

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF1

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Optique et Mécanique de Précision

Présentée par : **ZAHRI Abdeliamine**

Thème

Caractérisation du transfert de matières des aciers dans un système tribologique

Soutenue le : 18/01/2024

devant le jury :

Président	Loucif kamel	Professeur	U. F. A Sétif1, Algérie
Rapporteur	Khennafi- Benghalem Nafissa	Professeur	U. F. A Sétif1, Algérie
Examineur	Makri Hocine	Professeur	Université de M'sila, Algérie
Examineur	Frihi Djamel	Professeur	Université de Guelma, Algérie
Examineur	Boualem Keskes	Professeur	U. F. A Sétif1, Algérie
Examineur	Boudilmi Aissa	MCA	Université de M'sila, Algérie

Année universitaire : 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

1420

Remerciements

*En premier lieu, je remercie **ALLAH**, le tout puissant de m'avoir accordé la patience, la force et le courage pour dépasser toutes les difficultés et achever ce travail.*

Ce travail a été réalisé au sein de deux entités, l'unité de recherche des matériaux émergents et l'institut d'optique et mécanique de précision.

*Mes premiers remerciements vont naturellement à mon directeur de thèse, **Mme Nafissa Khennafi-Benghalem** professeur à l'université Sétif1. Je voudrais exprimer ma profonde gratitude pour avoir brillamment dirigé ce travail de thèse et d'avoir partagé avec moi son savoir et ses multiples compétences, qu'elle trouve entre ces modestes lignes les expressions de ma considération.*

*Un grand merci est dédié au professeur et maître de recherche à INRES école des mines de Paris Sophia-Antipolis Antibes **Pierre Montmitonnet** qui nous a fourni la documentation en relation avec notre travail.*

Les remerciements suivants reviennent bien évidemment à l'ensemble des membres du jury qui ont accepté de juger mon travail de thèse :

*J'adresse mes remerciements à **M. Kamel Loucif**, Professeur à l'université Sétif1, pour avoir accepté de présider mon jury de thèse.*

*Que **M. Boualem Keskes**, Professeur à l'université Sétif1, **M. Hossine Makri**, Professeur à l'université de M'sila, **Djamel Frihi**, Professeur à l'université de Guelma et **Aissa Boudilmi** Maître de conférence à l'université de M'sila, qui m'ont fait l'honneur d'être examinateurs de mes travaux de thèse, je les remercie vivement pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.*

Je tiens à présenter mes profonds remerciements à tous les membres de l'unité de recherche des matériaux émergents et à tous mes collègues. Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à toute personne ayant contribué de proche ou de loin à la réalisation de ce travail.

Zahri Abdeliamine

Dédicaces

*A peine je viens de terminer la rédaction de cette thèse de doctorat, je voudrais le
dédier avec une immense joie, un grand honneur et un cœur chaleureux :*

*A ma mère et à la mémoire de mon père en signe de ma profonde reconnaissance
pour tous les sacrifices, tolérances et encouragements qu'ils ont bien voulu
consentir pour moi, tous les mots restent faibles pour leur exprimer mes sentiments
et qu'ils acceptent seulement ces lignes en guise de ma reconnaissance.*

*A ma femme Djamila Benderradji et sa famille, qui a porté toute la souffrance avec
moi jusqu'à ce que j'ai pu terminer ce travail.*

Qu'ALLAH leur procure bonne santé et longue vie.

*A mes enfants, mes frères et sœurs, à tous mes amis, et à tous les êtres qui me sont
chers.*

Zahri Abdeliamine

Résumé

Le transfert de matières sur les surfaces actives des outils pendant les processus d'usinage et de laminage des pièces peut provoquer des conséquences majeures sur la qualité de la production. Ce transfert peut se déposer sur les bords et les surfaces coupantes des outils, ce qui sera à l'origine d'une mauvaise production (pièces mal usinées), et par un contrôle simple de fabrication ces pièces seront rejetées. Pour l'évaluation des effets néfastes de ce transfert on a utilisé le procédé de bipoinçonnement qui corrèle bien avec les processus d'emboutissage et de laminage. Ce travail a pour objectif l'étude des différentes transformations aux niveaux des surfaces suite au transfert de matière des tôles en acier d'une nuance SXE vers un outil en HSS, des observations optiques par MEB et DRX ont été effectués pour voir de plus près l'effet du transfert sur l'état de surface, sur le comportement en frottement de la tôle écrasée et sur les faces des deux poinçons haut et bas qui serrent la tôle. Dont le but de minimiser les rebuts et de penser à une longévité de vie des outils et de préserver l'environnement.

Le bipoinçonnement est un essai mécanique utilisé dans certains domaines de la tribomécanique. Il nous permet d'exploiter sa particularité d'interpréter théoriquement et numériquement le frottement à l'interface tôle-poinçon en se basant sur les travaux de J.P. Miraille et J. Kubié ou ils ont établi une relation entre les différents paramètres mécaniques globaux (contrainte moyenne d'écrasement, géométrie de l'empreinte) et les paramètres physiques de l'essai (frottement à l'interface matériau-outil et la contrainte d'écoulement du matériau écrasé).

De ce fait nous pouvons d'une part utiliser le test de bipoinçonnement pour mesurer la contrainte d'écoulement du matériau écrasé et la cession du frottement à l'interface matériau-poinçon, d'autre part nous pouvons aussi contrôler et analyser le transfert de matière entre deux corps frottant sous régime sec.

En premier lieu, nous présentons, une synthèse fondamentale sur la tribologie, entre autres les tests de frottements ou de mise en forme (bipoinçonnement, emboutissage,). Suivie par une synthèse sur les aciers rapides et les aciers faiblement alliés. Nous avons aussi présenté la conception de la machine utilisée pour les essais de bipoinçonnement.

Dont l'objectif d'acquérir une connaissance détaillée sur le bipoinçonnement, le calcul de coefficient de frottement et de mettre en relief le phénomène de transfert de matière lors d'un contact entre un poinçon et une tôle. De ce fait, nous avons donc réalisé des séries de bipoinçonnement avec un nombre d'indentations variable sur des tôles en acier faiblement allié (XES) et des poinçons en acier (HSS) à outils sur la presse qu'on a réalisé, en lui adaptant des dispositifs de maintien du couple

Résumé

(tôle-poinçon) et en lui associant un capteur de pression numérique EDS 300 pour la mesure des efforts d'écrasement. Nous avons travaillé sur des tôles en acier écrouit et avec recuit.

Nous avons aussi caractérisé la rugosité des poinçons avant et après écrasement afin de déduire la relation entre frottement et état de surface.

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Tribologie et bipoinçonnement

I.1 La Tribologie.....	3
I.1.1 Définition et historique de la tribologie.....	3
I.1.2 Aspects industriels et économiques.....	4
I.1.3 Perspectives de la tribologie.....	5
I.2 Analyse tribologique des systèmes.....	5
I.2.1 Objectifs.....	5
I.2.2 Système tribologique.....	6
I.2.3 Paramètres fonctionnels.....	8
I.2.3.1 Mode de contact.....	8
I.2.3.2 Charge ou dynamique du contact.....	9
I.2.3.3 Vitesse ou cinématique du contact.....	9
I.2.3.4 Etats de surface.....	10
I.2.4 Mécanismes d'endommagement des surfaces.....	11
I.3 Le frottement	12
I.3.1 Lois Empiriques du frottement	13
I.3.2 Classification des phénomènes de frottement.....	16
I.3.2.1 Frottement sec.....	16
I.3.2.2. Frottement des métaux.....	17
I.3.3 Le contact outil-tôle influence du frottement.....	19
I.4 La Rugosité.....	16
I.5 Bipoinçonnement	19
I.5.1 Définition	19

Références bibliographiques chapitre I

Chapitre II : Synthèse sur les aciers rapides et les aciers faiblement alliés

II. Introduction.....	22
II.1 Les différentes classes d'aciers	22
II.1.1 Caractéristiques de l'acier.....	23

Table des matières

II.1.2 Classification des aciers.....	23
II.1.2.1 Aciers ordinaires ou aciers au carbone.....	24
II.2 Acier rapide.....	25
II.2.1 Historique.....	25
II.2.2 Introduction.....	25
II.2.3 Définition des aciers rapides.....	25
II.2.4 Classification des aciers rapides.....	26
II.2.4.1 Aciers à outils non alliés pour travail à froid.....	27
II.2.4.2 Aciers à outils alliés pour travail à froid.....	27
II.2.4.2.1 Aciers résistants aux chocs mécaniques.....	27
II.2.4.2.2 Aciers résistants à l'usure.....	28
II.2.4.2.3 Aciers à très haute résistance à l'usure.....	28
II.2.4.2.4 Aciers résistant à la corrosion.....	28
II.2.4.2.5 Aciers à outils alliés pour travail à chaud.....	28
II.2.4.2.6 Aciers résistants aux chocs mécaniques.....	28
II.2.4.2.7 Aciers résistants aux chocs thermiques.....	28
II.2.4.2.8 Aciers résistants à l'usure aux températures élevées.....	28
II.2.4.3 Aciers rapides HSS.....	29
II.2.4.3.1 Définition.....	29
II.2.4.3.2 Les nuances des aciers rapides.....	29
II.2.4.3.2.1 Aciers rapides au tungstène.....	29
II.2.4.3.2.2 Aciers rapides au molybdène.....	29
II.2.4.3.2.3 Aciers rapides surcarburés.....	30
II.2.4.3.2.4 Aciers surcarburés au cobalt.....	31
II.2.4.3.2.5 Aciers rapides spéciaux au cobalt.....	31
II.2.4.3.2.6 Aciers rapides courants.....	31
II.2.4.3.2.7 Aciers extra-rapides.....	31
II.2.4.3.2.8 Aciers au molybdène-cobalt.....	31
II.3 Propriétés des aciers à outils.....	33
II.3.1 Dureté.....	33

Table des matières

II.3.2 Trempabilité.....	33
II.3.3 Tenue à chaud.....	33
II.3.4 Ténacité.....	34
II.3.5 Résistance à l'usure.....	34
II.3.6 Résistance aux chocs thermiques.....	34
II.4 Composition chimique.....	35
II.4.1 Le Carbone.....	35
II.4.2 Le Chrome.....	35
II.4.3 Le Tungstène.....	35
II.4.4 Le Molybdène.....	35
II.4.5 Le cobalt.....	36
II.4.6 Le manganèse et le nickel.....	36
II.4.7 Le silicium.....	36
II.4.8 Le soufre.....	36
II.5 Recuit.....	36
II.5.1 Recuit d'homogénéisation.....	37
II.5.2 Recuit de régénération.....	37
II.5.3 Recuit complet.....	37
II.5.4 Recuit de détente.....	38
Références bibliographiques chapitre II	

Partie expérimentale I

Chapitre III : Conception et réalisation de la bipoinçonneuse

III.1. Introduction.....	39
III.2. Fonction principale	39
III.2.1. Fonctions partielles.....	39
III.3. Le cahier des charges Fonctionnel (CDCF)	39
III.3.1. Les exigences techniques du cahier des charges.....	40
III.3.2. Diagramme « bête à cornes » ou Analyse du besoin.....	41

Table des matières

III.3.3. Diagramme « pieuvre ».....	41
III.3.4. Diagramme A-0 (SADT).....	43
III.4. Présentation et description de la conception de la bipoinçonneuse.....	44
III.4.1 Description de la conception de la bipoinçonneuse	45
III.4.1.1 structure du bâti	45
III.4.1.2 Porte poinçons et porte-échantillon	47
III.4.1.3 Vérin hydraulique et commande du poinçon	48
III. 4.2. Capteur de pression	48
III.4.2.1 la détermination de l'effort de bipoinçonnement est effectuée par les relations suivantes	49
III.5. Conclusion	49
Références bibliographiques chapitre III	

Partie expérimentale II

Chapitre IV : Procédure expérimentale, résultats et interprétations

IV. Introduction.....	60
IV.1 Techniques expérimentales.....	60
IV.1.2 Eprouvettes et poinçons.....	60
IV.1.2.1 Composition chimique des éprouvettes.....	60
IV.2.2 Composition chimique des poinçons des aciers rapides (HSS).....	61
IV.3 Evaluation des paramètres expérimentaux.....	62
IV.3.1 Contrainte moyenne de déformation σ_m	62
IV.3.2 Déformation ε	62
IV.3.3 Coefficient de frottement « μ »	63
IV.3.4 Représentation de la géométrie de la tôle après écrasement.....	63
IV.4 Étude expérimentale.....	64
IV.4.1 Essai avec téflon.....	64
IV.4.1.1 Analyse statistique des résultats.....	67
IV.4.2 Essai sans téflon.....	67

Table des matières

IV.4.3 Essai du matériau écroui.....	67
IV.4.4 Evolution du coefficient de frottement de l'acier écroui.....	68
IV.4.5 Essai avec matériau recuit.....	69
IV.4.6 Evolution du coefficient de frottement et de la contrainte d'écoulement de l'acier écroui et qui a subi un recuit	70
IV.5 Observation des poinçons.....	72
IV.5.1 Observation optique.....	72
IV.5.2 Observation par MEB des poinçons après contact.....	73
IV.6 Essais similaires.....	74
IV.6.1 Matériaux.....	74
IV.6.2 Résultats expérimentaux et interprétations.....	74
IV.6.2.1 Résultats d'essais de bipoinçonnement.....	74
IV.6.2.2 Observations Optiques et MEB.....	76
IV.6.2.3 Contrôle de la rugosité.....	77
IV.7 Contrôle de la rugosité des poinçons.....	78
IV.7.1 Conclusion.....	82
Conclusion générale.....	83
Annexes.....	87
Références bibliographiques chapitre IV	

Liste des figures

Figure 1.1	Schématisation d'un contact tribologique.....	7
Figure 1.2	Définition cinématique des surfaces.....	9
Figure 1.3	Représentation schématique d'une section des couches superficielles d'une surface technique.....	10
Figure 1.4	Variation du coefficient de frottement μ avec la force normale d'un glissement sec d'un acier sur de l'aluminium dans l'air.....	15
Figure 1.5	Schématisation du test de bipoinçonnement	20
Figure 2.1	Dureté de quelques aciers rapides surcarbureés en fonction de la température..	30
Figure 2.2	Evolution de la dureté en fonction de la température de revenu pour quelques nuances d'aciers à outils de travail à chaud	33
Figure 2.3	Evolution de la ténacité en fonction de la température de quelques aciers à outils	34
Figure 3.1	Diagramme « bête à corne »	41
Figure 3.2	Diagramme « pieuvre » des fonctions de la bipoinçonneuse	42
Figure 3.3	Diagrammes A-0	43
Figure 3.4	Structure de la bipoinçonneuse en 3D (a) porte poinçon fixe et échantillon (b)	45
Figure 3.5	Vue éclatée du bâti (bipoinçonneuse)	46
Figure 3.6	Vue éclaté de l'ensemble portes-poinçons et porte-échantillon	47
Figure 3.7	Vue générale de l'ensemble portes-poinçons et porte-échantillon	48
Figure 3.8	EDS 300 (a) et schéma de principe du mancontacteur (b)	49
Figure 4.1	Schéma de principe du test de bipoinçonnement	60
Figure 4.2	Géométries des poinçons	62
Figure 4.3	Représentation schématique a) représentation réelle de l'élargissement de la tôle b) après écrasement	63
Figure 4.4	Densités de probabilité calculées pour la déformation selon l'effort min a) et max b)	65
Figure 4.5	Densités de probabilité calculées pour la contrainte selon : a)l'effort min et b) max	66
Figure 4.6	Densités de probabilité d'une variable aléatoire	67
Figure 4.7	Présentation de l'état de la tôle après écrasement du matériau écroui	68

Liste des figures

Figure 4.8	Coefficient de frottement μ du matériau écroui a) pas 2.5KN et b) pas 4KN..	68
Figure 4.9	Tôle après écrasement matériau recuit	69
Figure 4.10	Coefficient de frottement a) et contrainte d'écoulement b) du matériau recuit et écroui.....	69
Figure 4.11	Courbes récapitulatives a) coefficient de frottement et b) la contrainte d'écoulement on fonction de la déformation.....	70
Figure 4.12	Schéma descriptif des différentes zones de l'interface d'écrasement des poinçons.....	71
Figure 4.13	Observation optique de l'interface dans la zone frottée a) et non frottée b)....	72
Figure 4.14	La micrographie prise par MEB du poinçon.....	73
Figure 4.15	Contrainte σ en fonction de la déformation ϵ	75
Figure 4.16	Observation optique et MEB des poinçons	76
Figure 4.17	Frottement en fonction de la déformation	77
Figure 4.18	Profil filtré	78
Figure 4.19	Amplifications à 50% vue à 45°	78
Figure 4.20	Microscope confocal (Leica DCM8)	79
Figure 4.21	Interface du poinçon à F=90 KN, a) avant b) après le contact	79
Figure 4.22	Présentation microscopique des surfaces écrasées du poinçon obtenues par le microscope confocal	80
Figure 4.23	Profil de la zone non frottée du poinçon	80
Figure 4.24	Profil de la zone frottée du poinçon	80

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Eléments de description d'une situation tribologique	7
Tableau 1.2	Différents types d'usure	12
Tableau 1.3	Valeurs typiques du coefficient de frottement statique μ pour de combinaisons métal/métal sous régime non lubrifié dans l'air	18
Tableau 2.1	Les différentes classes d'aciers	22
Tableau 2.2	Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés	24
Tableau 2.3	Composition chimique des principales nuances d'aciers rapides normalisées.	32
Tableau 2.4	Comparaison des caractéristiques d'emploi des nuances les plus courantes d'aciers rapides	32
Tableau 3.1	Caractéristiques des fonctions de la bipoinçonneuse	42
Tableau 3.2	Les éléments constituant le bâti de la bipoinçonneuse	46
Tableau 3.3	Les éléments constituant le porte poinçon	47
Tableau 4.1	Composition chimique des éprouvettes par DRX	61
Tableau 4.2	Composition chimique des poinçons par DRX	61
Tableau 4.3	Séries d'indentation avec téflon	64
Tableau 4.4	Paramètres statistiques de la déformation ϵ avec effort Min et Max	65
Tableau 4.5	Paramètres statistiques de la contrainte d'écoulement σ [N/mm ²] avec effort Min et Max	65
Tableau 4.6	Paramètres expérimentaux de la série d'indentation avec un pas de (2.5-4 KN)	68
Tableau 4.7	Paramètres expérimentaux de la série d'indentation pas 1,5KN	69
Tableau 4.8	Composition chimique des poinçons avant et après l'écrasement	73
Tableau 4.9	Détermination de la déformation et le coefficient de frottement μ avec $h_o=0$. 98 mm et $L_o=14.98$ mm	75
Tableau 4.10	Calcul du coefficient de frottement μ à partir des paramètres expérimentaux..	76
Tableau 4.11	Rugosité mesurée (R_a) des surfaces	77
Tableau 4.12	Rugosité mesurée (R_a , R_t et R_z) des surfaces dans l'essai F_{min}	81
Tableau 4.13	Rugosité mesurée (R_a , R_t et R_z) des surfaces dans l'essai F_{max}	81

Liste des abréviations

NF EN	Normes françaises et européens
HSS	Acier rapide
F_n	Force normale
FP	Fonctions principales
FC	Fonctions contraintes
CAO	Conception assisté par ordinateur
DRX	Diffraction des rayons X
MEB	Microscope à balayage électronique
EDX	Analyse de la composition des rayons X à dispersion d'énergie
F_t	Force tangentielle
V_n	Vitesse normale [m/s]
V_t	Vitesse tangentielle [m/s]
μ	Coefficient de frottement
μ_s	Coefficient de frottement statique
E	Energie dissipée dans le contact
W	Charge appliquée au contact
V	Vitesse [m/s]
P	Pression exprimée en pascal
F	Force appliquée exprimée en newtons
S	Surface sur laquelle la force est appliquée exprimée en mètres.
F_{th}	Force théorique
η	Rendement des vérins
σ_m	Contrainte moyenne de déformation
σ_0	Contrainte moyenne de déformation $\mu=0$
ε	Déformation
a	Largeur des poinçons
L'	Largeur de la tôle après l'écrasement

Liste des abréviations

L_0	Largeur initiale
L_f	Largeur finale
H_0	Épaisseur initiale
H_f	Épaisseur finale
Ra	La Moyenne Arithmétique de la Rugosité
Rt	Ecart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil
Rz	Représente la rugosité totale moyenne

Introduction Générale

Introduction générale

Dans la technique de la fabrication mécanique, on rencontre souvent un grand nombre de pièces en acier fabriquées par des procédés de mise en forme tels que (extrusion, étirage, estampage, laminage, emboutissage....etc.). Ces techniques de mise en forme des aciers ont pour objectif de donner une forme déterminée au matériau tout en lui imposant une certaine microstructure, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées. C'est un travail qui nécessite de maîtriser parfaitement les paramètres expérimentaux (composition du matériau, température, pression, vitesse de refroidissement, etc.). Les pièces obtenues subissent en général des contacts sévères avec les outils de mise en forme ce qui peut induire des vibrations qui est un phénomène complexe, il se produit à chaque fois que deux surfaces subissent un glissement relatif. Ces conditions de contact conduisent au phénomène de transfert de matière d'un matériau sur la surface de l'autre. Ce transfert peut conduire en général à des conséquences non négligeables voire parfois majeures. Ce qui peut être traduit par des gradients de déformations importants en surface des outils de mise en forme et des pièces à fabriquer. Il est primordial donc d'étudier les conditions qui régissent les phénomènes de transfert de matière et de la déformation des pièces dans ces systèmes tribologiques durant les procédés de mise en forme, dans le but de trouver des solutions adéquates à cette problématique. L'étude des conditions de contact de tout système tribologique est basée sur une analyse mécanique et physicochimique du contact. L'analyse mécanique nous fournit un ordre de grandeur des vitesses de glissement, des déformations plastiques, des contraintes et des températures auxquelles sont soumises les pièces ce qui pourra nous permettre d'identifier le mécanisme d'usure qui gouverne le contact, le coefficient de frottement, le gradient de déformation plastique et la pression de contact. Dans la littérature, il existe plusieurs types d'essais de caractérisation tribologique en mise en forme, d'une part on cite l'essai de pion-disque ou l'essai à quatre billes, on fait l'étude du développement d'une méthodologie pour une investigation tribologique fiable lors de l'application d'un micro-tribomètre, et d'autre part on trouve les tests de bipoinçonnement ou de compression. Le test de bipoinçonnement a la particularité de déterminer le coefficient de frottement après les tests expérimentaux en relevant certains paramètres nouveaux issus de l'expérimental comme la largeur et l'épaisseur de la pièce finale et l'effort d'écrasement. Le frottement est un paramètre essentiel dans les opérations de bipoinçonnement. D'une part il génère un effort de retenue qui peut être avantageux ou nuisible, d'autres part, le contact entre la tôle à bipoinçonner et l'outillage influence directement l'aspect de surface du produit final, de façon à obtenir un embouti sans défaut tels que striction, casse, marque de grippage ou encore mauvais aspect de surface, il est de plus en plus important de contrôler les interactions profondes entre la tôle et l'outillage. Malgré leurs importances et les problèmes dans les procédés de

Introduction générale

mise en forme, les phénomènes de frottement et de transfert de matières lors de bipoinçonnement n'ont pas été beaucoup étudiés, où un nombre très limité des études peut être trouvé sur ce sujet dans la littérature. P. Montmitonnet et al ont eu pour but d'étudier le frottement et le transfert de matière dans les procédés de laminage à froid de bandes métalliques. Ils ont étudié plus particulièrement les couches de transfert et le frottement. G.R. Payen et al ont analysé mécaniquement les conditions de contact tôle/serreflan en emboutissage profond, dans leurs résultats ils ont précisé l'impact de l'élasticité et de la loi d'écrouissage du métal et du frottement sous le poinçon. H. Hasselbruch et al, ont constaté que les surfaces structurées déterministes permettent de réduire les pertes de frottement jusqu'à 7% dans des conditions extrêmes de frottement aux limites à des contraintes hertziennes élevées et à de petites épaisseurs de film lubrifiant relatives. Des roues dentées revêtues de DLC ont montré une réduction des pertes de frottement entre 10-21% par rapport aux roues dentées non revêtues.

Ce manuscrit de thèse s'articule autour de quatre chapitres complémentaires.

Dans le premier chapitre, nous présentons, une synthèse bibliographique et des généralités sur la tribologie.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons, une synthèse sur les aciers rapides et les aciers faiblement allié (XES), leurs caractéristiques et leurs applications dans l'industrie.

Quant au troisième chapitre, nous l'avons consacré à la conception et la réalisation d'une presse hydraulique de laboratoire qui nous a servi de réaliser nos essais expérimentaux.

Alors que le quatrième chapitre de cette thèse, nous l'avons réservé en totalité à la partie expérimentale et aux interprétations dont l'objectif d'acquérir une connaissance détaillée sur le bipoinçonnement, le calcul du coefficient de frottement et de mettre en relief le phénomène de transfert de matière lors d'un contact entre un poinçon et une tôle.

De plus nous avons aussi caractérisé la rugosité des poinçons avant et après écrasement afin de déduire la relation entre frottement et état de surface.

Enfin nous achevons ce travail par une conclusion générale qui résume notre étude et les perspectives de ce travail.

Chapitre I

Tribologie et bipoinçonnement

I.1 La Tribologie :

I.1.1 Définition et historique de la tribologie

Discipline regroupant sciences et technologies s'intéressant aux interactions entre surfaces en contact, à leurs effets et causes aux moyens de les amplifier ou de les réduire. La tribologie traite des problèmes de contact, de frottement, d'usure et de lubrification.

