



HAL
open science

Compréhension des mécanismes d'endommagement en surface des outils de forge à chaud

Estelle Daouben

► **To cite this version:**

Estelle Daouben. Compréhension des mécanismes d'endommagement en surface des outils de forge à chaud. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2009. Français. NNT : 2009VALE0014 . tel-03023895

HAL Id: tel-03023895

<https://uphf.hal.science/tel-03023895v1>

Submitted on 25 Nov 2020

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

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



N° d'ordre 09/14

THESE PRESENTEE A
L'UNIVERSITE DE VALENCIENNES
ET DU HAINAUT CAMBRESIS
EN VUE DE L'OBTENTION D'UN
DOCTORAT EN GENIE MECANIQUE
PAR

Estelle DAOUBEN



**COMPREHENSION DES MECANISMES
D'ENDOMMAGEMENT EN SURFACE
DES OUTILS DE FORGES A CHAUD**

EFFETS DES LUBRIFIANTS

Soutenue le 10 juillet 2009

Devant le jury composé de

I. IORDANOFF, professeur, Laboratoire LAMEFIP, Centre ENSAM de Bordeaux

Rapporteurs :

P. PICART, professeur, Directeur adjoint de FEMTO-ST, Besançon

E. FELDER, professeur, Chef de groupe adjoint CEMEF, Sophia Antipolis

Examineurs :

L. DUBAR, professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis et LAMIH

M. DUBAR, professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis et LAMIH

A. DUBOIS, professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis et LAMIH

Invités :

P.Y. BONDON, Directeur R&D, CONDAT S.A., Chasses-sur-Rhône

R. SPATARO, Ingénieur de recherche, CETIM, Saint-Etienne



N° d'ordre 09/14

THESE PRESENTEE A
L'UNIVERSITE DE VALENCIENNES
ET DU HAINAUT CAMBRESIS
EN VUE DE L'OBTENTION D'UN
DOCTORAT EN GENIE MECANIQUE
PAR

Estelle DAOUBEN



**COMPREHENSION DES MECANISMES
D'ENDOMMAGEMENT EN SURFACE
DES OUTILS DE FORGES A CHAUD**

EFFETS DES LUBRIFIANTS

Soutenue le 10 juillet 2009

Devant le jury composé de

I. IORDANOFF, *professeur, Laboratoire LAMEFIP, Centre ENSAM de Bordeaux*

Rapporteurs :

P. PICART, *professeur, Directeur adjoint de FEMTO-ST, Besançon*

E. FELDER, *professeur, Chef de groupe adjoint CEMEF, Sophia Antipolis*

Examineurs :

L. DUBAR, *professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis et LAMIH*

M. DUBAR, *professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis et LAMIH*

A. DUBOIS, *professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis et LAMIH*

Invités :

P.Y.BONDON, *Directeur R&D, CONDAT S.A., Chasses-sur-Rhône*

R. SPATARO, *Ingénieur de recherche, CETIM, Saint-Etienne*

Remerciements

Cette thèse a été préparée au Laboratoire LAMIH dirigé par le Prof. Éric MARKIEWICZ. Elle est issue d'un partenariat entre la société CONDAT, le CETIM de Saint Étienne et l'équipe MSM du LAMIH. Ce partenariat a permis de faire évoluer ce projet expérimental autant dans le domaine industriel que scientifique. Au terme de ce travail, je voudrais remercier les nombreuses personnes qui m'ont aidée au niveau scientifique, industriel mais également sur un plan plus personnel.

Je tiens tous d'abord à remercier Laurent Dubar, mon directeur de thèse ainsi que Mirentxu Dubar et André Dubois qui ont co - encadré cette thèse. Malgré leurs responsabilités, ils ont su être disponibles, patients et encourageants et ils ont su m'initier à la recherche. Merci aussi à Raphaël Deltombe, ingénieur recherche et Alain Noël qui m'ont épaulée lors des essais expérimentaux.

Je remercie les rapporteurs de cette thèse Mr Philippe Picart et Mr Eric Felder pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Merci également à Mr Ivan Iordanoff qui a accepté de participer à mon jury, et pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail afin de lui donner une dimension numérique.

J'adresse mes plus vifs remerciements, une nouvelle fois à André Dubois pour son soutien et l'aide qu'il m'a fourni lors de la rédaction de ce rapport. Merci à Messieurs Thierry Garçon et Bruno Laurent pour leur aide matérielle au près du banc d'essai. Merci aussi à Rémi Canu de m'avoir permis lors de son stage de réaliser mes derniers essais afin d'atteindre mes objectifs.

Je remercie l'entreprise CONDAT pour avoir cofinancé ce travail. De nombreuses personnes de l'entreprise ont pris part à cette étude. Je souhaite toutes les remercier et en particulier :

- Le directeur du laboratoire R&d Mr Pierre-Yves Bondon qui m'a permis de découvrir le travail en entreprise en m'intégrant dans son équipe.
- Mon Tuteur industriel Nguyen Truong Dinh et Laurent Dreptin qui m'ont appris à évoluer dans le monde de l'entreprise de façon à faire avancer mon sujet industriel.
- Bernadette Gregot qui a suivi avec intérêt mon travail et qui a toujours pris le temps de répondre à mes questions.
- et Frédéric Deschampt pour son écoute et ses conseils

Je remercie par ailleurs le CETIM pour avoir aussi cofinancé ce travail. Je remercie surtout ses participants pour avoir suivi mes recherches tout en les valorisant lors des différentes commissions forges, réunions ayant agrémenteés mon suivi de thèse. Merci donc à Ludovic Lazzarotto, Richard Spataro et Pierre Krumpipe.

Au niveau industriel de la forge, les partenaires de ce projet sont Forges de Courcelles représentée par Mr Boujon et Mr Robert et Ascoforges représentée par Mr Secordel et Mr Risser. Je tiens à les remercier pour leurs écoutes, leurs disponibilités afin d'effectuer des mesures sur site et l'aide qu'ils ont apportée pour nous fournir les matériaux de l'étude.

D'un point de vue plus personnel, j'ai une pensée émue pour toutes les personnes avec qui j'ai partagé mon bureau, un café, une sortie sportive mais surtout une amitié : David, Julien, Fabrice, Cédric, Audrey, Damien, Frédéric, Anastasia, Kévin et un petit plus pour toi J2J et ta famille, ma petite famille du nord.

Je tiens aussi à souligner la contribution considérable de toute ma famille en particulier mes parents, mes sœurs et mon beau frère qui m'ont soutenu durant toutes mes études et durant mes travaux de thèse. Ils ont su m'encourager et même à distance suite à mon départ de Bretagne vers le Nord.

Enfin je remercie Benoit qui eu la lourde tâche de me supporter lors de cette période de fin de thèse. Je te remercie pour ton soutien, merci à toi et ta famille de m'avoir motivé à un moment de votre vie difficile à affronter.

Merci à tous ceux que j'ai pu oublier et qui m'ont entouré...

Sommaire

Résumé	6
Nomenclature.....	7
Introduction	9
Chapitre 1 : Caractérisation tribologique des procédés de mise en forme	14
I. Introduction	14
II. Endommagement des matrices	16
II.1. Endommagement par déformation plastique.....	16
II.2. Endommagement par fatigue mécanique	17
II.3. Endommagement par fatigue thermique.....	18
II.4. Endommagement par usure abrasive	20
II.5. Usure adhésive et couches de transfert.....	21
II.6. Localisation des endommagements sur une matrice de forge	23
II.7. Conclusion.....	24
III. Méthodes de caractérisation tribologique.....	24
III.1. Mesures sur site	25
III.2. Approche numérique	25
III.3. Mesures en laboratoire.....	26
III.3.1. Tests tribologiques « Simulations ».....	27
III.3.2. Tests tribologiques « Procédés ».....	29
III.3.3. Choix d'un test pour la caractérisation des conditions de contact et de lubrification en forge à chaud.....	30
IV. WHUST : méthodologie d'utilisation et d'exploitation	34
IV.1. WHUST : Méthodologie d'utilisation.....	34
IV.1.1. Respect des paramètres physico-chimiques du contact	35
IV.1.2. Respect des paramètres mécaniques du contact.....	35
IV.1.3. Méthodologie	36
IV.2. Les paramètres d'entrée du WHUST	38
IV.3. Les paramètres de sortie et l'exploitation des résultats.....	42
IV.3.1. Quantifier le pouvoir de réduction du frottement : identification d'un coefficient de frottement.....	44
IV.3.2. Quantifier le pouvoir de protection des surfaces en contact	48
V. Conclusion.....	50

Chapitre 2 : WHUST et caractérisation des lubrifiants – application à un procédé d’estampage	52
I. Introduction	52
II. Analyse du procédé générique.....	54
II.1. Les lopins.....	54
II.2. Les matrices.....	56
II.3. L’apport de lubrifiant.....	58
II.4. Analyse thermomécanique du procédé.....	60
II.5. Bilan.....	61
III. Réglage des paramètres du banc d’essai.....	61
III.1. Les éprouvettes	61
III.2. Les frotteurs.....	63
III.3. Réglage des paramètres mécaniques	67
III.4. Bilan.....	70
IV. Précision et sensibilité des mesures.....	71
IV.1. Objectifs	71
IV.2. Répétitivité des mesures.....	72
IV.3. Approche multi-passes	75
IV.4. Sensibilité du WHUST.....	76
IV.4.1. Résultats.....	77
IV.4.2. Bilan.....	82
V. Conclusion.....	84
Chapitre 3 : Lubrification et mécanismes d’endommagement	86
en surface des outils de forges à chaud.....	86
I. Cadre de l’étude.....	86
II. Plan d’expérience - étendue des paramètres de l’étude.....	87
II.1. La lubrification.	87
II.2. La composition du lubrifiant.	89
II.3. Le procédé de mise en forme.....	90
II.4. Les matériaux en contact	92
II.5. Usure de la matrice en cours de production	92
II.6. Bilan.....	93

III. Effet de la lubrification.....	94
III.1.Influence de l'épaisseur déposée en première passe.....	94
III.2.Effet du cumul de lubrifiant à la surface du frotteur	98
IV. Effet de la formulation du lubrifiant.....	101
IV.1. Influence de la granulométrie.....	101
IV.2. Influence de la teneur en liant.	104
V. Influence du procédé : effet de la zone matrice.....	106
VI. Usure industrielle.....	111
VII. Conclusion.....	115
Conclusions et perspectives.....	117
Références bibliographiques.....	128

Résumé

Les conditions de contact et de frottement en forge à chaud engendrent des sollicitations thermomécaniques importantes qui induisent différents modes d'endommagement des outillages. L'objectif principal de la thèse vise à quantifier la capacité des lubrifiants à réduire ou retarder ces endommagements. En premier lieu, le choix d'un banc d'essai de laboratoire permettant la caractérisation tribologique appliquée au domaine de la mise en forme est présenté et justifié. La méthodologie d'utilisation du banc d'essai est détaillée. Les résultats fournis par le banc sont présentés sous forme d'indicateurs de performances, permettant de quantifier les capacités du lubrifiant à réduire le frottement ou à protéger les surfaces, côtés pièces et côtés outils. Ensuite, une première campagne d'essais montre la fiabilité et la robustesse du banc d'essai, notamment en terme de sensibilité et de répétitivité. Enfin, une seconde campagne d'essais conduit à la qualification des dispersions aqueuses graphitées, utilisées comme lubrifiant en forgeage à chaud des aciers. Les résultats présentent les performances du lubrifiant graphité en fonction de sa composition (granulométrie, liant), de son mode d'application où des sollicitations mécaniques qu'il subit.

