partir d'un certain niveau de déformation présente un amincissement très proche du point A, en particulier dans le cas lubrifié.

On peut donc dire que lorsqu'il n'y a pas de lubrification, à la déformation liée à l'application d'une pression interne, s'ajoute des tensions de retenue au niveau des zones de contact qui génèrent des amincissements critiques dans les zones de transition. Lorsqu'il y a lubrification, ces efforts de tension sont moindres menant à des amincissements plus modérés dans les zones de transition, et donc à une variation d'épaisseur globale légèrement moins importante sur l'ensemble de la pièce (0,24 mm pour le cas lubrifié contre 0,30 mm pour le cas "à sec") et à des amincissements localisés moins critiques que dans le cas "à sec" (0,61 mm ou 32% dans le cas lubrifié contre 0,53 mm ou 40% dans le cas "à sec").

Les efforts de mise en forme ont également été comparés dans le cas "à sec" et lubrifié. Les résultats sont visibles à la **Figure.4.9**. On remarque que dans ce cas d'hydroformage, la lubrification a finalement quasiment aucun effet sur l'effort de formage pour obtenir la même déformée du tube. En fait, ce sont les variations d'épaisseur dans les zones libres de se déformer qui viennent compenser les efforts de retenue au niveau des zones en contact. La comparaison de l'évolution de la pression interne avec la déformation du tube obtenue en matrice carrée montre que dans le cas de la matrice rectangulaire, il faut pratiquement le même effort pour une déformation plus importante. En effet, dans le cas de l'hydroformage en matrice rectangulaire, le tube présente seulement deux points de contact initiaux, contre quatre en matrice carrée ; le tube est donc plus libre de se déformer que dans le cas de la matrice carrée et il y a moins d'effort de résistance dû au frottement à contrer. On remarque également un changement de pente dans la courbe pour la matrice rectangulaire ; celui-ci a lieu pour un déplacement de

capteur de l'ordre de 2,5 mm qui correspond à la transition gonflement libre – gonflement avec contact du tube au niveau du point B.

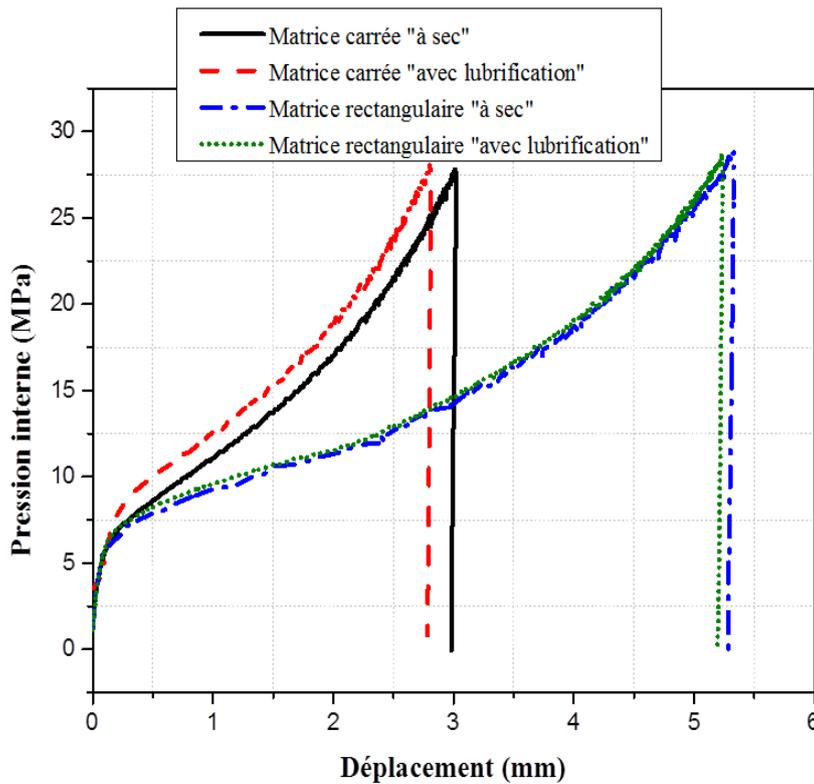


Figure.4.9. Courbes pression – déformation du tube dans le cas de l'hydroformage en matrice rectangulaire avec et sans lubrification (point B) (capteur 3).

4.3.3.2 Mise en forme en matrice trapézoïdale (configuration n°2)

Les tests d'hydroformage en matrice trapézoïdale ont été réalisés avec et sans lubrification.

Etant donné qu'il n'y a aucune symétrie pour cette configuration, l'ensemble du contour de la section transversale du tube est étudié. Les mesures d'épaisseur sur ce contour sont représentées à la **Figure.4.10** et synthétisées dans le **Tableau 4.2**.

Tableau.4.2. Variations de la réduction d'épaisseur dans la section transversale du tube hydroformé dans la matrice trapézoïdale.

* Réduction de l'épaisseur en %								
A	B	C	D	E	F	G	H	

Sans lubrifiant	11,5	33,7	27,6	37,5	17,5	19	16,2	18
Avec lubrifiant	10,5	30,6	27,5	36	17	18	14	15,2

A la lecture du **Tableau.4.2**, on constate qu'avec la lubrification, la réduction d'épaisseur est moindre sur l'ensemble du profil ; ceci est bien en accord avec les tendances observées et celles reportées dans la littérature.

Les points A et E correspondent aux points de contact initiaux, le point A au niveau du petit côté et le point E au niveau du grand côté. On constate que pour le point A, pour lequel les points voisins arrivent assez tôt, au cours du procédé, en contact avec la matrice, l'amincissement est le plus faible.

Les points D et F correspondent aux deux points qui se déplacent le plus au cours de l'hydroformage, le point D étant situé au niveau de l'angle le plus aigu de la matrice. C'est donc pour ce point que l'amincissement est le plus important, que le test soit réalisé avec ou sans lubrification. Il est à noter qu'il correspond au lieu de rupture qu'on a pu observer à la **Figure.4.7.b** et qu'il est en bon accord avec les observations obtenues dans la littérature [**Li et al. 2009 ; Xu et al. 2009**]

La partie (BCD) concentre les amincissements les plus importants. Cela est dû à la grande liberté de déformation du tube dans cette zone de l'angle le plus aigu de la matrice trapézoïdale. Du côté de l'autre angle, la partie (FGH) révèle une certaine homogénéité d'épaisseur avec des niveaux de réduction d'épaisseur relativement raisonnable (~15 – 20 %).

La **Figure.4.11** présente les efforts de mise en forme dans le cas "à sec" et "lubrifié". En effet, la comparaison de l'évolution de la pression interne avec la déformation du tube obtenu en matrice carrée montre que dans le cas de la matrice trapézoïdale, il faut moins d'efforts pour une déformation plus importante. En effet, dans le cas de l'hydroformage en matrice trapézoïdale, le tube présente seulement deux points de contact initiaux, contre quatre en matrice carrée ; le tube est donc plus libre de se déformer dans le cas de la matrice carrée et il y a moins d'effort de résistance du au frottement à contrer.

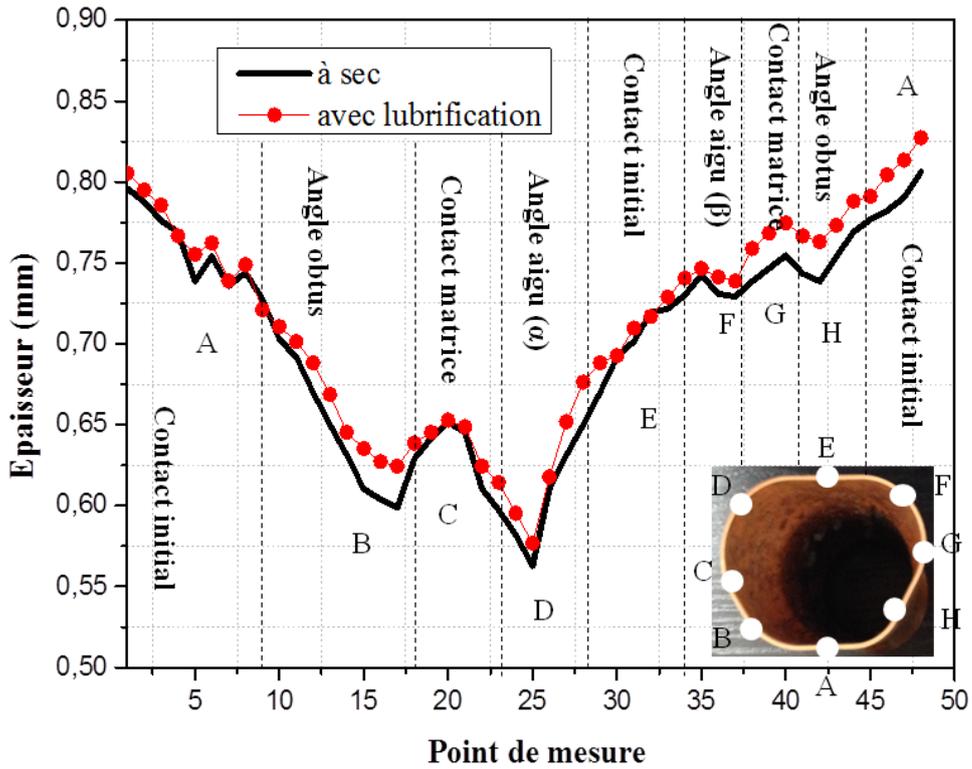


Figure.4.10. Effet de la lubrification sur la distribution de l'épaisseur le long de la section transversale du tube hydroformé dans une matrice de forme trapézoïdale.