La tribologie intéresse tous les domaines d'activité car l'univers technique qui nous environne est essentiellement régi par des contacts. Ils contribuent au fonctionnement des liaisons entre solides que ce soit dans les systèmes vivants ou dans les machines, dans les mécanismes les plus élémentaires comme les plus complexes. On en trouve aussi bien dans les articulations humaines que dans celles des satellites, en micromécaniques comme dans les engins de travaux publics, dans la mise en forme des matériaux comme dans les organes de transmission d'énergie ou de guidage. Préoccupation permanente et universelle, la tribologie se caractérise aussi par son inter-disciplinarité et fait appel à de nombreuses sciences fondamentales telles que physique, chimie, mécanique des solides, mécanique des fluides, sciences des matériaux... [DOW79].

Le terme tribologie lui-même, (du grec *tribein* = frotter et *logos* = étude) est récent (1966). Les notions de frottement et usure remontent, cependant, à la plus lointaine antiquité et ont accompagné les progrès de l'humanité. Les hommes primitifs ont façonné par frottement et usure les pointes acérées de leurs outils ou de leurs armes, puis obtenu le feu en heurtant des silex ou en frottant l'un contre l'autre des morceaux de bois (Paléolithique).

A la Renaissance, le renouveau intellectuel dans les sciences et les arts va relancer la progression dans la prise de conscience des problèmes tribologiques. Les nombreuses études et schémas laissés par Leonard de Vinci sur le frottement de glissement, le roulement, sur les matériaux de friction, les engrenages en sont les témoignages les plus typiques. Beaucoup de ces mécanismes furent concrétisés par les inventeurs, de nouveaux matériaux de friction furent mis au point qu'introduisirent les bases des progrès des siècles suivants [FREN90].

Plus récemment, des scientifiques célèbres ont abordé les problèmes de tribologie d'une manière d'abord descriptive puis de plus en plus quantitative.

La prise de conscience de la physique du frottement, de l'usure et des phénomènes thermiques dans le contact par Vernotte, Archard, Bowden, Tabor, Jaeger et Kragelski eut lieu dans la première moitié du XX^e siècle mais l'étude est poursuivie à l'heure actuelle par de nombreuses équipes scientifiques [WILC77].

Pendant les cinquante dernières années, les recherches se multiplient pour en développer les nombreux aspects : analyse et description des surfaces techniques jusqu'à l'échelle nanométrique, études des contacts lisses ou rugueux, du frottement, de l'usure, de l'adhérence, approfondissement des connaissances dans le domaine de la lubrification, développement de lubrifiants et additifs sans cesse plus performants, conception de nouveaux matériaux ou de nouveaux traitements et revêtement de surfaces.

I.1.2 Aspects industriels et économiques

Au cours des dernières décennies, l'impact de la tribologie sur la vie économique et industrielle a été considérable, comme l'ont montré de nombreuses enquêtes.

Bien que les évaluations soient relativement divergentes suivant les éléments pris en compte, il apparaît que 10 à 30% de l'énergie produite dans le monde est consommée par frottement. L'American Society of Mechanical Engineers (ASME) estime, de son côté, à plus de 10% de la consommation totale énergétique des Etats-Unis, l'économie qui pourrait être réalisée par des actions de recherche dans le domaine de la tribologie. En ce qui concerne le coût de l'usure, les valeurs avancées sont aussi extrêmement variables selon que l'on introduit les coûts matières ou les pertes de production, mais toutes atteignent des niveaux impressionnants [BILO94].

I.1.3 Perspectives de la tribologie

Confrontée aux exigences du monde moderne, la tribologie doit affronter des situations nouvelles. L'accroissement des performances, la miniaturisation, les soucis d'économie d'énergie et de matière, les exigences de fiabilité et de longévité, la variété des environnements (vide spatial, températures élevées, milieux cryogéniques ou chimiquement agressifs, protection environnementale ou sanitaire...) conduisent à mettre en œuvre de nouveaux concepts et de nouvelles solutions. Recherches fondamentales et finalisées sont souvent associées pour prendre en compte la complexité et la variété de ces situations. L'amélioration des techniques connues ou

la création de nouvelles (sustentation magnétique, nano-tribologie, bio-tribologie, tribologie spatiale...) font apparaître de nouveaux aspects concernant la compréhension du frottement, la conception des mécanismes, des matériaux à usage tribologique, des méthodes et moyens de lubrification [CZIC78].

I.2 Analyse tribologique des systèmes

I.2.1 Objectifs

D'une manière générale, on observe en ingénierie mécanique, que le choix des matériaux pour réaliser un composant est souvent orienté par des considérations qui n'ont que peu ou pas à voir avec la tribologie et qui sont les suivantes :

- Propriétés mécaniques, électriques ou magnétiques,
- Résistance à la corrosion, poids, coût.

La nature même des problèmes tribologiques, leur variété, leur complexité ainsi que le grand nombre de variables qui interviennent, nécessitent donc une approche analytique fonctionnelle détaillée de façon à pouvoir détecter et prendre en compte les facteurs et paramètres principaux les plus critiques qui régiront le comportement général de l'ensemble du système.

En conséquence, il importe de disposer, pour analyser la situation, d'une méthode, aussi rigoureuse que possible, qui conduise à une prise en compte de tous les éléments disponibles pouvant influencer sur le résultat final. L'analyse tribologique, proposée ci-après, vise à atteindre cet objectif en adoptant la démarche suivante :

1. Identification des différents contacts qui interviennent dans le mécanisme.
2. Extraction pour chaque contact des paramètres fonctionnels ou variables opérationnelles.
3. Identification des effets résultants générés par le fonctionnement et évaluation de leur influence sur le contact.
4. Détection des processus physiques ou physico-chimiques qui peuvent se produire et conduire à l'endommagement des surfaces.
5. Affectation à chaque contact d'une ou plusieurs fonctions tribologiques explicites à remplir.

Le choix final des matériaux de surface sera ensuite orienté de manière à assurer l'adéquation entre leurs propriétés exigées par les fonctions mécaniques, superficielles et volumiques et les impératifs thermiques et tribologiques des composants.

I.2.2 Système tribologique

Un système tribologique ou tribosystème est un ensemble composé d'éléments en interaction statique ou dynamique généralement organisé en fonction d'un but : transmission d'énergie, étanchéité statique ou dynamique, freinage et guidage [PIEU64]. Un tribosystème se caractérisera donc par un ou plusieurs contacts par lesquels transiteront les efforts, la chaleur, éventuellement l'électricité.

Dans le cas le plus général, un contact tribologique est composé de quatre éléments principaux figure 1.1 :

- Les deux premiers corps soumis à des torseurs cinématique (vitesses) et dynamique (forces et moments) sont limités par des couches superficielles à caractéristiques spécifiques souvent mal connues tant des points de vue géométrique que physicochimique, mécanique ou structural figure 1.1 (1) et (2).
- Le milieu interfacial ou 3^{ème} corps qui est soumis à des sollicitations mécaniques, thermiques, physicochimiques figure 1.1 (3).
- L'environnement dont le rôle peut être déterminant dans le comportement du contact (Figure 1.1) (4).

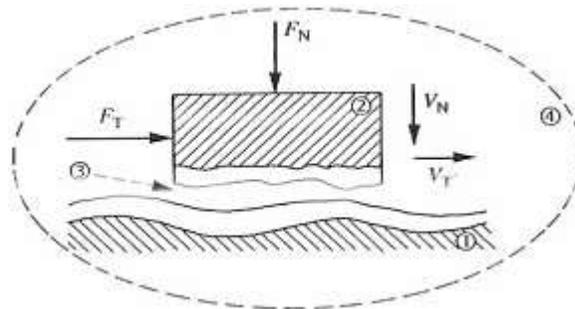


Figure 1.1 Schématisation d'un contact tribologique.

Pour décrire cette situation, on s'appuiera sur un répertoire de références présenté dans le tableau 1.1 où sont regroupés les éléments principaux à identifier.

Dans la première colonne, on trouve les paramètres principaux ou variables opérationnelles définissant la situation tribologique. Ils précisent les conditions initiales, nominales ou maximales de l'expérimentation ou de l'utilisation.

La deuxième colonne regroupe les phénomènes les plus communément observés, décrits et commentés dans la littérature spécialisée, qui peuvent se manifester lors du fonctionnement et modifier rapidement les conditions initiales.

Tableau 1.1 : Eléments de description d'une situation tribologique [EYRE79].

Variables opérationnelles	Phénomènes observés	Mécanismes d'endommagement
Mode de contact	Résistance au déplacement	Adhésion
Etat de surface	Vibrations	Abrasion
Charge	Phénomènes thermiques	Erosion (Cavitation)
Vitesse	Transformations superficielles	Déformation
Ambiance (avec lubrification)	Transformations structurales	Fatigue de contact (Fretting-fatigue)
Matériaux	Perte de matière	Corrosion (Tribocorrosion)

La troisième colonne présente les processus les plus couramment admis qui peuvent conduire à l'endommagement des surfaces. Ces processus sont regroupés en six familles fondamentales, chacune pouvant être reliée à un mécanisme de base qui est à l'origine de l'endommagement.

I.2.3 Paramètres fonctionnels

Pour caractériser une situation tribologique, il importe dans un premier temps, d'identifier les différents contacts et d'extraire les variables opérationnelles qui définissent le fonctionnement de chaque contact.

I.2.3.1 Mode de contact

Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact. Ces informations participeront à l'évaluation du champ de contraintes imposée au contact. Par nature du contact on entend la

définition générale de ce qui constitue le contact : solide/solide, liquide/solide, liquide + particules/solide, liquide + vapeur/solide...

La géométrie du contact caractérise la forme des surfaces qui limitent les solides au voisinage de la zone de contact. On définit trois types de contact : ponctuel, linéique et surfacique. Les deux premiers types constituent les contacts hertziens ou contacts concentrés.

La géométrie du contact précise aussi les caractéristiques principales et les dimensions du contact : plans de courbure principaux et rayons de courbure principaux, par exemple pour les contacts hertziens. Elle sera prise en compte dans la détermination du champ de contraintes généré par le contact. A partir de la géométrie des surfaces, on peut introduire la notion de surface cinématique et de fréquence de service : on désigne par petite surface cinématique la surface dont les points sont sollicités en permanence et par grande surface cinématique celle dont les points ne sont sollicités que lorsque l'antagoniste passe au-dessus d'eux (Figure 1.2). La fréquence de service est définie par le rapport des longueurs entre petite et grande surface cinématique.

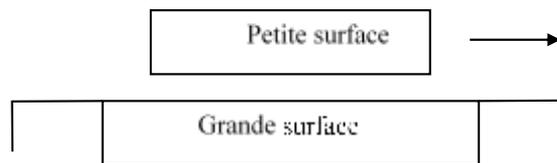


Figure 1.2 : Définition cinématique des surfaces

I.2.3.2 Charge ou dynamique du contact

Il s'agit de déterminer le torseur dynamique, c'est-à-dire l'ensemble des forces et moments auquel est soumis le contact. La charge et la manière dont elle est appliquée permettent d'évaluer la nature et le niveau des contraintes auxquelles les couches superficielles sont soumises. La connaissance du champ de contrainte en profondeur est nécessaire pour justifier quantitativement la nature, la qualité et l'épaisseur des traitements en revêtements de surface, pour évaluer les risques de fatigue de contact... La plage de variation des charges mises en œuvre en génie mécanique est extrêmement large allant du milli-newton au méga-newton.

La charge intervient dans l'énergie dissipée dans le contact. Si l'on adopte une loi de frottement de Coulomb, par exemple, la puissance mise en jeu par frottement s'exprime par l'expression :

$$E = \mu W v \quad (1.1)$$

I.2.3.3 Vitesse ou cinématique du contact

Ce paramètre consiste à préciser les différents éléments du torseur cinématique (ensemble des vitesses et moments cinétiques) appliqués au contact, c'est-à-dire la nature et la cinématique du mouvement. Suivant l'orientation des composantes de ce torseur au niveau du contact, le déplacement pourra s'effectuer en roulement, glissement ou pivotement. De même, une orientation du vecteur «vitesse» non parallèle à la surface de contact introduira l'éventualité de chocs.

La caractérisation de ce paramètre exige aussi la mise en évidence de la fréquence des sollicitations qui peuvent être continues, alternées ou répétées, les unes ou les autres pouvant avoir des conséquences variables sur le comportement du système et faire apparaître des phénomènes de fatigue de contact ou des difficultés dans le maintien des films de lubrifiant.

La vitesse contribue à l'énergie dissipée dans le contact. Elle est aussi l'un des facteurs intervenant dans l'évaluation de la durée de vie des surfaces, combinée au temps de fonctionnement, elle permet le calcul de la distance à parcourir.

I.2.3.4 Etats de surface

Le paramètre état de surface prend en compte deux éléments capitaux de description du contact Figure 1.3 :

- Etat de surface microgéométrique,
- Etat de surface physico-chimique.

La microgéométrie est l'un des éléments d'appréciation de l'aire réelle de contact, des raideurs normales et tangentielles du contact, des résistances mécanique, électrique et thermique de l'interface, de l'aptitude à l'adhésion et de la perméabilité du contact. Les paramètres à prendre en compte sont accessibles par la topographie des surfaces.

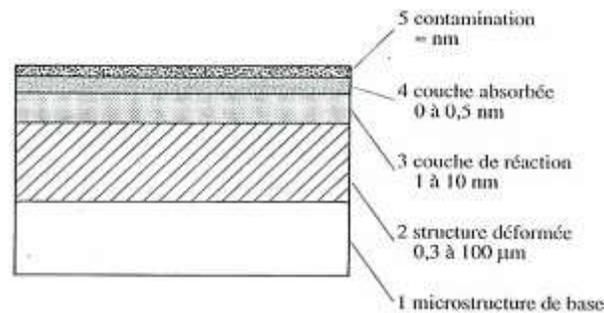


Figure 1.3 Représentation schématique d'une section des couches superficielles d'une surface technique.

Ainsi que l'ont récemment continué les études du frottement à l'échelle atomique réalisées en nanotribologie [LAND97], le contact des solides met en jeu, non seulement les aspects microgéométrique, mais aussi les interactions moléculaires interfaciales et les forces de surfaces. Les unes et les autres sont largement tributaires de la physicochimie de la surface. Celle-ci est donc déterminante dans l'aptitude à l'adhésion et au glissement, ainsi que dans la réactivité de la surface avec l'environnement dont le rôle est essentiel en lubrification par exemple. Les surfaces réelles sont, en effet, constituées par la superposition de plusieurs couches de nature, structure et composition qui peuvent être très différentes de celles du métal de base. La figure 1.3 donne une représentation schématique et un ordre de grandeur de l'épaisseur des principales couches que l'on rencontre généralement dans les surfaces techniques. Leur présence et leur importance dépendent essentiellement du mode d'élaboration et de l'environnement. Ces couches peuvent évoluer ensuite en cours de service. Les moyens actuels d'analyse des surfaces et interfaces permettent de les caractériser tant du point de vue composition que structure.

I.2.4 Mécanismes d'endommagement des surfaces

Les différents effets décrits peuvent être attribués à des processus mécaniques ou physicochimiques qui vont apparaître isolément ou simultanément et avec plus ou moins d'intensité suivant les circonstances.

Le mécanisme d'adhésion se caractérise par l'établissement de liaisons interfaciales entre les surfaces en contact. L'adhésion se manifeste généralement par des transferts de matière d'une surface à l'autre et peut en se généralisant produire le grippage épidermique, voire la soudure des composants.

L'abrasion est due à l'action de particules dures libres ou liées à l'une des surfaces (aspérités), qui viennent agresser les surfaces par action de coupe ou de déformation.

L'érosion est provoquée par l'action de particules solides, liquides ou de vapeurs animés par un fluide et qui viennent frapper les surfaces solides. Les contraintes développées lors de l'impact peuvent extraire des particules de manière de la surface.

La cavitation, usure générée par l'implosion de bulles de vapeur au voisinage d'une surface, peut être considérée comme un cas particulier de l'usure érosive.

La déformation apparaît lorsqu'une surcontrainte locale entraîne le dépassement de la limite d'élasticité des matériaux et crée un défaut sur la surface par plastification.

L'endommagement des surfaces par fatigue de contact se manifeste lorsque les couches superficielles des composants sont soumises à des contraintes répétées ou alternées qui conduisent à l'amorçage de fissures. Ces sollicitations peuvent être d'origine mécanique ou thermique. Les dégradations apparaissent sous forme de piqûres, de fissures, d'écaillage et s'accompagnent de modifications structurales. Les avaries par fatigue ou usure par petits débattements (fretting-fatigue ou fretting-usure) se rattachent à ce type de mécanisme.

L'usure tribochimique ou tribocorrosion intervient dans des situations où le contact fonctionne en environnement corrosif. L'énergie dissipée dans le contact peut alors activer les phénomènes de corrosion et accélérer la dégradation des surfaces. La présence d'un potentiel électrique peut aussi modifier le comportement. Le tableau 1.2 récapitule et schématise les mécanismes d'endommagement des surfaces.

Tableau 1.2 : Différents types d'usure [EYRE79].

Processus d'usure	Aspects de l'endommagement	Importance relative	Ordre de grandeur des Variations dimensionnelles
Adhésion	Transfert, micro-liaisons Grippage, épidermique	15%	10 ⁻² mm/an
Abrasion	Striures, rayures, bourelets. copeaux	50%	10mm/an
Erosion	Eclats, cavités, rayures		1mm/an
Déformation	Empreinte, fissures		/
Fatigue	Fissures,	8 %	/
Glissement	délamination,		
Roulement	écaillages, piquûres,		
Fretting	oxydation		
Corrosion	Oxydes	5 %	/

I.3 Le frottement

Le frottement est un phénomène multiforme et complexe, cette complexité découle de sa dépendance vis-à-vis d'un nombre remarquablement élevé de facteurs ; eux-mêmes sont des notions fluctuantes dépendant de plusieurs variables et s'imbriquant les unes dans les autres [9], il peut être défini comme la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un objet solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement [CAUB64].

Le frottement est aussi défini comme la force résistante tangentielle à l'interface commune entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force externe, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à la surface de l'autre [RABI65]. Tout mouvement est freiné par une résistance, cette résistance, qui limite toutes formes connues de mouvement, est appelée frottement [OECD69]. Il résulte de l'existence de forces s'exerçant sur une interface entre deux corps et tendant à s'opposer au mouvement tangential relatif entre eux [MONT93].

Les normes ne définissent pas le frottement mais la force de frottement qui est la force résistante tangentielle à l'interface entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force extérieure, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à l'autre [DHER78]. Pour d'autres normes, le frottement se résume à l'action agissant contre le mouvement relatif de corps en contact. Le frottement sec, entre deux surfaces non lubrifiées est un phénomène complexe pour lequel il

n'existe pas de théorie fondamentale. L'expérience permet d'établir certains faits concernant ce phénomène [DIN77].

I.3.1. Lois empiriques du frottement

D'après la littérature, on remarque que sur le plan formalisme le frottement sec est le parent pauvre de la tribologie [BERT92]. Cette pauvreté est une conséquence de sa complexité qui provient essentiellement de divers aspects. Le nombre élevé de paramètres influents peut atteindre facilement les 600 paramètres [FOY99] à cause de :

- Caractère singulier de chaque système tribologique.
- Non uniformité des phénomènes à l'échelle du contact.
- Evolution temporelle des phénomènes.

Depuis les travaux de Léonard De Vinci (1452-1519), la formulation d'une loi de frottement a été établie empiriquement. Ainsi, une série de différents travaux, qui se sont succédés ont conduit aux lois fondamentales de la force de frottement.

Le 19 décembre 1699 Amontons expose son mémoire où il présente deux lois dites lois d'Amontons sur le frottement qui s'énoncent ainsi.

- Force de frottement est proportionnelle à la force normale
- Force de frottement ne dépend pas de l'aire apparente de contact

Trente-huit ans plus tard en 1737, Bernard Forrest de Bélidor propose de représenter les rugosités de surface par des sphères jointives. Il montre que le rapport entre la force de frottement et la force normale appliquée est indépendant du nombre d'aspérités (sphères) et est voisin de 0.35.

Vu la simplicité de ce modèle, il a été utilisé et présenté par les tribologues très longtemps et même encore très récemment [FILL04, FREN86].

En 1748 Léonard Euler développe une approche analytique du frottement, il précise la notion de coefficient et d'angle de frottement encore utilisée aujourd'hui. C.A. Coulomb a publié les deux lois d'Amontons et montre que dans beaucoup de cas :

- Le coefficient de frottement est indépendant de la vitesse de glissement.

Cette troisième loi lui a été attribuée. D'où la définition du coefficient de frottement :

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (1.2)$$

Où P : Force normale (Charge appliquée à une vitesse de glissement donnée), F : Force de frottement tangentielle et μ : coefficient de frottement

A ce point, il faut souligner que μ n'est constante que pour un couple de matériaux donnés en glissement relatif dans un milieu environnant donné. Cette loi est trop générale pour rendre bien compte du frottement, pourtant depuis Coulomb, de nombreux coefficients de frottement ont été proposés sans pour autant qu'aucun d'entre eux ne décrive parfaitement le phénomène [FOUR96]. Il est bien entendu impossible de faire entrer dans une formule mathématique unique l'influence d'un très grand nombre de paramètres comme :

- Variables thermomécaniques (température, vitesse, contrainte) ;
- Etat de surface des antagonistes (rugosité composition chimique, énergie de surface
- Propriétés du lubrifiant
- Propriétés du troisième corps.

La démarche de construction d'une loi de frottement consiste à isoler une ou deux variables en général une des variables mécaniques ou cinématiques dont l'effet est jugé primordial et décrire son influence sous une certaine forme mathématique [MONT93].

La première loi est justifiée dans le cas des glissements secs, la figure 1.4 montre des résultats types d'un glissement sec dans l'air d'un acier sur de l'aluminium. Le coefficient de frottement est effectivement constant tout le long de la variation de la force normale avec un facteur proche de 10^6 .

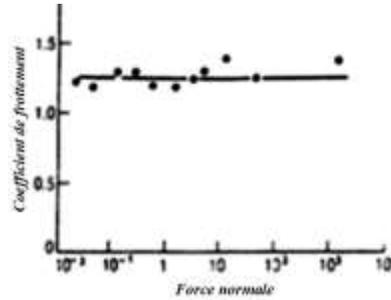


Figure 1.4 : Variation du coefficient de frottement μ avec la force normale d'un glissement sec d'un acier sur de l'aluminium dans l'air [BOWD86].

Ces essais sont menés pour atteindre deux objectifs, non contradictoires, mais sensiblement différents

- Soit mesurer l'aptitude d'une tôle à subir une opération de formage donnée l'aptitude d'un lubrifiant ou d'un traitement de surface d'outil à résoudre tel problème de frottement, de transfert ou d'usure, etc.
- Soit constituer une banque de données tribologiques permettant les études de conception d'opérations à l'aide d'outils de simulation numérique ; le type d'essai et sa mise en œuvre sont choisis en vertu de leur degré de similitude avec la zone de l'outillage.

A noter que les essais Erichsen et Swift, beaucoup plus complexes, mais leur interprétation en termes de frottement est moins directe et requiert un modèle mécanique de l'opération et souvent des mesures complémentaires : courbe d'écrouissage de la tôle, etc. [FELD91].

I.3.2 Classification des Phénomènes de Frottement

Parmi les différents types de frottement on se base sur les deux types frottement qui nous intéressent :

I.3.2.1 Frottement sec :

Dans le domaine du frottement sec, les résultats de Coulomb sont encore utilisés aujourd'hui. Cependant, des progrès importants ont été réalisés à la suite des travaux de Holm en 1938, qui montrent que les aspérités en contact se déforment plastiquement et peuvent se souder, ainsi la force de frottement est directement reliée aux contraintes de cisaillement des jonctions formées. Bowden et Tabor en 1939 précisent cette notion en faisant intervenir la dureté du matériau le plus mou [TABO73]. D'autres auteurs, dont Ernst et Merchand en 1940, montrent que les

déformations des aspérités et l'effet de labourage doivent être pris en compte pour le calcul du frottement. Plus récemment, Bowden et Tabor en 1950, et Kragelski 1965 définissent la notion de surface réelle du contact. En effet les surfaces réelles d'un contact ne sont jamais géométriquement parfaites et la force appliquée se répartit sur un grand nombre de microcontacts soumis à des déformations plastiques. La surface réelle de contact est alors directement fonction de la charge appliquée et indépendante de la surface apparente de contact.

Rabinowicz en 1965, introduit de plus la notion d'énergie d'adhérence des surfaces afin de préciser la valeur du frottement.

Récemment, à la suite de nombreuses observations, le modèle de contact à trois corps a été proposé par Maurice Godet. Cette notion qui est quasi universellement admise aujourd'hui, consiste à considérer un contact sec comme formé de deux solides de comportement généralement élasto-plastique et d'un film intercalaire dont malheureusement la rhéologie est très mal connue. Ce film intercalaire, nécessaire au bon fonctionnement d'un contact, peut provenir d'un revêtement initial (c'est le rôle des traitements de surface), mais peut aussi être constitué de débris d'usure qui assurent une séparation entre les deux corps en contact.

I.3.2.2. Frottement des métaux

Dans de nombreuses applications, on peut rencontrer le glissement d'un métal sur un autre métal dans l'air. Leur coefficient de frottement varie de $\mu = 0.5$ à 1.5 pour des glissements non lubrifiés tableau 1.3. Ces valeurs sont nettement plus élevées dans le vide.

Zambelli et Vincent ont reporté qu'à l'exception de l'or et d'autres métaux nobles (Platine...) ($\mu=2$), les métaux s'oxydent généralement dans l'air en formant un film d'oxyde dont l'épaisseur peut se situer entre 1 à 10 nm (Cr, Al ; exception notable : le fer qui forme des films plus épais).

Ce film d'oxyde peut induire un coefficient de frottement faible, pour de faibles pressions : C'est le cas du cuivre frottant sur lui-même dont le coefficient $\mu=0.4$ pour une force normale $P < 10^{-2}$ N [WITH50].

Pour une force $P > 10^{-1}$ N, ce coefficient se stabilise à $\mu=1.8$. Cet accroissement est dû à la rupture du film d'oxyde. Il y a transfert de matière [DELM89].