Mots clés : forgeage à chaud, acier, tribologie, lubrifiant, graphite

Abstract

The conditions of contact and friction encountered in hot forging generate important thermomechanical stresses which induce various damaging modes on the tools. The principal objective of the thesis aims at quantifying the capacity of the lubricants to reduce or delay these damages. First, the choice of a laboratory friction test allowing the tribological characterization applied to hot steel working is presented and justified. The methodology of use of the test bench is detailed. Results provided by the friction test are presented as performance pointers, allowing quantifying the capacities of the lubricant to reduce friction or to protect workpiece and tool surfaces. Second, a first series of tests is run. Results show the reliability and the robustness of the test bench, in particular in terms of sensitivity and repeatability. Finally, a second series of tests is performed. It leads to the qualification of the graphite aqueous solutions, used as lubricant in hot forging of steels. The results present the performances of the graphite lubricants according to their composition (grain size distribution, binder), their spraying technique, and the mechanical loadings they undergo.

Keywords: hot forging, steel, tribology, lubricant, graphite

Nomenclature

Notation	Désignation	Unité
C	Chaleur massique	$J.kg^{-1}°C^{-1}$
D	Ecart maximum entre la fonction théorique et la fonction expérimentale	-
$D\alpha(n)$	Seuil critique théorique (valeur extraite de la table de Kolmogorov)	-
e	épaisseur de la couche de calamine	μm
f	Coefficient de frottement, des modèles basés sur la déformation plastique des aspérités	-
F	Force normale du contact	N
F_a	Force d'adhésion	N
F_c	Force de contact	N
F_e	Force d'amortissement	N
F_n	Force normale du W.H.U.S.T	N
F_{nt}	Force de liaison normale	N
f_o	fonction des probabilités cumulées de la population	-
F_r	Force de répulsion	N
F_s	Force de liaison de cisaillement	N
F_t	Force tangentielle du W.H.U.S.T	N
H	Dureté du matériau	$N.m^{-2}$
i	Indice variant de 1 à n	-
L_c	Longueur critique avant l'apparition de rayures	mm
Léq	Largeur de la zone de contact	mm
L_i	Indice de lubrification (F_t/F_n)	-
m	Coefficient de frottement, loi de Tresca	-
m_i	Masse du lopin froid	g
m_f	Masse du lopin décalaminé à l'issue de la chauffe	g
n	Nombres de mesures	-
p	Pénétration du frotteur dans l'éprouvette	mm
q'	Longueur de la zone de contact	mm
K	Conductivité thermique	$W.m^{-1}°C^{-1}$
K'	Raideur	$N.m^{-1}$

k	Coefficient d'usure	-
k'	Constante d'oxydation	$\mu\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
Ra	Rugosité moyenne du frotteur	μm
R_o	Rayon d'attaque du frotteur	mm
t	Temps de chauffe	sec.
$T_{X \text{ cal.}}$	Taux de calamine	%
\bar{v}_g	Vitesse de glissement	$\text{mm}.\text{s}^{-1}$
W	Taux d'usure (Volume de matière arrachée par seconde)	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
X_l, X_n	La plus petite mesure et la plus grande mesure	-
α	Taux de confiance donné par la table de Kolmogorov	-
$\alpha(T)$	Coefficient de dilatation	-
α'	Rapport entre la surface réelle de contact et la surface apparente	-
δ	Hauteur du retour élastique	mm
$\Delta\theta$	Accroissement totale de la température de la matrice	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta\theta_s$	Accroissement de température dû au contact statique	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta\theta_g$	Accroissement de température dû au glissement	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta\theta_t$	Perte de chaleur durant le transfert de l'éprouvette	$^{\circ}\text{C}$
ε_p	Déformation plastique	-
$\dot{\varepsilon}$	Vitesse de déformation plastique	s^{-1}
Π_m	Paramètres mécaniques	-
Π_p	Paramètres physiques	-
Π_c	Paramètres chimiques	-
σ_o	Contrainte d'écoulement	MPa
σ_n	Contrainte normale, pression de contact	MPa
σ_t	Contrainte de frottement (tangentielle)	MPa
θ_c	Température à l'issue de la chauffe	$^{\circ}\text{C}$
θ_e	Température d'essai	$^{\circ}\text{C}$
θ_{max}	Température maximum en surface des matrices	$^{\circ}\text{C}$
$\theta_{\text{préchauffage}}$	Température de préchauffage des matrices	$^{\circ}\text{C}$
$\theta_{\text{régime}}$	Température de régime des matrices	$^{\circ}\text{C}$
ω	Hauteur du bombé	mm
μ	Coefficient de frottement, loi de Coulomb	-

Introduction

La mise en forme par déformation plastique est aujourd'hui intégrée dans le processus de fabrication de nombreux composants dits de sécurité et destinés à l'automobile ou à l'aéronautique (éléments moteurs, de fixations, de transmission de puissance, etc.). Un lopin de géométrie simple est déformé plastiquement entre deux matrices afin d'obtenir la forme désirée. Le durcissement par écrouissage, l'orientation du métal suivant la géométrie extérieure de la pièce (le fibrage), l'absence de contraintes résiduelles liées à l'usinage font que la mise en forme par déformation plastique produit des pièces possédant d'excellentes propriétés mécaniques.

Ces procédés de mise en forme, comprenant notamment l'ensemble des procédés de forgeage, peuvent être réalisés à froid (grande précision géométrique, très bon état de surface final) ou à chaud (réduction des contraintes dans les outillages, réalisation de formes complexes). Leur réussite est conditionnée par de nombreux paramètres, complexes et difficiles à maîtriser [She01].

Lors du contact outil/pièce, les matrices sont soumises à de fortes sollicitations d'origines mécaniques (vitesse, pression, glissement de matière), thermiques (échauffement dû au frottement et à la déformation plastique des pièces) et chimiques (réactivité des surfaces en présence des divers éléments lubrifiants, oxydes de la pièce, etc.) [Pic05]. Ces sollicitations thermomécaniques et physicochimiques induisent différents modes d'endommagement des matrices : fatigue thermique, fatigue mécanique, déformation plastique, usure abrasive, transferts de matière...

En mise en forme à chaud, la température maximale que subit la matrice en surface est un des facteurs déclencheurs de ces phénomènes de dégradation. En effet, des mesures sur sites ont montré que la présence de points chauds situés sur la matrice semble être à l'origine de phénomènes de collage : les lopins restent collés aux outillages de forge [Bar04]. Ce contact prolongé engendre des transferts de chaleur du lopin chaud (de l'ordre de 1000°C dans le cadre de la mise en forme de pièces en acier) vers la matrice, transferts qui nuisent considérablement à la tenue mécanique des outillages, et réduisent considérablement leur durée de vie. Il s'en suit des soucis économiques importants puisqu'en coût direct, l'outillage représente en moyenne 10 à 15% du coût de fabrication des pièces forgées [Sta02, Ter06]. Il convient d'y rajouter les coûts induits par les défauts générés sur les pièces (défauts de surface, évolutions dimensionnelles) et ceux résultant d'une baisse de productivité (changements plus fréquents d'outils, réparations, incidents de production).

Deux solutions existent actuellement pour remédier aux dégradations d'outillage :

- les traitements de surface pour protéger l'outillage de l'usure
- la lubrification de l'interface pour améliorer les conditions de contact et de frottement.

Les traitements de surface effectués sur l'outillage sont essentiellement des couches de consolidation. Ces couches permettent à l'outil de résister à l'usure en augmentant sa dureté superficielle. Nous pouvons distinguer deux types principaux de traitement : les traitements de surface réalisés par des procédés de diffusion et les dépôts de couches dures par PVD ou CVD [Nav99, Cho03]. En forge à chaud, les traitements les plus utilisés sont la nitruration par diffusion et le chromage par revêtement [Mul90].

La lubrification doit améliorer les conditions de contact aussi bien lors de la mise en forme que lors de l'éjection de la pièce. Le rôle du lubrifiant est donc triple :

- améliorer les conditions de contact et de frottement en diminuant la contrainte de cisaillement au niveau de l'interface pièce/outil ;
- assurer le refroidissement des outils ;
- nettoyer la surface des outils des débris résultants soit de l'usure, soit de la pollution de surface (oxydes, calamines, etc.).

Les qualités indispensables d'un bon lubrifiant sont par conséquent :

- d'adhérer aux surfaces sur lesquelles il est déposé. Ses liaisons de surfaces doivent être plus résistantes que les cisaillements auxquels il est soumis ;
- d'être capable de subir de grandes augmentations de surface sans perdre son pouvoir lubrifiant (cette qualité est indispensable en mise en forme à froid où le lubrifiant est appliqué sur la pièce) ;
- de conserver des propriétés lubrifiantes constantes dans les conditions de températures, de pressions et de vitesses de glissement propres au procédé de mise en forme ;
- de faciliter le déplacement de la matière sans créer de résidus pouvant altérer la qualité de la pièce ou des outils ;
- de réaliser une isolation thermique afin de réduire l'échauffement des outils.

En plus de ces exigences principales, le lubrifiant doit également :

- assurer un refroidissement de la surface de l'outillage entre chaque frappe, bien qu'en toute rigueur cette fonction doit être dissociée de la fonction lubrification, qui intervient quant à elle pendant la frappe ;
- de contribuer à l'obtention d'un excellent état de surface de la pièce forgée, ceci pour éviter des reprises et permettre une finition par calibrage à froid ou usinage.

Mais l'efficacité d'une lubrification ne dépend pas uniquement des propriétés du lubrifiant, et donc de sa composition chimique. Le procédé d'application du lubrifiant joue également un rôle essentiel puisqu'il conditionne en partie le régime de lubrification.

De façon générale, un régime de lubrification mixte, voire limite, sera recherché en mise en forme [Sch83]. Ces régimes de lubrifications sont caractérisés par la présence d'un film lubrifiant continu bien adhérent aux surfaces actives des matrices. Dans cette configuration, le rôle du lubrifiant est d'assurer le niveau de frottement désiré au contact de la pièce en supportant une partie des contraintes [Wil95]. Ainsi, il permet d'éviter tout type de microgrippage ou de collage de la pièce sur l'outillage et donc de réduire l'endommagement de surface des outillages. Pour se faire, l'application du lubrifiant doit être assurée suivant des conditions optimales d'utilisation car seule une couche régulière, d'une épaisseur déterminée, peut produire un effet de lubrification satisfaisant [Jeo01].