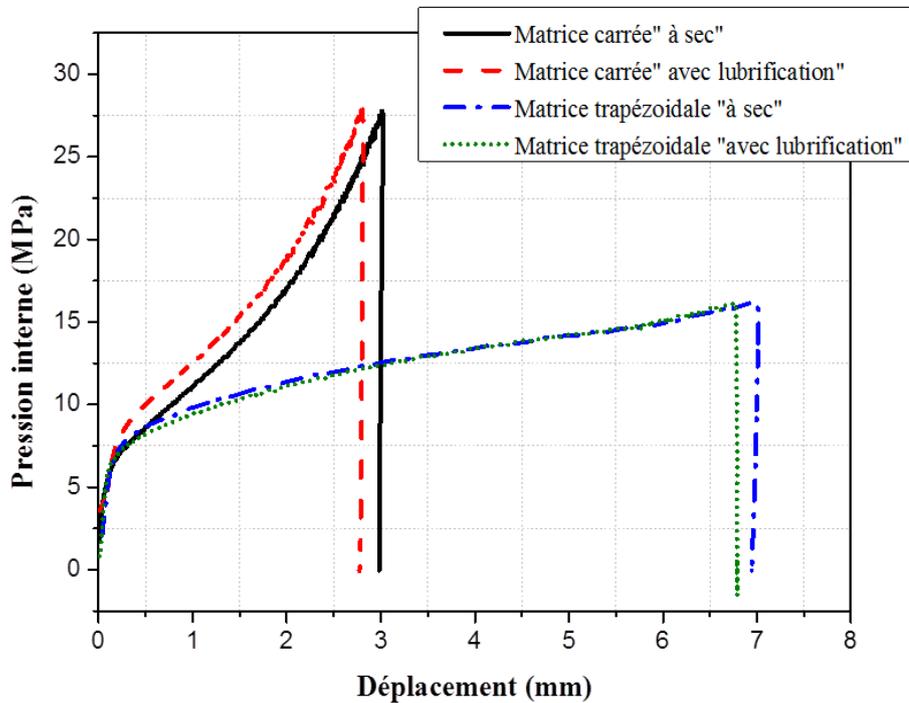


Figure.4.11. Courbes pression – déformation du tube dans le cas de l'hydroformage en matrice trapézoïdale avec et sans lubrification (point D) (capteur 3).

4.3.3.3 Mise en forme en matrice carrée-trapèze (configuration n°3)

La **Figure.4.12** montre la distribution de l'épaisseur le long de la section transversale du tube déformé dans une section trapèze-carrée. Une pression interne de 16 MPa, assure l'expansion de tubes sans aucun risque d'éclatement sans ou avec lubrification. Comme la montre la **Figure.4.3.c**, la section trapèze-carrée présente un angle aigu ($58,68^\circ$), un angle obtus ($121,32^\circ$) et deux angles droits. L'ensemble du modèle doit donc être étudié. Les principaux résultats révèlent que, l'épaisseur minimale se situe au niveau de l'angle aigu avec 32,5% de réduction d'épaisseur pour le test sans lubrifiant contre 30,3% pour le test avec un lubrifiant (point D). Ce résultat est en bon accord avec les observations faites dans des études antérieures [**Li et al 2009 ; Xu et al 2009**]. L'autre région critique se situe au niveau de l'angle obtus avec 31,6% de réduction d'épaisseur pour le test à sec contre 29,8% pour celui lubrifié (point B). La 3^{ème} région (points H et F) correspondant à l'angle droit présente une réduction d'épaisseur de 21,4% pour le test sans lubrifiant contre 19,33% pour le test avec un lubrifiant. La dernière région à considérer (points A et E) correspond aux zones initiales de contact ; c'est dans cette zone que l'amincissement est minimal. Comme pour les autres cas présentés précédemment, le lubrifiant permet de limiter l'amincissement et ce pour les différentes zones considérées plus haut.

La **Figure.4.13** présente les efforts de mise en forme dans le cas "à sec" et "lubrifié". La comparaison de l'évolution de la pression interne avec la déformation du tube obtenue en matrice carrée et en matrice trapèze-carrée montre qu'il faut moins d'effort pour une déformation plus importante en matrice trapèze-carrée qu'en matrice carrée. Le nombre de points de contact initiaux (4 en matrice carrée et 3 en matrice trapèze-carrée) et la liberté de déformation du tube côté trapèze explique cette différence de niveau d'effort de mise en forme. Notons que les niveaux des efforts sont relativement proches dans les cas d'hydroformage en matrice trapézoïdale et en matrice trapèze-carrée ; toutefois, on peut noter une déformation (ou déplacement) moindre dans le cas de la présente configuration qui est légèrement plus contrainte que dans le cas précédent.

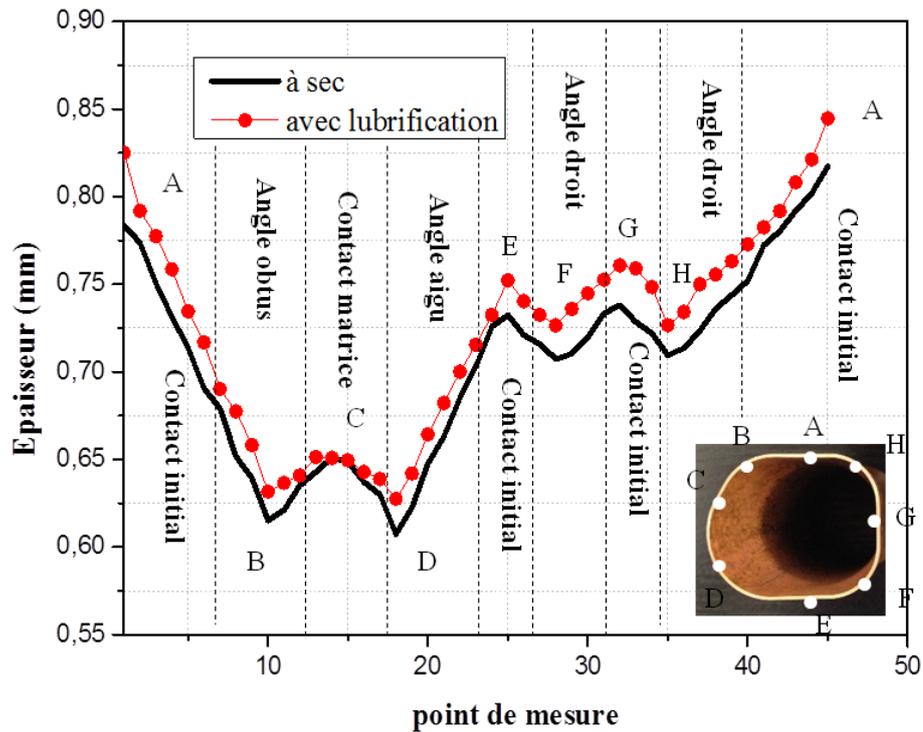


Figure.4.12. Effet de la lubrification sur la distribution de l'épaisseur le long de la section transversale du tube hydroformé dans une matrice de forme trapèze-carrée.

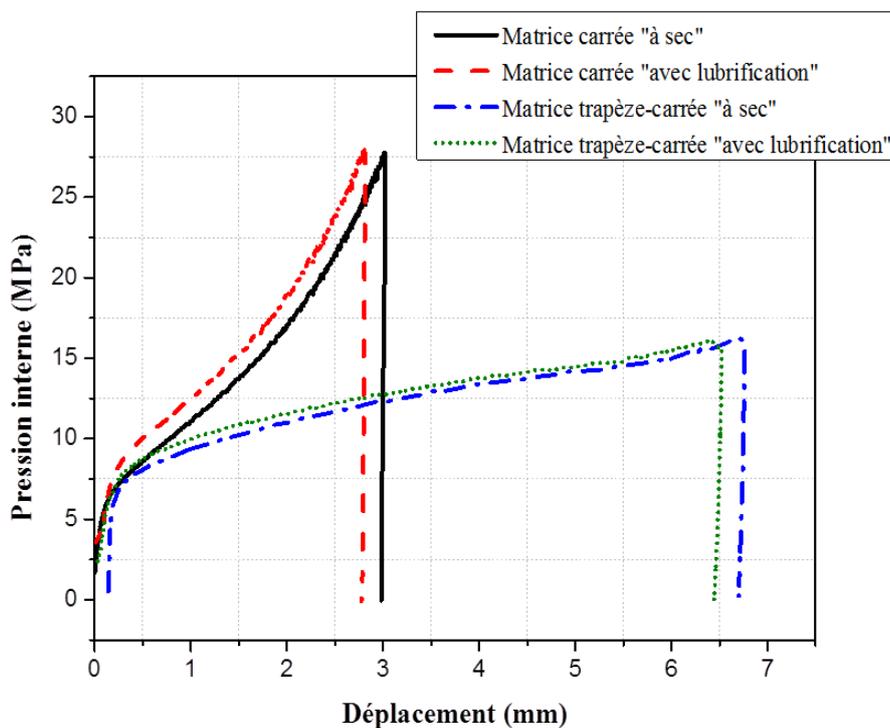


Figure.4.13. Courbes pression – déformation du tube dans le cas de l'hydroformage en matrice trapèze-carrée avec et sans lubrification(D) (capteur 3).

4.3.4 Synthèse

Dans cette section, une base de données expérimentale a été établie pour étudier la relation entre la distribution d'épaisseur et les conditions de lubrification pour différentes configurations. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. L'amincissement localisé dépend de la forme de la forme de la matrice, et plus particulièrement de la liberté de déformation du tube et du nombre de contacts initiaux
2. Afin d'étudier l'effet d'une lubrification, nous avons utilisé un dépôt de téflon sur le tube. On a pu constater que la présence de lubrifiant permet de limiter les amincissements sur l'ensemble du tube mis en forme.

4.4 Simulations EF des tests et comparaison

Dans cette partie, les différentes configurations d'hydroformage sont simulées à l'aide de la version explicite du code LS-Dyna, pour différentes conditions de frottement en relation avec les résultats expérimentaux rapportés au [chapitre 3](#) et à la section précédente. Comme il a été montré précédemment que le modèle coque donnait de meilleures corrélations avec les résultats expérimentaux, nous présenterons essentiellement les résultats obtenus avec ce modèle. Néanmoins, les résultats obtenus avec un modèle 3D solide seront superposés aux autres résultats pour confirmer les conclusions du [chapitre 3](#). On rappelle ci-dessous les principales conditions de modélisation ([Tableau.4.3](#)). Les déformées obtenues en fin de procédé pour les différentes configurations et les modèles 3D coque et 3D solide sont fournies dans les [Figures 4.14](#) et [4.15](#).

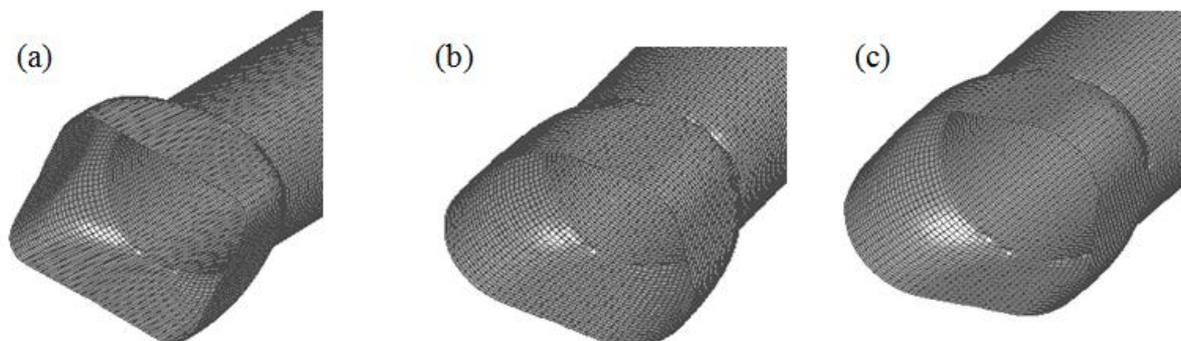


Figure 4.14 Tubes déformés obtenus par des simulations 3D coque pour les différentes configurations.