Dans le cas d'un alliage métallique tel que l'acier à 0.4% en masse de carbone, la valeur du coefficient de frottement sec est relativement élevée ($\mu \cong 1$) pour de faibles forces cette valeur tombe à $\mu=0.5$ pour des charges élevées. Cette transition est attribuée à l'incrustation du film d'oxydes de fer sous l'effet de la force élevée assurant le maintien du contact entre film d'oxydes [BOWD86].

La fonte grise et les bronzes au plomb glissant sur un acier normal donnent des valeurs faibles du coefficient de frottement ($\mu=0.2-0.4$). Ce comportement est attribué à la présence de phases lubrifiantes (graphite, plomb) qui favorisent la formation d'un film interfacial à faible résistance au cisaillement.

Tableau 1.3 : Valeurs typiques du coefficient de frottement statique μ pour de combinaisons métal/métal sous régime non lubrifié dans l'air [BOWD86, TAB073].

Métaux glissant sur eux même dans l'air	μ_s	Métaux purs et alliages glissant sur l'acier inoxydable (à 13 % Cr) dans l'air	μ_s
Or	2	Argent	0.5
Argent	0.8-1	Aluminium	
Etain	1	Cadmium	
Aluminium	0.8-1.2	Cuivre	0.8
Cuivre	0.7-1.4	Chrome	0.5
Indium	2	Indium	2
Magnésium	0.5	Plomb	1.2
Plomb	1.5	Cuivre-20%plomb	0.2
Cadmium	0.5	Métal - blanc à base de Sn	0.8
Chrome	0.4	Métal - blanc à base de Pb	0.5
/	/	Laiton- α (Cu30%Zn)	
/	/	Plomb- α /Laiton- β (Cu-40%Zn)	0.2
/	/	Fonte grise	0.4
/	/	Acier doux (0.13%C)	0.8

I.3.3 Le contact outil -tôle influence du frottement

Généralement, le frottement est un effet relativement délicat à prendre en compte dans des modèles analytiques d'essais mécaniques.

Dans les essais de compression, le frottement est à l'origine de l'apparition d'un bombé sur l'éprouvette. Suivant la géométrie de l'éprouvette (plus ou moins élancée), le frottement peut alors jouer un effet parasite au cours de l'essai [JACQ09].

M. Pietrzyk (2002) analyse des essais de compression uni-axiale sur un acier pour identifier des paramètres d'une loi viscoplastique en tenant compte des effets de frottement entre la pièce et les outils. L'auteur caractérise les paramètres de plusieurs lois de comportement viscoplastiques plus ou moins complexes qui peuvent prendre en compte des changements de phases ou de microstructure, le coefficient de frottement étant considéré connu. Faurholdt (2000) identifie des coefficients de lois de comportement et de frottement à partir de mesures d'efforts au cours d'un essai de compression. Bien qu'il soit connu que la sensibilité de l'effort par rapport au coefficient de frottement est fortement dépendante de la géométrie des éprouvettes.

De manière générale, il est peu fait mention dans la littérature de l'influence de la valeur du coefficient de frottement sur les résultats de l'identification des paramètres rhéologiques.

Il est en principe possible de déterminer des coefficients de frottement par des mesures directes d'efforts tangentiels en utilisant des capteurs ou bien des tribomètres Boyer (2001). Comme pour les essais rhéologiques, il est important de se rapprocher le plus possible des conditions d'utilisation en industrie. Or, il peut être délicat et même impossible d'effectuer des mesures directes lorsque la pression de contact entre l'outil et la pièce est trop importante [JACQ09].

Nous avons vu que le frottement joue un rôle lors de la déformation, il faut être en géométrie plate ($h/a \ll 1$). Le matériau écrasé glisse alors contre le poinçon. La cission de frottement s'oppose à ce glissement, et par conséquent, à l'écrasement. Physiquement, c'est le phénomène qui fait du test de bipoinçonnement test de frottement dans l'essai de bipoinçonnement [KUBI80]. Une opération de mise en forme réunit simultanément plusieurs de ces conditions. C'est pourquoi la maîtrise du frottement est souvent la clé de la rentabilité d'un procédé de mise en forme. D'où l'intérêt de la tribologie pour la mise en forme tribologie [BARR95].

I.4 La Rugosité

Ce terme générique regroupe l'ensemble des facteurs caractérisant les irrégularités géométriques d'une surface, qui vont du domaine microscopique défini plus généralement par la

rugosité, au domaine macroscopique correspondant à la géométrie de contact. Donc, tous les effets qui résultent de la mise en œuvre et du parachèvement d'une pièce mécanique (opérations de mise en forme, de mise à la côte, traitements thermiques et de surfaces) sont concernés et en particulier.

- Création de sillons, aspérités, cavités, porosités.
- Génération de défauts de forme (linéarité, circularité...).

La topographie (rugosité) au sens général du terme agit sur la plupart des facteurs qui gouvernent le comportement au frottement et à l'usure et notamment : mode de contact et comportement du milieu interfacial (troisième corps).

La rugosité constitue aussi un facteur déterminant pour la qualité des produits finis (propriétés d'aspect notamment). Elle intervient de manière prépondérante dans le processus de rodage, auquel est systématiquement liée une diminution des irrégularités de surface. Cette évolution correspond à une élimination des excroissances ou aspérités se produisant ou bien par cisaillement-déchirement (avec émission de débris) ou bien par consommation chimique (action des additifs extrême-pression des lubrifiants) ou bien encore par plastification. Ce troisième mode, qui s'avère le plus efficace parce qu'il préserve les surfaces des endommagements dus au débris, est favorisé par l'interposition de films lubrifiants et l'action de certains traitements de surfaces [RYMU89].

Les traitements de surfaces peuvent participer à la modification des caractéristiques topographiques, la variété des procédés et de leurs paramètres de mise en œuvre offrant à cet égard une gamme étendue de possibilités. En règle générale, l'effet des traitements de surfaces ne doit pas être seulement considéré par rapport à la rugosité directement induite, mais aussi et surtout par rapport au mode d'évolution de cette rugosité au cours du frottement, et notamment du rodage. Si, à chargement identique, le contact hertzien conduit à des pressions théoriques plus élevées, il permet, par contre, une meilleure maîtrise de la surface réelle de contact, par exemple en cas de désalignement l'accroissement de l'aire de contact favorise les phénomènes d'adhésion.

I.5 Bipoinçonnement

I.5.1 Définition

C'est un test qui consiste à écraser une tranche d'un massif parallélépipédique entre deux poinçons plans, rectangulaires, symétriques et parallèles (Figure 1.5).

Pour tout calcul ultérieur, des restrictions relatives à la largeur de la tôle, la largeur des poinçons, les plans de déformation et les frottements entre les surfaces poinçons et tôle sont prises en compte. L'interaction entre les poinçons et la tôle relèvent donc de la mécanique des milieux continus et de la plasticité.

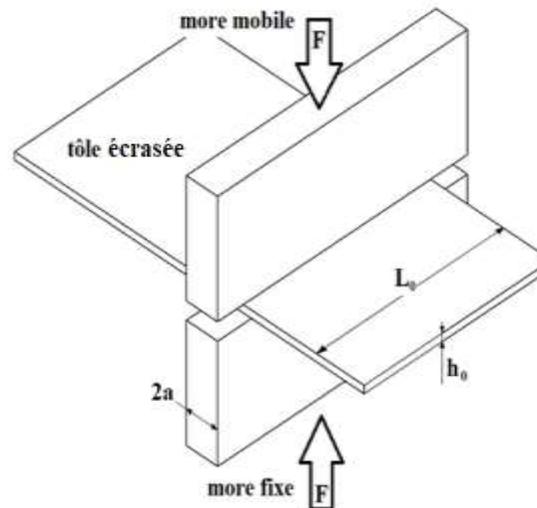


Figure 1.5 : Schématisation du test de bipoinçonnement

1.5.2 Calcul mécanique

Le calcul mécanique est basé sur la détermination de la cission d'écoulement ou la contrainte de cisaillement nécessaire à la déformation plastique du massif. Cette contrainte dépendra directement de la contrainte normale moyenne d'écrasement. A cet effet, différentes méthodes de calcul peuvent être utilisées. On cite [KUBI80] :

- Méthode des tranches (verticales et horizontales),
- Méthode des bornes (supérieure et inférieure),
- Méthodes des champs de lignes de glissement,
- Méthode de Prandtl

Le choix d'une méthode ou une autre quant au calcul mécanique dépend particulièrement du rapport h/a et des propriétés mécaniques des matériaux des poinçons et de la tôle.

Sans se lancer sur les critères et les démonstrations du calcul mécanique, la contrainte moyenne d'écrasement σ_m est donnée selon la méthode choisie comme suit :

- Selon la méthode des tranches verticales :

$$\sigma_m = \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \left(1 + \bar{m} \frac{a}{4h}\right) \quad (1.3)$$

avec σ_0 et \bar{m} sont respectivement contrainte d'écoulement plastique et constante de Tresca tels que ($0 \leq \bar{m} \leq 1$).

- Selon la méthode des tranches horizontales :

$$\sigma_m = \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{a}{4h}\right) \quad (1.4)$$

Dans ce cas, les frottements ne sont pris en compte.

Nous nous contentons de ces formules étant donné qu'elles sont les mieux adaptées à nos essais.

En effet, pour une géométrie très plate ($h/a \ll 1$) et le cas de frottement faible, la déformation est quasiment homogène. La déformation $\bar{\varepsilon}$ est donnée par la formule suivante :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \text{Log} \frac{h_0}{h_f} \quad (1.5)$$

où h_0 et h_f sont les épaisseurs initiale et finale respectivement de la tôle bipoinçonnée.

Le coefficient de frottement entre les poinçons et la tôle est donné par la formule :

$$\mu = \left(\frac{\sqrt{3} \cdot F}{2.2a \cdot L' \cdot \sigma_0} - 1 \right) \cdot \frac{4h_f}{2a} \quad (1.6)$$

Où F est la force de poinçonnement et L' est la largeur de la tôle sous chargement (pendant l'écrasement) et est donnée par l'équation :

$$L' = L_0 + \frac{2}{3} (L_f - L_0) \quad (1.7)$$

L_0 et L_f sont les largeurs initiale et finale de la tôle.

Références bibliographiques chapitre I

- [DOW79] D. Dowson, History of Tribology, Longmans, Londers, (1979).
- [BARR95] O. Barrau, Étude du frottement et de l'usure d'acier à outil de travail à chaud", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1995.
- [BENG07] N. Benghalem, Étude des mécanismes d'usure et de frottement de deux aciers X12NiCrMoSi25-20 et le 25CrMo4", Thèse de doctorat, IOMP université de Sétif, (2007).
- [BERT92] Y. Berthier, Tribologie science carrefour, Journées européennes de freinage 3 et 4 décembre (1992), Lille France.
- [BILO94] J.M. Bilot, B. Rigaut, Importance industrielle de l'usure, CETIM-Information, n°141, déc. (1994).
- [BOWD86] F P. Bowden, D. Tabor, The friction and Lubricated of solids, Part I, Clarendon Press. Oxford (1964). Revised edition (1954), Paperback édition(1986)
- [CAUB64] J-J. Caubet, Théorie et pratique industrielle du frottement, Paris, Edition Dunod-Technip, (1964).
- [CZIC78] H. Czichos, Tribology A. System Approach, Elsevier, Tribology series 1, (1978)
- [DELM89] F. Delmare, Lubrification mixte et transfert, séminaire : le contact métal outil en mise en forme des métaux : frottement, lubrification, état de surface, usure, Sofia Antipolis, Ed. FELDER (E.)T.III, (1989), Paris.
- [DHER78] J. Dhers, Usure, avaries, corrosion, Techniques et vulgarisation(1978).
- [EYRE79] T.S. Eyre, Treatise on Materials, Technology, vol. 13, (1979).
- [FELD91] E. Felder, La lubrification des surfaces métalliques pour la mise en forme. M 597, Techniques de l'Ingénieur, Paris (1991).
- [FILL04] N. Fillot, Étude mécanique de l'usure. Modélisation par éléments discrets des débits de troisième corps solide, (2004), INSA De Lyon.
- [FOUR96] C. Fournier, Quantification des troisièmes corps par analyse d'image, Rapport de stage, LMC INSA de Lyon, (1996).
- [FOY99] R. Foy, la physique cours et exercice ", (1998-1999)
- [FREN86] J. Frene, La tribologie de l'antiquité à nos jours, Bulletin de l'union des physiciens, (1986).
- [FREN90] J. Frene et al, Lubrification hydrodynamique, Edit Eyrolles, Paris, (1990).

- [JACQ09] G. Jacquet, Étude de la cinétique de recristallisation au cours du laminage à chaud de l'acier ferritique inoxydable K45, rapport interne Aperam, (2009).
- [KUBI98] J. Kubié, Le test de bipoinçonnement : étude théorique – Application à l'étude du transfert de matière dans un contact frottant, Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, CEMEF, (1998).
- [LAND97] D. Landolt, Traité des Matériaux, vol. 12, Presses polytechniques et universitaires des, (1997).
- [MONT93] P. Montmitonnet, Lois de frottement et déformation plastique, Matériaux et techniques N°1-2-3 (1993).
- [OECD69] OECD, M, Glossary of terms and definition in the field of friction, Organization for economic cooperation and development (1969).
- [PIEU64] A. Pieuchot, J. Blouet, R. Gras, R. Courtel, Méc. Mat. Elec., Gami, Paris, oct. (1964).
- [RABI65] E. Rabinowicz, Friction and wear of materials. John Wiley and sons Inc.,) New York - London – Sydney (1965).
- [ROND87] F. Rondé-Oustau, Le plissement en emboutissage : approche phénoménologique et expérimentale. 5e partie, Chap. 1, Physique et Mécanique de la Mise en Forme des Métaux (1990), Presses du CNRS (École d'été d'Oléron) (1987).
- [RYMU89] Z. Rymuza, Tribology of miniature systems, Elsevier, Tribology Series 13, (1989).
- [TABO73] D. Tabor, in NEALE, MJ(ED). , Tribology Handbook butterworths. (1973).
- [WILC77] D. Wilcock Strategy for Energy Conservation through Tribology, Materials Science, (1977).
- [WITH50] J.R. Withhead, Surface deformation and friction of metals at light loads, Proc. ROY. Soc. London, (1950).

Chapitre II

Synthèse sur les aciers rapides et les aciers faiblement alliés

II. Introduction

Selon le dictionnaire ROBERT, un acier est un «alliage de fer et de carbone (moins de 1,5%) auquel on donne, par traitement mécanique ou thermique, des propriétés variées (malléabilité, résistance...)».

Selon la norme NF EN 10020 (qui en juin 1989 a remplacé la norme NF A 02-025), «acier et un matériau dont le fer est l'élément prédominant, sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2% et il contient d'autres éléments ; un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2%, mais cette valeur de 2% est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte» [BENG07].

À la lecture de ces deux définitions, on constate que la limite supérieure de la teneur en carbone des alliages Fe-C susceptibles de s'appeler des aciers (par différence avec les fontes) est délicate à préciser. C'est la raison pour laquelle il peut être préférable d'adopter un point de vue plus métallurgique en prenant en compte la différence intervenant lors de la solidification de ces alliages.

La solidification d'une fonte s'achève par une réaction eutectique qui inclut la précipitation de carbure de fer et/ou de graphite [TAYL06].

II.1 Les différentes classes d'aciers

Les familles d'aciers sont classées en deux critères :

A- Composition chimique : nature et teneur des éléments d'alliage, aciers non alliés ($\leq 1\%$ d'éléments d'alliage), aciers peut allier (teneur de chaque éléments d'alliage $\leq 5\%$), aciers très alliés.

B- Propriétés d'usage ou qualité : aciers de qualité, aciers spéciaux, (aciers d'usage général, aciers de construction mécanique, aciers pour appareils à pression, aciers à outils, aciers inoxydables).

C'est ainsi que la norme NF EN 10020 distingue selon des classes de qualité définies dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Les différentes classes d'aciers [MURR04].

Aciers	Non alliés	Alliés
De qualité	Aciers de qualité non alliés	Aciers de qualité alliés
Spéciaux	Aciers spéciaux non alliés	Aciers spéciaux alliés
Inoxydable		Aciers inoxydables

II.1.1 Caractéristiques de l'acier

L'acier est un matériau ductile, il peut subir des changements de forme par compression ou extension plastiques à chaud ou à froid. Il est caractérisé, en outre, par une propriété fondamentale : on peut modifier sa structure et ses propriétés par traitement thermique. Cependant, certains aciers alliés ne présentent pas cette propriété et leur utilisation est due à d'autres caractéristiques. L'acier peut durcir également sous l'effet d'autres traitements que la trempe, par exemple par écrouissage (travail mécanique à froid) ou diffusion d'éléments à partir de la surface (ajout d'azote par nitruration par exemple).

La possibilité d'attribuer aux aciers une gamme étendue de propriétés grâce à des traitements thermiques, mécaniques, thermomécaniques et thermochimiques est à l'origine du très large éventail d'utilisations de ce matériau. Les aciers ordinaires présentent divers défauts qui limitent leurs utilisations [BENG07]. Très souvent, la résistance aux sollicitations mécaniques est en cause ; parfois, c'est l'attaque par des réactifs chimiques ou même simplement par l'atmosphère, lorsqu'elle est humide ou polluée.

On a réussi à pallier ces inconvénients et à élargir les domaines d'emploi des aciers en ajoutant une certaine quantité d'éléments métalliques ou non métalliques. On obtient ainsi une importante gamme d'aciers alliés bien adaptés à des situations très diverses.

II.1.2 Classification des aciers

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers [BENG07] :

- Aciers au carbone d'usage général,
- Aciers de traitements thermiques, alliés ou non,
- Aciers à outils
- Aciers inoxydables

II.1.2.1 Aciers ordinaires ou aciers au carbone

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 80 % de la production des aciers tableau 2.2. Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %), phosphore (0.06%). Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans ces aciers

Tableau 2.2 : Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés [BENG07].

Nuance	Pourcentage de carbone (C)	Résistance R_m (MPa) état recuit	Emplois
Extra-doux	$C < 0,15$	330-420	Tôles, carrosserie, feuillards, quincaillerie et pièces de forge.
Doux	$0,15 < C < 0,20$	370-460	Charpente métallique, profilés, construction mécanique courante, boulons et fils ordinaires.
Demi-doux	$0,20 < C < 0,30$	480-550	Pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés et pièces forgées.
Demi-dur	$0,30 < C < 0,40$	50-650	Petit outillage, éléments de machines agricoles et organes de transmission.
Dur	$0,40 < C < 0,60$	650-750	Pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et traitées.
Extra-dur	$0,60 < C$	>750	outils d'usinage et découpe, câbles, et ressorts.

Traditionnellement, les matériaux de prédilection pour l'emboutissage et le bipoinçonnement sont l'acier extra-doux. Présentant des allongements élevés voisins de 40 %, une anisotropie forte ($r = 1,5$ à $2,5$), un écrouissage important et un module d'élasticité élevé (environ 200 GPa), ils répondent particulièrement bien aux sollicitations imposées par ce procédé [ROND87].

Les aciers à très bas carbone et sans interstitiels sont particulièrement bien adaptés au formage des pièces difficiles du fait de leur faible limite d'élasticité (110 à 150 MPa), de leur forte anisotropie ($r > 2$), de leur forte écrouissabilité et de leur allongement important.

II.2 Acier rapide

II.2.1 Historique

Le mérite de l'invention des aciers rapides revient aux Américains Taylor et Whites en 1903 [TAYL06].

En 1907, Taylor a signalé que le meilleur acier rapide contient 18,91% de tungstène, 0,23% de vanadium, 5,47% de chrome et 0,67% de carbone. Cela a conduit au développement de ce qui était considéré comme l'acier rapide standard pendant de nombreuses années, contenant 18% de tungstène, 4% de chrome et 1% de vanadium, ou quoi est maintenant connu comme l'acier rapide T1[ABDL86, TAYL07].

II.2.2 Introduction

Les aciers à outils sont utilisés, comme leur nom l'indique, dans tous les procédés d'usinage (tournage, perçage, fraisage...) et de mise en forme à froid et à chaud (poinçons, matrices, cylindres de laminoirs) des matériaux. Les aciers à outils font partie intégrante du domaine des aciers spéciaux, mais ils diffèrent sensiblement des aciers de construction mécanique, tant par les conditions de leur utilisation que par les critères d'emploi qui servent à les définir. En effet, dans le cas d'un outil de qualité, on recherche le maximum de dureté, sans fixer de limite supérieure. Alors que l'acier de construction mécanique doit présenter une aptitude suffisante à l'emploi avec des caractéristiques spécifiques bien déterminées comme la tenue à la fatigue, la résistance à la rupture, l'aptitude à subir un cycle thermomécanique au cours de la mise en œuvre et l'usinabilité par ailleurs. L'outil est sollicité dans la plupart des cas au niveau de sa surface, qui doit supporter les contraintes les plus sévères, alors que les sollicitations d'un acier de construction intéressent l'ensemble du matériau [LEVE79]. De ce fait, ces aciers sont caractérisés par une dureté élevée, une bonne résistance à l'usure et une ténacité assez élevée [BANA97].

II.2.3 Définition des aciers rapides

Ces aciers sont caractérisés par une très grande dureté supérieure à 60 HRC à la température ambiante et par une très bonne dureté à chaud. Leur composition chimique comporte plus de 0,7

% de carbone et des éléments susceptibles de former des carbures : 4% de chrome dans tous les cas, du tungstène, du molybdène et de vanadium en proportion variables, éventuellement du cobalt pour améliorer les propriétés à chaud [DESA15].

L'utilisation des aciers rapides de coupe par rapport aux aciers à outils ordinaires, permet d'augmenter sensiblement la vitesse de coupe de 2 à 4 fois et la tenue de l'outil de 10 à 30 fois. L'élément d'alliage principal est le tungstène. Plus la teneur en tungstène est élevée, plus les qualités de coupe de ces aciers sont meilleures et ceci jusqu'à environ 23%. Au-delà de cette teneur, le tungstène semble n'avoir aucun effet.

Les teneurs en chrome sont en général, de l'ordre de 4 à 4,5 %. Le molybdène peut remplacer le tungstène et la tenue à chaud de ces aciers s'améliore en présence de vanadium et de cobalt.

Les aciers rapides contiennent des carbures lédéburitiques. A l'état recuit, ils sont constitués de ferrite alliée et de carbures de type M_6C , $M_{23}C_6$, MC , M_3C dont le principal acier dans les aciers rapides est le M_6C , la ferrite comporte la plus grande partie dissoute de chrome.

La structure d'un acier moulé comporte un eutectique complexe qui ressemble à la lédéburite et qui se dépose aux joints de grains.

Pour assurer une bonne tenue à chaud, les outils rapides sont soumis à une trempe de 1200 à 1300°C pour avoir une meilleure dissolution des carbures secondaires, et obtenir au chauffage, de l'austénite hautement alliée au Cr, W, Mo, et V. Ceci assure, après trempe, une structure martensitique à haute stabilité, donc une bonne tenue à chaud. La trempe est suivie d'un revenu multiple à haute température [BENS19].

II.2.4 Classification des aciers rapides

La propriété essentielle d'un acier à outil est la dureté qui exprime la résistance du matériau à l'enfoncement ou à la déformation. Cette propriété doit être atteinte soit à la température ambiante, soit le plus souvent à chaud avec des maintiens sous charge souvent prolongés. Suivant la composition chimique de l'acier, des niveaux de duretés compris entre 40 et 70 HRC peuvent être obtenus après un traitement thermique de trempe et un revenu.

Dans la mesure où les phénomènes de contact avec les matériaux mis en forme par déformation à froid ou à chaud ou par usinage peuvent entraîner des échauffements importants, il est nécessaire l'acier constituant l'outillage ait en plus une résistance à chaud suffisante pour éviter un adoucissement trop important en service.

C'est cette dernière propriété qui permet de classer les aciers à outils en quatre groupes conformément à la norme ISO/DIS 4957 qui a remplacé la norme NF A 35590. Cette norme s'applique à toutes les normes de produits laminés à chaud ou à froid, forgés ou étirés, et ne prend en compte que les aciers ont acquis une certaine renommée internationale. Elle désigne les aciers à outils suivants quatre groupes différents :

1. Les aciers non alliés pour travail à froid,
2. Les aciers alliés pour travail à froid (température de surface inférieure à 200°C),
3. Les aciers alliés pour travail à chaud (température de surface supérieure à 200 °C),
4. Les aciers rapides (température de surface peuvent atteindre, voire dépasser 600 °C).

Comparativement à la norme ISO/DIS 4957, la désignation américaine fait appel à des lettres qui rappellent, soit les propriétés d'emploi (H pour chaud), soit la composition chimique (T et M pour les aciers contenant du tungstène ou du molybdène), soit les propriétés de mise en œuvre (W pour trempant à l'eau, O pour trempant à l'huile et A pour trempant à l'air).

II.2.4.1 Aciers à outils non alliés pour travail à froid

C'est les plus simples puisqu'ils ne contiennent que du fer et du carbone (0,45 à 1,2 %), les autres éléments y étant présents en teneurs résiduelles variables selon les matières premières et le mode d'élaboration utilisés. A teneur en carbone égales, ces aciers acquièrent après trempe des duretés aussi élevées que celles des aciers alliés. Ils diffèrent cependant de ces derniers, par une trempabilité plus faible, ce qui limite leur emploi à des pièces de sections relativement étroites. Leur trempabilité limitée conduit également à l'emploi de moyens de trempe énergiques : eau pure ou salée, et plus rarement pour des pièces de faible section, l'huile [COLO00]. En contrepartie, les aciers au carbone sont moins durs à l'état recuit et présente de ce fait, une usinabilité et une aptitude de formage à froid bien meilleure [COLO71].