En mise en forme par forgeage à chaud, les produits lubrifiants les plus couramment employés sont des suspensions de graphite dans de l'eau. Le mode d'application dépend de plusieurs facteurs : le nombre de pièces à forger, la taille et la géométrie des pièces, le type d'opération et de machine, la nature et viscosité du produit à appliquer. A l'heure actuelle, le mode d'application le plus employé est la pulvérisation sur l'outillage avant chaque frappe [Yan06]. Mais de nombreuses questions restent à l'heure actuelle sans réponse.

D'un point de vue scientifique. A l'heure actuelle, les liens entre les propriétés du graphite à l'échelle nanométrique et micrométrique sont encore très mal connus [Sch07]. Si les mécanismes de glissement des plans de graphènes, donc à l'échelle du nanomètre, sont bien identifiés [Pie93], les implications de ceux-ci sur le comportement tribologique des grains de graphite sont très peu traitées dans la littérature et restent relativement obscures. Il en va de même des actions du liant sur l'accroche des grains de graphite sur la surface des outils, ou sur les connexions des grains entre eux.

D'un point de vue industriel. Les fournisseurs de lubrifiant développent constamment de nouveaux produits, plus performants, plus propres. Les questions qui se posent alors à l'industriel sont :

- Quel lubrifiant doit-on utiliser pour un procédé de forgeage donné ?
- En quelle quantité, où, quand et comment faut-il l'appliquer ?

Les enjeux derrière ces questions sont capitaux puisque cela concerne directement l'amélioration de la qualité des pièces fabriquées, l'augmentation de la durée de vie de l'outil et de la productivité.

Pour apporter des éléments de réponses concrets à ces questions nous avons développé une approche expérimentale reposant sur un banc de caractérisation tribologique spécifique. Notre étude se limite au domaine très vaste de la tribologie des procédés de forge à chaud. Elle concerne la compréhension et la modélisation des phénomènes d'endommagement en surface des outils lors du forgeage d'aciers en présence de lubrifiant.

Le déroulement de l'étude s'articule autour des trois phases suivantes :

- Caractérisation tribologique appliquée au domaine de la mise en forme, choix d'un banc d'essai de laboratoire.
- Validation du choix d'un banc d'essai, application à l'étude d'un procédé de mise en forme générique.
- Etude du lubrifiant et de son mode d'application.

Caractérisation tribologique en mise en forme, choix d'un banc d'essai de laboratoire

Il est difficile de réaliser des mesures sur sites pour caractériser les interfaces mises en jeu dans le domaine de la mise en forme à chaud. Cela entraîne des contraintes de coût et de production trop importantes. Actuellement, le moyen le mieux adapté consiste à la réalisation d'essais en laboratoire. Un état de l'art des dispositifs de caractérisation tribologiques utilisables en mise en forme à chaud est présenté dans le chapitre 1. Une attention particulière est portée au WHUST, Warm and Hot Upsetting-Sliding Test, l'un des bancs d'essai développés au LAMIH. Ce banc d'essai implique un frotteur représentant l'outil de mise en forme et une éprouvette représentant le lopin. Le frotteur vient en contact avec l'éprouvette et glisse le long de sa surface où il crée une déformation plastique sous l'action d'une pression de contact imposée. Les réglages du banc sont nombreux et permettent de reproduire en laboratoire un ensemble conséquent de paramètres tribologiques influents. La méthodologie, permettant de reproduire sur le banc d'essai du LAMIH des conditions de contact représentatives des procédés industriels, est détaillée. Les résultats fournis par le banc sont présentés sous forme d'indicateurs de performances et sont déclinés en deux catégories :

- Quantification du pouvoir lubrifiant du produit testé,
- Qualification du pouvoir de protection des surfaces (côté pièce et/ou côté outil).

Application à l'étude d'un procédé de mise en forme générique

Le second chapitre s'attache à la validation du choix du WHUST pour l'étude tribologique des procédés de mise en forme à chaud. La méthodologie, présentée au chapitre 1, est développée autour d'un procédé de mise en forme générique, représentatif des métiers de l'estampage. Les paramètres de réglage du banc d'essai sont identifiés de façon à reproduire en laboratoire les conditions de contact mécaniques, physiques et chimiques rencontrées à l'interface lopin/matrice du procédé industriel. Une attention particulière est portée au respect des conditions d'interface : taux de calamine, dépôts de lubrifiant. Deux campagnes d'essais montrent la robustesse du banc d'essai du LAMIH : les mesures sont répétitives et suffisamment sensibles pour distinguer le comportement de deux lubrifiants a priori identiques.

Etude du lubrifiant et de son mode d'application

Les influences de la lubrification, de la composition du lubrifiant et de certains paramètres liés aux procédés sont étudiées via une campagne d'expérimentations. Dans un premier temps les paramètres de l'étude et leur plage de variation sont définis en fonction des spécificités des procédés industriels. Ensuite, les réglages du banc d'essai sont détaillés et les essais sont réalisés. Les résultats sont présentés à l'aide des indicateurs de performances définis au premier chapitre.

La conclusion générale dresse un bilan des principaux résultats et de la façon dont ceux-ci permettent de mieux appréhender la lubrification des procédés de forgeage à chaud.

Enfin différentes perspectives sont proposées à ces travaux. Celles-ci sont relatives à :

- l'approfondissement des essais permettant une meilleure connaissance du rôle de certains composés, telle que la nitruration de l'outillage,
- l'application de méthodologie d'utilisation du banc d'essai à la qualification de produits lubrifiants autres que les dispersions de graphite,
- la façon dont les résultats fournis par le banc d'essai peuvent servir à quantifier l'usure des outillages de mise en forme, notamment via une approche particulière prenant en compte la composition du troisième corps.

Chapitre 1 : Caractérisation tribologique des procédés de mise en forme

I. Introduction

Les étapes de mise en forme, qu'elles soient réalisées à température ambiante ou à chaud, conditionnent le matériau dans son intégralité. Si les conditions de contact régnant au sein de ce procédé ne sont pas maîtrisées elles conduisent à des gradients de déformation importants en surface, sources de défauts localisés (rayures, fissures, grippages) ou généralisés (déchirement de tôle, blocage de la pièce dans l'outillage). La maîtrise des conditions de contact est donc devenue un passage obligatoire dans tous processus d'optimisation d'une chaîne de fabrication et requiert notamment l'utilisation d'outils d'analyse spécifiques.

Pour caractériser les conditions de contact avec glissement, nous faisons souvent appel à des lois surfaciques, couramment appelées modèles de frottement, qui expriment la contrainte de frottement σ_t en fonction de paramètres mécaniques Π_m , physiques Π_p et/ou chimiques Π_c :

$$\sigma_t = \sigma_t(\Pi_m, \Pi_p, \Pi_c) \quad (1)$$

Dans la plupart des applications, seule l'évolution de quelques paramètres a une influence notable sur les conditions de contact et de frottement. Ainsi les modèles de frottement actuels n'utilisent qu'un maximum de deux à trois grandeurs mécaniques, physiques ou chimiques pour caractériser les contacts avec glissement. Les paramètres dont les variations n'ont pas une influence notable (paramètres cachés) sont intégrés dans des constantes sans dimensions : *les coefficients de frottement*. Les modèles de frottement peuvent être regroupés en deux grandes familles : les modèles linéaires et les modèles non linéaires. Dans les modèles linéaires, le coefficient de frottement donne le rapport de proportionnalité entre la contrainte de frottement et le paramètre représentatif des conditions de contact. Nous retrouvons les lois de frottement bien connues de Coulomb et de Tresca. Dans les modèles non linéaires, le coefficient de frottement indique l'évolution de la contrainte de frottement en fonction du ou des paramètres de la loi [Dub98]. Dans cette catégorie nous retrouvons les modèles de « vagues plastiques » (basés sur la déformation des rugosités en contact). Dans le cas du forgeage, deux modèles de vagues plastiques peuvent être discernés : le modèle initié par Challen et Avitzur [Cha79, Avi86], où les pièces sont supposées lisses et les outils rugueux, le modèle initialement développé par Bay [Bay90, Sch90, Pet97], où les outils sont supposés lisses et les pièces rugueuses.

Les modèles de frottement sont étroitement liés aux lois d'usure : l'endommagement d'une surface est la conséquence de conditions de contact sévères. La plupart des lois d'usure sont basées sur le modèle proposé par JF. Archard [Arc53]. Cette loi permet de quantifier l'usure en mesurant un volume de matière dit « usé » en fonction d'un certain nombre de paramètres relatifs aux matériaux et aux procédés. Son expression est donnée par :

$$W = k \frac{F \overline{v_g}}{H} \quad (2)$$

où F est la force normale du contact (N), $\overline{v_g}$ la vitesse de glissement (m.s^{-1}), H la dureté du matériau (N.m^{-2}) et W le volume de matière arrachée par seconde ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$). k représente le coefficient d'usure intégrant les paramètres physicochimiques autres que F , H et $\overline{v_g}$ (tels que la microstructure, la lubrification,...). Ce coefficient est compris entre 10^{-3} pour un taux d'usure rapide, estimé inacceptable, et 10^{-7} pour un taux d'usure jugé admissible [Lud92]. La loi d'Archard est cependant un modèle simple, une première approche qui n'a d'autres ambitions que de fournir un ordre de grandeur de la vitesse d'usure en fonction de paramètres simples à mesurer (force, vitesse, dureté). Des lois plus récentes expriment le taux d'usure en prenant en compte davantage de paramètres que ceux apparaissant dans l'équation (2). Ils font notamment la distinction entre les différents types d'usure (adhésive, abrasive...), mais reposent sur les mêmes hypothèses de départ : les interactions entre les aspérités en surface des corps en contact. Les paramètres de ces lois sont donc essentiellement des paramètres mécaniques. Il est toutefois important de conserver à l'esprit que l'usure résulte d'un ensemble de phénomènes complexes, pouvant impliquer jusqu'à 25 paramètres différents, et qu'aucun modèle particulier ne doit être pris en considération pour une étude sans être validé par des essais expérimentaux spécifiques. Lors des essais, il est essentiel de reproduire l'ensemble des paramètres caractéristiques du contact glissant étudié. Or il est souvent impossible de connaître a priori quels sont les paramètres essentiels à l'étude. Ainsi, la méthode la plus simple, mais également la plus fiable, pour savoir si un dispositif expérimental simule correctement le comportement recherché est de vérifier que les résultats fournis par le dispositif (débris et taux d'usure, frottement, etc.) sont identiques, ou tout au moins comparables, à ceux du procédé étudié.