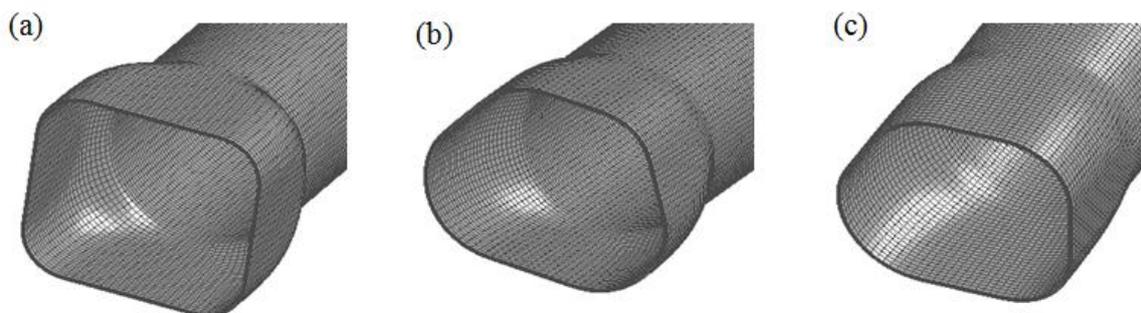


Figure 4.15 Tubes déformés obtenus par des simulations 3D solide pour les différentes configurations.

Tableau.4.3. Description des principales conditions de simulations

Matériau	Cu-DHP Loi d'écroutissage : $\bar{\sigma} = 441,97(0.0075 + \bar{\epsilon})^{0.349}$
Conditions de frottement	Cas "à sec" : <ul style="list-style-type: none"> - $\mu = 0.1$ déterminé par le test "pion sur disque" - $\mu = 0.25$ déterminé par le test d'expansion en matrice carrée Cas lubrifié : <ul style="list-style-type: none"> - $\mu = 0$ déterminé par le test "pion sur disque" - $\mu = 0.05$ déterminé par le test d'expansion en matrice carrée
Modèle 3D coque	EF coque Belytschko-Tsy 13 423 éléments 13 530 nœuds Taille d'éléments : 1mm
Modèle 3D solide	Eléments quadratiques complètement intégrés à 8 nœuds 4 éléments dans l'épaisseur 52 000 éléments 65 520 nœuds Taille d'éléments : 1mm

4.4.1 Post-traitement des résultats

Dans le but de vérifier que le test d'expansion en matrice carrée peut constituer un test de caractérisation du coefficient de frottement valable pour tout type d'opération d'hydroformage, les hydroformages suivant les différentes configurations réalisées expérimentalement à la section précédente ont été simulés. Les résultats numériques seront alors comparés aux résultats expérimentaux vus précédemment. On se concentrera sur cette partie sur les comparaisons des profils d'épaisseur.

A partir d'un modèle 3D coque, la distribution d'épaisseur en fonction de la distance a été élaborée facilement.

Pour un modèle 3D solide, l'obtention de la distribution d'épaisseur est plus délicate. En effet, à partir des sections des tubes mis en forme, il est possible de mesurer les profils extérieurs et intérieurs. Les données sont enregistrées dans un fichier texte qui est ensuite analysé à l'aide d'un programme Matlab© développé par Pierrick Malécot pour obtenir la répartition de l'épaisseur le long du profil de la section du tube déformé.

Comme les résultats expérimentaux ont été élaborés en fonction des points de mesure alors qu'avec le modèle 3D coque on obtient la distribution d'épaisseur aux nœuds du maillage, il a été nécessaire de passer à un repérage angulaire afin de pouvoir les superposer.

Le repérage angulaire consiste à trouver un lien entre les angles et les points de mesure ou entre les angles et les distances entre deux nœuds du maillage coque. La conversion des valeurs en abscisses à des positions angulaires est réalisée en utilisant les formules ci-dessous :

- **Si on a 'n' points de mesures**, on a donc 'n-1' intervalles. On divise alors 90° par n-1 pour obtenir le 'pas'. Ainsi le point '1' correspond à 0° , le n^{ème} angle correspond à angle $(n-1) \cdot \text{pas}$ (cette formule est valable pour les résultats expérimentaux et le modèle 3D solide)
- **Si on a des distances**, on sait alors que la dernière valeur correspond à 90° . Pour les autres distances on utilise la règle de trois. On obtient ainsi pour chaque distance un angle bien déterminé (valable pour modèle 3D coque).

4.4.2 Comparaisons numérique/expérimentale

4.4.2.1 Expansion d'un tube en matrice rectangulaire (configuration n° 1)

Le test d'expansion en matrice rectangulaire a été simulé à l'aide d'un modèle EF 3D coque et d'un modèle 3D solide, avec des conditions de contact avec ou sans lubrification. On a relevé la répartition d'épaisseur au niveau de la section transversale centrée pour l'ensemble des simulations menées, que l'on a comparé aux mesures effectuées à la [section 4.3.3.1](#). On obtient des profils d'épaisseur ([Figures 4.16 et 4.17](#)) assez semblables à ceux trouvés pour la matrice carrée. Comme la matrice possède une symétrie, la répartition d'épaisseur est représentée pour un secteur angulaire variant de 0° à 180° .

Si l'amincissement au niveau des zones "mur" sont du même ordre de grandeur, il est plus prononcé au niveau de la zone "coin" dans le cas de la matrice rectangulaire. Ceci est dû au fait que le tube est libre de se déformer, en début de procédé, suivant la direction correspondant au côté long de la matrice rectangulaire ; la partie "coin" se déforme donc plus et il en résulte un amincissement plus important que pour le cas de mise en forme en matrice carrée.

D'une façon générale, le profil de répartition d'épaisseur sur le contour de la section transversale du tube déformé en fin de procédé est cohérent avec celui obtenu expérimentalement. Les zones d'amincissement critiques sont bien prédites. Néanmoins, les valeurs obtenues numériquement sont relativement éloignées des mesures ; les amincissements critiques des zones de transition sont légèrement sous-estimés, alors que celui de la zone mur est largement surestimé. L'épaisseur dans les zones coin est celle qui semble le mieux prédites par les simulations éléments finis. Cela est dû à la méthode d'évaluation de l'épaisseur nodale dans les éléments coque, qui représente une épaisseur moyenne autour du nœud considéré. Ceci pourrait sans doute être amélioré par un maillage plus fin.

Quant aux résultats obtenus avec un modèle 3D solide (en grisé [Figures 4.16 et 4.17](#)), ils représentent très mal la répartition d'épaisseur, mais fournissent finalement des valeurs critiques d'amincissement plus proches des résultats expérimentaux.

Les coefficients de frottement pour le test lubrifié déterminés par le test pion sur disque et le test d'expansion sont très proches (0 pour le premier et 0,05 pour le second). On constate à la

Figure.4.16 que le logiciel LS Dyna ne permet pas une distinction nette des résultats obtenus avec l'un ou l'autre de ces coefficients, en dehors peut-être des positions angulaires 0° et 180° (contact initial) où les résultats obtenus à l'aide du coefficient de frottement déterminé par le test d'expansion sont plus proches des mesures expérimentales.

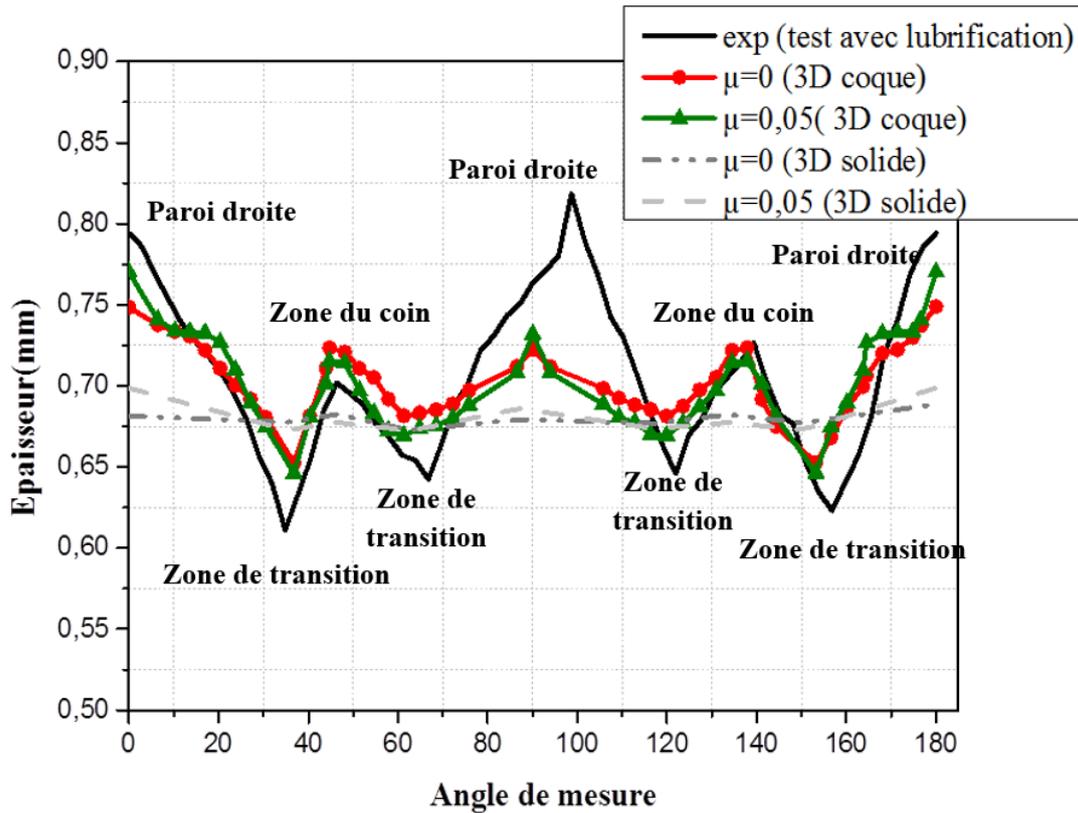


Figure.4.16. Distribution d'épaisseur pour différents points de mesure pour une section rectangulaire avec lubrification.