II.2.4.2 Aciers à outils alliés pour travail à froid

Ces aciers dont la dureté à la température ambiante est supérieure à 50 HRC, mais avec un abaissement sensible au-dessus de 300°C, peuvent être divisés en quatre groupes, selon les propriétés d'emploi requis :

II.2.4.2.1 Aciers résistants aux chocs mécaniques

Caractérisés par des teneurs en carbone compris entre 0,35 et 0,6% et des additions de chrome, de silicium, de nickel ou de tungstène (50WCrV8, 45NiCrMo16, 35CrMo7) ;

II.2.4.2.2 Aciers résistants à l'usure

Caractérisés par des teneurs en carbone supérieurs à 0,9%, avec des additions de manganèse, de chrome et de vanadium (105V, 99Cr6, 90MnCrV8, 95MnWCr5).

II.2.4.2.3 Aciers à très haute résistance à l'usure

Caractérisés par des teneurs en carbone supérieurs à 0,9 % et des teneurs importantes en chrome, en molybdène et en vanadium (X100CrMoV8, X153CrMoV12, X210Cr12, X210CrW12).

II.2.4.2.4 Aciers résistant à la corrosion, caractérisés par des additions importantes de chrome et des teneurs en carbone voisines de 0,4 % (X40Cr14, X38CrMo16).

II.2.4.2.5 Aciers à outils alliés pour travail à chaud

Ils sont caractérisés par une dureté à la température ambiante relativement élevée, comprise entre 40 et 56 HRC, et par une bonne dureté à chaud. Ces aciers sont répartis en trois groupes :

II.2.4.2.6 Aciers résistants aux chocs mécaniques

Ils sont analogues aux aciers de construction à hautes caractéristiques, mais avec une teneur en carbone plus élevée et une addition de vanadium pour augmenter la résistance au revenu (55NiCrMoV7, 50CrMoV13-15).

II.2.4.2.7 Aciers résistants aux chocs thermiques

Ils sont centrés sur les compositions chimiques à 3 et 5% de chrome, avec addition de molybdène, de tungstène, de vanadium, éventuellement de cobalt pour augmenter les propriétés mécaniques à chaud (32CrMoV12-28, X37CrMoV5-3, X38CrMoV5-1, X35CrWmoV5).

II.2.4.2.8 Aciers résistants à l'usure aux températures élevées

Ils comportent des nuances à forte addition de tungstène, de chrome, de molybdène et de cobalt afin d'augmenter la pénétration de trempe et le niveau de caractéristiques mécaniques [8].

La présence de ces éléments en teneurs élevées contribue à un meilleur comportement à chaud de ces aciers, qui conservent ainsi aux températures de service des valeurs élevées de dureté et de résistance à l'usure ainsi qu'au fluage. La résistance à l'adoucissement au revenu s'en trouve également améliorée. Ces avantages comportent, en contrepartie, une moins bonne tenue aux chocs mécaniques ou thermiques. La nécessité d'appliquer des températures de trempe élevées implique la prise en considération de grandes précautions quant au réchauffage de trempe, et au non refroidissement à l'eau des outillages ainsi chauffés [COLO71]. (X30WCrV9-3, 38CrCoWV18-17-17).

II.2.4.3 Aciers rapides (HSS)

Dans cette partie, on expose les caractéristiques principales de l'acier que nous avons utilisé comme poinçons dans nos essais exploratoires.

II.2.4.3.1 Définition

Les caractéristiques de ces aciers ont été évoquées dans le paragraphe §(II.1.1). On rappelle que les aciers rapides contiennent des carbures lédéburitiques. A l'état recuit, ils sont constitués de ferrite alliée et de carbures de type M_6C , $M_{23}C_6$, MC , M_3C dont le principal acier dans les aciers rapides est le M_6C , la ferrite comporte la plus grande partie dissoute de chrome.

II.2.4.3.2 Les nuances des aciers rapides

Ces aciers peuvent être classés suivant l'élément de l'alliage dominant en :

II.2.4.3.2.1 Aciers rapides au tungstène

Le tungstène a été le premier élément d'addition principal utilisé. L'acier de base HS 18-0-1 a été longtemps le plus employé. C'est en 1912 que l'Allemand Becker proposa l'addition de 5% de cobalt et créa la nuance HS 18-1-1-5. Le rôle du cobalt est de stabiliser les carbures à chaud. La dureté à chaud s'en trouve donc améliorée et, par conséquent, la capacité à supporter les vitesses de coupe plus élevée.

II.2.4.3.2.2 Aciers rapides au molybdène

Bien que découverts vers 1910, les aciers rapides au molybdène n'ont connu leur développement qu'à partir de 1945, en raison de la pénurie de tungstène durant la seconde guerre mondiale.

Ce développement tardif est dû au risque de décarburation et de démolybdénisation de ces aciers, tant au cours de leur fabrication qu'au cours des traitements thermiques, ainsi qu'à leur susceptibilité à la surchauffe due à un domaine de température d'austénitisation très étroit.

Alors que les aciers rapides au tungstène peuvent être traités dans des fours à air, les aciers rapides au molybdène nécessitent des traitements thermiques en bains de sel ou en four sous vide.

Les avantages des aciers rapides au molybdène par rapport à ceux au tungstène sont importants :

- Le molybdène est plus abondant dans la nature que le tungstène ;
- Le molybdène a une influence double de celle du tungstène sur les capacités de coupe de l'acier : 1% de molybdène remplace 2% de tungstène ;
- Il est possible d'obtenir des duretés plus élevées avec les aciers au molybdène et, à dureté égale, leur résistance aux chocs est supérieure à celle des aciers au tungstène ; - le prix de revient des aciers au molybdène est sensiblement inférieur à celui des aciers au tungstène.

La nuance HS 2-9-1-8 est, actuellement la plus employée des nuances d'aciers rapides à l'exception des outils pour opérations axiales (forêt, taraud) pour lesquels la nuance HS 6-5-2-5 est également très employée.

II.2.4.3.2.3 Aciers rapides surcarburés

Les aciers rapides surcarburés, c'est-à-dire ceux dont la teneur en carbone est supérieure à 1 %, permettent d'obtenir des duretés allant jusqu'à 70 HRC soit environ 1035 HV (figure 2.1). La limite de dureté des matériaux usinables a par la suite été reculée. C'est ainsi que l'on peut usiner des aciers jusqu'à 52 HRC (soit environ 550 HV).

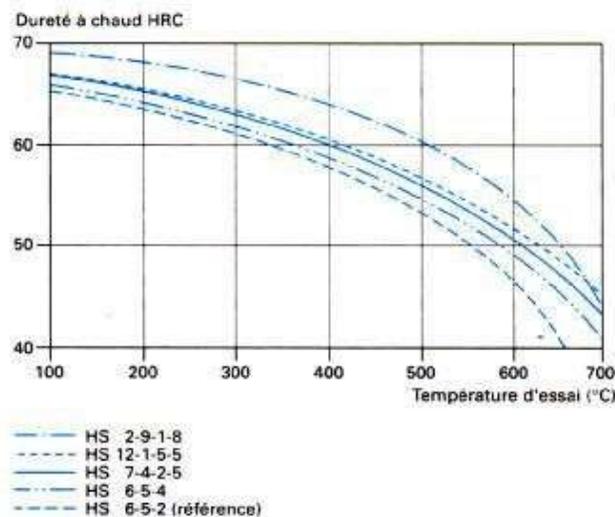


Figure 2.1 : Dureté de quelques aciers rapides surcarburés en fonction de la température [TAYL06].

Parmi les nuances d'aciers rapides surcarburés les plus employées selon la norme Américaine (AISI), citons :

- HS 6-5-4 ou M4
- HS 7-4-2-5 ou M41
- HS 2-9-1-8 ou M42
- HS 12-1-5-5 ou T15

II.2.4.3.2.4 Aciers rapides surcarburés au cobalt

Caractérisés par de hautes teneurs en carbone et en vanadium, avec des additions de cobalt pouvant atteindre 10% (HS 6-5-3-8) [COLO00].

II.2.4.3.2.5 Aciers rapides spéciaux au cobalt

Ce sont des aciers rapides qui contiennent, en plus de la teneur moyenne, environ entre 2 et 15% Co. Ils sont destinés à être utilisés dans des conditions de travail très sévères.

- Usinage de métaux durs (aciers traités, fontes trempes).
- Vitesses de coupes très élevées (tours automatiques, tours à barres).
- Section du copeau forte (dégrossissage, rabotage).

II.2.4.3.2.6 Aciers rapides courants

Ces Aciers sont aussi appelés «aciers 18-4-1» et ils contiennent environ 18% W, 4% Cr, 1% V. Ils sont employés pour les outils coupants à grande vitesse (forets, tarauds, alésoirs, ...), ainsi que pour le petit outillage demandant une grande résistance à l'usure à chaud et sans chocs thermiques (matrices spéciales, filières,...).

II.2.4.3.2.7 Aciers extra-rapides

Ces aciers contiennent en moyenne 18 % W, 4 % Cr, 1 % Mo et 2 % V. Ils sont utilisés pour outils de finition devant présenter des arêtes aiguës et une grande constante de profil (peignes à fileter les tubes, fraises, broches, alésoirs, ...).

II.2.4.3.2.8 Aciers au molybdène-cobalt

Ce sont des aciers à coupe rapide ; de dureté exceptionnelle (59 à 70) HRC, permettant d'usiner les alliages à haute résistance massique et les alliages réfractaires.

Le tableau 2.3 fournit les compositions chimiques moyennes des principales nuances d'aciers rapides normalisées en France [ACH006].

Tableau 2.3 : Composition chimique des principales nuances d'aciers rapides normalisées.

Désignation de la nuance	Composition chimique (%)							
	EN 10027-1	AISI	C	Cr	W	Mo	V	Co
Acier de base								
HS 18-0-1		T1	0.80	4	18		1.1	
HS 6-5-2		M2	0.85	4	6	5	2	
HS 2-8-1		M1	0.85	4	2	8	1.2	
HS 2-9-2		M7	1.00	4	2	9	2	
Aciers Sur Carbur2s								
HS 6-5-3		M3 type 2	1.20	4	6	5	3	
HS 6-5-4			1.3	4.5	6	5	4	
Aciers au cobalt								
HS 18-1-1-5		T4	0.80	4	18	0.8	1.3	5
HS 18-0-2-10		T5	0.80	4	18		1.5	10
HS 6-5-2-5		M35	0.85	4	6	5	2	5
Aciers au cobalt à haute teneur en carbone								
HS 7-4-2-5		M41	1.10	4	7	4	2	5
HS 2-9-1-8		M42	1.10	4	1.6	9	1.1	8
Aciers surcarburés au cobalt								
HS 12-1-5-5		T15	1.60	4.5	12	5	5	
HS 10-4-3-10		-	1.30	4	9.5	3.6	3.2	
HS 7-6-3-12		M44	1.30	4	6	3.2	3.2	

Le tableau 2.4 compare les propriétés d'emploi des nuances d'aciers rapides les plus courantes. Avec l'aide du tableau 1, on observe l'influence sur les propriétés de l'acier des divers éléments d'alliage, notamment du cobalt et du vanadium [ACHO06].

Tableau 2.4 : Comparaison des caractéristiques d'emploi des nuances les plus courantes d'aciers rapides.

Désignation de la nuance (en 10027-1)	Résistance à l'usure	Ténacité	Dureté à chaud	Aptitude au moulage
HS 6-5-2	5	7	4	8
HS 6-5-4	8	5	7	2
HS 6-5-2-5	5	5	7	6
HS 2-9-1-8	8.5	5	9	5.5
HS 18-0-1	4	6.5	4	8
HS 18-1-1-5	5	4	7	6
HS 12-1-5-5	9	2.5	8	1
La caractéristique considérée est notée de 1 (médiocre) à 10 (excellente).				

II.3 Propriétés des aciers à outils

II.3.1 Dureté

Il faut que la dureté soit élevée, si l'on veut éviter que des déformations ne se produisent en service, et si l'on veut doter l'acier d'une bonne résistance à l'enfoncement. Par ailleurs, l'acier doit souvent faire preuve d'une dureté suffisante à chaud (jusqu'à 600°C). A titre d'exemple, la Figure I.2 on présente la variation de la dureté en fonction de la température de revenu pour quelques aciers à outils.

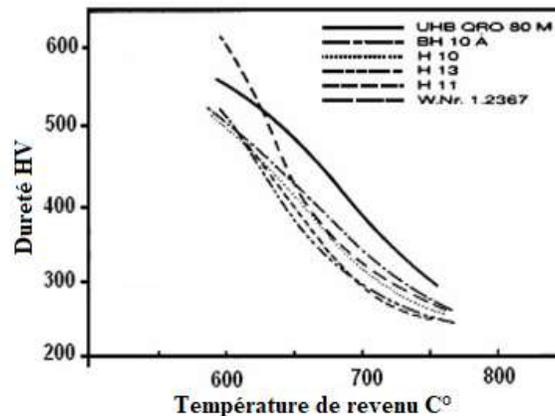


Figure 2.2 : Evolution de la dureté en fonction de la température de revenu pour quelques nuances d'aciers à outils de travail à chaud [ACH006].

II.3.2 Trempabilité

Les outils doivent avoir des propriétés homogènes ; pour les pièces massives, ils doivent présenter une bonne trempabilité. Un grand pouvoir trempant est également nécessaire si l'on veut éviter que des déformations en cours de traitement ou en cours d'utilisation n'apparaissent.

II.3.3 Tenue à chaud

La tenue à chaud est essentielle dans beaucoup de cas d'outils de coupe rapide, moules, filières d'extrusion, matrice de forgeage, etc. En plus de la dureté, la tenue à chaud doit reposer sur de bonnes propriétés mécaniques, une bonne résistance au fluage et une excellente résistance à l'oxydation.

II.3.4 Ténacité

Les cadences de fabrication étant de plus en plus élevées, il faut que les aciers à outils résistent bien aux chocs, sans se briser ni s'écailler. La Figure 2.3 représente l'évolution de la ténacité de quelques aciers à outils en fonction de la température.

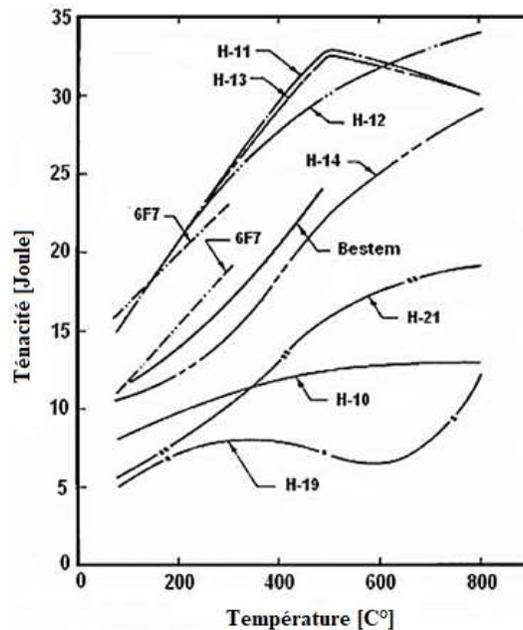


Figure 2.3 : Evolution de la ténacité en fonction de la température de quelques aciers à outils [COLO71].

II.3.5 Résistance à l'usure

Les outils (de coupe ou de mise en forme) sont en continuel frottement avec les pièces qu'ils servent à fabriquer, ainsi, ils doivent conserver leur tranchant et leur géométrie le plus longtemps possible en l'occurrence, ils doivent présenter une bonne résistance à l'usure [DORL86].

II.3.6 Résistance aux chocs thermiques

Plusieurs types d'outils sont soumis à des chocs thermiques sévères et nombreux, auxquels ils doivent résister sans se déformer ni se fissurer [DORL86].

II.4 Composition chimique

L'obtention de caractéristiques mécaniques que requièrent les aciers d'outillages nécessite l'ajout à l'acier de base d'un certain nombre d'éléments d'alliage carburigène (chrome, tungstène, molybdène, vanadium) afin d'obtenir des carbures spéciaux aussi bien après l'élaboration et les

transformations à chaud (carbures primaires) qu'après traitement thermique (carbures secondaires). A ces éléments d'alliages constituant les bases des aciers à outils peuvent également s'ajouter d'autres éléments pour améliorer telle ou telle propriété fonctionnelle [COLO00].

II.4.1 Le Carbone

C'est l'élément essentiel de durcissement de l'acier. Au-delà de 0,6 % de carbone, on atteint la zone des aciers à outils caractérisée par un haut niveau de dureté correspond au domaine des aciers de travail à froid et des aciers à coupe rapide. Il faut noter que l'augmentation de la teneur en carbone conduit à l'abaissement de la température du liquidus et du solidus réduisant ainsi les domaines de température correspondant à la transformation à chaud et au traitement thermique.

II.4.2 Le Chrome

Cet élément est utilisé dans la plupart des aciers à outils, en quantité allant de 0,5 à 17 %. Cet élément alphasène joue un rôle essentiel dans l'augmentation de la trempabilité. Bien qu'ayant un pouvoir carburigène inférieur à celui du tungstène, il forme des carbures du type M_7C_3 qui participent à la résistance à l'abrasion et s'opposent au grossissement du grain lors de l'austénitisation.

II.4.3 Le Tungstène

Il a été l'un des éléments d'alliage les plus employés dans le domaine des aciers à outils en raison de son pouvoir carburigène très important donnant naissance à des carbures de haute dureté ce qui confèrent aux aciers une grande résistance à l'usure. De plus, favorise le durcissement secondaire.

II.4.4 Le Molybdène

Cet élément a un comportement analogue à celui du tungstène. Cependant, sa diffusivité dans le fer est quatre fois supérieure à celle du tungstène, ce qui entraîne une moins grande sensibilité de cet élément au phénomène de ségrégation. Les aciers au molybdène présentent, par rapport aux aciers au tungstène, un certain nombre d'avantages (meilleure ductilité et densité plus faible ; mise en solution plus facile des carbures de molybdène) et d'inconvénients (plus grande sensibilité à la décarburation et au phénomène d'oxydation catastrophique pour des maintiens entre 1000 et 1100 °C, plus grande sensibilité au phénomène de surchauffe, d'où réduction de la fourchette de température de trempe) [LEVE79].

II.4.5 Le cobalt

Il améliore les propriétés à chaud et la ténacité des oxydes formés en service,

II.4.6 Le manganèse et le nickel

Ils augmentent la trempabilité des aciers à outils. Le nickel a un effet favorable sur la résistance aux chocs mécaniques, ainsi que son influence plutôt défavorable sur la résistance au revenu.

II.4.7 Le silicium

Il contribue à l'amélioration des propriétés élastiques, notamment pour les emplois à des températures inférieures à 300°C, et qui améliore la pénétration de trempe par effet de synergie notamment avec le molybdène,

II.2.8 Le soufre

Qui peut être ajouté pour améliorer les propriétés d'aptitude à l'usinage. D'autres éléments d'alliage présentent un aspect plus prospectif, comme l'azote qui est ajouté au moment de l'élaboration soit par l'intermédiaire de ferroalliages nitrurés, soit par coulée sous laitier avec mise sous pression à 4 bars pour faciliter son insertion. Ajouter en substitution partielle au carbone, l'azote entraîne une amélioration des propriétés mécaniques à chaud et de la résistance à la corrosion d'acier à outils contenant des teneurs en chrome égales 12% au minimum. Par contre, il abaisse la résistance aux chocs, l'aptitude à l'usinage par des moyens comme l'électroérosion, ainsi que l'aptitude au soudage [COLO00].

II.5 Recuit :

Objectif : éliminer toute l'histoire thermique de l'acier en ramenant le métal à l'équilibre physico-chimique et mécanique.

Principe : réaliser un cycle thermique

- Chauffage à une température de recuit
- Maintien isotherme à cette température
- Refroidissement lent dans l'air ou le four

Propriétés recherchées :

- Ductilité maximale

- Dureté minimale
- Bonnes propriétés mécaniques

Dans la pratique, on distingue différents recuits en fonction des buts à atteindre :

- Le recuit d'homogénéisation
- Le recuit de régénération
- Le recuit complet
- Le recuit de détente

II.5.1 Recuit d'homogénéisation

Objectif : réduire les hétérogénéités de composition chimique engendrées par le procédé de solidification pour réduire ces hétérogénéités, on fait intervenir la diffusion en portant l'acier à haute température ($T > 1100^{\circ}\text{C}$) et en le maintenant à cette température pendant le temps nécessaire pour obtenir le résultat souhaité. Le maintien est suivi d'un refroidissement assez rapide, provoquant généralement un fort grossissement des grains, nécessite d'affiner ultérieurement (réalisation d'un recuit de régénération).

II.5.2 Recuit de régénération

Objectif : affiner le grain de l'acier après que celui-ci ait subi un grossissement excessif à la suite d'une surchauffe accidentelle ou d'un recuit d'homogénéisation par exemple : L'affinement des grains de l'acier est possible grâce à la transformation austénitique et au processus de germination et de croissance de l'austénite. Le maintien à T maximale du cycle assure la mise à T uniforme de la pièce à T ambiante, la structure de l'acier est constituée de ferrite (ou de cémentite) et de perlite.

II.5.3 Recuit complet

Objectif : homogénéiser la structure d'un acier non allié ou faiblement allié ; il permet aussi d'affiner le grain de cet acier. Il se définit essentiellement par son cycle thermique qui comporte :

- une austénitisation (conditions identiques que celle qui précède la trempe).
- un refroidissement à l'air libre.

Un des intérêts de ce recuit est d'obtenir un matériau dont l'usinage et la déformation à froid est facilitée.

II.5.4 Recuit de détente

Objectif : diminuer les contraintes résiduelles préalablement générées par des cycles thermiques ayant créé, des gradients thermiques et donc des déformations hétérogènes (à

l'occasion d'opération de formage, de soudage ou de traitements thermiques) Un traitement de relaxation comporte un chauffage relativement lent (limiter les contraintes liées au gradient thermique) à la température choisie :

- un maintien à la température choisie ;
- un refroidissement relativement lent (limiter les nouvelles contraintes liées au gradient thermique)

Références bibliographiques chapitre II

- [**ABDL86**] R. Abdel monem, A study of the microstructure and wear of high-speed steels, Thèse de doctorat, University de Salford, United Kingdom, (1986).
- [**ACHO06**] A. Achour, Etude du comportement en usure des outils de coupe en fonction du revêtement, Thèse de Doctorat, Université Mentouri – Constantine, Algérie, (2006).
- [**BANA97**] J. Banalis, G. Meader, Précis de métallurgie-Elaboration, structure, propriétés, normalisée ; Edition Nathau (1997).
- [**BENG07**] N. Benghalem, Étude des mécanismes d'usure et de frottement de deux aciers X12NiCrMoSi25-20 et le 25CrMo4, Thèse de doctorat d'IOMP de Sétif, (2007).
- [**BENS19**] S. Bensaada, Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes, polycop, Université Mohamed khider, (2019).
- [**COLO00**] M. Colombie, Matériaux industriels, matériaux métallique ; DUNOD, Paris (2000).
- [**COLO71**] L. Colombier, les aciers à outils et leur traitement thermique, PYCEDITION, Paris, (1971).
- [**DESA15**] Jean-E Desaignes Contribution à l'étude de l'amélioration de l'usinabilité des aciers Analyse des Couches de Transferts Sélectifs (CTS) et caractérisation des conditions d'apparition (2015).
- [**DORL86**] J. Dorlot, J.Bailon, J.Massonave, Des matériaux ; 2eme Ed, DUNOD, (1986).
- [**LEVE79**] R. LÉVÊQUE, technique de l'ingénieur ; les aciers à outils (1979).
- [**MURR04**] G. Murry, Aide-Mémoire Métallurgie, Dunod, Paris (2004).
- [**ROND87**] F. Rondé-oustau, Le plissement en emboutissage : approche phénoménologique et expérimentale. (1987).
- [**TAYL06**] F.W. Taylor, On the art of cutting metals, ASME (1906).
- [**TAYL07**] F.Taylor. Trans. A. S. M. E.; (1907).

Partie expérimentale

Partie expérimentale I

Chapitre III

Conception et réalisation de la bipoinçonneuse

III.1. Introduction

Dans ce chapitre on présente la méthodologie adoptée pour la conception du dispositif de charge (bipoinçonneuse), qui permet d'exercer une force ou une contrainte sur une surface donnée. Premièrement, nous avons déterminé la fonction principale, ensuite les différentes fonctions partielles du dispositif lesquelles sont essentielles et aussi complémentaires.

Toute réalisation doit passer par une étape au cours de laquelle nous définissons toutes les caractéristiques du produit exprimant les besoins. L'aboutissement de cette phase est l'élaboration d'un cahier de charges fonctionnelles, qui guidera nos opérations de conception et nous permettra de mieux répondre à nos attentes.

III.2. Fonction principale

Le dispositif consiste pour écraser des tôles entre deux poinçons avec un effort et vitesse d'écrasement contrôlés, afin d'étudier l'effet du frottement lors de l'essai du bipoinçonnement sur le transfert de matière entre tôles-poinçons.

III.2.1. Fonctions partielles

Les fonctions partielles nécessaires pour le dispositif de bipoinçonnement sont :

- Variation de l'effort d'écrasement F suivant la nature du matériau des tôles
- Utilisation de différentes formes des poinçons
- Fixation et maintien de l'échantillon lors de l'essai
- Guidage contrôlé des poinçons lors de l'essai
- Variation de la force de poinçonnement et la vitesse d'écrasement
- Mesure et contrôle de la force de poinçonnement et la vitesse d'écrasement par des capteurs appropriés

L'étude de ces fonctions partielles citées ci-dessus nous a permis de connaître le rôle de chacune d'elles et par la suite proposer des solutions adéquates pour concrétiser la fonction principale de ce dispositif de bipoinçonnement.

III.3. Le cahier des charges Fonctionnel (CDCF)

Le cahier des charges fonctionnel (CDCF) est un document important dans une démarche de conception d'un produit. C'est un outil méthodologique par lequel le demandeur va exprimer son besoin auprès du concepteur-réalisateur. Il est aussi utilisé pour réparer et suivre le

développement du produit dans les différentes phases de son élaboration depuis l'idée jusqu'à la livraison.