Il apparaît donc essentiel pour notre étude sur la caractérisation de la lubrification en forge à chaud de connaître le plus précisément possible les paramètres physicochimiques du contact étudié (lubrification, propriété de l'outil et de la pièce...) de façon à les reproduire au mieux en laboratoire.

Dans un premier temps, un état des lieux en terme d'endommagement de surface et d'usure des outils sera donc présenté. Les dispositifs d'essai tribologiques dédiés à la mise en forge à chaud seront ensuite introduits. Une attention particulière sera portée au banc d'essai développé par le LAMIH, en précisant notamment la méthodologie développée pour assurer au banc sa représentativité par rapport aux procédés de mise en forme.

II. Endommagement des matrices

En forge à chaud, le lopin est mis en forme par « écrasement » entre deux matrices. Les matrices sont alors soumises à des sollicitations thermomécaniques importantes. Ces sollicitations entraînent l'apparition de défauts et limitent par conséquent leur durée de vie. Les principaux défauts rencontrés sont la déformation plastique, la fatigue mécanique, la fatigue thermique, l'usure abrasive et la formation de couches de transfert [Bar04].

II.1. Endommagement par déformation plastique

L'objectif de la mise en forme est de donner à un lopin une forme prédéfinie, répondant à des tolérances dimensionnelles données. Dans le cadre du forgeage, donc de la mise en forme sans enlèvement de matière, ceci passe obligatoirement par la création de déformations plastiques généralisées à l'ensemble du lopin. Ces déformations plastiques génèrent des contraintes mécaniques sur les matrices. Ces contraintes sont fonction des formes initiales et finales du lopin, de son matériau, des températures de mise en forme. Les vitesses de déplacement des matrices ont également une importance, puisqu'elles ont une action directe sur les taux de déformations. Enfin, la vitesse de glissement au niveau des interfaces lopin/matrice joue également un rôle essentiel puisqu'elle conditionne le régime de lubrification, donc le niveau des contraintes tangentielles que subiront les surfaces des matrices.

Sous certaines conditions, ces sollicitations mécaniques peuvent atteindre des valeurs telles que la limite d'élasticité du matériau des outils soit localement dépassée. Des déformations plastiques apparaissent alors en surface, sur des épaisseurs pouvant atteindre 200 μ m [Bar04]. Seul un examen micrographique permet de mettre en évidence avec certitude la nature de ce défaut, parfois assimilée à tort à du « fluage » (figure 1).

L'endommagement de la surface par déformation plastique sera d'autant plus présent que la température en surface de la matrice sera importante. En effet, au delà d'une certaine valeur, les sollicitations thermiques font fortement décroître la contrainte d'écoulement [Miq02].

Ainsi les aciers d'outillage à chaud de structure martensitique, telle que la nuance X38CrMoV5-3 couramment utilisée en forge à chaud, voient leur résistance mécanique s'effondrer au-delà de 550 °C, et perdre jusqu'à 60% de leur valeur. Ces aciers ne peuvent pas être utilisés sans risque de déformations rapides au-delà de 600 °C [Lev03].

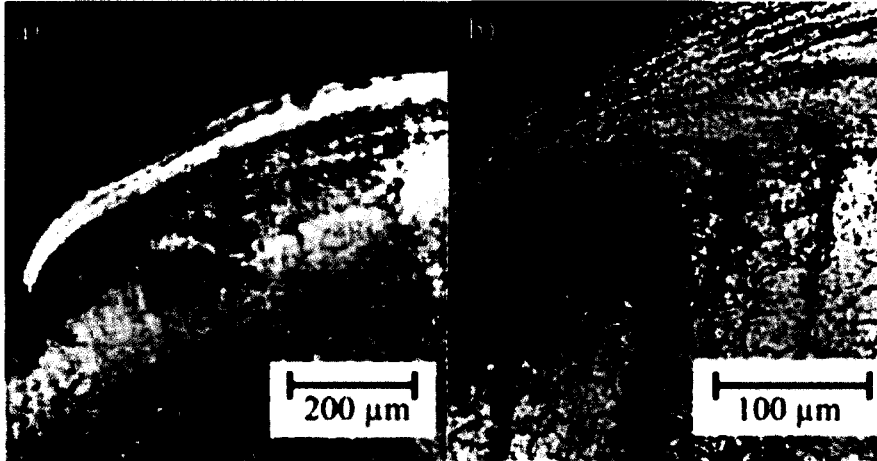


figure 1 : Endommagement des matrices, déformation plastique au niveau d'un rayon convexe d'outils ayant forgé 1000 pièces en acier C45 à 1100-1150°C.
Matériau de l'outil :
a) X32CrMoV12-28 [Wal99]
b) X38CrMoV5-3 [And99]

La consolidation des surfaces actives des outils par un traitement spécifique ou par le dépôt d'un revêtement superficiel est alors une voie de solution à ce type d'endommagement. L'effet de ces traitements est essentiellement de garantir une dureté en surface suffisamment élevée durant tout le cycle de mise en forme, retardant la chute de dureté liée à l'augmentation de la température [Kas08]. Il est toutefois à noter que dans certains cas, cette « consolidation » n'est pas suffisante pour empêcher le défaut d'apparaître. Il a par exemple été montré dans une étude précédente relative à un procédé d'extrusion à froid [Ver02], que l'utilisation d'un revêtement de nitrure de titane (PVD ou CVD) n'empêchait pas l'apparition de déformations plastiques localisées dans une zone de congé de la matrice.

II.2. Endommagement par fatigue mécanique

L'endommagement par fatigue mécanique est directement lié aux cadences de mise en forme. La succession de frappes induit des cycles de chargement/déchargement générateurs de contraintes qui, bien qu'inférieures à la limite élastique, peuvent conduire à une détérioration irrémédiable de la matrice. L'endommagement opère en deux phases :

- amorçage des premiers défauts sous la surface sous forme d'un réseau de fissures,
- les fissures se propagent vers la surface et aboutissent à la rupture de parties significatives de la matrice (figure 2).

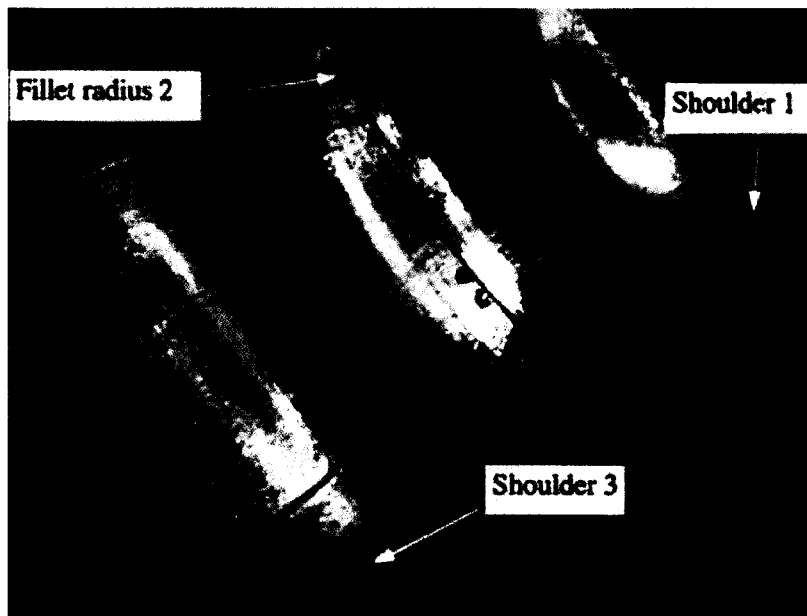


figure 2 : Endommagement des matrices, fissure mécanique sur un rayon de raccordement (*fillet radius 2*) et écaillages dus à de la fatigue mécanique sur un outil en carbure cémenté ayant forgé 500 pièces d'acier inoxydable AISI 306L à 1000°C [Bru99]

L'amorce de la première fissure qui conduira à la ruine de l'outillage est fonction de l'amplitude des variations de contraintes, le nombre de cycles, mais également la fréquence des sollicitations ou encore du gradient de contraintes. Des critères de fatigue peuvent être utilisés pour prédire l'apparition de ces défauts et mettre en place une maintenance préventive. Toutefois, B. Weber, dans une étude menée il y a près de dix ans, répertoriait près de quarante critères de fatigue multiaxiaux différents, ce qui souligne bien la complexité du phénomène et la difficulté à prédire de façon fiable la rupture par fatigue sur des géométries et sous des chargements « industriels » [Web99].

II.3. Endommagement par fatigue thermique

Les cadences de mise en forme imposent des cycles de sollicitations mécaniques, mais également thermiques. En cours de production, les surfaces sont soumises à des variations de température dont l'allure est caractérisée par des montées brutales périodiques (figure 3).

A chaque frappe, la matrice subit un pic de chaleur $\Delta\theta$ qui est du, d'une part, au contact statique avec le lopin chaud ($\Delta\theta_s$) et, d'autre part, au frottement exercé sur ses parois lors du glissement de matière ($\Delta\theta_g$). Ce qui donne un accroissement total de température égal à :

$$\Delta\theta = \Delta\theta_s + \Delta\theta_g \quad (3)$$

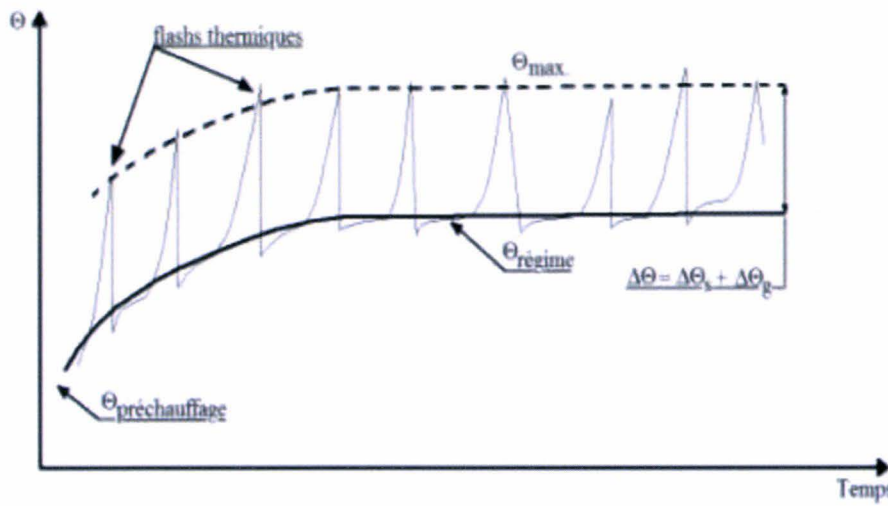


figure 3 : Endommagement des matrices, cycle thermique en surface des outillages tout au long de leur durée de vie [Bar04]

Après la frappe, les actions cumulées du retrait du lopin, de la diffusion de la chaleur depuis la surface vers le cœur de la matrice et de l'application du lubrifiant provoquent une phase de refroidissement de la surface de l'outil. Ces apports et pertes successifs de chaleur entraînent l'échauffement de la matrice qui passe de sa température de préchauffage $\theta_{\text{préchauffage}}$ à une température de régime $\theta_{\text{régime}}$. La température maximum obtenue à la surface de l'outillage θ_{max} (figure 3) est donnée par :

$$\theta_{\text{max}} = \theta_{\text{régime}} + \Delta\theta \quad (4)$$

Des mesures sur sites industriels ont montré que dans certains cas de forgeage, le pic de température superficielle $\Delta\theta$ pouvait atteindre 500°C , et donc être bien supérieur à la température de régime des matrices.