La **Figure.4.17** compare la répartition d'épaisseur obtenue par simulation du test en matrice rectangulaire sans lubrification. Pour cela, les deux coefficients de frottement déterminés par le test "pion sur disque" ($\mu=0,1$) et le test d'expansion ($\mu=0,25$) ont été utilisés pour mener les simulations par éléments finis. Les résultats obtenus sont comparés aux mesures expérimentales. On constate encore une fois la difficulté de reproduire de façon fidèle la répartition des épaisseurs dans la pièce hydroformée, même si le profil général est retrouvé. Les fortes localisations au niveau des zones de transition ne sont pas reproduites. Par contre, les épaisseurs prédites au niveau des zones de contact (repérées par la dénomination "paroi droite" dans la figure) sont assez proches des épaisseurs mesurées dans ces mêmes zones, et les

résultats sont bien meilleurs dans le cas des simulations menées à l'aide du coefficient de frottement issu du test d'expansion.

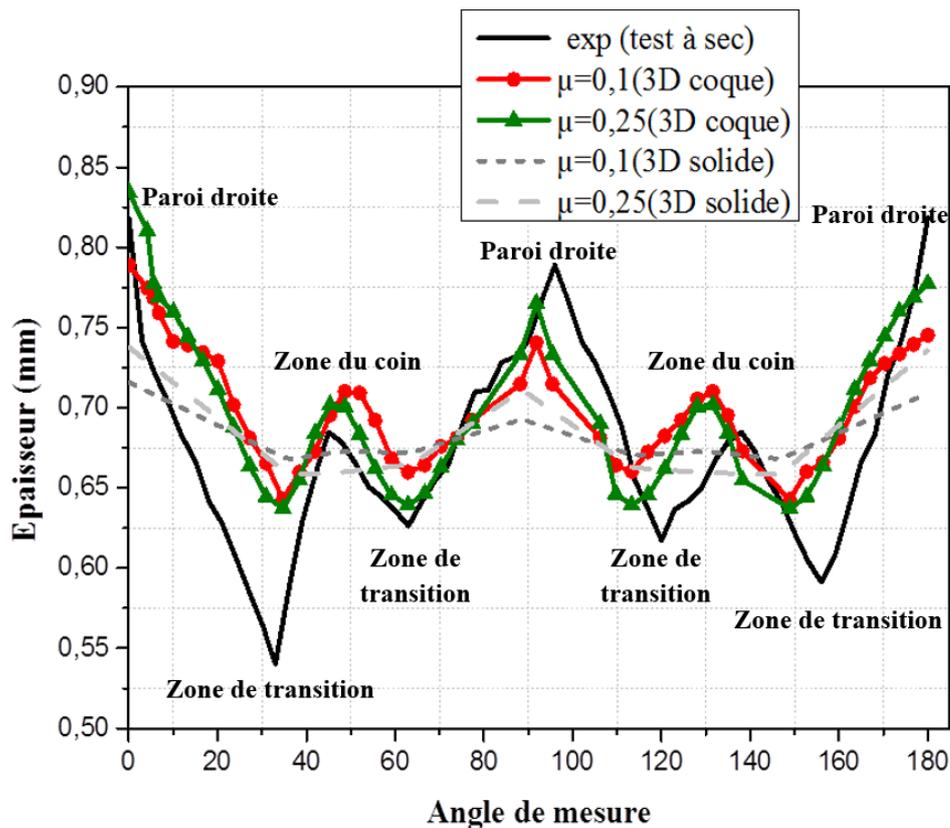


Figure.4.17. Distribution d'épaisseur pour différents points de mesure pour une section rectangulaire à sec.

L'analyse menée dans le [Tableau.4.4](#) permet toutefois de relativiser les différences observées sur les courbes. Dans ce tableau, on a consigné les erreurs en pourcent sur les épaisseurs obtenues dans les trois zones (mur, coin, zone de transition) pour le test à sec et le test lubrifié. Notons que seuls les résultats obtenus avec les coefficients de frottement par le test d'expansion sont présentés ici. Les principaux résultats sont :

- d'une part, les erreurs sur les épaisseurs prédites par simulations numériques sont en fait toutes inférieures à 10% par rapport aux mesures expérimentales ;
- d'autre part, les erreurs sont plus importantes dans le cas de l'hydroformage à sec ;
- enfin, les épaisseurs les moins bien reproduites par les simulations sont celles au niveau de la zone de transition mur – coin.

Tableau.4.4. Comparaison entre les résultats numériques et les mesures de l'épaisseur minimale et la variation d'épaisseur (matrice rectangulaire).

	Erreur en e_{mur}	Erreur en $e_{\text{transition}}$	Erreur en e_{coin}
$\mu=0.05$ (3D coque)	+ 3%	-5.7%	-1.9%
$\mu=0.25$ (3D coque)	+3.6%	-9.7%	-2.4%

4.4.2.2 Expansion d'un tube en matrice trapézoïdale

A nouveau, le test d'expansion en matrice trapézoïdale a été simulé par éléments finis à l'aide d'un modèle 3D coque. Comme pour les expérimentations menées à la [section 4.3.3.2](#), les cas avec et sans lubrification ont été étudiés. Pour les simulations, à chaque fois, les coefficients de frottement obtenus par le test "pion sur disque" et par le test d'expansion ont été considérés.

On compare les répartitions d'épaisseur obtenues numériquement à celles mesurées sur les tubes mis en forme dans les [Figures 4.18 et 4.19](#). Comme il n'y a aucune symétrie, le secteur angulaire considéré varie de 0° à 360° et on a représenté en grisé les résultats obtenus à l'aide du modèle 3D solide.

On remarque à nouveau la difficulté de prédire correctement la répartition d'épaisseur à l'aide du modèle 3D coque. Le modèle 3D solide semble plus réaliste pour le cas présent. Mais les niveaux d'épaisseur sont globalement très surestimés. De plus, le modèle éléments finis 3D coque ne permet pas une représentation nette des conditions de frottement ; il est difficile de distinguer les différentes valeurs de frottement que ce soit à la [Figure 4.18](#) ou à la [Figure 4.19](#).

Toutefois, à la [Figure 4.19](#) qui représente la répartition d'épaisseur obtenu dans le cas d'une mise en forme à sec, la répartition d'épaisseur prédite présente un profil relativement fidèle à celui obtenu expérimentalement, en particulier dans la partie gauche du diagramme, même si les niveaux d'épaisseur sont très différents.

Une analyse plus fine est fournie dans le [Tableau.4.5](#). Les conclusions qu'on peut en tirer sont identiques à celles énoncées à la [section 4.4.2.1](#).

Tableau.4.5. Comparaison entre les résultats numériques et les mesures de l'épaisseur minimale et la variation d'épaisseur (matrice trapézoïdale).

	Erreur ϵ_{mur1}	en	Erreur ϵ_{obtus1}	en	Erreur en ϵ_{aigu1}	Erreur en ϵ_{aigu2}	Erreur ϵ_{obtus2}	en
$\mu=0.05$ (3D coque)	-3.7%		-5.4%		-8.1%	+1.3%	+1.5%	
$\mu=0.25$ (3D coque)	-7.1%		-7.4%		-9.4%	+1.9%	+2.3%	

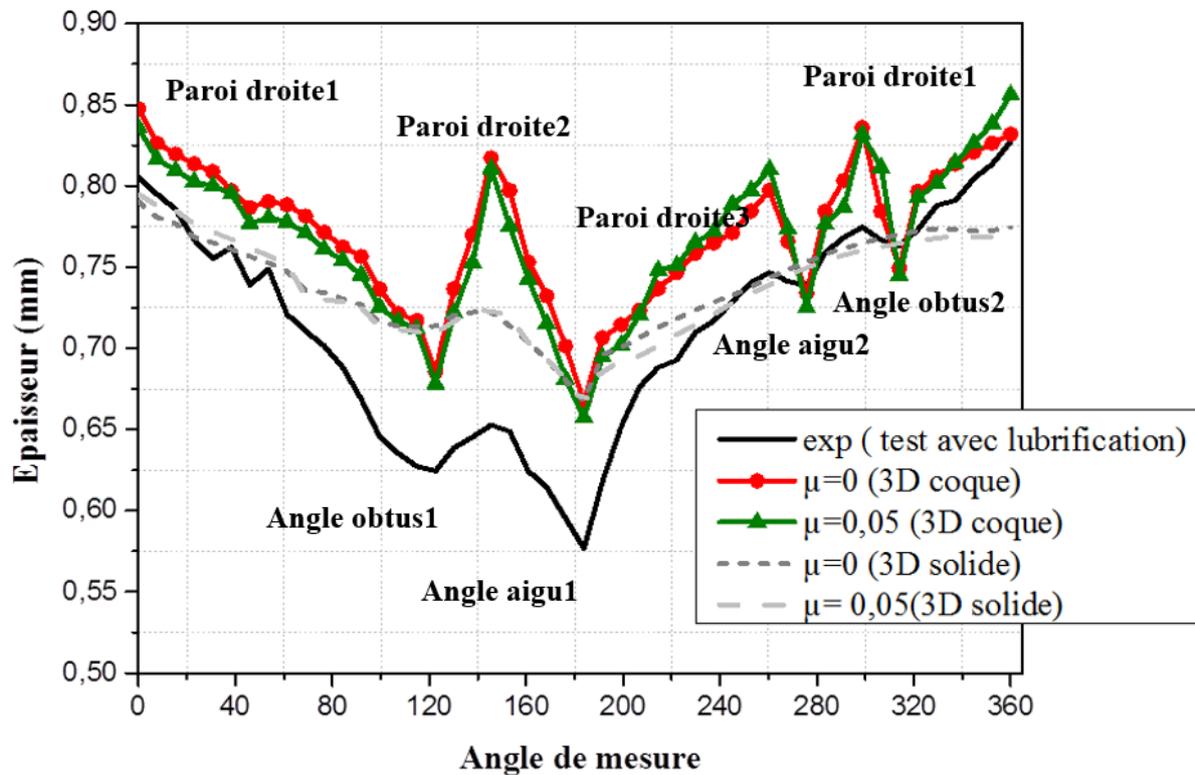


Figure.4.18. Distribution d'épaisseur pour différents points de mesure pour une section trapézoïdale avec lubrification.