Pour rédiger un cahier des charges fonctionnel, il est conseillé de suivre plusieurs étapes. Premièrement, il convient d'effectuer une étude d'opportunité. Il s'agit de déterminer avec précision les besoins et les attentes.

Deuxièmement, il faut mener une étude de faisabilité. Son objectif est de savoir si le projet est réalisable et économiquement fiable.

Troisièmement, il faudra faire une analyse fonctionnelle du besoin. On l'appelle aussi l'AFB. Elle consiste à lister toutes les fonctions du produit ou toutes les attentes auxquelles le service doit répondre.

Quatrièmement, il faudra définir l'expression fonctionnelle du besoin, dite EFB. Elle sert à organiser l'information.

III.3.1. Les exigences techniques du cahier des charges

Les exigences techniques du cahier des charges de la conception du dispositif de bipoinçonnement permet d'évaluer le coefficient de frottement après les tests expérimentaux en relevant certains paramètres expérimental comme la largeur et l'épaisseur des échantillons après d'écrasement.

- Destiné à faire des essais d'écrasement par bipoinçonnement
- Variation de l'épaisseur des éprouvettes : 0.5 mm à 100 mm
- Variation de la largeur des éprouvettes : 10 mm à 1000 mm
- Mesure de la déformation transversale (écrasement)
- Mesure des charges critiques
- Possibilité de réaliser des essais de flexion
- Bon fonctionnement et étalonnage facile pour les essais
- Montage et démontage facile de l'échantillon pendant l'essai (liaison encastrement et articulés).
- Fabrication des pièces du dispositif avec les moyens disponibles de l'institut.

- Manipulation facile d'essai.

III.3.2. Diagramme « bête à cornes » ou Analyse du besoin

Le diagramme bête à cornes est un outil utilisé pour l'analyse fonctionnelle du besoin. C'est un schéma qui démontre si le produit est utile pour l'utilisateur, s'il répond à ses besoins.

L'expression du besoin permet d'isoler l'objet étudié afin d'identifier le principal destinataire, sa matière d'œuvre, et d'exprimer sa fonction globale.

Pour établir la bête à corne, il est essentiel de se poser les trois questions suivantes :

- À qui, à quoi le produit rend-il service ?
- Sur qui, sur quoi agit-il ?
- Dans quel but existe-t-il ?

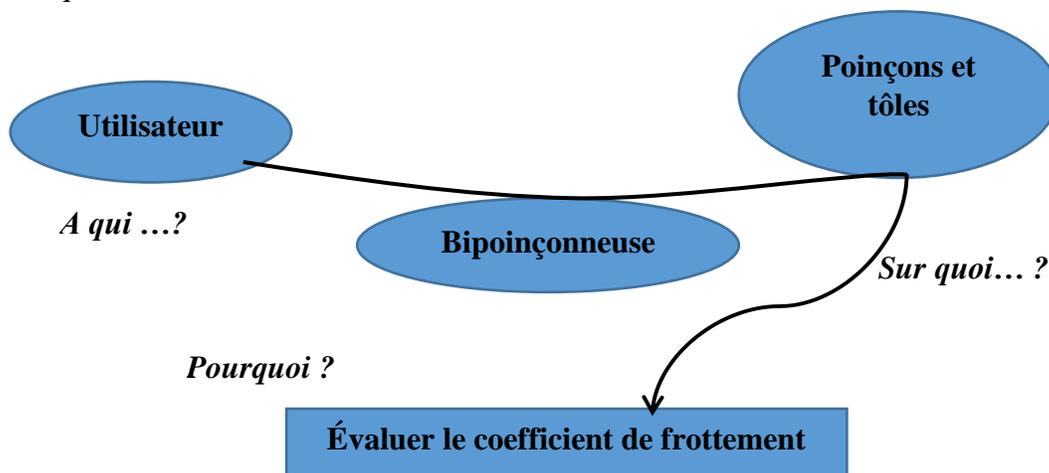


Figure 3.1 : Diagramme « bête à corne »

III.3.3. Diagramme « pieuvre »

Le diagramme pieuvre ou graphe des interactions est un schéma qui représente la relation entre un produit/service et son environnement. C'est un outil d'analyse utilisé dans le cadre de la méthode APTE (Application aux Techniques d'Entreprise). Ce diagramme est utilisé pour représenter la fonction de service d'un produit. Autrement dit, cela nous permet de voir quelles sont les fonctions principales, secondaires du produit et comment ces fonctions réagissent à l'environnement externe. Il est utilisé lors de l'analyse fonctionnelle.

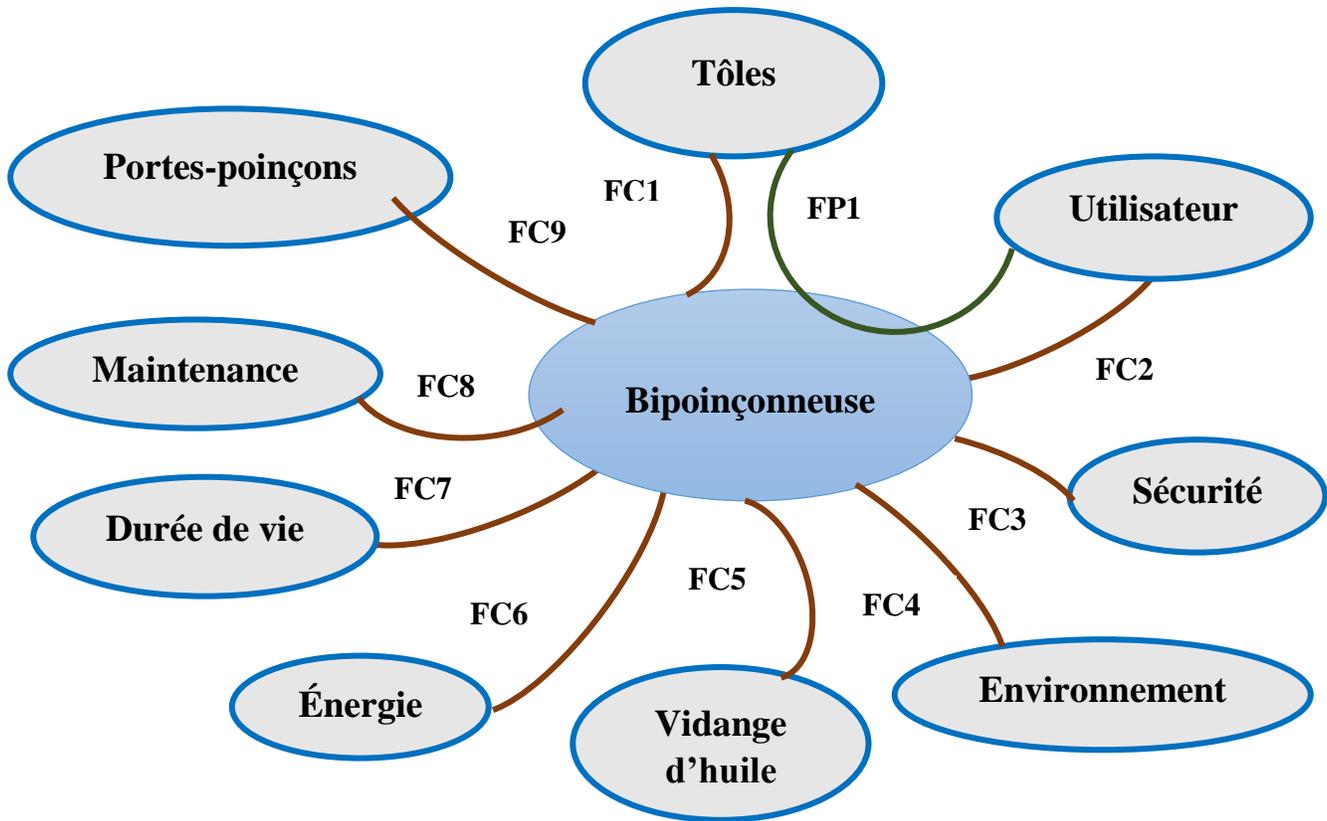


Figure 3.2 : Diagramme « pieuvre » des fonctions de la bipoinçonneuse

Le tableau 3.1 représente les caractéristiques des fonctions de la presse.

Tableau 3.1 : Caractéristiques des fonctions de la bipoinçonneuse

Fonction	Critère d'appréciations	Niveau	Flexibilité
FP1	Force de pression Résistance de la table	300 tonnes Acier	/
FC1	La table ajustable horizontale pour les deux directions.	Diamètre 800mm	/
FC2	Presse à hauteur utilisable	/	/
FC3	Etre conforme aux normes de sécurité	Sécurité	/
FC4	La table résistante au temps	Longue durée de vie	
FC5	Vérin à portée de main	/	/
FC6	S'adapter aux caractéristiques de l'énergie	Utiliser l'énergie fournie.	/
FC7	La table résistante au temps	Longue durée de vie	/
FC8	Système de montage (boulons, etc.)	/	/
FC9	Porte poinçon ajustable pour les deux directions	/	/

Pour résumer, il faut concevoir une bipoinçonneuse pouvant exercer une force équivalente à 300 tonnes, démontable, durable et possédant une hauteur de travail se situant dans le champ visuel.

III.3.4. Diagramme A-0 (SADT)

La méthode SADT figure 3.1, ou méthode d'analyse fonctionnelle descendante, est une méthode graphique qui part du général pour aller au particulier. Elle permet de décrire des systèmes complexes où coexistent différents flux de matière d'œuvre : systèmes automatisés, asservis ou intégrant l'informatique.

C : Paramètre de configuration. R : paramètre de réglage. E : données d'exploitation/consigne de fonctionnement. W : mise en énergie ou présence de matière d'œuvre.

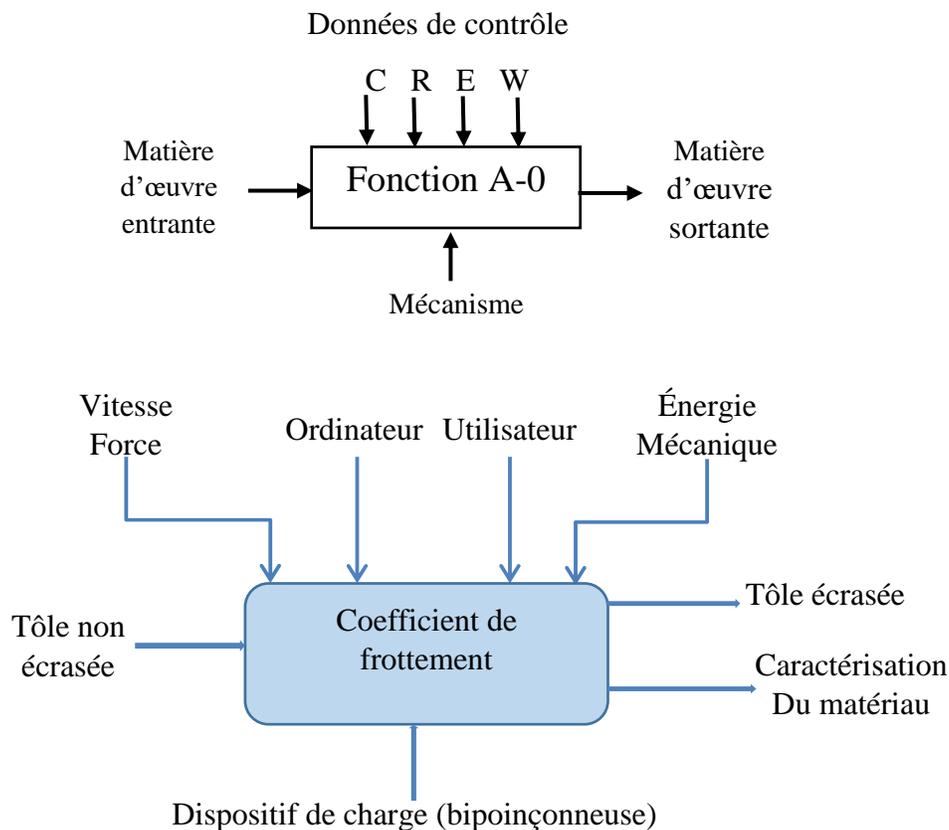


Figure 3.3 : Diagrammes A-0

III.4. Présentation et description de la conception de la bipoinçonneuse

La conception de la bipoinçonneuse a été réalisée à l'aide du logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) SolidWorks, qui est un outil de modélisation et de conception en 3D. Il offre aux concepteurs la possibilité de créer rapidement des concepts, d'expérimenter des fonctionnalités et des dimensions, afin de produire des modèles et des plans précis. Les fonctionnalités les plus couramment utilisées du logiciel SolidWorks sont :

- Modélisation 3D : SolidWorks permet de créer des modèles 3D précis à l'aide d'outils de création de formes, tels que l'esquisse, la fonction de base extrusion, la fonction de révolution, etc.
- Assemblage : Il permet de créer des assemblages 3D en ajoutant des pièces individuelles et en les fixant ensemble à l'aide de contraintes, telles que les contraintes de contact, les contraintes de positionnement, les contraintes d'alignement, etc.
- Mise en plan : SolidWorks facilite la création de dessins techniques détaillés à partir des modèles 3D. Il permet de générer automatiquement des vues orthographiques, des coupes, des sections, des vues éclatées, des dimensions, des cotations, etc.
- Simulation : SolidWorks propose des fonctionnalités de simulation qui permettent de tester virtuellement la résistance, la rigidité et les performances d'un modèle avant sa fabrication physique.

La forme et les dimensions de tous les éléments constituant la bipoinçonneuse sont déterminées en fonction des conditions d'essai suivant : l'effort appliqué, les dimensions de l'échantillon (poinçons et tôles), le mode de fixation et les dimensions de portes poinçons.

La bipoinçonneuse proposé peut répondre aux besoins de caractérisation mécaniques de transfère de matière des aciers, permettant la déterminions du coefficient de frottement et la contrainte d'écoulement.

La figure 3.4 illustre la conception 3D de la bipoinçonneuse réalisé avec le logiciel solid works.

La bipoinçonneuse est composée de plusieurs sous-ensembles tel que :

- Structure du bâti et table N
- Vérin hydraulique et fixation pour exercer l'effort de compression

- Alimentation hydraulique du vérin et commande
- Porte poinçon supérieur et inférieur et porte échantillon figure 3.4

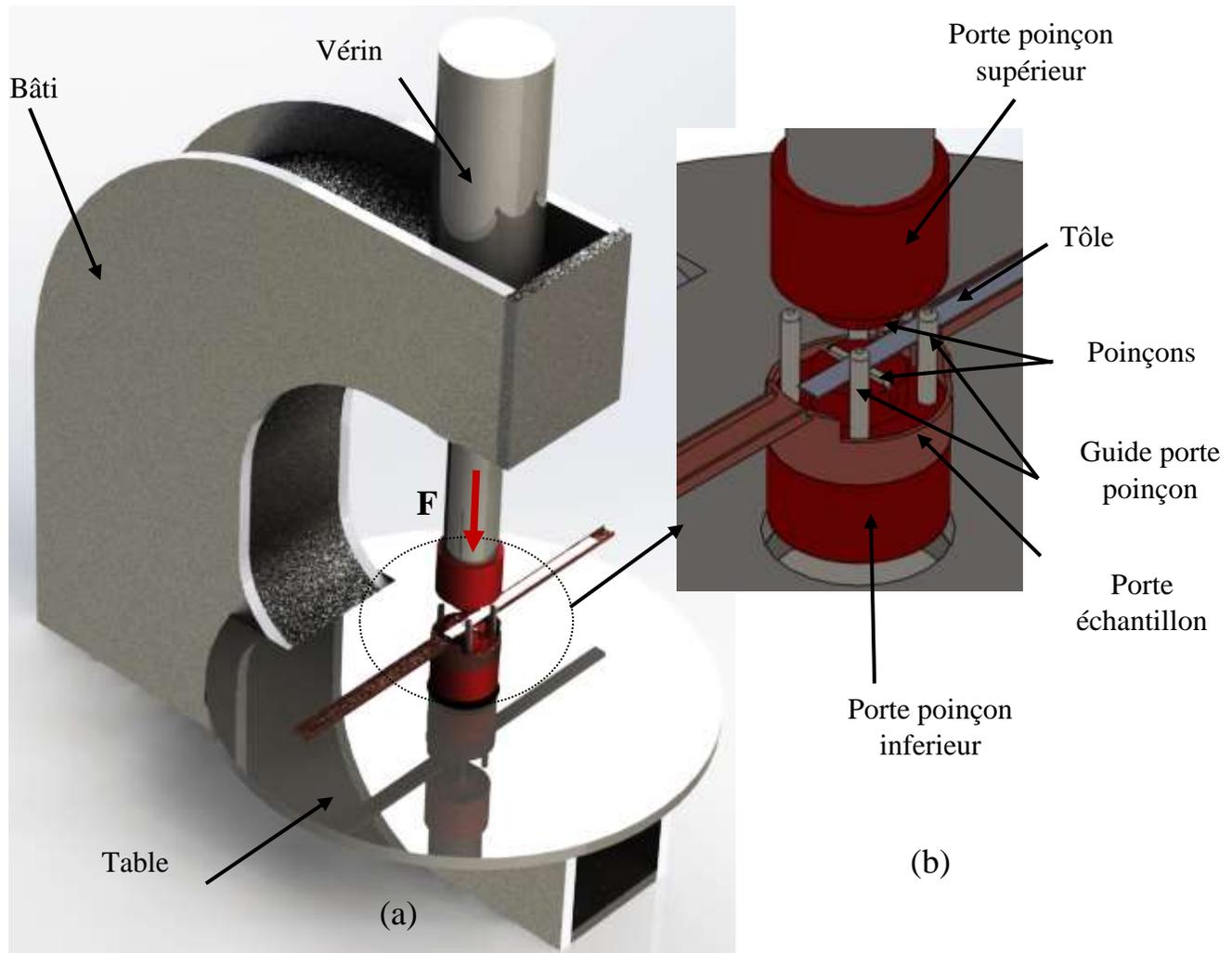


Figure 3.4 : Structure de la bipoinçonneuse en 3D (a) et (b) porte poinçon fixe et échantillon

III.4.1 Description de la conception de la bipoinçonneuse

III.4.1.1 structure du bâti

Le bâti de la bipoinçonneuse est constitué :

- Les dimensions du bâti sont : 1000x1000x240mm³
- Deux tôles en acier de longueur identiques : 1000*1000mm.

- Deux renforcements en acier plat de section 100*240mm.
- Une table en acier de la forme ronde de diamètre 1000mm soudée avec le bâti.
- Deux plaques de fermeture plates en acier.

La figure 3.5 et le tableau 3.2 montrent une vue éclatée des différents éléments constituant le bâti.

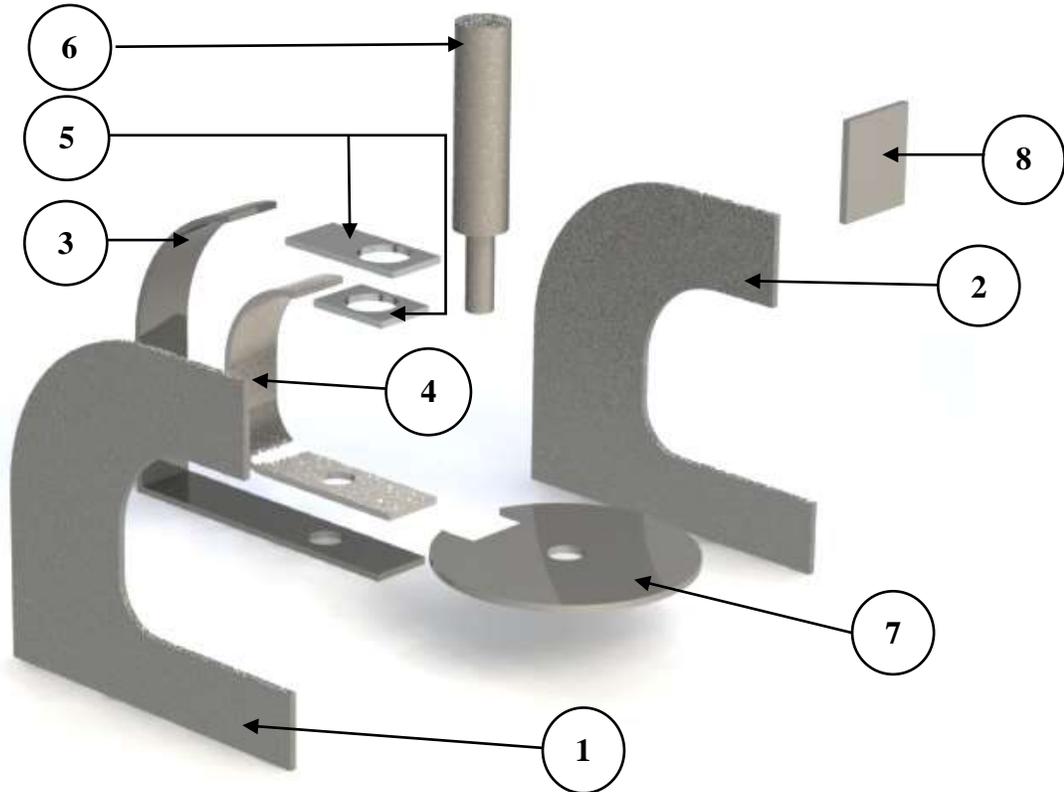


Figure 3.5 : Vue éclatée du bâti (bipoinçonneuse).

Tableau 3.2 : Les éléments constituant le bâti de la bipoinçonneuse.

N°	Quantité des pièces	Désignation
1	1	Côté gauche du support en acier de la bipoinçonneuse.
2	1	Côté droit du support en acier de la bipoinçonneuse.
3	1	Renforcement extérieur
4	1	Renforcement intérieur
5	1	Support du vérin (maintien)
6	1	vérin
7	1	table
8	2	Couvert

III.4.1.2 Porte poinçons et porte-échantillon

La figure 3.6 et le tableau 3.3 présente une vue éclatée des différents éléments constituant les portes poinçons (fixe et mobile).

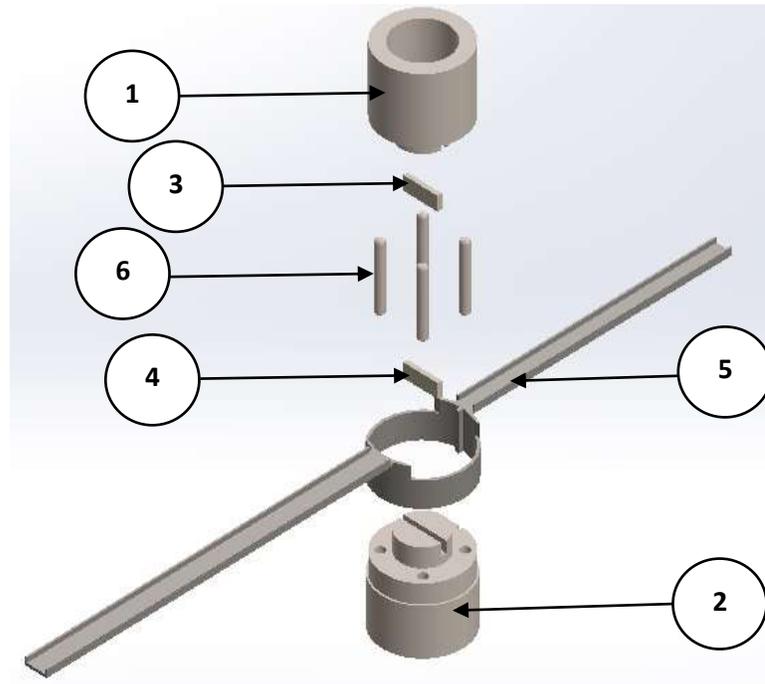


Figure 3.6 : Vue éclatée de l'ensemble portes-poinçons et porte-échantillon.

Tableau 3.3 : Les éléments constituant le porte poinçon.

N°	Quantité des pièces	Désignation
1	1	Porte poinçon mobile (mors supérieur)
2	1	Porte poinçon fixe (mors inférieur)
3	1	Poinçon supérieur
4	1	Poinçon inférieur
5	1	Porte échantillon (tôle)
6	1	Guidage du porte poinçon

La figure 3.7 montre la conception en 3D de l'ensemble portes-poinçons et porte-échantillon



Figure 3.7 : Vue générale de l'ensemble portes-poinçons et porte-échantillon.

III.4.1.3 Vérin hydraulique et commande du poinçon

Le rôle du vérin est d'exercer l'effort de compression pour appliquer le bipoinçonnement des échantillons figure 3.8. On a utilisé un capteur de pression relié directement avec le vérin hydraulique qui nous permet de mesurer l'effort de bipoinçonnement.

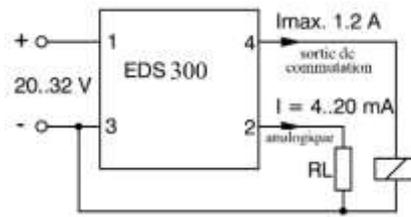
III. 4.2. Capteur de pression

Dans notre cas, on a utilisé un capteur de pression pour la mesure de la force de compression exercée par le poinçon supérieur de la machine.