Ces variations successives de la température de surface sont à l'origine de l'apparition de défauts par fatigue thermique. Au contact lopin/matrice, la chaleur issue du lopin fait subir une dilatation en extrême surface de la matrice. Par contre, les sous couches restées froides s'opposent à cette dilatation, ce qui génère des contraintes dans les directions tangentes à la surface. Il peut s'ensuivre une plastification des couches superficielles.

Durant la phase de refroidissement du cycle de forgeage (éjection du lopin, application du lubrifiant), les couches superficielles subissent un retrait. Si ces couches ont subi une déformation plastique durant le contact lopin/matrice le retrait va créer des contraintes de traction importantes, susceptibles de conduire à une nouvelle plastification, voire à l'amorce d'une fissuration superficielle [Den00].

Il apparaît alors une structure de réseau de fissures en surface caractéristique de l'endommagement par fatigue thermique (figure 4).

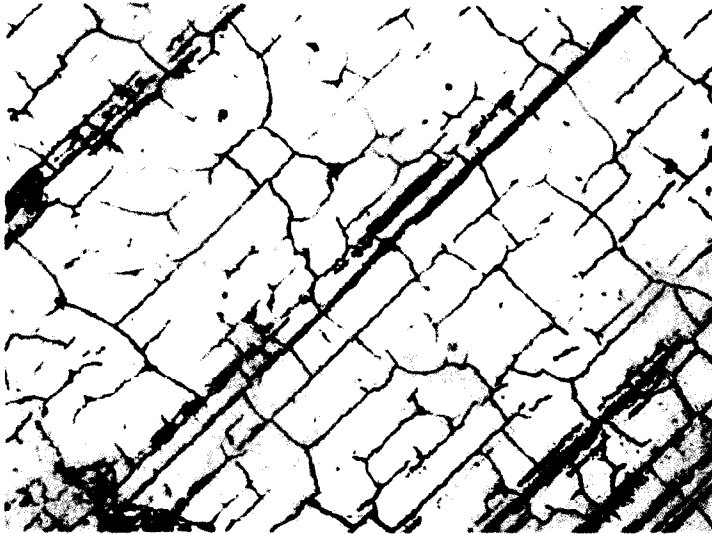


figure 4 : Endommagement des matrices, réseau de fissures de fatigue thermique sur une matrice d'estampage nitrurée [Bar04]

II.4. Endommagement par usure abrasive

L'usure abrasive est un phénomène d'usure par déplacement et/ou par enlèvement de matière de la surface frottante d'une pièce mécanique (figure 5). L'usure abrasive implique toujours des déformations plastiques locales au niveau de la surface, mais pas nécessairement un enlèvement de matière par production de débris d'usure. Ainsi, si la particule est de forme régulière et que la pénétration est faible, l'abrasion se traduira par une déformation plastique en extrême surface, sans enlèvement de matière, et la trace créée sera un microsillon de labourage. Si la particule présente des angles vifs, elle agira comme un micro outil de coupe et libérera des débris d'usure sous forme de copeaux ou éclats [Arc80, Rig97]. Ainsi, contrairement à ce que laisse entendre la loi d'Archard (2), l'usure n'est pas conditionnée uniquement par la dureté, la pression et la vitesse de glissement. Les températures, l'état de surface en contact, les performances du lubrifiant jouent également un rôle essentiel dans l'apparition de ce type d'endommagement de surface. De plus nous pouvons distinguer deux origines différentes au processus d'abrasion. La première est l'abrasion causée par les aspérités de la surface la plus dure qui indentent, labourent, coupent ou rayent la surface opposée. Mais cette origine ne permet pas d'expliquer l'usure des outils, dont la dureté en surface est bien plus importante que celle des pièces mises en forme. L'abrasion peut également être générée par des particules abrasives du troisième corps [God90], particules très dures, emprisonnées entre la surface du lopin et celle des outils. Ces particules indentent, labourent, coupent ou rayent les deux surfaces du contact. Ces particules abrasives sont soit des particules d'usure préalablement libérées des surfaces initiales, soit des particules extérieures qui viennent « polluer » le contact.

Dans le premier cas, des fragments arrachés de l'une des surfaces (au départ ils proviennent de la surface la plus tendre) durcissent suite à l'érouissage important ayant précédé leur arrachement. Ils deviennent alors suffisamment durs pour rayer la surface des outils. Le second cas peut être illustré par le cas de la calamine. Se développant en surface des lopins en estampage, la calamine est une source importante de débris qui se détachent facilement de la surface des lopins et restent emprisonnés dans le contact. Elle favorise par conséquent une usure abrasive par « pollution de surface ».

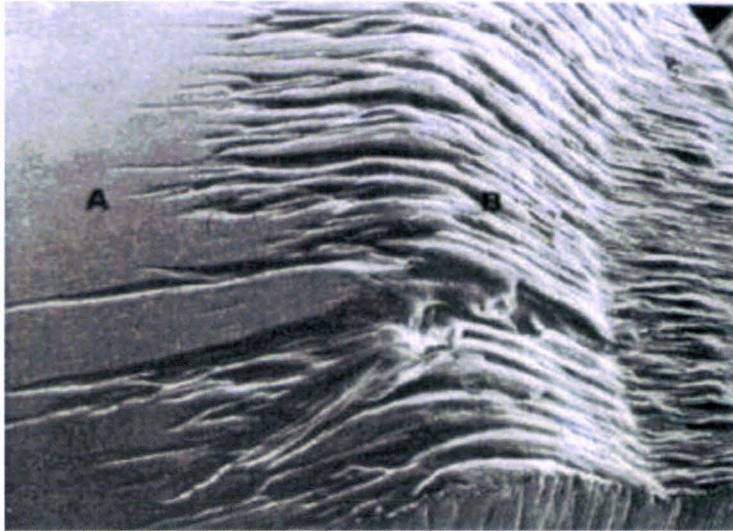


figure 5 : Endommagement des matrices, usure par abrasion d'une matrice [Bar04]

II.5. Usure adhésive et couches de transfert

En cours de vie, la forte activité chimique des surfaces en contact, du fait notamment des pressions de contact élevées, de l'échauffement du contact et de la déformation plastique, conduit à la formation d'une pellicule plus ou moins adhérente aux surfaces des matrices. L'épaisseur de cette couche de transfert peut varier de quelques micromètres à plusieurs dizaines de micromètres [Bar04]. Dans certains procédés de mise en forme, tel que le laminage de produits plats, cette couche de transfert est recherchée car elle permet un meilleur comportement tribologique de l'ensemble bande/lubrifiant/cylindre de travail [Mon00]. Toutefois, en forgeage de précision, la formation de couches de transfert modifie les côtes et l'état de surface des pièces et peut contrarier l'éjection des pièces. Cela conduit ensuite au grippage et la matrice est alors mise hors service.

Tous traitements ou revêtements de surface qui contribuent à diminuer la formation de la couche de transfert sont potentiellement intéressants dans la lutte contre l'usure des matrices de forge à chaud et à mi-chaud.

La formation de cette couche de transfert est générée par de l'usure adhésive. Lorsque les aspérités des deux surfaces entre en contact, elles peuvent former une « micro soudure » qui possède une limite de rupture qui lui est propre [Rig97]. Cette limite dépend de paramètres tels que les propriétés mécaniques des deux matériaux, la température atteinte au niveau du contact, la température de soudure des deux aspérités, la nature du lubrifiant, etc. [Zam98]. Trois cas de figure se présentent alors :

- *La micro soudure est moins résistante que les deux matériaux.* Les deux aspérités se séparent au niveau de la jonction. Aucun transfert de matière ne se produit mais les surfaces de contact sont modifiées. L'usure des deux surfaces est très faible ou nulle. Ce cas de figure apparaît lorsque la liaison entre aspérités est dominée par les forces de type Van der Waals.
- *La micro soudure des aspérités est moins résistante que l'un des deux matériaux.* Il se produit alors un transfert de matière entre les deux surfaces. Un amas de matière se forme alors au niveau des aspérités du matériau possédant la plus grande force cohésive (figure 6a). Ce phénomène est à l'origine de la couche de transfert apparaissant sur les outillages.
- *La micro soudure des aspérités est plus résistante que les deux matériaux.* Ceci conduit directement à la création de débris (figure 6b). Les contacts locaux créent des déformations plastiques mais aussi des changements dans la microstructure de la zone de proche surface, ce qui crée une hétérogénéité. Ces changements rendent possible la libération de fragments de matière à cause des forts cisaillements localisés.

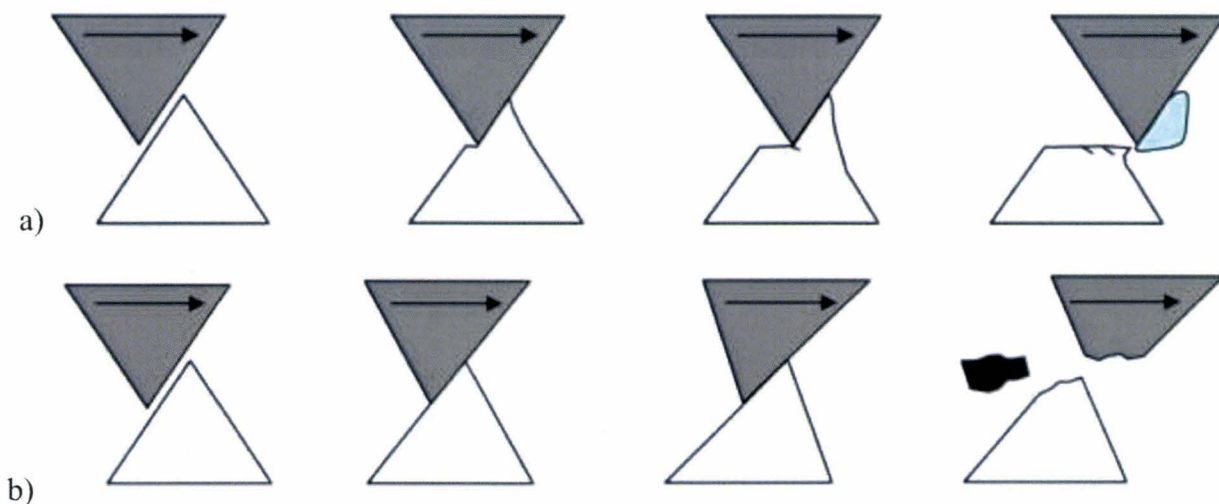


figure 6 : Endommagement des matrices, adhésion entre deux aspérités et :

(a) création d'un amas de matière adhérent

(b) création d'un débris d'usure

A l'image de l'usure abrasive, l'usure adhésive génère également des débris. La distinction entre usures abrasive et adhésive n'est donc jamais très simple à mettre en évidence expérimentalement. La différence se fait sur la nature des débris libérés dans le troisième corps, composé de « copeaux d'usure » du matériau abrasé pour l'usure abrasive, ou de particules constituées notamment des deux matériaux en contact pour l'usure adhésive. Une fois que des débris sont libérés des surfaces, le phénomène « usure » correspond donc à l'action simultanée de l'usure abrasive (action du troisième corps) et de l'usure adhésive. Ces modes d'usure sont donc dans la pratique rapidement combinés.