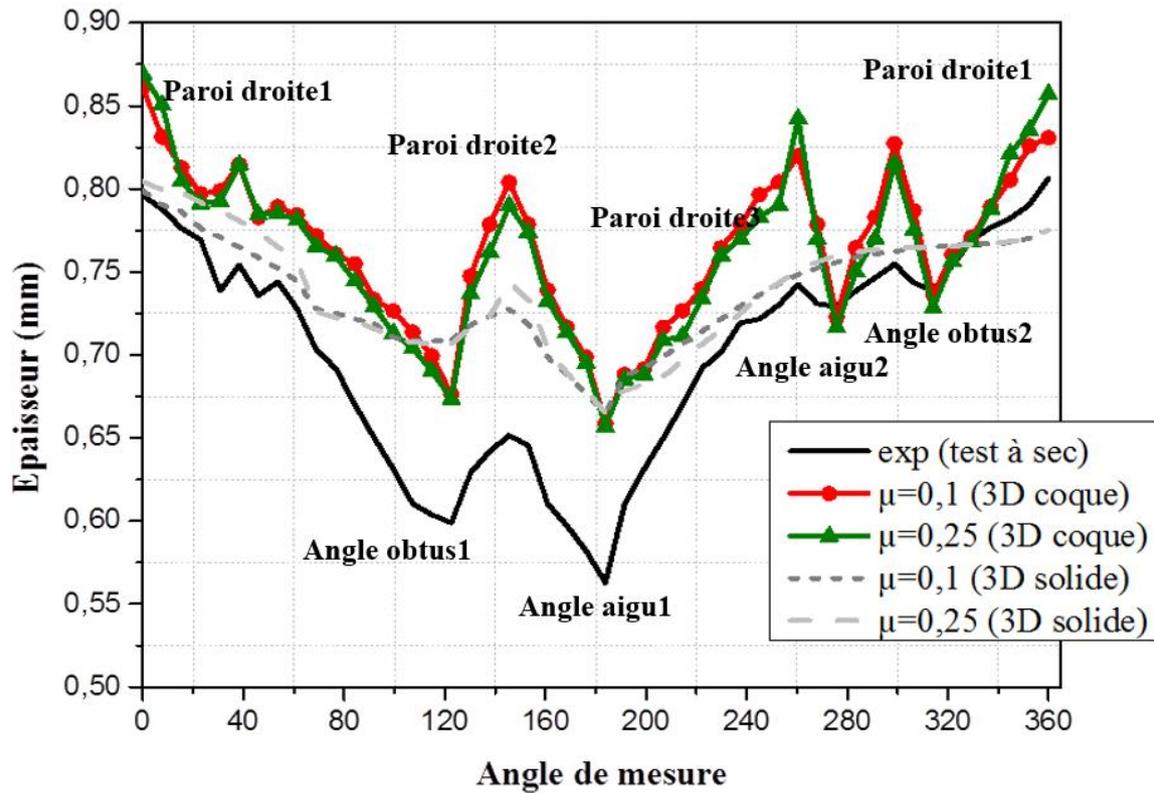


Figure.4.19. Distribution d'épaisseur pour différents points de mesure pour une section trapézoïdale à sec.

4.4.2.3 Expansion d'un tube en matrice trapèze – carrée

La même étude a été menée pour l'hydroformage de tube en matrice trapèze-carrée et les répartitions d'épaisseur sont visibles dans les [Figures 4.20 et 4.21](#) et analysées dans le [Tableau.4.6](#). On retrouve les mêmes caractéristiques déjà énoncés à la [section 4.4.2.2](#) menant aux mêmes remarques.

Tableau.4.6. Comparaison entre les résultats numériques et les mesures de l'épaisseur minimale et la variation d'épaisseur (matrice trapèze-carré).

	Erreur en e_{mur}	Erreur en e_{obtus}	Erreur en e_{aigu}	Erreur en e_{droit}
$\mu=0.05$ (3D coque)	-3.7%	-7.2%	-4.6%	-6.8%
$\mu=0.25$ (3D coque)	-6.5%	-9.3%	-8.2%	-9.5%

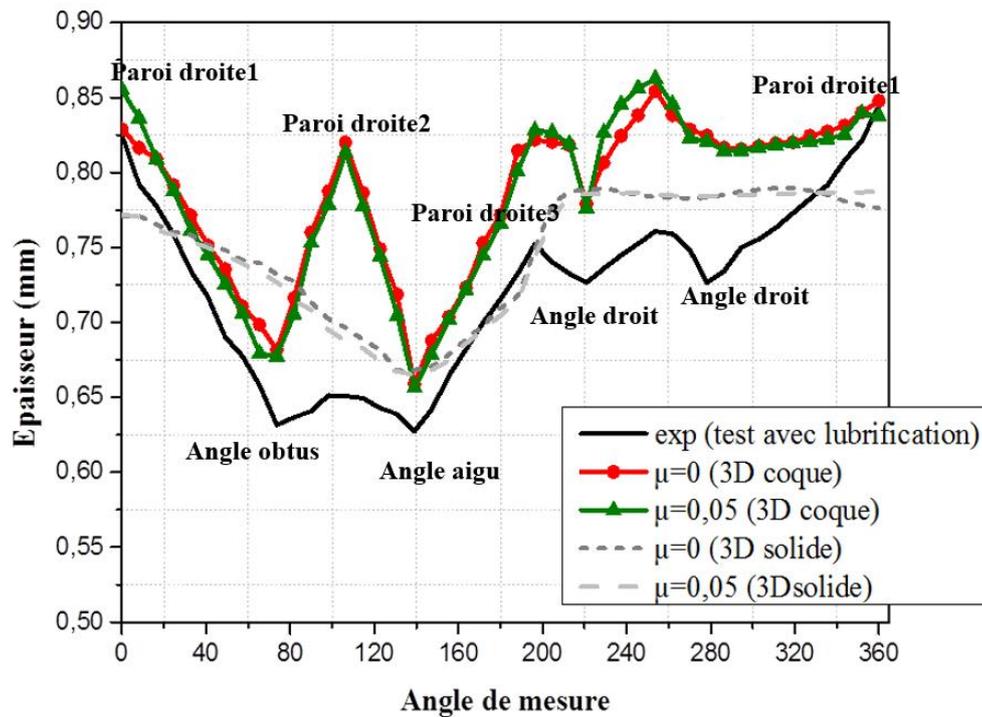


Figure.4.20. Distribution d'épaisseur pour différents angles de mesure pour une section trapèze-carrée avec lubrification.

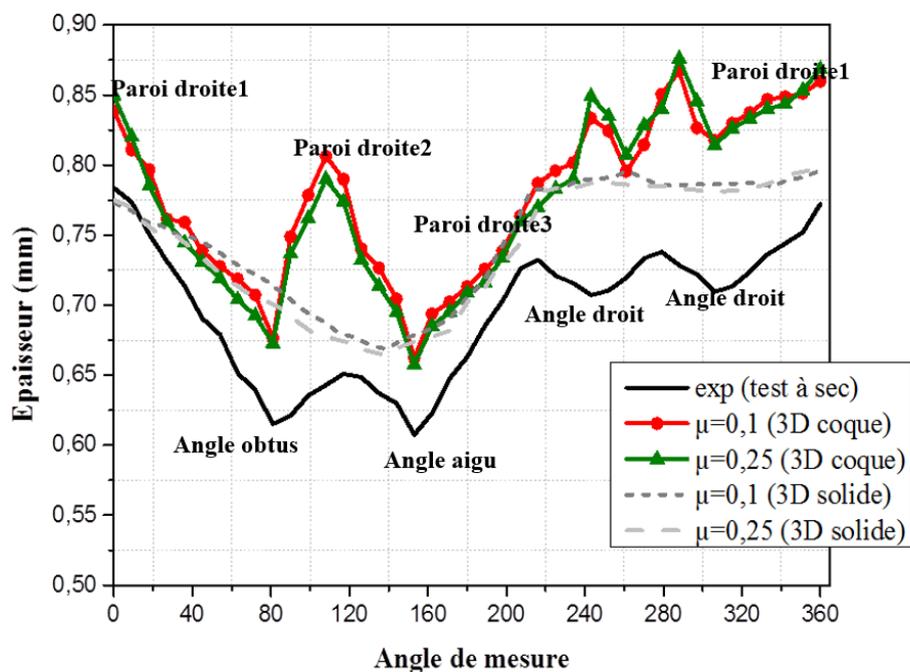


Figure.4.21. Distribution d'épaisseur pour différents angles de mesure pour une section trapèze-carrée à sec.

4.4.3 Synthèse

Les trois tests d'hydroformage ont été simulés à l'aide des modèles 3D coque et 3D solide. Les tests avec et sans lubrification ont été modélisés. Pour cela, pour chaque cas, le coefficient de frottement déterminé par le test "pion sur disque" et celui obtenu par le test d'expansion ont été considérés. Les résultats présentés sont d'une part la répartition d'épaisseur le long de la section transverse du tube, d'autre part un tableau synthétisant les écarts d'épaisseur en pourcent pour chaque zone spécifique. Les résultats obtenus avec un modèle 3D solide sont également présentés pour la répartition d'épaisseur le long de la section transverse.

Globalement, la répartition d'épaisseur est retrouvée mais avec des écarts non négligeables avec les mesures ; toutefois, ces erreurs restent toujours inférieures à 10%. Il semble que les résultats en épaisseur soient assez peu dépendants du coefficient de frottement, ce qui est assez conforme aux résultats expérimentaux. Le modèle 3D solide ne permet pas de représenter des variations d'épaisseur brutales qu'on observe expérimentalement dans les zones de transition, alors que le modèle 3D coque le permet.

4.5 Bilan et synthèse

Dans ce travail, une base des données expérimentales a été établie pour évaluer la relation entre la répartition d'épaisseur et les conditions de lubrification lors de l'utilisation de différentes matrices. Ce travail expérimental a été complété par des simulations numériques fondées sur la méthode des éléments finis.

Les conclusions sur le travail expérimental sont les suivantes :

(1) Pour un contact tube/matrice sans lubrification, l'emplacement de l'amincissement dépend des conditions de contact tube/matrice initiales et de la liberté laissée au tube pour se déformer. En matrice carrée (4 points de contact initiaux, peu de liberté de déformation pour le tube), l'amincissement critique a lieu dans la zone de transition mur-coin. En matrice trapézoïdale et trapèze-carrée, il a lieu au niveau de l'angle aigu de la matrice.

(2) L'utilisation de Téflon en tant que lubrifiant entre le tube et la matrice joue un rôle important dans la réduction de l'amincissement. Avec lubrification, on obtient une répartition d'épaisseur plus homogène.