Le capteur de pression nommé l'EDS 300 (figure 3.8 (a) et (b)) est un manostat électronique compact avec affichage digital intégré. Il propose quatre variantes de sortie différentes : avec deux points de commutation, ainsi que ses deux variantes avec un signal de sortie analogique supplémentaire 4...20 mA. Les points de commutation et hystérésis correspondantes se règlent par le biais des touches. L'appareil offre de nombreux paramètres de réglage supplémentaires, comme la temporisation à l'enclenchement ou au déclenchement et la fonction ouvrante / fermante des sorties, pour adapter de façon optimale l'appareil à chaque application. L'appareil convient parfaitement pour le montage de circuits de charge pour accumulateurs où le pilotage de compresseurs et de pompes. Il offre plusieurs possibilités de réglage et de programmation.



a) EDS 300



b) Schéma avec une sortie de commutation et une sortie analogique

Figure 3.8 : EDS 300 (a) et schéma de principe du manostat (b)

III.4.2.1 la détermination de l'effort de bipoinçonnement est effectuée par les relations suivantes

1- calcul de l'effort fourni par le vérin :

$$F = S.P \quad (3.1)$$

Avec : P la pression en [bar] donnée par le capteur EDS 300

S La section du piston du vérin de diamètre D=120mm

$$S = \frac{\pi.D^2}{4} \quad (3.2)$$

III.5. Conclusion :

Nous pouvons en conclure que nous avons pu réussir à concevoir et à réaliser la structure métallique de la bipoinçonneuse. La réalisation de la structure dépend essentiellement du choix du vérin, qui limite la taille et les dimensions de cette structure.

L'intérêt de ce projet est la conception et la réalisation d'une presse du laboratoire qui représente dans notre situation une presse mécanique constituée principalement d'une structure métallique et une pompe avec un moteur à trois chevaux.

Ce système est un mélange de l'électromécanique qui rassemble à donner une image d'intégralité, ce qui montre d'autres cotés la transformation de l'énergie électrique vers une énergie mécanique. Pour cela, on a opté d'utiliser une commande de position en boucle ouverte concernant

le contrôle du moteur. Ce produit réalisé et d'une grande importance pour être utilisé dans des travaux de fin de cycle des étudiants de l'IOMP lors des opérations dans l'usinage (emboutissage...) et les essais exploratoires dans les travaux pratiques.

L'automatisation de cette commande est réalisée par un logiciel de programmation. Afin de s'assurer des bons résultats de mesures de force, on a utilisé un capteur de force EDS 300, qui se compose de deux sorties une sortie analogique qui sera transformée par une carte électronique vers un signal numérique et une sortie de commande, dont le but de mesurer la force appliquée en compression.

Partie expérimentale II

Chapitre IV

Techniques expérimentales

IV. Introduction :

Cette partie est réservée aux travaux expérimentaux, nous avons utilisé la bipoinçonneuse que nous avons réalisé pour effectuer les essais de bipoinçonnement et de choisir les paramètres d'études mécaniques et tribologiques pour présenter nos résultats avec interprétations.

IV.1 Procédure expérimentale

Le bipoinçonnement consiste à écraser une tôle figure 4.1 entre deux poinçons, avec une force F dans des conditions bien déterminées ; où le frottement joue un rôle significatif. Chaque essai consiste à écraser la tôle qui doit être soigneusement dégraissée, à vitesse d'écrasement imposée et constante au cours de l'essai jusqu'à ce que l'effort d'écrasement atteigne une valeur fixée à l'avance.

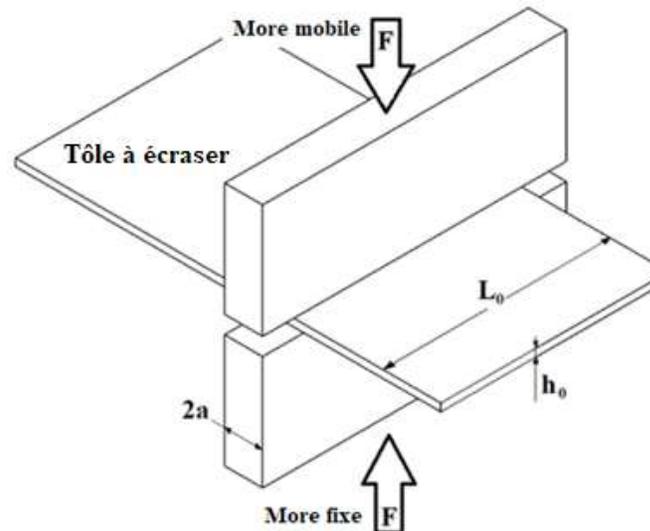


Figure 4.1 : Schéma de principe du test de bipoinçonnement [Kubi80].

IV.1.2 Eprouvettes et poinçons

IV.1.2.1 Composition chimique des éprouvettes

Les éprouvettes que nous avons utilisées nous ont été fournies par la société nationale de réalisation et de gestion des industries SONARIC unité de Ferdjioua Mila Algérie. Dans le tableau 4.1, nous présentons la composition chimique des éprouvettes sous forme de tôles obtenues par DRX.

Tableau 4.1 : Composition chimique des éprouvettes par DRX

EL AN	Unn [wt.%]	C norm. [wt.%]	C Atom [at.%]	(1 Sigma) [wt.%]
C6	0.75	5.73	22.01	0.92
Si14	0.05	0.05	0.08	0.03
Mn25	0.66	0.68	0.57	0.05
Fe26	91.12	93.54	77.33	2.44
	97.42	100.00	100.00	

IV.2.2 Composition chimique des poinçons (HSS)

L'ensemble des travaux de préparation des échantillons ont été réalisés au niveau de l'institut d'optique et mécanique de précision (IOMP) et dans l'unité de recherche des matériaux émergents, université Sétif1. Quant aux poinçons en HSS, on les a découpés à partir d'une plaque mère en acier (en anglais, high speed steel ou HSS), d'épaisseur 5 mm en plusieurs pièces de forme parallélépipédique de même longueur 40 mm et de hauteur 15 mm dont la géométrie finale est présentée dans la figure 4.2, les faces à bipoinçonner sont polies à l'aide d'une polisseuse automatique avec du papier abrasif (**FEPA**, Fédération Européenne des Fabricants de Produits Abrasifs). (FEPA P) grain pour le papier de ponçage, suivant un pas progressif allant de P400 ($35.0 \pm 1.5 \mu\text{m}$) à P5000 ($5 \mu\text{m}$). Dont le but de réaliser des surfaces assez lisses. Le tableau 4.2 présente la composition chimique des poinçons par EDX.

Dans le tableau 4.2, nous présentons la composition chimique des poinçons obtenue par DRX. Alors que la figure 4.2 représente la géométrie des poinçons de forme parallélépipédique et de dimension 5x14x40mm.

EL AN	Unn[wt.%]	Cnorm[wt.%]	CAtom[at.%]	(1sigma) [wt.%]
C6	1.41	4.14	12.46	0.69
O8	14.55	15.35	34.73	1.77
Si14	0.82	0.87	1.12	0.06
V23	0.16	0.17	0.12	0.03
Cr24	3.14	3.31	2.31	0.11
Fe26	71.85	75.76	49.11	1.93
Mo42	0.39	0.42	0.16	0.04
autre				
	81.93	100.00	100.00	

Tableau 4.2 : Composition chimique des poinçons par DRX



Figure 4.2 : Géométrie des poinçons

IV.3 Evaluation des paramètres expérimentaux

Les principaux paramètres à évaluer et à calculer sont :

- Contrainte moyenne de déformation σ_m ;
- Déformation ε ;
- Coefficient de frottement m ;
- Rugosité des poinçons avant et après écrasement ;

IV.3.1 Contrainte moyenne de déformation σ_m

Pour calculer la contrainte d'écoulement on utilise la formule (4.1)

$$\sigma_m = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{F}{2aL'} \quad (4.1)$$

Où $2a=5\text{mm}$ est la largeur des poinçons ;

L' : est la largeur de la tôle après l'écrasement ;

Tel que

$$L' = L_0 + \frac{2}{3}(L_f - L_0) \quad (4.2)$$

Où L_0 : largeur initiale.

L_f : largeur finale.

IV.3.2 Déformation ε

La déformation ε peut s'écrire selon l'expression (4.3) :

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{H_0}{H_f}\right) \quad (4.3)$$

Où H_0 : Épaisseur initiale

H_f : Épaisseur finale.

IV.3.3 Coefficient de frottement « μ »

Le coefficient de frottement « μ » se calcule selon les formules (4.4) et (4.5)

$$F = 2a \cdot L' \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0(\varepsilon) \left[1 + \mu \frac{2a}{4H_f} \right] \quad (4.4)$$

$$\mu = \left(\frac{\sqrt{3} \cdot F}{2 \cdot 2a \cdot L' \cdot \sigma_0(\varepsilon)} - 1 \right) \cdot \frac{4H_f}{2a} \quad (4.5)$$

Où σ_0 : contrainte d'écoulement,

μ : coefficient de frottement de Tresca,

IV.3.4 Représentation de la géométrie de la tôle après écrasement

Après chaque série d'écrasement, quatre mesures sont effectuées à l'aide d'un micromètre digital dont la précision est égale à 1 μm . Sur chaque empreinte, on mesure respectivement les épaisseurs et les largeurs finales (H_f et L_f) dans chaque empreinte voir figure 4.3.

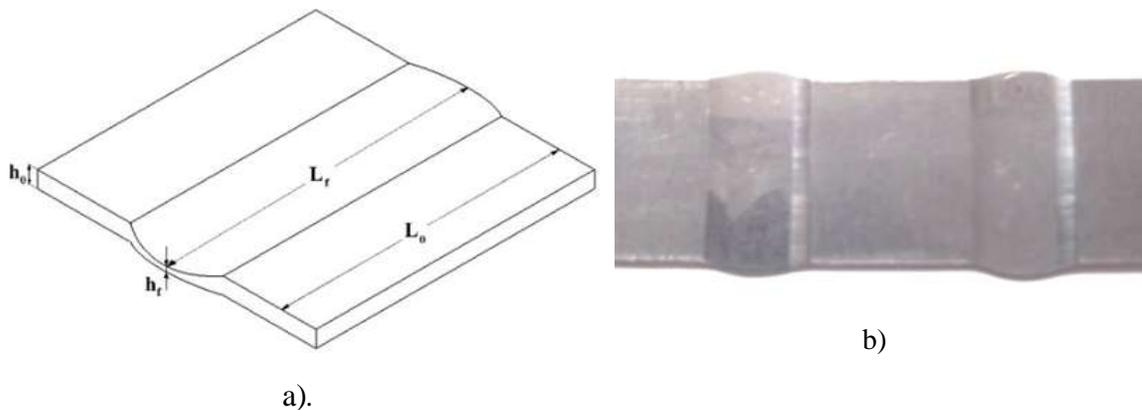


Figure 4.3 : Représentation schématique : a) représentation réelle de l'élargissement de la tôle [Pann06], b) après écrasement

IV.4 Étude expérimentale

Après avoir assuré le bon fonctionnement et l'étalonnage de la bipoinçonneuse, on a lancé plusieurs essais préliminaires avec et sans téflon. Suite à la reproductibilité des résultats des essais dans les mêmes conditions, nous sommes passés aux essais exploratoires.

IV.4.1 Essai avec téflon

Dans cette partie nous avons lancés nos essais on s'assurant du bons fonctionnement de la bipoinçonneuse une fois le contrôle est assuré, on a effectué trois séries d'indentation avec un minimum et un maximum d'effort comme l'indique le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Séries d'indentation avec téflon

Série	Nombre d'écrasement	Effort [KN]	Epaisseur [mm]	Largeur [mm]
1	20	35 Min 90 Max	0.9	15,05
2	30			
3	40			

Après l'opération du bipoinçonnage, on mesure respectivement les épaisseurs et les largeurs finales (H_f et L_f) à l'aide d'un micromètre digitale au 1/1000 mm. Les valeurs mesurées de chaque empreinte sont introduites directement dans les formules (4.1, 4.2, 4.3, 4.4 et 4.5) pour la détermination de la moyenne et de l'écart type de la déformation (ε) et de la contrainte (σ : N/mm²). Dans les tableaux (4.4, 4.5), on présente les paramètres statistiques calculés de la moyenne et de l'écart type pour les deux cas où l'effort est max et min à partir des valeurs relevées voir **Annexe 4.1**.

Pour prendre en compte les dispersions expérimentales d'essai, l'approche probabiliste consiste à construire une densité de probabilité associée à chaque variable indépendante mal connue. Le principe du maximum d'incertitude permet de construire la densité de probabilité $P(X)$ de la variable aléatoire X , à valeurs sur $]-\infty, +\infty [$, en utilisant que la seule information disponible. Ces informations sont des contraintes qui doivent vérifier les densités de probabilité cherchées : la moyenne (moment d'ordre un), l'écart type (moment d'ordre deux) et des moments d'ordre supérieurs. Les densités de probabilité de chaque paramètre sont représentées sur la figure (4.4). Nous pouvons remarquer que les densités de probabilité de la contrainte d'écoulement et du coefficient de frottement sont en forme de cloches. L'utilisation d'une distribution gaussienne aurait introduit une erreur particulièrement importante dans l'analyse de la dispersion. Dans ce cas ; la densité de probabilité est uniforme et la fonction de répartition est une fonction linéaire.

Dans le tableau 4.4, nous avons présenté la déformation ε pour les trois différents écrasements (20, 30 et 40) dans les deux cas de l'effort min et max. Nous remarquons que les valeurs obtenues de la déformation pour les trois cas sont similaires d'une valeur moyenne de 0,227 et grimpent à une valeur moyenne de 1,751 ce qui peut nous conduire à avancer que la déformation s'amplifie avec l'augmentation de l'effort de l'écrasement.

Tableau 4.4 : Paramètres statistiques de la déformation ϵ avec effort Min et Max

N° 'écrasement	20	30	40	Moyenne ϵ
ϵ (Min)	0,228 \pm 0,022	0,208 \pm 0,037	0,2454 \pm 0,034	0,227 \pm 0,031
ϵ (Max)	1,69 \pm 0,107	1,773 \pm 0,053	1,8222 \pm 0,077	1,751 \pm 0,080

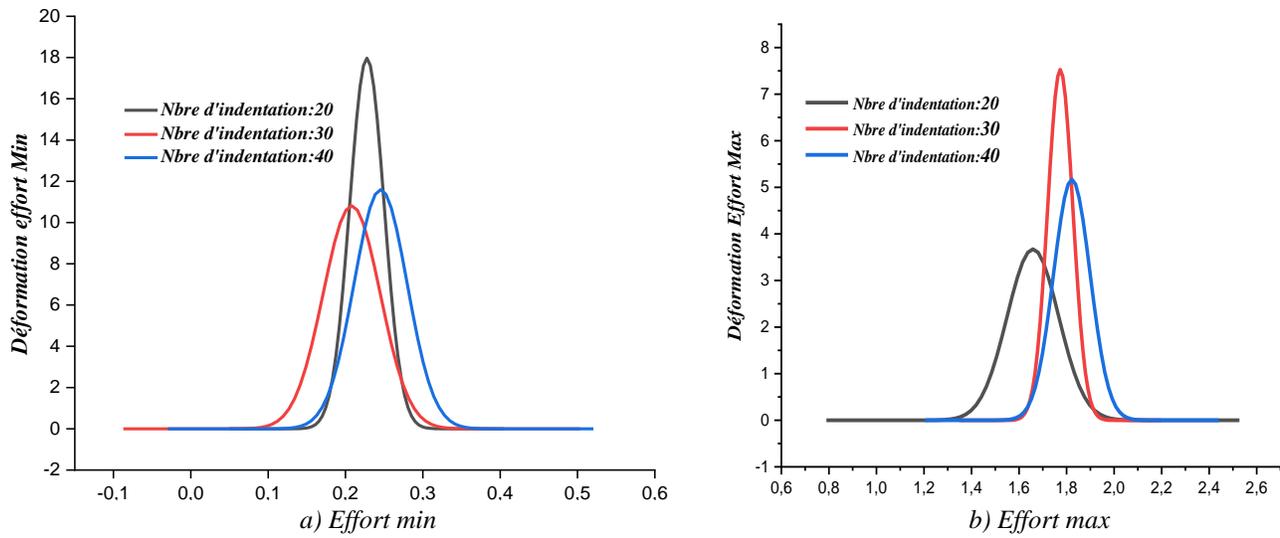


Figure 4.4 : Densités de probabilité calculées pour la déformation selon l'effort min a) et max b).

D'après les résultats mentionnés dans le tableau 4.5, on constate que la contrainte d'écoulement prend la valeur de 398,69 N/mm² pour un effort min de 35 KN, et elle atteint une valeur 937,8613 N/mm² un effort maximal de 95 KN.

Tableau 4.5 : Paramètres statistiques de la contrainte d'écoulement σ [N/mm²] avec effort Min et Max

N° 'écrasement	20	30	40	Moyenne σ N/mm ²
σ N/mm ² (Min)	398,206 \pm 0,502	400,20 \pm 0,640	397,650 \pm 1,224	398,690 \pm 0,790
σ N/mm ² (Max)	937,350 \pm 2,062	937,220 \pm 1,630	939,020 \pm 1,603	937,862 \pm 1,770

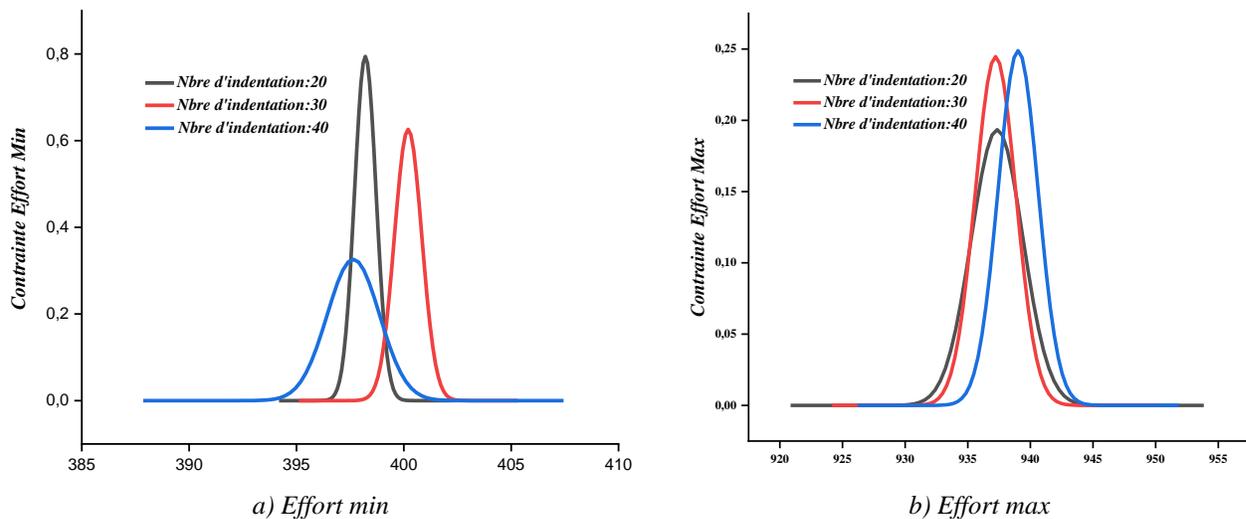


Figure 4.5 : Densités de probabilité calculées pour la contrainte selon l'effort min a) et max b)

On remarque pour les deux cas étudiés que la distribution est gaussienne. Ces courbes de Gauss sont connues aussi sous le nom de «courbe en cloche» ou encore de «courbe de la loi normale», c'est une représentation visuelle de données suivant la loi gaussienne. Elle permet de représenter graphiquement la distribution d'une série et en particulier la densité de mesures d'une série. Elle se base sur les calculs de l'espérance et de l'écart-type de la série. Pour un échantillon important, il est généralement constaté une courbe en forme de cloche, c'est-à-dire une forte concentration des valeurs autour de la moyenne puis des valeurs de moins en moins nombreuses aux extrémités de la série.

Les aires délimitées par ces courbes et l'axe des abscisses sont toutes les mêmes et sont égales à 1. Plus l'écart-type est petit, plus la cloche est pointue. La courbe de Gauss permet de calculer la probabilité pour qu'une valeur, choisie au hasard dans un ensemble des valeurs, appartienne à un intervalle donné. Lorsqu'une variable aléatoire suit une loi normale, elle est dite *gaussienne* ou *normale*. En statistiques, une distribution est une collection de valeurs et de fréquence d'une observation.

De plus, les conclusions tirées à partir d'analyses de courbes gaussiennes sont intuitives et simples à expliquer à une audience, même si ses notions en statistiques sont rudimentaires.

L'approche paramétrique est de définir des paramètres, suivant les fonctions de densité de probabilité définies.

Pour les deux cas étudiés la tôle. Les résultats ont une dispersion, cette dernière et étroite pour le cas relatif au faible nombre d'indentation. Par contre cette dispersion s'élargie avec l'augmentation du nombre d'indentation, cela se traduit par la différence d'épaisseur au départ et aussi de la non homogénéité d'écouissage.

IV.4.1.1 Analyse statistique des résultats

Dans un premier temps, afin d'étudier la sensibilité de chaque paramètre sur la dispersion des résultats de la déformation et la contrainte d'écoulement, nous présentons cette sensibilité sous la forme d'intervalles de confiance IC de 90 % ; c'est à dire d'intervalles qui englobent 90 % des réalisations. La notion d'IC est illustrée sur la figure 4.6. La définition de l'IC, est spécifiée par les valeurs $X_{5\%}$ et $X_{95\%}$ qui sont respectivement le 5 % quantile et le 5 % quantile. L'intervalle de confiance peut être défini pour n'importe quel pourcentage de confiance figure 4.6.

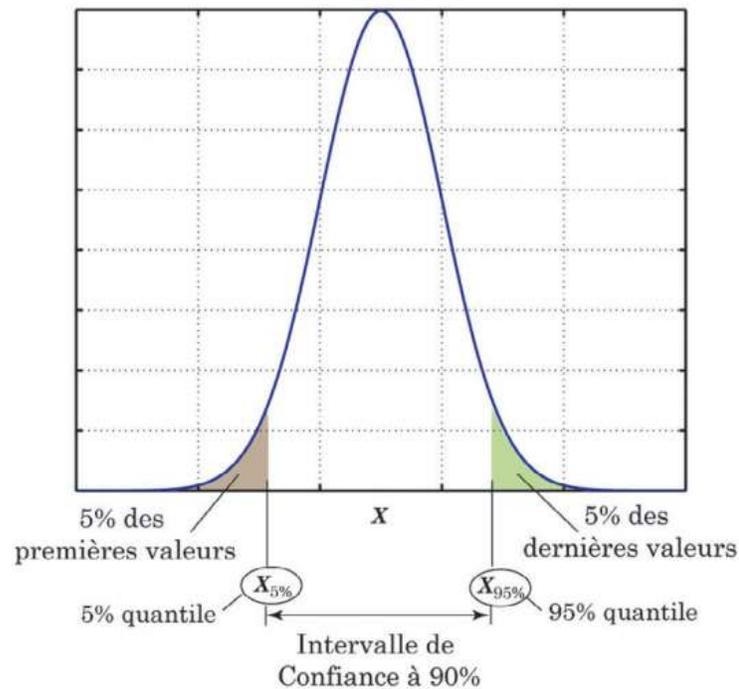


Figure 4.6 : Densités de probabilité d'une variable aléatoire

IV.4.2 Essai sans téflon

Dans cette partie, nous avons effectué deux séries d'indentation que ce soit sur le matériau écroui ou sur celui qui a subi un traitement de recuit.

IV.4.3 Essai du matériau écroui

Quatre séries d'indentation ont été effectuées, deux séries avec un pas de 2.5 et les deux restantes avec un pas de 4 KN (figure 4.7) comme l'indique le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Paramètres expérimentaux de la série 1 avec un pas de 2,5 et 4KN

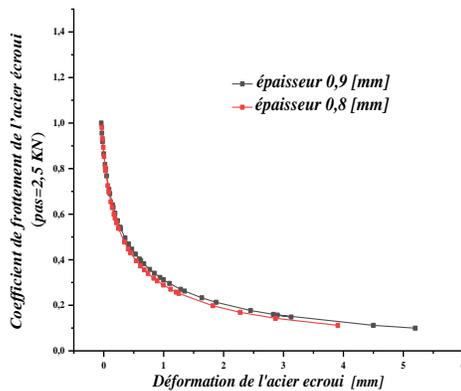
Série	Epaisseur [mm]	Largeur [mm]	Effort [KN]	Pas [KN]	Nombre d'écrasements
1	0.8	15	35 - 95	2.5 et 4	16 et 23
2	0.9				



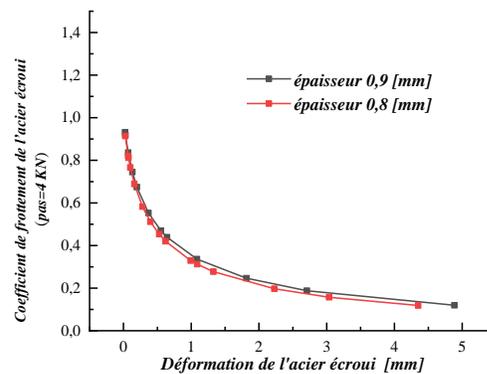
Figure 4.7 : Présentation de l'état de la tôle après écrasement du matériau écroui

IV.4.4 Evolution du coefficient de frottement de l'acier écroui

Après avoir mesuré les dimensions de la tôle **Annexe 4.2**, modifiée par le processus du bipoinçonnement, qui sont respectivement l'épaisseur et la largeur finales (H_f et L_f) nous avons pu tracer les courbes des figures (4.8, 4.9)



a) Coefficient de frottement $\mu = f(\epsilon)$



b) Coefficient de frottement $\mu = f(\epsilon)$

Figure 4.8 : Coefficient de frottement μ du matériau écroui a) pas 2.5 KN et b) pas 4 KN

La figure 4.8 montre l'évolution de l'allure du coefficient de frottement du matériau écroui, les valeurs du coefficient de frottement pour les deux différentes séries où la tôle à une épaisseur de 0.8 et 0.9mm avec un pas respectivement de 2.5 et 4 KN sont presque identiques, elles sont comprises entre [0.1-1]. Le coefficient de frottement est inversement proportionnel avec la déformation, ce coefficient continue à se baisser avec l'augmentation de l'effort d'écrasements et tend à se stabiliser avec les plus importantes valeurs de l'effort.