II.6. Localisation des endommagements sur une matrice de forge

La forme d'une matrice de forge est caractérisée par trois zones différentes : la gravure, le flanc et la bavure (figure 7). La gravure est située au centre de la matrice, elle présente la forme principale du produit à obtenir. Le flanc se trouve à la périphérie de la gravure, il est caractérisé par des surfaces quasiment parallèles au sens du déplacement des matrices. Les zones de bavure se trouvent à la périphérie de la matrice. Ces zones jouent un rôle essentiel en forge à chaud. La présence de la bavure empêche un contact direct entre les matrices inférieure et supérieure, contact qui serait synonyme de casse des outils. Mais la formation d'un cordon de bavure à la jonction entre les matrices permet surtout de réguler les écoulements plastiques du lopin. Cela facilite le bon remplissage des gravures et permet de maîtriser la géométrie de la pièce finie [Alt96]. De part la nature des contacts qu'elles conditionnent, les zones de gravure, flanc et bavure subissent des modes d'endommagement différents. La nature de ces endommagements est liée à la géométrie des surfaces (congés, fond de gravure, etc.) ainsi qu'aux sollicitations thermomécaniques qui y règnent.

En fond de gravure, les pressions de contact sont élevées et les vitesses de glissement sont très faibles. De l'endommagement par fatigue thermique et/ou mécanique y apparaît donc de façon préférentielle. Sur les flancs, les vitesses de glissement sont plus importantes qu'en gravure et les pressions de contact peuvent être plus élevées. Cette zone, qui est aussi une zone de fort glissement, est donc sujette à de l'usure abrasive. De plus, ces surfaces présentent des géométries complexes, avec notamment des rayons de raccordement. La précontrainte des matrices n'est pas suffisante pour maintenir un état de contrainte majoritairement hydrostatique. La zone du flanc est donc une zone où la matrice peut également subir des déformations plastiques importantes. Enfin ce sont dans les zones de bavure que les vitesses de glissement sont les plus élevées. Ces zones sont également le siège de longueurs de glissements importantes, et sont par conséquent sujettes à de fortes usures abrasives.

La figure 7 illustre la localisation principale des modes d'endommagement, qu'ils interviennent simultanément ou indépendamment.

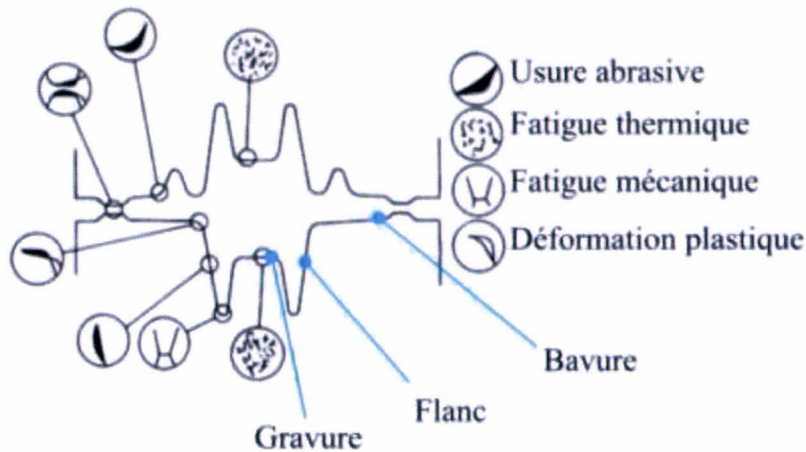


figure 7 : Endommagement des matrices, localisation des principaux modes d'endommagement visibles en surface des matrices [Alt96]

II.7. Conclusion

Les fortes sollicitations thermomécaniques induites par la mise en forme de lopins à chaud sont à l'origine de défauts pouvant réduire considérablement la durée de vie des matrices de forge. A l'exception des phénomènes de fatigue mécanique, l'endommagement des matrices s'amorce et se développe à partir de leurs surfaces actives, d'où l'importance attachée à la protection de ces surfaces. Les démarches industrielles qui découlent de cette remarque sont assez empiriques et reposent essentiellement sur l'utilisation de traitements de surfaces et de lubrifiants adaptés à la forge à chaud. Toutefois, il a été montré que si l'utilisation de revêtements durs augmentait effectivement la durée de vie des outillages, ils n'étaient pas suffisants pour supprimer l'ensemble des défauts [Kas08]. Ceci justifie donc pleinement le sujet de notre étude basée sur l'importance de la lubrification et son influence sur le comportement de l'interface matrice/lubrifiant/lopin en cours de mise en forme à chaud.

III. Méthodes de caractérisation tribologique

Trois types d'approches sont souvent rencontrés pour l'étude des contacts lubrifiés :

- Réalisation de mesures in situ, sur sites industriels ;
- Analyse des conditions de contact à l'aide de l'outil numérique;
- Réalisation de mesures sur des bancs de laboratoire.

Ces trois approches permettent d'identifier des coefficients de frottement et d'analyser l'effet du lubrifiant, mais ne nous fournissent pas les mêmes informations sur le tribosystème étudié.

III.1. Mesures sur site

La réalisation de mesures sur site industriel est l'approche qui semble la plus naturelle pour l'étude des conditions de contact et de frottement. Effectuer des mesures sur site offre l'avantage de prendre en compte l'ensemble exhaustif des paramètres réels influents sur le contact. Les mesures sont donc, par définition, représentatives de la réalité industrielle et la fiabilité des résultats obtenus ne dépend donc que de la précision des mesures. Cependant mettre de tels essais en place n'est jamais une tâche aisée. L'aménagement d'une chaîne de production existante a un coût généralement prohibitif : arrêt de la chaîne pour l'installation des instruments de mesure, interruptions répétées de la production en cours de campagne d'essais, risque important de rebuts, etc. La mise en place d'une chaîne pilote peut être une solution alternative. Mais cela requiert également des investissements et des développements importants, une maintenance particulière, et ne garantit plus nécessairement la reproduction de l'ensemble des paramètres du procédé. Une fois l'essai en place apparaît un autre inconvénient de taille : l'interprétation des résultats. En effet, dans cette configuration d'étude, il est quasiment impossible d'isoler un paramètre particulier pour en étudier les effets sur l'ensemble du procédé.

III.2. Approche numérique

L'approche numérique repose sur l'utilisation de codes de calcul par éléments finis dédiés à l'étude des procédés de mise en forme (tels que Forge2005, Abaqus, Deform, PamStamp,...). Le procédé de mise en forme est simulé numériquement avec un coefficient de frottement choisi de façon empirique. Les résultats fournis par le code sont ensuite comparés à des grandeurs expérimentales (effort, géométrie finale...). Le coefficient de frottement de la simulation est alors recalé pour corrélérer avec ces données réelles. Cette méthode a pour avantage d'être rapide et simple à mettre en œuvre. Les résultats donnent accès à des grandeurs mécaniques locales non mesurables sur site ou en laboratoire, comme les déformations, les contraintes, les températures en cœur. Le prix modéré des ordinateurs actuels couplé à l'augmentation de leur puissance de calcul et de leur capacité mémoire rend cette approche simple et peu coûteuse à mettre en œuvre, et explique pourquoi elle s'est tellement développée ces dernières années.

Cependant, les résultats obtenus dépendent directement des paramètres du modèle et des développements inhérents au code de calcul utilisé. Si le code utilise la loi de frottement de Coulomb, le champ de contrainte tangentielle sera proportionnel à la pression de contact (configuration par défaut d'Abaqus), alors que s'il travaille avec la loi de frottement de Tresca, le champ sera proportionnel à la contrainte d'écoulement (configuration par défaut de Forge®).

Par conséquent, c'est le code qui prédéfinit la forme du champ de contrainte tangentielle, indépendamment du régime de lubrification réel. Ceci peut avoir des conséquences directes sur la prédiction des déformations plastiques en surface au niveau des outils par exemple.

D'un autre côté, si certains codes sont capables de calculer l'usure dans les zones à risque [Har06, Beh08], la « prédiction » fournie par le code repose elle aussi sur des modèles théoriques, pour l'essentiel basés sur la loi d'Archard. La prédiction numérique de l'usure reste pour l'instant un champ en plein développement [Ode86, Gie03], mais pas suffisamment robuste pour prédire quantitativement un taux d'usure sur un outillage de forge.

Au final, l'identification d'un paramètre, qu'il s'agisse d'un coefficient de frottement ou d'un taux d'usure, est fortement conditionnée par les lois implémentées dans le code de calcul. L'identification des résultats ne peut donc pas être exclusivement numérique : la validation des simulations sur un dispositif réel (procédé industriel ou essai de laboratoire) demeure indispensable.

III.3. Mesures en laboratoire

Un nombre important de dispositifs expérimentaux a été développé ces dernières décennies afin de caractériser les conditions de contact de mise en forme. Cette approche « laboratoire » offre de nombreux avantages : les essais sont conçus pour effectuer des mesures précises, répétitives et flexibles sans interférer avec la ligne de production. Ils permettent d'étudier indépendamment les paramètres jugés prépondérant dans le contact et donnent accès à certaines grandeurs physiques, mécaniques ou chimiques non mesurables sur sites. Le principal inconvénient de ce type de démarche est la représentativité des essais vis-à-vis de la réalité industrielle. Il est donc impératif que les conditions de contact de l'essai reflètent au plus près les conditions de contact rencontrées en production.

Il existe de nombreux essais de laboratoire dédiés aux analyses tribologiques. Rien que pour le domaine de la mise en forme, Niels Bay a dénombré plus de quatre-vingt types d'essais tribologiques différents [Bay02], qu'il propose de scinder en deux familles distinctes : les tests « simulations » et les tests « procédés ». Chaque famille de tests est exploitée par une approche directe ou indirecte.