Celles relatives aux simulations numériques sont :

(3) Les épaisseurs prédites présentent une erreur inférieure à 10% par rapport à celles mesurées.

(4) Les répartitions d'épaisseur le long de la section transverse sont relativement conformes à celles mesurées pour les modèles 3D coque.

(5) Les modèles 3D solide ne permettent pas une représentation réaliste de la répartition d'épaisseur dans le tube mis en forme.

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Ce travail a été mené dans le cadre d'une collaboration entre le département de mécanique appliquée (FEMTO-ST, Besançon) et le Laboratoire de Génie des Matériaux et Environnement (LGME, Sfax). Il a porté sur la capacité du test d'expansion d'un tube dans une matrice à section carrée à caractériser un coefficient de frottement de type Coulomb adapté à la simulation éléments finis de tout type d'opérations d'hydroformage de tube.

Après une étude bibliographique assez large sur le procédé d'hydroformage de tubes, nous avons sélectionné :

- Le test d'expansion en matrice carrée pour l'étude expérimentale du contact tube/matrice avec frottement d'une part ;
- Le modèle d'Orban-Hu 2007 qui propose une modélisation semi-analytique du test précédemment cité d'autre part.

Dans un premier temps, il a fallu s'approprier ce modèle d'Orban-Hu, le programmer et vérifier sa capacité à bien représenter l'évolution d'un certain nombre de paramètres (rayon de coin, épaisseur) avec l'évolution de la pression interne au cours du procédé. Pour cela nous avons confronté les résultats obtenus avec ce modèle à ceux obtenus par des simulations éléments finis du test d'expansion. Plusieurs modèles éléments finis ont été proposés :

- Un modèle 2D déformation plane ;
- Un modèle 3D coque ;
- Un modèle 3D solide.

Cette partie a permis de dégager les remarques suivantes :

- Même si le modèle 2D déformation plane est plus proche du modèle d'Orban-Hu en termes d'hypothèses posées par les auteurs, il ne permet pas une bonne corrélation des différents résultats.
- Les modèles 3D, que le maillage soit composé d'éléments coques ou d'éléments solides (briques), fournissent des résultats très comparables à ceux trouvés avec le modèle théorique.

A ce stade, on peut donc en déduire que le modèle d'Orban-Hu 2007 permet bien de représenter l'écoulement de la matière constitutive d'un tube soumis à un test d'expansion en matrice carrée.

Cette validation étant faite, nous avons proposé une méthode pour l'utilisation des résultats théoriques afin de déterminer une valeur du coefficient de frottement en hydroformage. Nous avons exploré plusieurs caractéristiques telles que la répartition de l'épaisseur dans le tube, l'épaisseur minimale dans le tube ou de l'amplitude de variation d'épaisseur dans le tube en fonction du coefficient de frottement pour un état de sollicitation en pression interne donné. C'est finalement l'épaisseur minimale qui a été retenue. Notons toutefois qu'il est nécessaire d'effectuer la caractérisation pour une pression interne donnée et pour une épaisseur initiale de tube connue.

La méthode de caractérisation proposée, fondée sur l'épaisseur minimale du tube pour une pression donnée, a été appliquée dans le cadre du test d'expansion libre réalisé au Département de Mécanique Appliquée. Nous avons pu déterminer des coefficients de frottement de Coulomb dans les cas de contact tube/matrice à sec ou lubrifié, et constater la capacité de la méthode proposée à distinguer ces deux cas de frottement. Des tests de mesure de frottement plus conventionnels, tels que le test "pion sur disque" ont été réalisés au Laboratoire de Génie des Matériaux et Environnement. Les valeurs obtenues par ces deux tests sont très différentes et consignées dans le tableau ci-dessous. Notons que nous sommes pour ces deux méthodes dans des conditions de pression, de géométrie d'interface et de dynamique différentes.

Les différents coefficients de frottement ont été utilisés pour lancer les simulations du test d'expansion en matrice carrée. Les principales conclusions de cette étude comparative sont :

- Le modèle 3D coque permet les meilleures prédictions de répartition d'épaisseur dans le tube ;
- Le coefficient de frottement déterminé par le test d'expansion fournit les meilleures prédictions.

	Contact à sec	Contact lubrifié
Test pion sur disque	$\mu = 0,1$	$\mu \sim 0$
Test d'expansion	$\mu = 0,25$	$\mu = 0,05$

Pour terminer, les différents coefficients de frottement ont été utilisés pour simuler des expansions de tubes dans des matrices de géométries moins régulières:

- Matrice rectangulaire;
- Matrice trapézoïdale non symétrique;
- Matrice constituée de l'association d'un demi-trapèze et d'un demi-carré.

L'ensemble de ces tests a été réalisé expérimentalement. D'une façon générale, le coefficient de frottement caractérisé par le test d'expansion en matrice carrée fournit de meilleurs résultats sur la répartition d'épaisseur dans le tube mis en forme avec une différence toujours inférieure à 10% par rapport aux mesures expérimentales.

On révèle à nouveau la faiblesse du modèle 3D solide vis-à-vis de la prédiction de la variation d'épaisseur par rapport à l'évolution des conditions de contact.

Mais on peut constater la difficulté de représenter correctement la répartition d'épaisseur à l'aide de simulations par éléments finis.

Ces travaux ont donné lieu à deux publications de rang A et 4 communications internationales dont 2 ont été publiées dans des journaux référencés.

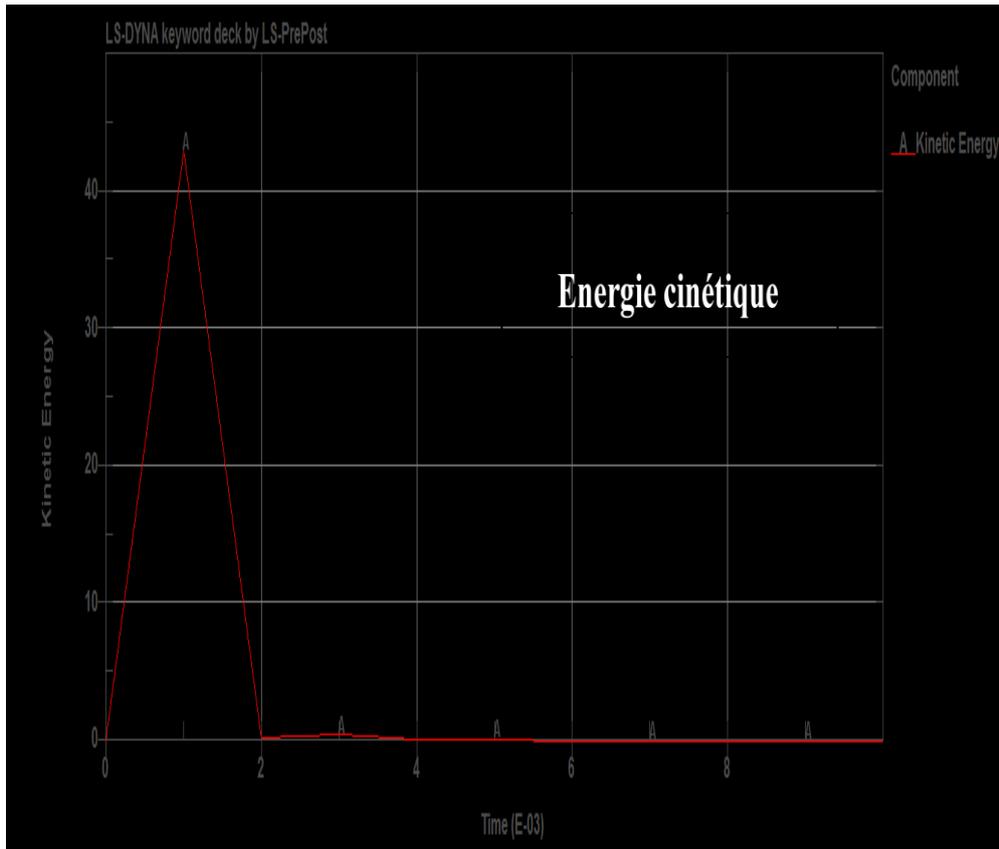
Ce travail ouvre des perspectives intéressantes dont on donne ici les principales pistes ;

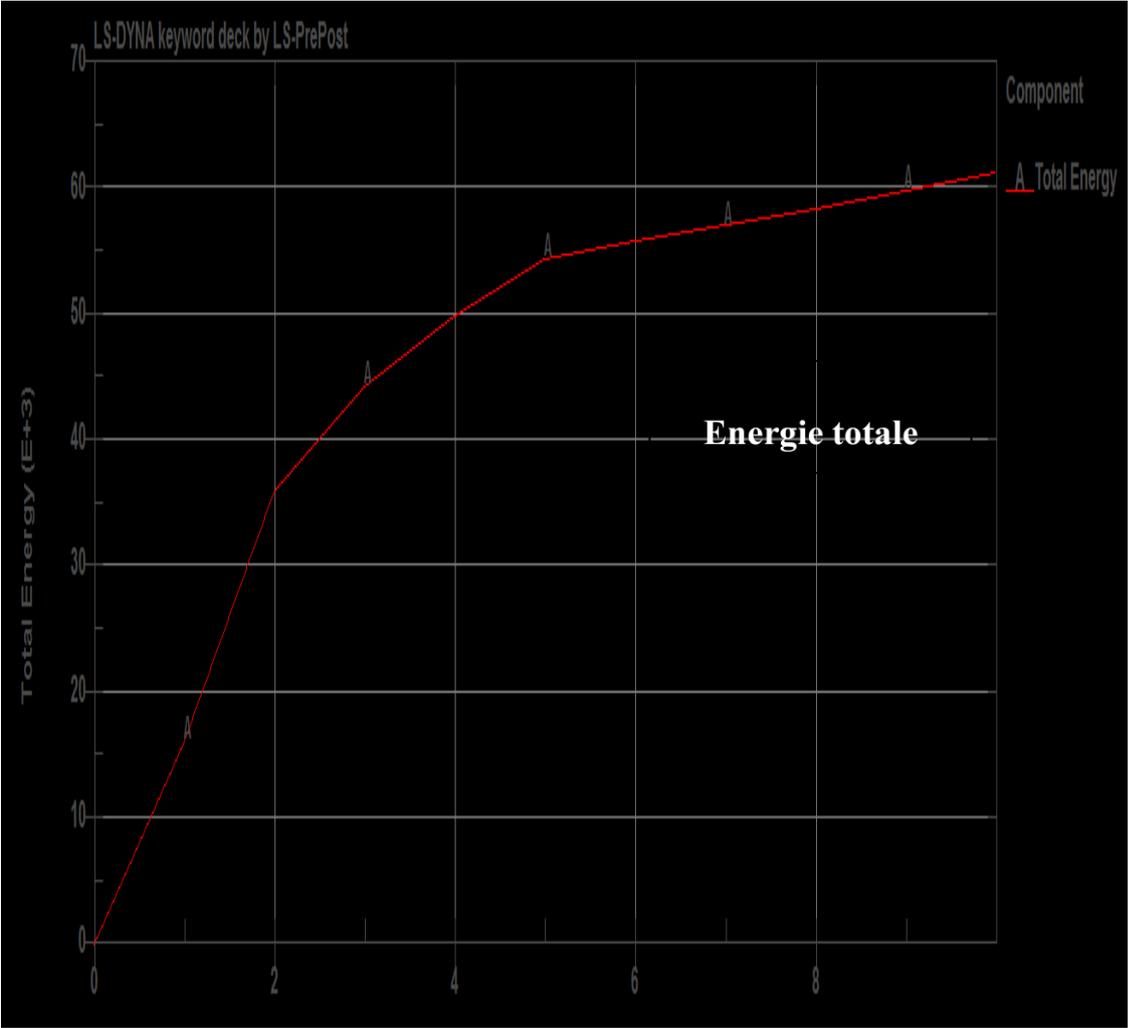
- A court terme, il serait intéressant de reproduire cette étude pour d'autres matériaux tubes (aciers, alliages d'aluminium par exemple) afin de s'assurer de la capacité du test d'expansion libre associé à l'utilisation du modèle d'Orban-Hu 2007 à distinguer différents couples de matériaux en contact.
- Il conviendrait également de réaliser les tests pion sur disque dans des plages de pression de contact et de vitesse de glissement comparables à celles du test d'expansion pour conforter les résultats obtenus.
- A moyen terme, il faudrait réaliser une analyse de sensibilité aux principaux paramètres numériques (taille de maille par exemple) pour affirmer ou non la pertinence des modèles 3D coque par rapport aux modèles 3D solide pour l'étude de la variation d'épaisseur en hydroformage de tube.