Pour la contrainte d'écoulement des deux séries dont l'épaisseur sont respectivement 0.8 et 0.9mm et un pas de déplacement de 2.5 et 4 KN donnent des équations linéaires croissantes presque identiques, qui évoluent dans le même sens que l'effort d'écrasement figure 4.9.

IV.4.5 Essai avec matériau recuit

Dans ce cas, on a effectué une seule série d'indentation figure 4.9. Voir tableau 4.7.

Tableau 4.7. Paramètres expérimentaux de la série d'indentation pas 1,5KN

Série	Epaisseur [mm]	largeur [mm]	Effort [KN]	Pas [KN]	Nombre d'écrasements
1	0.8	15	35 - 95	1.5	35

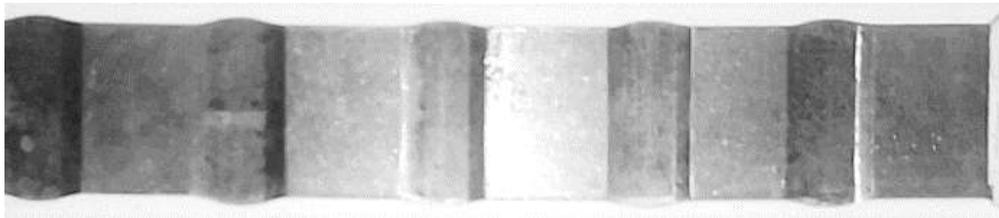
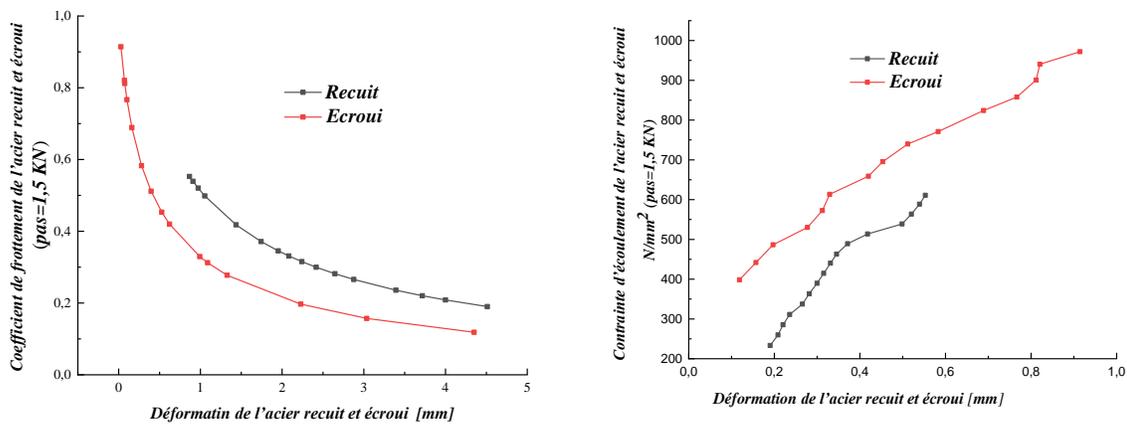


Figure 4.9 : Tôle après écrasement matériau recuit

De la même manière les grandeurs (H_f et L_f) respectivement ont été déterminées dans chaque empreinte **Annexe 4.3**. Ces paramètres nous permettent de tracer les courbes du coefficient de frottement $\mu=f(\epsilon)$ et de la contrainte d'écoulement $\sigma=(\epsilon)$ voir figure 4.11.



Coefficient de frottement de l'acier recuit et écroui $\mu=f(\epsilon)$

Contrainte d'écoulement de l'acier recuit et écroui $\sigma=(\epsilon)$

Figure 4.10 : Coefficient de frottement μ et contrainte d'écoulement du matériau recuit et écroui

La figure 4.10 mentionne l'allure de la courbe du matériau écroui et celle du matériau recuit. On remarque que l'allure des deux courbes est presque la même avec une légère différence.

Les coefficients de frottement sont presque identiques, ils sont compris entre 0.1 - 0.9. Le coefficient de frottement évolue dans le même sens que l'effort d'écrasement et diminue graduellement jusqu'à une valeur limite et par la suite tend à se stabiliser, on remarque que le coefficient de frottement pour le matériau écrouit reste toujours inférieur à celui du matériau recuit ce qui peut être expliqué par l'influence du processus de l'écrouissage sur l'évolution du coefficient de frottement.

Ces courbes de la figure 4.10 pour les deux matériaux utilisés, présentent une différence importante de la contrainte d'écoulement ce qui peut nous conduire à conclure que l'écrouissage joue un rôle déterminant sur la contrainte d'écoulement du matériau.

On peut en conclure à partir des résultats décrits précédemment que l'écrouissage est un paramètre qui a une influence non négligeable sur le frottement par contre son influence sur la contrainte d'écoulement est considérable.

IV.4.6 Evolution du coefficient de frottement et de la contrainte d'écoulement de l'acier écrouit et qui a subi un recuit

Après avoir mesuré, les dimensions de la tôle modifiée par le processus du bipoinçonnement, qui sont l'épaisseur et la largeur finales respectivement (H_f et L_f) nous avons pu tracer les courbes de la figure 4.11.

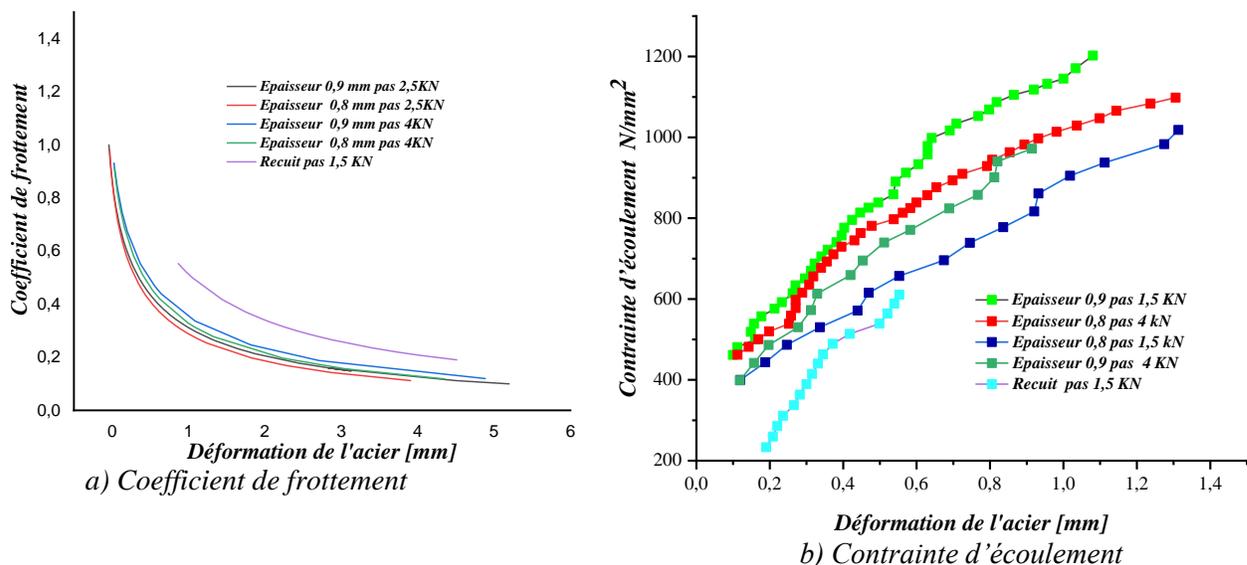


Figure 4.11 : Courbes récapitulatives a) coefficient de frottement et b) contrainte d'écoulement en fonction de la déformation

La figure 4.11.a montré l'évolution de l'allure du coefficient de frottement du matériau écrouit et celle du matériau qui a subi un recuit. Les valeurs du coefficient de frottement pour les deux différentes séries matériau écrouit où la tôle à une épaisseur de 0.8 et 0.9mm avec un pas respectivement de 1.5 et 4 KN sont presque identiques, on remarque que l'allure des deux courbes est presque la même avec une légère différence elles sont comprises entre [0.1-1]. Le coefficient de frottement est inversement proportionnel avec la déformation, ce coefficient continue à se baisser avec l'augmentation de l'effort d'écrasements et tend à se stabiliser avec les plus importantes valeurs de l'effort. On remarque que le coefficient de frottement pour le matériau écrouit reste toujours inférieur à celui du matériau qui a subi un recuit ce qui peut être expliqué par l'influence du processus de l'écrouissage sur ce dernier.

Pour la contrainte d'écoulement des deux matériaux écrouit et celui qui a subi un recuit donnent des équations linéaires croissantes presque identiques, qui évoluent dans le même sens que l'effort d'écrasement figure 4.11.b, ces courbes présentent pour les deux matériaux utilisés une différence importante de la contrainte d'écoulement ce qui peut nous conduire à conclure que l'écrouissage joue un rôle déterminant sur la contrainte d'écoulement du matériau.

IV.5 Observation des poinçons

IV.5.1 Observation optique

Nous avons fait des micrographies par microscopie optique des zones affectées et non affectées, dont le but de voir de plus près l'impact du bipoinçonnage sur les surfaces des poinçons par rapport aux surfaces initiales la figure 4.12 représente les zones observées des poinçons.

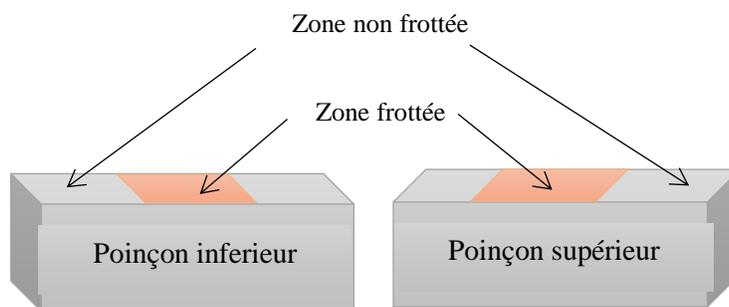
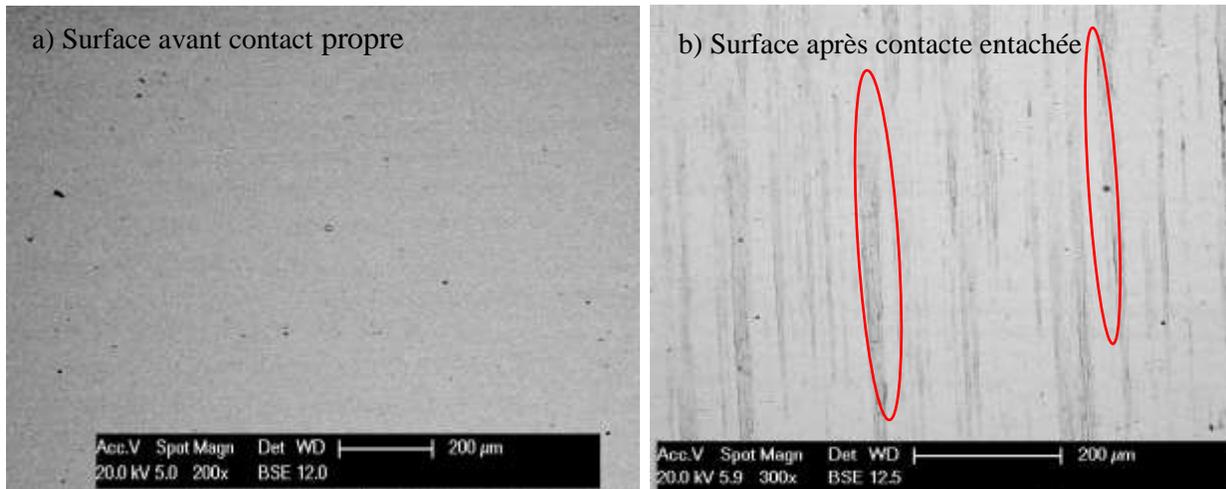


Figure 4.12 : Schéma descriptif des différentes zones de l'interface d'écrasement des poinçons



a) Observation optique de la zone non frottée

b) Observation optique de la zone frottée

Figure 4.13 : Observation optique de l'interface dans la zone frottée a) et non frottée b).

Si on compare les micrographies des poinçons avant et après l'écrasement, on remarque dans les milieux et les bords des zones écrasées la présence et la création de quelques nuages sous formes de taches noires suite au bipoinçonnement de la tôle. On confirme la formation à la limite du contact (bord de l'empreinte d'écrasement), au milieu et aux limites des contacts, des éléments nouveaux ont été remarqués comme des particules incrustées, des pistes discontinues et dispersées et des rayures.

Si on observe aussi les images correspondantes aux essais où nous avons effectué un nombre d'écrasements avec un effort progressif (35-90KN). Il est remarquable encore que la répartition de ces tâches est plus importante et condensée dans les zones affectées dans le cas où le nombre d'écrasement et l'effort sont maximaux.

D'après l'observation optique qui montre l'adhésion de nouvelles suspensions sur l'interface des poinçons qui ont subi l'écrasement, on constate alors qu'il y a eu du transfert de matière au niveau des zones de contact. Ce transfert est fonction du nombre d'indentations opérées et de l'effort d'écrasement appliqué.

IV.5.2 Observation par MEB des poinçons après contact

Cette partie nous a permis de voir de plus en détails l'effet de l'effort sur le transfert de matière. La figure 4.15 illustre l'allure des éprouvettes après écrasement. On remarque que les éprouvettes qui ont obéi aux grands efforts leurs déformations sont beaucoup plus importantes et leurs formes ont bien changées.

Les micrographies prises par MEB ont été réalisées au laboratoire de recherche : dosage et analyse chimique à haute résolution (DAC-HR) de l'école des mines de Paris, CEMEF 1 dont le but de visualiser le transfert de matière au niveau superficiel des poinçons. Nous avons sélectionné deux couples d'échantillons pour les observer au MEB figure 4.14

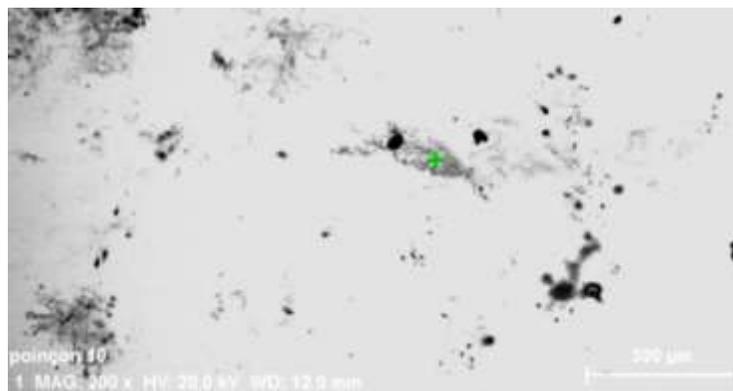


Figure 4.14 : La micrographie prise par MEB du poinçon

Le tableau 4.8 représente la composition chimique des poinçons avant et après l'écrasement dans les deux zones frottées et non frottées.

Tableau 4.8 : Composition chimique des poinçons avant et après l'écrasement

	Zone non frottée		Zone frottée	
	XRD	EDX	XRD	EDX
Elément	Mass %	Mass %	Mass %	Mass %
C	1.28	1.41	1.28	1.41
V	0.17	x	0.23	x
Cr	3.31	4.27	3.92	5.01
Fe	75.76	89.9	82.83	90.6
Mo	0.42	0.841	0.47	0.636

Si on compare la composition chimique des poinçons avant et après l'écrasement, on peut noter qu'il y a une nette différence entre elles ; ça passe d'un taux de fer de 75.76 à un taux de 82.83% pour les résultats obtenus par DRX, et pour les résultats obtenus par EDX en remarque que le taux de fer a changé de 89.9 à un taux de 90.6% cela peut être expliqué par le transfert de matière de la tôle étalée sur la surface du poinçon.

IV.6 Essais similaires

Cette partie a été réalisée au sein du laboratoire de l'école de mines de Paris, sur la machine bipoinçonneuse du CEMF.

IV.6.1 Matériaux

Le matériau utilisé des tôles écrasées dans cette étude est un acier à bas carbone, il a été délivré sous forme de tôle d'épaisseur de 0.9mm, c'est un acier au carbone faiblement allié de dureté initiale dans l'état normalisé. Par contre les poinçons sont en acier à outil HSS.

IV.6.2 Résultats expérimentaux et interprétations

IV.6.2.1 Résultats d'essais de bipoinçonnement

Les essais préliminaires ont été effectués avec un lubrifiant solide qui est le téflon, il s'agit d'enrouler sur l'éprouvette plate plusieurs tours pour couvrir la zone à bipoinçonner afin de minimiser le contact et effectuer des essais à faible frottement. On voit en effet ci-dessus qu'à frottement quasi-nul, ce qui donne la contrainte d'écoulement σ_0 du métal, nécessaire pour appliquer le modèle détaillé plus haut. Pour faire varier la déformation et tracer une courbe d'écrouissage complète, on pratique plusieurs indentations à des pressions progressant par petits échelons. A partir de ces essais, nous avons déduit les contraintes σ et les déformations ε , une courbe représentative de $\sigma(\varepsilon)$ a été tracée, son allure répond bien au comportement attendu. D'autres essais ont ensuite été effectués pour déterminer le coefficient de frottement en fonction de la réduction, dans l'objectif de passer aux essais réels. Ces essais vont nous permettre d'étudier et d'analyser les couches de transfert.

Tableau 4.9 : Paramètres expérimentaux mesurés pour la détermination de la déformation et la déduction du coefficient de frottement avec l'épaisseur initiale de la tôle $h_o=0.98$ mm et la longueur initiale $L_o=14.98$ mm

Lf [mm]	L' [mm]	hf [mm]	F [N]*10 ³	σ_0 [N/mm ²]	ϵ
15.2	15.097	0.963	30	344.181	0.020
15.357	15.201	0.892	40	455.750	0.109
15.606	15.367	0.716	45	507.180	0.362
15.827	15.515	0.604	50	558.181	0.559
16.582	16.018	0.385	63	681.210	1.079
16.776	16.147	0.305	65.2	699.350	1.348
17,008	16.302	0.277	70.2	745.840	1.459
17.334	16.519	0.25	80.16	840.452	1.577
17.419	16.576	0.201	85.32	891.495	1.829
17.473	16.612	0.179	90.34	941.902	1.963
17.52	16.643	0.162	95	988.624	2.078
17.623	16.712	0.154	100.1	1037.420	2.137

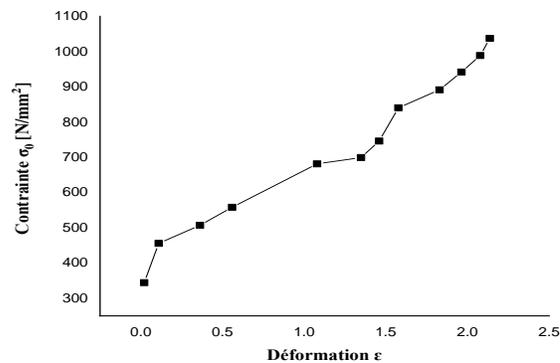


Figure 4.15 : Contrainte σ en fonction de la déformation ϵ

IV.6.2.2 Observations Optique et MEB

Les poinçons testés sous régime lubrifié ont été observés par voie optique et au MEB. Ces observations ont montré qu'il y a eu un transfert assez timide de quelques particules isolées ou regroupées, formant une présence peu significative. L'analyse EDX de la composition de la surface a révélé une présence en fer sur les couches superficielles d'un pourcentage compris entre 0.32-

2.2 % ainsi qu'une présence très similaire en manganèse. La faible proportion est due au fait que seule une petite fraction de la surface est couverte, et d'autant plus les particules étant très minces.

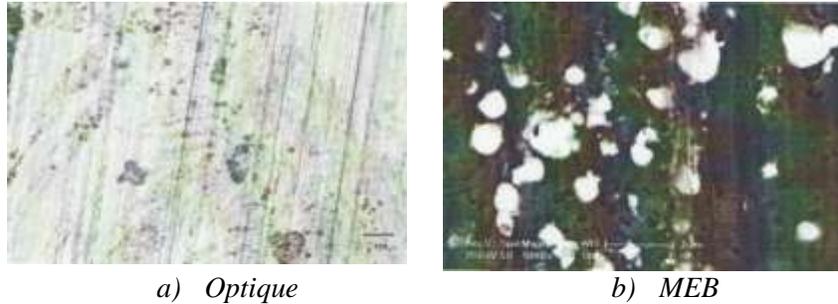


Figure 4.16 : Observation optique et MEB des poinçons

Tableau 4.10 : Calcul du coefficient de frottement à partir des paramètres expérimentaux

Une fois le processus d'observation terminé, nous sommes passés au dépouillement des résultats en cite le calcul du coefficient de frottement à partir des paramètres expérimentaux (H_f , L_f)

F [N]	H_f [mm]	L_f [mm]	L' [mm]	σ_0 [N/mm ²]	ε	μ
35120	0.936	15.181	15.104	465.042	0.017	0.121
40000	0.888	15.281	15.170	527.333	0.078	0.153
45000	0.826	15.46	15.29	588.620	0.161	0.193
50120	0.768	15.692	15.445	649.027	0.246	0.174
55260	0.669	15.937	15.608	708.098	0.405	0.173
60260	0.583	16.163	15.759	764.786	0.564	0.153
65020	0.53	16.356	15.887	818.514	0.674	0.150
70280	0.463	16.616	16.060	875.181	0.829	0.141
75300	0.404	16.753	16.152	932.392	0.987	0.126
80320	0.36	16.876	16.234	989.590	1.120	0.116
85440	0.31	17.01	16.323	1046.850	1.293	0.111

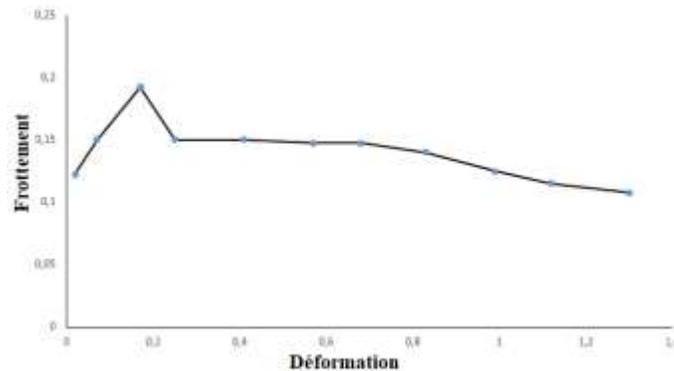


Figure 4.17 : Frottement en fonction de la déformation

IV.6.2.3 Contrôle de la rugosité

Nous avons effectué des essais exploratoires sur le rugosimètre Hommel tester. Les essais ont été explorés sur trois parties différentes de la zone frottée comme l'indique la figure 4.21. L'objectif est de mesurer la rugosité des surfaces frottées des poinçons pour pouvoir corréliser entre le frottement et la rugosité. L'étude de ces résultats a révélé que tous les poinçons ont à peu près une rugosité identique de leur surface initiale de l'ordre 0,09 à 0,1 μm et qu'au cours du frottement leur rugosité tombe à 0,07 μm ce qui a entraîné une baisse du frottement. Un exemple d'illustration des rugosités est donnée par les figures 4.19 et 4.20

Tableau 4.11 : Rugosité mesurée (R_a) des surfaces.

Zone exploitée	R_a [μm] Echantillon
Etat initial bord	0.0910
côte	0.0865
Côte frottée bord	0.077
côte	0.072
Bord frotté bord	0.122
côte	0.118

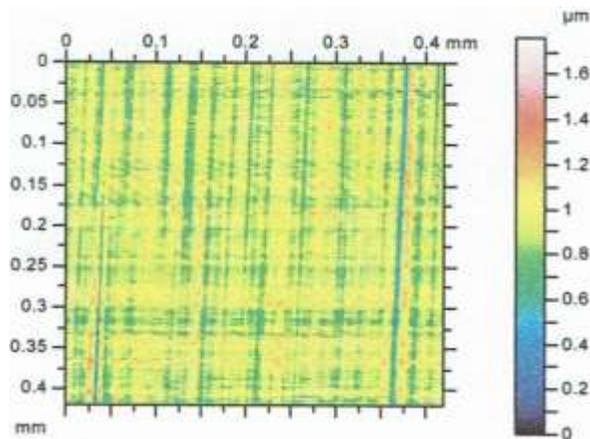


Figure 4.18 : Profil filtré

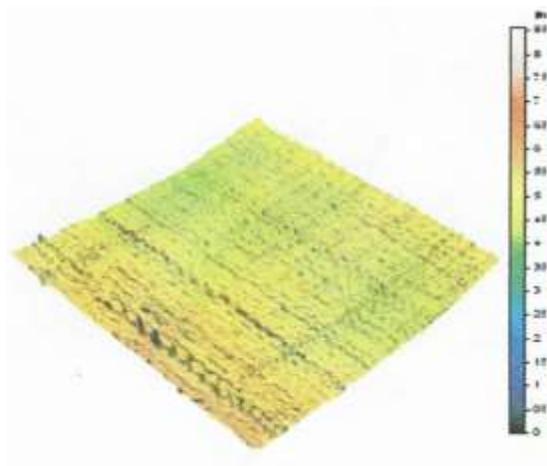


Figure 4.19 : Amplifications à 50% vue à 45°

IV.7 Contrôle de la rugosité des poinçons

Les échantillons bipoinçonnés ont nécessité un contrôle d'état de surface dont le but de vérifier l'effet du bipoinçonnement sur les faces écrasées.