III.3.1. Tests tribologiques « Simulations »

Les tests de simulations sont conçus pour reproduire des conditions tribologiques « génériques », sans lien direct avec un procédé de mise en forme particulier.

La figure 8 présente quarante deux dispositifs appartenant à cette famille. Ces essais sont scindés en trois sous-familles : essais à déformations plastiques généralisées à l'ensemble de l'éprouvette, à déformations localisées à la surface, à déformations élastiques.

Lors d'un contact lubrifié, la déformation plastique de l'un ou de l'ensemble des corps en contact joue un rôle non négligeable sur la réponse globale du tribosystème. Le test de compression d'anneau le montre très bien : en fonction de la sévérité du frottement, le diamètre intérieur de l'anneau va soit diminuer (frottement fort), soit augmenter (frottement faible). Le frottement peut donc avoir un effet direct sur l'écoulement de matière. *Des tests avec déformations plastiques généralisées* à l'ensemble de l'éprouvette ont donc été développés pour prendre en compte l'influence du frottement sur la déformation plastique de la pièce formée. Mais contrairement aux tests tribologiques « procédés » présentés dans le paragraphe suivant, les dispositifs « simulations » ne respectent pas les cinétiques rencontrées au niveau des procédés industriels.

Parmi ces essais nous trouvons par exemple les essais de compression-rotation et d'extrusion-rotation [Oud90]. Ces essais opèrent en deux étapes : dans un premier temps, l'éprouvette est écrasée (ou extrudée) pour atteindre un taux de déformation imposé, puis l'effort de compression est maintenu constant et l'éprouvette est entraînée en rotation. L'avantage de cette démarche en deux étapes est de dissocier l'énergie de déformation plastique, très importante, de l'énergie de frottement, bien plus faible. Le dispositif gagne alors en précision.

Par contre ces dispositifs d'essai présentent généralement deux inconvénients de taille quant à la pertinence des résultats fournis. Premièrement, il n'est généralement pas possible d'imposer des vitesses de glissement ou des pressions de contact. Ainsi, les conditions de contact mécaniques de ces essais ne sont pas représentatives de celles des procédés de mise en forme. Deuxièmement, ces essais requièrent des éprouvettes de géométries spécifiques. Elles présentent donc des surfaces avec des états de surface, des duretés superficielles, des réactivités chimiques différentes des pièces réelles.

Déformation plastique généralisée		Déformation plastique localisée		Déformation élastique	
Compression sliding of thin sheet 01	Upsetting between rigid, inclined dies 02	Rolling-plate lubrication 03	Rolling with cylindrical tool 04	Flattening test (flat end) 05	Punch extrusion test 06
Strip upsetting with simultaneous sliding 07	Strip reduction test 08	Strip-rolling 09	Strip-rolling test 10	Flattening test (flat end) 11	Direct-rod ring compression 12
Two-plate compression with simultaneous sliding strip at intermediate die 13	Round strip drawing test 14	Strip-rolling 15	Compression test, ball on ring 16	Flattening test (flat end) 17	Compression test, ball on ring 18
Compression test of ring 19	Rolling with skewed punch 20	Backward cup extrusion with rotating punch 21	Compression test, ball on ring 22	Flattening test (flat end) 23	Compression test, ball on ring 24
Compression test of ring 25	Rolling with skewed punch 26	Rolling with rotating die 27	Compression test, ball on ring 28	Flattening test (flat end) 29	Compression test, ball on ring 30
Compression test of ring 31	Rolling with skewed punch 32	Rolling with rotating die 33	Compression test, ball on ring 34	Flattening test (flat end) 35	Compression test, ball on ring 36
Compression test of ring 37	Rolling with skewed punch 38	Rolling with rotating die 39	Compression test, ball on ring 40	Flattening test (flat end) 41	Compression test, ball on ring 42
Compression test of ring 43	Rolling with skewed punch 44	Rolling with rotating die 45	Compression test, ball on ring 46	Flattening test (flat end) 47	Compression test, ball on ring 48
Compression test of ring 49	Rolling with skewed punch 50	Rolling with rotating die 51	Compression test, ball on ring 52	Flattening test (flat end) 53	Compression test, ball on ring 54
Compression test of ring 55	Rolling with skewed punch 56	Rolling with rotating die 57	Compression test, ball on ring 58	Flattening test (flat end) 59	Compression test, ball on ring 60
Compression test of ring 61	Rolling with skewed punch 62	Rolling with rotating die 63	Compression test, ball on ring 64	Flattening test (flat end) 65	Compression test, ball on ring 66
Compression test of ring 67	Rolling with skewed punch 68	Rolling with rotating die 69	Compression test, ball on ring 70	Flattening test (flat end) 71	Compression test, ball on ring 72
Compression test of ring 73	Rolling with skewed punch 74	Rolling with rotating die 75	Compression test, ball on ring 76	Flattening test (flat end) 77	Compression test, ball on ring 78
Compression test of ring 79	Rolling with skewed punch 80	Rolling with rotating die 81	Compression test, ball on ring 82	Flattening test (flat end) 83	Compression test, ball on ring 84
Compression test of ring 85	Rolling with skewed punch 86	Rolling with rotating die 87	Compression test, ball on ring 88	Flattening test (flat end) 89	Compression test, ball on ring 90
Compression test of ring 91	Rolling with skewed punch 92	Rolling with rotating die 93	Compression test, ball on ring 94	Flattening test (flat end) 95	Compression test, ball on ring 96
Compression test of ring 97	Rolling with skewed punch 98	Rolling with rotating die 99	Compression test, ball on ring 100	Flattening test (flat end) 101	Compression test, ball on ring 102
Compression test of ring 103	Rolling with skewed punch 104	Rolling with rotating die 105	Compression test, ball on ring 106	Flattening test (flat end) 107	Compression test, ball on ring 108
Compression test of ring 109	Rolling with skewed punch 110	Rolling with rotating die 111	Compression test, ball on ring 112	Flattening test (flat end) 113	Compression test, ball on ring 114
Compression test of ring 115	Rolling with skewed punch 116	Rolling with rotating die 117	Compression test, ball on ring 118	Flattening test (flat end) 119	Compression test, ball on ring 120
Compression test of ring 121	Rolling with skewed punch 122	Rolling with rotating die 123	Compression test, ball on ring 124	Flattening test (flat end) 125	Compression test, ball on ring 126
Compression test of ring 127	Rolling with skewed punch 128	Rolling with rotating die 129	Compression test, ball on ring 130	Flattening test (flat end) 131	Compression test, ball on ring 132
Compression test of ring 133	Rolling with skewed punch 134	Rolling with rotating die 135	Compression test, ball on ring 136	Flattening test (flat end) 137	Compression test, ball on ring 138
Compression test of ring 139	Rolling with skewed punch 140	Rolling with rotating die 141	Compression test, ball on ring 142	Flattening test (flat end) 143	Compression test, ball on ring 144
Compression test of ring 145	Rolling with skewed punch 146	Rolling with rotating die 147	Compression test, ball on ring 148	Flattening test (flat end) 149	Compression test, ball on ring 150
Compression test of ring 151	Rolling with skewed punch 152	Rolling with rotating die 153	Compression test, ball on ring 154	Flattening test (flat end) 155	Compression test, ball on ring 156
Compression test of ring 157	Rolling with skewed punch 158	Rolling with rotating die 159	Compression test, ball on ring 160	Flattening test (flat end) 161	Compression test, ball on ring 162
Compression test of ring 163	Rolling with skewed punch 164	Rolling with rotating die 165	Compression test, ball on ring 166	Flattening test (flat end) 167	Compression test, ball on ring 168
Compression test of ring 169	Rolling with skewed punch 170	Rolling with rotating die 171	Compression test, ball on ring 172	Flattening test (flat end) 173	Compression test, ball on ring 174
Compression test of ring 175	Rolling with skewed punch 176	Rolling with rotating die 177	Compression test, ball on ring 178	Flattening test (flat end) 179	Compression test, ball on ring 180
Compression test of ring 181	Rolling with skewed punch 182	Rolling with rotating die 183	Compression test, ball on ring 184	Flattening test (flat end) 185	Compression test, ball on ring 186
Compression test of ring 187	Rolling with skewed punch 188	Rolling with rotating die 189	Compression test, ball on ring 190	Flattening test (flat end) 191	Compression test, ball on ring 192
Compression test of ring 193	Rolling with skewed punch 194	Rolling with rotating die 195	Compression test, ball on ring 196	Flattening test (flat end) 197	Compression test, ball on ring 198
Compression test of ring 199	Rolling with skewed punch 200	Rolling with rotating die 201	Compression test, ball on ring 202	Flattening test (flat end) 203	Compression test, ball on ring 204
Compression test of ring 205	Rolling with skewed punch 206	Rolling with rotating die 207	Compression test, ball on ring 208	Flattening test (flat end) 209	Compression test, ball on ring 210
Compression test of ring 211	Rolling with skewed punch 212	Rolling with rotating die 213	Compression test, ball on ring 214	Flattening test (flat end) 215	Compression test, ball on ring 216
Compression test of ring 217	Rolling with skewed punch 218	Rolling with rotating die 219	Compression test, ball on ring 220	Flattening test (flat end) 221	Compression test, ball on ring 222
Compression test of ring 223	Rolling with skewed punch 224	Rolling with rotating die 225	Compression test, ball on ring 226	Flattening test (flat end) 227	Compression test, ball on ring 228
Compression test of ring 229	Rolling with skewed punch 230	Rolling with rotating die 231	Compression test, ball on ring 232	Flattening test (flat end) 233	Compression test, ball on ring 234
Compression test of ring 235	Rolling with skewed punch 236	Rolling with rotating die 237	Compression test, ball on ring 238	Flattening test (flat end) 239	Compression test, ball on ring 240
Compression test of ring 241	Rolling with skewed punch 242	Rolling with rotating die 243	Compression test, ball on ring 244	Flattening test (flat end) 245	Compression test, ball on ring 246
Compression test of ring 247	Rolling with skewed punch 248	Rolling with rotating die 249	Compression test, ball on ring 250	Flattening test (flat end) 251	Compression test, ball on ring 252
Compression test of ring 253	Rolling with skewed punch 254	Rolling with rotating die 255	Compression test, ball on ring 256	Flattening test (flat end) 257	Compression test, ball on ring 258
Compression test of ring 259	Rolling with skewed punch 260	Rolling with rotating die 261	Compression test, ball on ring 262	Flattening test (flat end) 263	Compression test, ball on ring 264
Compression test of ring 265	Rolling with skewed punch 266	Rolling with rotating die 267	Compression test, ball on ring 268	Flattening test (flat end) 269	Compression test, ball on ring 270
Compression test of ring 271	Rolling with skewed punch 272	Rolling with rotating die 273	Compression test, ball on ring 274	Flattening test (flat end) 275	Compression test, ball on ring 276
Compression test of ring 277	Rolling with skewed punch 278	Rolling with rotating die 279	Compression test, ball on ring 280	Flattening test (flat end) 281	Compression test, ball on ring 282
Compression test of ring 283	Rolling with skewed punch 284	Rolling with rotating die 285	Compression test, ball on ring 286	Flattening test (flat end) 287	Compression test, ball on ring 288
Compression test of ring 289	Rolling with skewed punch 290	Rolling with rotating die 291	Compression test, ball on ring 292	Flattening test (flat end) 293	Compression test, ball on ring 294
Compression test of ring 295	Rolling with skewed punch 296	Rolling with rotating die 297	Compression test, ball on ring 298	Flattening test (flat end) 299	Compression test, ball on ring 300

figure 8 : Caractérisation tribologique, famille des essais tribologiques « Simulations » d'après [Bay02]