- Il existe d'autres modèles dans l'esprit du modèle d'Orban-hu dans la littérature (Hwang 2005, Liu 2006, Yang 2008). Une étude comparative des différents travaux théoriques traitant du test d'expansion serait tout à fait pertinente.
- Enfin, le travail réalisé constitue une base de données expérimentales conséquente qu'il serait intéressante d'utiliser pour l'étude de la striction et ainsi reprendre des travaux anciens dans l'équipe de recherche restés au niveau numérique essentiellement.

ANNEXE

Informations sur l'énergie cinétique et totale





Programmation d'Orban-Hu

```
% mesure épaisseur fichier isf
function [profil,a,d]=epaisseur_tube(a,d)
clc;
clear all;
close all;

a=input('Taper le numero de référence à donner au tube (puis enter) : ');

##### pour fichier Werth direct
%structure1(a);
%structure2(a);
##### pour fichier texte

for d=1:2
    structure_tube(a,d);
end

traitement(a);
ss_ech(a);

%fittagev2(a);
%mesure(a);
%mesure directe
%mesure_epaisseur1(a);

%mesure par splines ( a controler et terminer)
%mesure_epaisseur2(a);

%mesure par segment
mesure_epaisseur3(a);
%
figures_traces_tubes(a);
%figures_save_tubes();
end
```

```

a=input('Taper le numero de référence à donner au tube (puis enter) : ');

##### pour fichier Werth direct
%structure1(a);
%structure2(a);
##### pour fichier texte
for d=1:2
structure_tube(a,d);
end

traitement(a);
ss_ech(a);

%fittagev2(a);
%mesure(a);
%mesure directe
%mesure_epaisseur1(a);

%mesure par splines ( a controler et terminer)
%mesure_epaisseur2(a);

%mesure par segment
mesure_epaisseur3(a);
%
figures_traces_tubes(a);
%figures_save_tubes();
end

```

BIBLIOGRAPHIE

Références néto-graphiques :

[1]http://www.fischer-group.com/fr/fischer_companies/fischer_hydroforming/fischer_hydroforming.php?Navanchor=2110086.

[2]<http://www.learneasy.info/MDME/MEMmods/MEM30007A/processing/processing.html>.

[3] http://outils.construiracier.com/PCreuxV1/Fabrication/FAB_TSContSOudage.htm.

Références bibliographiques:

[Ahmetoglu et Altan 2000] M Ahmetoglu & T. Altan, Tube hydroforming state-of-the-art and future trends, *Journal of Materials Processing Technology*, V98(2000) 25-33

[Ahmetoglu et al. 2000] Ahmetoglu, M., Sutter, K., Li, X. J., & Altan, T. (2000). Tube hydroforming: current research, applications and need for training. *Journal of materials processing technology*, 98(2), 224-231.

[Alaswad et al. 2012] A. Alaswad K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, Tube hydroforming process: A reference guide, *Materials & Design*, V33 (2012)328–339.

[Altan et al. 2001] T. Altan, M. Jirathearanat, M. Strano et S. G. Shr. Adaptive FEM process simulations for hydroforming tubes, *Proceeding of the International Conference on Hydroforming*, November 2001.

[Asnafi 1999] N. Asnafi, Analytical modelling of tube hydroforming, *Thin-Walled Structures*, V34(1999)295-330.

[Asnafi 2003] N. Asnafi. Analytical modelling of tube hydroforming. *Thin-walled Structures*, V34(2003)295-330.

[Barcelik 2006] Alexander Bardelcik, Effect of Pre-Bending and Hydroforming Parameters on the Formability of Advanced High Strength Steel Tube. PhD thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada 2006.

[Ben Abdesslem 2011] Mohamed Anis Ben Abdesslem, Optimisation avec prise en compte des incertitudes dans la mise en forme par hydroformage. PhD thesis, Institut National Des Sciences Appliquées De Rouen 2011.

[Ben Ouirane et al. 2011] Abdel Hakim Ben Ouirane, Nathalie Boudeau, Raphaël Velasco, Gérard Michel, *Thin-Walled Structures*, V 49(2011)1217–1224.

[Boudeau et Balécot 2012] N. Boudeau, P. Malécot, A simplified analytical model for post processing experimental results from tube bulging test: Theory, experimentations, simulations, *International Journal of Mechanical Sciences*, V65(2012) 1–11

[Boumaiza et al. 2006] S. Boumaiza, J. B. Cordebois et G. Nefussi. Analytical and numerical study on plastic instabilities for axisymmetric tube bulging, *International Journal of Mechanical Sciences*, V48(2006)674-682

[Bunget 2008] Cristina J. Bunget, *Mechanics of Ultrasonic Tube Hydroforming*. PhD thesis, Faculty of North Carolina State University 2008.

[Carleer et al. 2000] B. Carleer, G. van der Kevie, L. de Winter, B. van Veldhuizen, Analysis of the effect of material properties on the hydroforming process of tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, V104 (2000) 158-166

[Ceretti et al. 2010] Ceretti, E., Braga, D., & Giardini, C. (2010). Optimization of process parameters and part geometry for high diameter tube hydroforming. *International Journal of Material Forming*, 3(1), 271-274.

[Ceretti et al. 2013] Ceretti, E., Attanasio, A., Fiorentino, A., Giorleo, L., & Giardini, C. (2013). Aluminium can shaping by hydroforming: simulative feasibility study and prototype production. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(5-8), 1797-1807.

[Chen et al. 2004] K. K. Chen, R.J. Soldaat et R. M. Moses. Free expansion bulge testing of tubes for automotive hydroform applications. *SAE Technical Paper* No. 2004-01-0832. V41(2004)761-772.

[Chen et al. 2014] Chen, Y. C., Chuang, C. Y., & Lee, M. F. (2014). Process Parameter with High Expansion Rate of SUS304 Tube Hydroforming. *Procedia Engineering*, 81, 2230-2236.

[Cherouat et al. 2002] A. Cherouat, k. Saanouni et Y. Hammi. Numerical improvement of thin tubes hydroforming with respect to ductile damage. *International Journal of Mechanical Sciences*, V44 (2002)2427-2446.

[Costello et Riff 2005] Costello, M. T., & Riff, I. I. (2005). Study of hydroforming lubricants with overbased sulfonates and friction modifiers. *Tribology Letters*, 20(3-4), 201-208.

[Cui et al. 2014] Cui X.L., Wang X.S., Yuan S.J., Deformation analysis of double-sided tube hydroforming in square-section dies, *Journal of Materials Processing Technology*, 2014; 214: 1341-1351.

[Daly et al. 2007] Daly D., Duroux P., Rachik M., Roelandt J.M., Wilsius J., Modeling of the post localization behavior in tube hydroforming of low carbon steels, *Journal of materials Processing Technology*, 2007; 182: 248-256.

[Fiorentino et al. 2009] Fiorentino, A., Ceretti, E., Attanasio, A., Braga, D., & Giardini, C. (2009, October). Experimental study of lubrication influence in the production of hydroformed T-joint tubes. In *Key Engineering Materials* (Vol. 410, pp. 15-24).

[Fiorentino et al. 2013a] Fiorentino, A, Ceretti, E, & Giardini, C. (2013). Tube hydroforming compression test for friction estimation—numerical inverse method, application, and analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(5-8), 695-705.

[Fiorentino et al. 2013b] Fiorentino, A., Ceretti, E., & Giardini, C. (2013, June). The THF Compression Test for Friction Estimation: Study on the Influence of the Tube Material. In *Key Engineering Materials* (Vol. 549, pp. 423-428).

[Gelin et Labergère 2001] Gelin .J. C, Labergère.C, Modelling, optimization and optimal control for hydroforming process, *Proceedings of the 4th international ESAFORM Conference on Material Forming*,V1(2001)377-380.

[Guermazi et al. 2009] Guermazi, N., Elleuch, K., Ayedi, H. F., Fridrici, V., & Kapsa, P. (2009). Tribological behaviour of pipe coating in dry sliding contact with steel. *Materials & Design*, 30(8), 3094-3104.

[Hashemi et al. 2015] Hashemi, S. J., Naeini, H. M., Liaghat, G. H., & Tafti, R. A. (2015). Prediction of bulge height in warm hydroforming of aluminum tubes using ductile fracture criteria. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(1), 19-29.

[Hwang et Chen. 2005] Y-M.Hwang , W-C.Chen ,Analysis of tube hydroforming in a square cross-sectional die, *International of Plasticity*,V21(2005)1815-1833.