Nous avons effectué des essais exploratoires sur un microscope confocale (Leica DCM8) figure (4.20). Une vision complète de la métrologie des surfaces 3D, une analyse très précise des surfaces est essentielle pour l'industrie et la recherche afin d'optimiser les performances des matériaux et des composants. Il permet d'obtenir des images de coupes optiques d'échantillons, à partir desquelles la géométrie complète de l'objet peut être reconstruite. La microscopie confocale est également importante, car c'est un outil puissant d'observation et de mesure tant au niveau de la recherche scientifique qu'au niveau de l'atelier. Ce type de microscope est largement utilisé dans les sciences biomédicales, la science des matériaux et la qualité de surface métrologie aux échelles micro et macro. C'est un instrument qui nous a permis d'évaluer les différents enregistrements des paramètres de rugosité qui caractérisent l'état de surface des poinçons destinés à l'écrasement, tableaux(4.12) et (4.13), d'ondulation et de géométrie figures (4.22), (4.23) et (4.24).



Figure 4.20 : Microscope confocal (Leica DCM8)

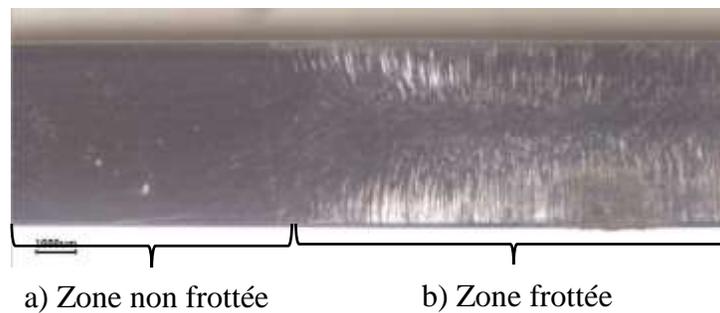


Figure 4.21 : Interface du poinçon (25 écrasements) $F=90\text{ KN}$, a) avant b) après le contact

Les essais ont été explorés sur les mêmes trois parties des poinçons destinées à l'observation optique. L'objectif est de mesurer la rugosité des surfaces (R_a , R_z et R_t) de chaque couple de poinçons frotté pour pouvoir corrélérer entre le frottement et la rugosité.

Nous remarquons clairement sur les profils de surface avant et après écrasement que la différence d'hauteur entre les saillies et les creux est très importante elle passe de 800 μm jusqu'à 400 μm après écrasement ce qui est pratiquement la moitié.

Tableau 4.12 : Rugosité mesurée (R_a , R_t et R_z) des surfaces dans l'essai F_{min}

F minimal	Zones testées		
	Non frottée	frottée	Bord
15 écrasements	$R_a=0.0055$	0.01035	0.00655
	$R_t=0.2117$	0.40405	0.20835
	$R_z=0.0844$	0.17185	0.12075
25 écrasements	$R_a=0.0064$	0.01135	0.0039
	$R_t=0.6638$	0.15665	0.33795
	$R_z=0.2654$	0.0691	0.12605

Tableau 4.13 : Rugosité mesurée (R_a , R_t et R_z) des surfaces dans l'essai F_{max}

F maximal	Zones testées		
	Non frottée	frottée	Bord
15 écrasements	$R_a=0.005$	0.00615	0.011
	$R_t=0.1381$	0.44055	0.5905
	$R_z=0.06175$	0.16455	0.32845
25 écrasements	$R_a=0.00445$	0.50885	0.0077
	$R_t=0.257$	0.53935	0.82715
	$R_z=0.1225$	0.3673	0.30065

L'étude des résultats obtenus a prouvé que :

Par comparaison des profils obtenus figures : (4.23) et (4.24) et les enregistrements de la rugosité [Ra] tableaux (4.12) et (4.13) des différentes surfaces des poinçons écrasés dans de différentes conditions (pression appliquée et nombre d'écrasement) on peut remarquer que :

- Tous les poinçons ont à peu près une rugosité moyenne R_a identique à l'état initial de leur surface initiale (non frottée), elle est de l'ordre de : $R_a= 0.0039$ à $0.0089 \mu\text{m}$ par contre dans les zones frottées les rugosités moyennes se sont augmentées en valeur.
- À partir de la figure (4.23) le profil obtenu en tout point de la surface du poinçon avant le bipoinçonnage de la tôle n'est pas identique à celui que l'on mesure dans la zone centrale du poinçon qui a subi des indentations (écrasements).

- D'autre part à partir de la figure (4.24) le profil correspond à un nombre d'écrasement élevé (25 écrasements) est nettement distingué (élevé) à celui correspondant aux 15 écrasements.
- La même chose pour le profil du poinçon soumis à une charge élevée il est aussi différent est plus étendu à celui du poinçon soumis à une charge faible.
- On remarque encore que le profil plus grand correspond est celui du poinçon qui a fait un nombre d'écrasement supérieur (25 écrasements) sous une charge maximale 90 KN voir la figure (4.22, 4.23 et 4.24).

On constate bien alors que la rugosité des poinçons crée pendant l'écrasement dépend proportionnellement de l'effort appliqué (pression exercée) et du nombre d'écrasements effectués, de ce fait est tout à fait conforme à ce que l'on sait par ailleurs dans l'observation optique.

IV.7.1 Conclusion

Il est en principe possible de déterminer le coefficient de frottement par des mesures directes d'efforts tangentiels en utilisant des capteurs ou bien des tribomètres. Comme pour les essais rhéologiques, il est important de se rapprocher le plus possible des conditions d'utilisation en industrie. Or, il peut être délicat et même impossible d'effectuer des mesures directes lorsque la pression de contact entre l'outil et la pièce est trop importante. L'utilisation de méthodes inverses peut donc se révéler utile pour la détermination de coefficients de frottement. Dans ce travail nous avons pu déterminer le coefficient de frottement en exploitant la particularité de l'essai de bipoinçonnement qui est l'un des rares essais de frottement s'effectuant avec déformation plastique en volume de l'un des deux matériaux antagonistes.

L'évaluation de la cession de frottement est liée à la formation progressive sur l'outil d'une couche de transfert correspondante à la tôle. De ce fait l'existence de ces microparticules en quantité pourtant très faible à la surface de la plaque suffise à changer le comportement du système. L'adhésion de ces particules qui sont superposées sur les surfaces des poinçons est proportionnelle à l'effort et au nombre d'écrasement effectué. En fin ce coefficient peut nous donner des informations sur l'aspect de surface est la distribution des déformations dans la tôle, comme nous avons pu aussi distinguer que les surfaces de contact des poinçons avec les plaques écrasées ont pu être affectées par le transfert de matière du corps antagoniste.

Références bibliographiques chapitre IV

- [Kubi80]** J Kubié, Le test de bipoinçonnement : étude théorique- application à l'étude du transfert de matière dans un contact frottant, Thèse de doctorat de l'école des mines de Paris, Cemef, (1980).
- [Pann06]** Y Pannier, Identification de paramètres élasto-plastiques par des essais statiquement indéterminés: mise en œuvre expérimentale et validation de la méthode des champs virtuels, Thèse doctorat, September (2006)

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail exécuté dans ce mémoire est purement de nature expérimentale, nous présentons une étude sur les conséquences qui résultent du bipoinçonnage de tôles d'acier contre des poinçons HSS.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer le coefficient de frottement quand on écrase une tôle en acier entre deux poinçons et de prouver qu'il y a eu du transfert de matières de la tôle bi-poinçonnée vers les poinçons, ce transfert qui pourra endommager ces outils appelés poinçons et par conséquent produira des défauts de fabrication sur la production. Deux types de tôles ont été utilisés, à savoir l'acier écroui et l'acier recuit. Le coefficient de frottement, est généralement déterminé par des mesures directes d'efforts tangentiels en utilisant des capteurs ou bien des tribomètres. Comme pour les essais rhéologiques, il est important de se rapprocher le plus possible des conditions d'utilisation en industrie. Or, il est peut être délicat et même impossible d'effectuer des mesures directes lorsque la pression de contact entre l'outil et la pièce est trop importante comme il est dans notre cas. L'utilisation de méthodes inverses peut donc se révéler utile pour la détermination du coefficient de frottement. Dans notre cas nous avons utilisé la particularité du test de bipoinçonnement pour déterminer le coefficient de frottement après le déroulement du test en exploitant la possibilité de calculer ce paramètre à partir des données collectées lors de l'essai et l'application de la formule (4.4):

Le bipoinçonnement qui est l'un des rares essais de frottement s'effectuant avec déformation plastique en volume de l'un des deux matériaux antagonistes.

Après les préparations des échantillons et des poinçons nous avons déterminé la composition chimique des échantillons et des poinçons.

Nos résultats expérimentaux se résument d'une manière générale en :

- Pour prendre en compte les dispersions expérimentales d'essai, l'approche probabiliste consiste à construire une densité de probabilité associée à chaque variable indépendante mal connue. Ces informations sont des contraintes que doivent vérifier les densités de probabilité cherchées : la moyenne (moment d'ordre un), l'écart type (moment d'ordre deux) et des moments d'ordre supérieurs.

L'approche probabiliste nous a permis de construire une densité de probabilité pour chaque paramètre étudié (déformation, contrainte d'écoulement). Nous pouvons remarquer que les

Conclusion Générale

densités de probabilité de la contrainte d'écoulement et du coefficient de frottement sont en forme de cloches.

Par la suite, nous avons présenté la déformation ϵ dans les deux cas de l'effort min et max. Nous remarquons que les valeurs obtenues de la déformation sont similaires d'une valeur moyenne de 0,227 et grimpent à une valeur moyenne de 1,751 ce qui peut nous conduire à avancer que la déformation s'amplifie avec l'augmentation de l'effort de l'écrasement.

Concernant, la contrainte d'écoulement on constate, que ce paramètre évolue avec l'augmentation de l'effort appliqué et passe de 398,690 N/mm² à 937,861 N/mm² pour un effort correspondant respectivement à 35 et 95 KN.

Afin d'étudier la sensibilité de chaque paramètre sur la dispersion des résultats de la déformation et la contrainte d'écoulement, nous présentons cette sensibilité sous la forme d'intervalles de confiance.

- Pour les deux différentes séries, nous avons utilisé deux tôles d'épaisseur 0.8 et 0.9mm avec un pas respectivement de 2.5 et 4 KN, l'évolution du coefficient de frottement des deux matériaux écrouit et recuit est presque identique. Ce coefficient de frottement est inversement proportionnel avec la déformation et continue à baisser avec l'augmentation de l'effort d'écrasement, nous remarquons aussi que la contrainte d'écoulement prend la même allure pour les deux matériaux avec une légère différence. En peut conclure à partir des résultats décrits précédemment que l'écrouissage est un paramètre qui a une influence non négligeable sur le frottement par contre son influence sur la contrainte d'écoulement est considérable.

L'observation par MEB nous a permis de voir de plus en détails l'effet de l'effort sur le transfert de matière. Les micrographies des éprouvettes après écrasement, montrent que celles qui ont obéi aux grands efforts, leurs déformations sont beaucoup plus importantes et leurs formes ont bien changées.

Les observations MEB ont montré clairement qu'il y'a eu du transfert de matière de la tôle vers le poinçon et que les surfaces de contact des poinçons avec les plaques écrasées ont pu être affectées par ce transfert de matière du corps antagoniste. Ce phénomène peut conduire à des situations majeures voire même néfastes.

Si on compare la composition chimique des poinçons avant et après l'écrasement, on peut noter qu'il y a une nette différence entre elles ; ça passe d'un taux de fer de 75.76 à un taux de

Conclusion Générale

82.83% pour les résultats obtenue par DRX, cela peut être expliqué par le transfert de matière de la tôle étalée sur la surface du poinçon.

De ce fait, nous remarquons l'existence de microparticules en quantité très faible à la surface du poinçon, cela suffise à changer le comportement du système. L'évolution de la cession de frottement qui est liée à la formation progressive sur l'outil d'une couche de transfert correspondante à la tôle a été prouvé par l'analyse EDX ou on remarque une différence dans la composition chimique des poinçons avant et après l'écrasement, on peut noter qu'il y a une nette différence entres elles ; cela est due peut être à l'étalement de la matière de la tôle sur la surface du poinçon. L'adhésion de ces particules qui sont superposées sur les surfaces des poinçons est proportionnelle à l'effort et au nombre d'écrasement effectué. Enfin ce coefficient de frottement peut nous renseigner sur l'aspect de la surface et la distribution des déformations dans la tôle.

Si on compare les micrographies des poinçons avant et après l'écrasement, on remarque dans les milieux et les bords des zones écrasées la présence et la création de quelques nuages sous formes de tâches noires suite au bipoinçonnement de la tôle. On confirme la formation à la limite du contact (bord de l'empreinte d'écrasement), au milieu et aux limites des contacts, des éléments nouveaux ont été remarqués comme des particules incrustées, des pistes discontinues et dispersées et des rayures.

Si on observe aussi les images correspondantes aux essais où nous avons effectué un nombre d'écrasements avec un effort progressif (35-90KN). Il est remarquable encore que la répartition de ces tâches est plus importante et condensée dans les zones affectées dans le cas où le nombre d'écrasement et l'effort sont maximaux.

D'après l'observation optique qui montre l'adhésion de nouvelles suspensions sur l'interface des poinçons qui ont subi l'écrasement, on constate alors qu'il y a eu du transfert de matière au niveau des zones de contact. Ce transfert est fonction du nombre d'indentations opérées et de l'effort d'écrasement appliqué.

Par comparaison des profils obtenus et les enregistrements de la rugosité [Ra] des différentes surfaces des poinçons écrasés dans de différentes conditions (pression appliquée et nombre d'écrasement) on peut remarquer que :

Conclusion Générale

- Tous les poinçons ont à peu près une rugosité moyenne Ra identique à l'état initial de leur surface initiale (non frottée), elle est de l'ordre de : Ra= 0.0039 à 0.0089 μm par contre dans les zones frottées les rugosités moyennes ont augmenté en valeur.
- Le profil obtenu en tout point de la surface du poinçon avant le bipoinçonnage de la tôle n'est pas identique à celui que l'on mesure dans la zone centrale du poinçon qui a subi des indentations (écrasements).
- D'autre part, le profil correspond à un nombre d'écrasement élevé (25 écrasements) est nettement distingué (élevé) à celui correspondant aux 15 écrasements
- La même chose pour le profil du poinçon soumis à une charge élevée il est aussi différent est plus étendu à celui du poinçon soumis à une charge faible.

On constate bien alors que la rugosité des poinçons crée pendant l'écrasement dépend proportionnellement de l'effort appliqué (pression exercée) et du nombre d'écrasements effectués, de ce fait est tout à fait conforme à ce que l'on sait par ailleurs dans l'observation optique.

Perspective, nous proposons continuer ce travail et utilisés des poinçons revêtu de plusieurs matériaux et étudier le transfert de matière dont ces revêtements.

Annexes

Les épaisseurs et les largeurs finales mesurées respectivement (H_f et L_f) essai avec téflon

20				30				40			
F min 35 KN		F max 90 KN		F min 35 KN		F max 90 KN		F min 35 KN		F max 90 KN	
L_f mm	H_f μ m										
14.438	747	17.34	215	15.15	751	17.437	194	15.289	738.5	17.708	213.5
14.613	729.5	17.321	281.5	15.216	764.5	17.362	191	15.298	718	17.637	183.5
14.662	722.5	17.319	233	15.15	766.5	17.44	183.5	15.272	733.5	17.739	193.5
14.678	761	17.343	245.5	15.137	747.5	17.353	176.5	15.328	720.5	17.707	190.5
14.675	761.5	17.346	210	15.255	743.5	17.414	195	15.306	722	17.677	181.5
14.704	772.5	17.353	215.5	15.2	752	17.463	194	15.264	749	17.717	189
14.714	748.5	17.406	218.5	15.24	751	17.444	195.5	15.276	724	17.681	180
14.697	736	17.402	210	15.174	795	17.389	199.5	15.497	659.5	17.632	185.5
14.757	717	17.431	215	15.132	757	17.426	202	15.4	693.5	17.717	168.5
14.73	729.5	17.309	206	15.101	756.5	17.345	194.5	15.329	727.5	17.657	173
14.72	717.5	17.413	223	15.123	748.5	17.353	194.5	15.267	731	17.732	172.5
14.772	740	17.494	216.5	15.184	764	17.358	196.5	15.28	737	17.689	177.5
14.757	737.5	17.481	217	15.176	758	17.353	195.5	15.314	742.5	17.712	170
14.765	737	17.424	202	15.187	757	17.322	199.5	15.311	718	17.524	204.5
14.735	747.5	17.437	214.5	15.17	770	17.377	216	15.3	737	17.614	182.5
14.779	741.5	17.441	202.5	15.168	760	17.37	194.5	15.497	668	17.599	157
14.871	735	17.451	190.5	15.146	710.5	17.44	214.5	15.303	722	17.647	194.5
14.846	730	17.358	209.5	15.192	757.5	17.392	198	15.345	716	17.668	188.5
14.817	736	17.407	196	15.21	753	17.423	199	15.346	739.5	17.59	187.5
14.789	734.5	17.373	178	15.105	762	17.48	196	15.279	722	17.623	169
				15.152	664	17.46	195	15.389	732	16.699	208.5
				15.153	714.5	17.415	191.5	15.437	735	17.672	181.5
				15.2	733	17.319	194	15.208	754.5	16.958	215.5
				15.2	754.5	17.412	195.5	15.445	724	17.658	191
				15.165	761	17.385	191.5	15.25	749.5	17.626	180
				15.161	749.5	17.43	179	15.318	727	17.637	185.5
				15.152	732.5	17.422	172.5	15.243	740.5	17.682	189
				15.173	733.5	17.364	192.5	15.347	742	17.669	182.5
				15.166	717.5	17.353	186	15.258	736	17.651	167.5
				15.122	756	17.374	192	15.234	746.5	17.691	189.5
								15.204	749.5	17.751	183
								15.305	734.5	17.668	188.5
								15.402	696	17.679	191.5
								15.284	755.5	17.713	183.5
								15.21	746.5	17.688	181
								15.362	696.5	17.644	175
								15.325	748.5	17.721	196
								15.308	744	17.699	196
								15.278	716.5	16.692	202
								15.275	726	17.665	197

Les épaisseurs et les largeurs finales mesurées respectivement (Hf et Lf) essai sans téflon

4 KN						2.5 KN					
		0.9mm		0.8mm				0.9mm		0.8mm	
	F (N)	L _f mm	H _f mm	L _f mm	H _f mm	N°	F (N)	L _f mm	H _f mm	L _f mm	H _f mm
1	35000	15.241	0.8295	15.202	0.775	1	35000	15.084	0.9085	15.241	0.731
2	39000	15.352	0.782	15.326	0.769	2	37500	15.097	0.9025	15.342	0.707
6	43000	15.449	0.743	15.351	0.728	3	40000	15.185	0.898	15.365	0.683
4	47000	15.523	0.6875	15.43	0.601	4	42500	15.202	0.87	15.485	0.657
5	51000	15.689	0.629	15.541	0.561	5	45000	15.248	0.857	15.546	0.638
6	55000	15.709	0.6125	15.698	0.515	6	47500	15.332	0.856	15.54	0.619
7	59000	15.827	0.57	15.652	0.484	7	50000	15.347	0.8155	15.625	0.593
8	63000	16.019	0.513	15.946	0.468	8	52500	15.385	0.783	15.71	0.577
9	67000	16.049	0.4825	15.933	0.449	9	55000	15.428	0.772	15.752	0.561
10	71000	16.22	0.446	16.317	0.38	10	57500	15.541	0.759	15.891	0.549
11	75000	16.357	0.4145	16.045	0.375	11	60000	15.565	0.721	16.013	0.536
12	79000	16.336	0.4105	16.284	0.317	12	62500	15.675	0.7085	16.081	0.517
13	83000	16.326	0.381	16.329	0.307	13	65000	15.781	0.6895	16.127	0.492
14	87000	16.612	0.351	16.532	0.25	14	67500	16.027	0.6605	16.137	0.478
15	91000	16.547	0.305	16.822	0.196	15	70000	16.099	0.5355	16.266	0.457
16	95000	16.739	0.295			16	72500	16.17	0.5155	15.361	0.426
						17	75000	16.232	0.5015	16.423	0.416
						18	77500	15.33	0.4705	16.561	0.406
						19	80000	16.399	0.4635	16.567	0.397
						20	82500	16.445	0.438	16.575	0.382
						21	85000	16.439	0.454	16.613	0.367
						22	87500	16.364	0.4735	16.622	0.355
						23	90000	16.324	0.4925	16.711	0.341

Essai avec matériau recuit Les épaisseurs et les largeurs finales mesurées respectivement (Hf et Lf)

N°	F (N)	Lf mm	Hf mm	N°	F (N)	Lf mm	Hf mm
1	35000	14.901	0.6685	19	62000	15.606	0.5045
2	36500	14.909	0.6600	20	63500	15.651	0.5425
3	38000	14.930	0.6550	21	65000	15.443	0.5590
4	39500	14.932	0.6455	22	66500	15.481	0.5560
5	41000	14.956	0.6400	23	68000	15.447	0.5315
6	42500	14.915	0.6375	24	69500	15.478	0.5485
7	44000	14.979	0.6345	25	71000	15.538	0.5560
8	45500	15.000	0.6135	26	72500	15.555	0.5465
9	47000	15.052	0.6145	27	74000	15.731	0.5130
10	48500	15.054	0.6010	28	75500	15.536	0.4925
11	50000	15.095	0.6000	29	77000	15.541	0.4800
12	51500	15.098	0.5900	30	78500	15.594	0.4880
13	53000	15.147	0.5700	31	80000	15.518	0.4975
14	54500	15.140	0.5735	32	81500	15.453	0.4680
15	56000	15.254	0.5570	33	83000	15.636	0.4535
16	57500	15.461	0.5310	34	84500	15.816	0.4120
17	59000	15.382	0.5250	35	86000	15.964	0.4190
18	60500	15.341	0.5345				

تمييز انتقال المواد الفولاذية في نظام احتكاكي

يمكن أن يؤثر انتقال المواد على الأسطح الناشطة للأدوات أثناء عمليات القطع والتصفيح بشكل كبير على جودة المنتج ويمكن أن تتجمع على الحواف وأسطح أدوات القطع، مما يؤدي إلى رداءة المنتج، ومن خلال مراقبة بسيطة لهذا الأخير، سيتم لا محالة رفضه. ولتقييم الآثار السلبية لهذا النقل، تم اختيار مثال التصفيح الثنائي، والذي يغطي عملية التصفيح والتطريق. ولذلك نبحت في هذا العمل عن التحولات السطحية المختلفة بعد التطريق وانتقال المواد من صفائح الفولاذ من درجة (XES) إلى الأداة (HSS)، وتأثير هذا الانتقال على حالة السطح، وتقييم الاحتكاك على وجهي الأداة العلوية والسفلية اللتان تضغطا على الصفيحة. تساعد النتائج المتحصل عليها على تجنب رفض القطع المصنعة وتمديد في عمر الأداة. بالإضافة إلى ذلك، قمنا بدراسة التحولات المختلفة على مستوى السطح بعد انتقال المادة من صفائح الفولاذ إلى الأداة. تم إجراء المسح الضوئي بواسطة MEB، XRD و XRF رؤية تأثير الانتقال على حالة السطح وطبيعة الاحتكاك لأسطح الأداة المستعملة العلوية والسفلية التي ضغطتا على الصفيحة الفولاذية. ويبقى الهدف هو تجنب تآكل الأدوات والحفاظ عليها واستعمالها لمدة أطول. وذلك مما يساهم في اقتصاد المادة والإمكانيات المستعملة.

الكلمات المفتاحية: التصفيح الثنائي، التطريق، الاحتكاك، التصلب بالضغط، تشوه البلاستيكي، السيلان البلاستيكي.

Characterization of steel material transfer in a tribological system

Abstract

Material transfer on the active surfaces of tools during parts' machining and rolling processes can significantly affect product quality. This transfer can be deposited on the edges and cutting surfaces of the tools, which will cause poor production (poorly machined parts), and by a simple manufacturing control, these parts will be rejected. For evaluating the adverse effects of this transfer, the example of bi-punching was chosen, which covers the process of stamping and rolling. This work investigates the different surface transformations following material transfer from a sheet or steel of XES grade to an HSS tool. It consists of examining the effect of the transfer on the surface condition and the friction behavior of the crushed sheet on the faces of the two upper and lower punches that grip the sheet. The results help to avoid scrap and to improve the tool's life. In addition, we studied the different transformations at the surface level following the transfer of material from a steel sheet of an SXE grade to an HSS tool. Optical observations by SEM, XRD, and XRF were carried out to see more closely the effect of the transfer on the surface state and the friction behavior of the crushed sheet on the faces of the two upper and lower punches that grip the sheet. The objective is to avoid waste and consider the tools' longevity.

Keywords: *Bi-punching, lamination friction, strain hardening, Plastic deformation, Plastic flow.*

Caractérisation du transfert de matières des aciers dans un système tribologique

Résumé

Le transfert de matière sur les surfaces actives des outils pendant les processus d'usinage et de laminage des pièces peut affecter considérablement la qualité du produit. Ce transfert peut être déposé sur les bords et les surfaces des outils de coupe, ce qui entraînera une mauvaise production (pièces mal usinées), et par un simple contrôle de fabrication, ces pièces seront rejetées. Pour évaluer les effets négatifs de ce transfert, on a choisi l'exemple du bipoinçonnage, qui couvre le processus d'emboutissage et de laminage. Ce travail examine les différentes transformations de surface suivant le transfert de matière d'une tôle ou d'un acier de qualité XES à un outil HSS. Il consiste à examiner l'effet du transfert sur l'état de surface et le comportement de frottement de la feuille écrasée sur les faces des deux poinçons supérieur et inférieur qui saisissent la feuille. Les résultats aident à éviter les débris et à améliorer la durée de vie de l'outil. De plus, nous avons étudié les différentes transformations au niveau de la surface suite au transfert de matière d'une tôle d'acier de nuance SXE à un outil HSS. Des observations optiques par MEB, XRD et XRF ont été effectuées pour voir de plus près l'effet du transfert et le comportement de frottement. L'objectif est d'éviter le gaspillage et de considérer la longévité des outils.

Mots clés : *Bipoinçonnement, laminage, frottement, écrouissage, déformation plastique, écoulement plastique*