[Hwang et Huang 2005] Hwang, Y-M.,Huang,.L-S, Friction tests in tube hydroforming, JEM152 # IMechE 2005, DOI: 10.1243/095440505X32517.

[Hwang et al. 2007] Yeong-Maw Hwang ,Yi-Kai Lin, Taylan Altan, Evaluation of tubular materials by a hydraulic bulge test, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(2007) 343–351.

[Imaninejad et al. 2004a] M.Imaninejad,G.Subhash , A.Loukus, Experimental and numerical investigation of free –bulge formation during hydroforming of aluminium extrusion, *Journal of materials Processing Technology*,V147(2004)247-254.

[Imaninejad et al. 2004b] M.Imaninejad,G.Subhash & A.Loukus, Influence of end-conditions during tube hydroforming of aluminium extrusion, *International Journal of mechanical science*,V46(2004)1195-1212.

[Kang et al. 2007] Kang, B. H., Lee, M. Y., Shon, S. M., & Moon, Y. H. (2007). Forming various shapes of tubular bellows using a single-step hydroforming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 194(1), 1-6.

[Kawai et Dohda 1987] Kawai, N., Dohda, K., 1987. A new lubricity evaluation method for metal forming by a compression-twist type friction testing machine. *ASME Transactions: Journal of Tribology*, vol. 109, 343-350.

[Kalfallah 2014] Khalfallah, A. (2014). Experimental and numerical assessment of mechanical properties of welded tubes for hydroforming. *Materials & Design*, 56, 782-790.

[Khodayari et al. 2002] Khodayari, G., Reid, J.V., Garnett, M., 2002, Tubes, lubes, dies and friction. *The Tube and Pipe Journal*, vol. 13, 72-74.

[Klocke et Raedt 2001] F. Klocke, H.W. Raedt: *Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 19 issues 4-6 (2001), pp. 495-505.

[Koç et al. 2001] M. koç, Y. Aue-U-Ian et T. Altan. On the characteristics of tubular materials for hydroforming experimentation and analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, V41 (2001)761-772.

[Koç et al. 2002a] M.Koç& T.Altan, Application of two dimensional(2D) FEA for the tube hydroforming process, *International Journal of Machine tools & Manufacture*,V42(2002) 1285-1295.

[Koc et al. 2002b] M. Koc, T. Altan – ‘Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process’, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42 (2002), pp. 123-138.

[Koç 2003a] Koç, M. (2003). Investigation of the effect of loading path and variation in material properties on robustness of the tube hydroforming process. *Journal of materials processing technology*, 133(3), 276-281.

[Koç 2003b] Koç, M. (2003). Tribological issues in the tube hydroforming process—selection of a lubricant for robust process conditions for an automotive structural frame part. *Journal of manufacturing science and engineering*, 125(3), 484-492.

[Korolis et Kyriakides 2011] Kyriakides, S. (2011). Hydroforming of anisotropic aluminum tubes: Part I experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*, 53(2), 75-82.

[Kridli et al. 2003] G.T.Kridli,L.Bao,P.K.Mallick ,Y.Tian .Investigation of thickness variation and corner filling in tube hydroforming, *Journal of Materails Processing Technology*,V133(2003)287-296.

[Lang et al. 2004] Lang.L.H, Wang. Z. R, Kang. D. C, Yuan.S. J, Zhang. S. H, Danckert. J, Nielsen. K. B, Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology* ,V151 (2004) 165-177.

[Lee et al. 2002] M. H. Lee, S. M. Sohn, C. Y. Kang et S. Y. Lee. Study on the hydroforming process for automobile radiator support members. *Journal of materials processing technology*, V130-131(2002)115-120.

[Li et al. 2009] Li, S., Xu, X., Zhang, W., & Lin, Z. (2009). Study on the crushing and hydroforming processes of tubes in a trapezoid-sectional die. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(1-2), 67-77.

[Liu et al. 2006] Liu, G., Yuan, S., & Teng, B. (2006). Analysis of thinning at the transition corner in tube hydroforming. *Journal of materials processing technology*, 177(1), 688-691.

[Maki et Walter 2007] T. Maki et C. Walter. Liquid curves â Sheet hydroforming helps the sporty Solstice standout. *Stamping Journal*, (2007)32-37.

[Manabe et Amino 2002] K. Manabe, M. Amino, Effects of process parameters and material properties on deformation process in tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, V123(2002)285-291.

[Marciniak 2002] Z. Marciniak – ‘Mechanics of sheet metal forming’, Oxford, Boston, Butterworth-Heinemann, 2002, 2nd ed.

[Ngaile et al. 2004a] Gracious Ngaile, Bandar Alzahrani, , Chen Yang, Part 1: Analytical modeling of symmetric multi-nose tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, V 146 (2004)108–115

[Ngaile et al. 2004b] Lubrication in tube hydroforming (THF): Part II. Performance evaluation of lubricants using LDH test and pear-shaped tube expansion test, *Journal of Materials Processing Technology*, V146 (2004)116–123.

[Ngaile et al. 2006] G. Ngaile, M. Gariety, T. Altan – ‘Enhancing tribological conditions in tube hydroforming by using textured tubes’, *Journal of Tribology*, July 2006, Vol.128, pp.674-676.

[Oh et al. 2006] S. I. Oh, B. H. Jeon, H. Y. Kim et J. B. Yang. Applications of hydroforming processes to automobile parts, *Journal of materials processing technology*, V174(2006) 42-55.

- [Orban et Hu 2007] Hatem Orban, S. Jack Hu, Analytical modeling of wall thinning during corner filling in structural tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, V194(2007) 7–14.
- [Plancak et al. 2005] M. Plancak, F. Vollertsen, J. Woitschig, Analysis, finite element simulation and experimental investigation of friction in tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, V170(2005) 220–228
- [Prier et Schmoeckel 1999] Prier, M., Schmoeckel, D., 1999. Tribology of Internal-High-Pressure-Forming. *Proceedings of The International Conference on Hydroforming*, 379-390.
- [Singh 2003] H. Singh – ‘Fundamentals of hydroforming’, AFFT, SME, 2003.
- [Strano 2002] M. Strano ‘Tube hydroforming: System analysis and process design’, PhD Dissertation, OSU, 2002.
- [Strano et al. 2004] M. Strano, S. Jirathearanat, S.G. Shr, T. Altan – ‘Virtual process development in tube hydroforming’, *Journal of Materials Processing Technology*, 146 (2004), pp. 130-136.
- [Velasco et Boudeau 2008] R.Velasco, N.Boudeau, Tube bulging test: Theoretical analysis and numerical validation, *Journal of Materials Processing Technology*, V205 (2008) 51–59.
- [Vitu, 2014], Caractérisation du comportement mécanique des tubes par gonflement libre pour l'hydroformage, Mémoire de Master, Université de Franche-Comté, 2014.
- [Vollertsen et al. 2002] F. Vollertsen, M. Plancak ‘On possibilities for the determination of the coefficient of friction in hydroforming of tubes’, *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126 (2002), pp. 412-420.
- [Wang et al. 2012] Wang, X. S., Yua, S. J., Peng, S. O. N. G., & XIE, W. C. (2012). Plastic deformation on hydroforming of aluminum alloy tube with rectangular sections. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22, s350-s356.

[**Xu et al. 2009a**] Xianghe Xu, Shuhui Li, Weigang Zhang, Zhongqin Lin, Analysis of thickness distribution of square-sectional hydroformed parts, *Journal of Materials Processing Technology*, V 209 (2009)158–164

[**Xu et al. 2009b**] Xianghe Xu, Weigang Zhang, Shuhui Li, Zhongqin Lin, Study of tube hydroforming in a trapezoid-sectional die, *Thin-Walled Structures*, V 47 (2009)1397–1403

[**Yi et al. 2011**] Hyae Kyung YI, Hong Sup YIM, Gun Yeop LEE, Sung Mun LEE, Gi Suk CHUNG, Young-Hoon MOON, Experimental investigation of friction coefficient in tube hydroforming, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, V 21(2011)s194–s198.

[**Yuan et al. 2006a**] S. J. Yuan, C. Han et X. S. Wang. Hydroforming of automotive structural components with rectangular-sections, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46(2006)1201-1206.

[**Yuan et al. 2006b**] S. Yuan, W. Yuan et X. Wang. Effect of wrinkling behavior on formability and thickness distribution in tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177(2006)668-671.

[**Zribi et al. 2008**] T. Zribi, A. Khalfallah, H. Belhadjsalah, Analyse de l'effet des paramètres matériaux sur l'hydroformage des tubes (2008).

[**Zribi et al. 2013**] Zribi, T., Khalfallah, A., & Hadjsalah, H. B. (2013, March). Analyse de la formabilité en hydroformage de tubes. *In Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM'2013* (pp. 1-4).

Frottement en hydroformage de tube : Caractérisation du frottement par le test d'expansion en matrice carrée

Abir ABDELKEFI

Résumé : L'objectif de cette thèse est d'étudier la possibilité de caractériser le coefficient de frottement par un modèle analytique. Tout d'abord, le modèle analytique (Orban-Hu, 2007) a été programmé à l'aide du logiciel « Matlab » puis validé par simulation numérique à l'aide du logiciel « Ls-Dyna ». Ensuite, on a réalisé des essais expérimentaux afin de caractériser les propriétés mécaniques du cuivre d'une part et étudier la mise en forme de tubes par hydroformage de tubes. Par suite, le coefficient de frottement a été caractérisé aussi bien par le modèle analytique que par le test classique 'pion sur disque'. Les simulations numériques avec les coefficients de frottement obtenus ont permis de valider les résultats issus des essais expérimentaux pour une matrice carrée. Les mêmes résultats ont été également obtenus pour d'autres configurations géométriques (section rectangulaire, trapézoïdale et trapèze

Abstract: The objective of this thesis is to study the possibility of characterizing the friction coefficient by an analytical model. First, the analytical model (Orban-Hu, 2007) has been programmed using "Matlab" software and has been validated by numerical simulation using "LS-Dyna" software. Then, experimental tests were carried out in order *i*) to characterize the mechanical properties of copper and *ii*) to study the tube hydroforming in a square section. As a result, the friction coefficient was characterized by the analytical model and the pin-on-disk test. Then, the numerical simulation with the friction coefficients obtained allowed to validate the experimental results for a square section. The same findings were obtained using other die geometries (rectangular, trapezoidal and trapezoid-sectional die).

Mots-clés : Hydroformage de tubes. Matrice carrée; Frottement; Modélisation analytique; Simulation numérique

Key-words: Tube hydroforming; Square die; Friction; Analytical modeling; Numerical simulation.