L'ensemble des essais à déformations plastiques localisées regroupe entre autre l'ensemble des systèmes pion-disque, systèmes utilisés aussi bien pour l'étude des procédés de mise en forme, que des contacts entre une garniture et un disque en freinage ou entre une tête de lecture et un disque dur [Dub95, Wat96, Kim03]. En conséquence, ces dispositifs d'essai génèrent des chargements mécaniques et thermiques qui varient parfois de façon très significative de ceux générés par les opérations de mise en forme industrielles. Nous retrouvons également des dispositifs spécifiques à la mise en forme, tel que le scratch test [Kud79], et des essais propres à la caractérisation des produits plats [Rau86]. Au cours de ces essais un frotteur vient en contact avec l'éprouvette, exerce une pression suffisante pour déformer plastiquement celle-ci au voisinage de sa surface puis glisse le long de l'éprouvette avec une vitesse de glissement imposée. Par certains aspects, ces dispositifs d'essai recourent les avantages des essais en ligne et des essais à déformations plastiques généralisés. Ainsi, à l'instar des mesures en ligne, ils rendent généralement possible l'utilisation de la vraie pièce comme éprouvette. Nous retrouvons ainsi au niveau du contact les mêmes matériaux, les mêmes rugosités, éventuellement le même revêtement et la même pollution de surface que pour le procédé industriel. Ces dispositifs étant avant tout des essais de laboratoire, ils n'interfèrent pas avec la production, donnent accès à des grandeurs mécaniques difficilement mesurables sur site, etc. Mais, l'état de sollicitations thermomécaniques à l'interface frotteur/éprouvette n'est pas toujours simple à déterminer et par conséquent, il est parfois difficile de savoir si ces sollicitations simulées sont proches de celles que nous cherchons à étudier sur le procédé industriel. Donc si l'avantage majeur de ces essais est leur polyvalence, la représentativité des résultats fournis est parfois contestable. Ainsi, avant toute transposition et/ou exploitation industrielle des résultats, il est essentiel de vérifier que les conditions physico-chimiques et mécaniques de contact simulées sur le banc d'essai sont compatibles avec celle du procédé de mise en forme étudié.

Les essais à déformations élastiques n'ont que peu d'intérêt pour les études à chaud. Leur champ d'application en mise en forme est essentiellement l'étude des éjections de pièces en frappe à froid [Sad90].

III.3.2. Tests tribologiques « Procédés »

Les tests « procédés » visent à reproduire en laboratoire les opérations de mise en forme sans modifier les cinématiques de base des procédés étudiés.

La figure 9 présente quarante trois bancs d'essais appartenant à cette famille, essais classés en fonction du type de procédé qu'ils simulent. Nous y retrouvons des dispositifs relativement basiques, tels que les tests de compression de cylindres [Gél84], de compression d'anneaux [Bec03] et de bi-poinçonnement [Paw98]. Ces essais sont simples à mettre en œuvre et fournissent des résultats quantitatifs. Il est ainsi généralement aisé d'identifier des coefficients de frottements relatifs à diverses lois à l'aide des résultats fournis par ces bancs d'essais. D'autres dispositifs de cette famille sont bien plus sophistiqués, requérant par exemple l'utilisation d'insert dans les outillages pour la mesure de champs de contraintes locaux [Hen04].

De part leur conception, ces essais voient leurs champs d'applications limités qu'à l'étude de certains procédés types. D'autre part, le fait de ne pas découpler le travail volumique du travail surfacique fait que la sensibilité de ces bancs à caractériser les performances tribologiques d'un système est parfois sujette à caution [Zha08].

III.3.3. Choix d'un test pour la caractérisation des conditions de contact et de lubrification en forge à chaud

Dans le cadre de notre étude, il apparaît clairement que la réalisation de mesures sur banc d'essai en laboratoire s'impose. L'approche numérique ne permet pas de prendre en compte les effets des lubrifiants autrement que sous la forme de coefficients de frottement. Quant aux mesures sur sites industriels, le fait de vouloir tester plusieurs lubrifiants entraînerait des coûts absolument exorbitants.

Parmi les dispositifs de laboratoire, les essais de compression et de compression d'anneau peuvent facilement être développés pour l'étude des conditions de contact à haute température.

Ces essais offrent de plus comme avantages :

- le respect des matériaux en contact,
- la possibilité de prendre en compte le comportement viscoplastique du matériau de l'éprouvette [Sah96]
- une mesure directe du coefficient de frottement à l'aide d'abaques,
- la possibilité d'être modélisés par éléments finis en axisymétrie (gain de temps lors des procédures d'exploitation des résultats, par exemple pour la construction des abaques),
- de pouvoir modifier la géométrie des éprouvettes pour simuler différentes pressions de contact [Tan98]

Compression		Forgeage		Extrusion		Etirage de barre/fil		Laminage		Etirage de feuille	
4A1	4A2	4A3	4A4	4A5	4A6	4A7	4A8	4A9	4A10	4A11	4A12
4B1	4B2	4B3	4B4	4B5	4B6	4B7	4B8	4B9	4B10	4B11	4B12
4C1	4C2	4C3	4C4	4C5	4C6	4C7	4C8	4C9	4C10	4C11	4C12
4D1	4D2	4D3	4D4	4D5	4D6	4D7	4D8	4D9	4D10	4D11	4D12
4E1	4E2	4E3	4E4	4E5	4E6	4E7	4E8	4E9	4E10	4E11	4E12
4F1	4F2	4F3	4F4	4F5	4F6	4F7	4F8	4F9	4F10	4F11	4F12
4G1	4G2	4G3	4G4	4G5	4G6	4G7	4G8	4G9	4G10	4G11	4G12
4H1	4H2	4H3	4H4	4H5	4H6	4H7	4H8	4H9	4H10	4H11	4H12
4I1	4I2	4I3	4I4	4I5	4I6	4I7	4I8	4I9	4I10	4I11	4I12
4J1	4J2	4J3	4J4	4J5	4J6	4J7	4J8	4J9	4J10	4J11	4J12
4K1	4K2	4K3	4K4	4K5	4K6	4K7	4K8	4K9	4K10	4K11	4K12
4L1	4L2	4L3	4L4	4L5	4L6	4L7	4L8	4L9	4L10	4L11	4L12
4M1	4M2	4M3	4M4	4M5	4M6	4M7	4M8	4M9	4M10	4M11	4M12
4N1	4N2	4N3	4N4	4N5	4N6	4N7	4N8	4N9	4N10	4N11	4N12
4O1	4O2	4O3	4O4	4O5	4O6	4O7	4O8	4O9	4O10	4O11	4O12
4P1	4P2	4P3	4P4	4P5	4P6	4P7	4P8	4P9	4P10	4P11	4P12
4Q1	4Q2	4Q3	4Q4	4Q5	4Q6	4Q7	4Q8	4Q9	4Q10	4Q11	4Q12
4R1	4R2	4R3	4R4	4R5	4R6	4R7	4R8	4R9	4R10	4R11	4R12
4S1	4S2	4S3	4S4	4S5	4S6	4S7	4S8	4S9	4S10	4S11	4S12
4T1	4T2	4T3	4T4	4T5	4T6	4T7	4T8	4T9	4T10	4T11	4T12
4U1	4U2	4U3	4U4	4U5	4U6	4U7	4U8	4U9	4U10	4U11	4U12
4V1	4V2	4V3	4V4	4V5	4V6	4V7	4V8	4V9	4V10	4V11	4V12
4W1	4W2	4W3	4W4	4W5	4W6	4W7	4W8	4W9	4W10	4W11	4W12
4X1	4X2	4X3	4X4	4X5	4X6	4X7	4X8	4X9	4X10	4X11	4X12
4Y1	4Y2	4Y3	4Y4	4Y5	4Y6	4Y7	4Y8	4Y9	4Y10	4Y11	4Y12
4Z1	4Z2	4Z3	4Z4	4Z5	4Z6	4Z7	4Z8	4Z9	4Z10	4Z11	4Z12

figure 9 : Caractérisation tribologique, famille des essais tribologiques « Procédés » d'après [Bay02]

Par contre, ces essais :

- ne respecte pas la nature des surfaces en contact (surfaces usinées),
- rendent délicate l'exploitation des résultats de part le bombement des surfaces libres à partir de certains niveaux d'écrasement (problème de replis de matière sur les tas de compression),
- ne permettent pas de régler indépendamment les déformations plastiques et les pressions de contact, les conditions de contact mécaniques ne sont donc que partiellement représentatives du procédé réel,
- ne permettent pas de régulation en vitesse de glissement.

Pour se rapprocher au mieux des sollicitations thermomécaniques « vraies » rencontrées en forge à chaud, Mahjoub ou Sallit ont développé des bancs d'essai de simulation, de type pion-disque, dédiés à la caractérisation des conditions de mise en forme à chaud [Mah99, Sal00]. Ces bancs sont capables de travailler à haute température et de produire des pressions de contact et des vitesses de glissement importantes. Bien que basés sur des technologies différentes, les principes de fonctionnement de ces deux bancs sont assez similaires : un frotteur de géométrie imposée applique le chargement sur une éprouvette entraînée en rotation. Cette configuration pose deux problèmes essentiels (figure 10).

Tout d'abord le frotteur passe à plusieurs reprises sur la même zone de contact. Il s'en suit une modification du troisième corps en cours d'essai qui influe sur l'évolution du coefficient de frottement, mais qui n'a pas de réalité industrielle. En industrie chaque frappe se réalise sur une nouvelle pièce, donc une surface « fraîche ». Ce défaut de conception a été partiellement résolu par Marzouki, qui propose un dispositif où le pion se déplace radialement durant l'essai, formant une trace de contact en spirale (figure 10c). L'avantage est qu'une particule du disque ne voit passer qu'une seule fois le pion, à l'image du lopin qui n'est en contact qu'une seule fois avec la matrice. Par contre le déplacement radial du pion pose le problème de la vitesse de glissement, qui dans cette configuration n'est plus constante.

Le second inconvénient est que sur ces dispositifs le lubrifiant est déposé sur le disque et non pas sur le pion (donc sur la pièce et non pas sur l'outil). Or le disque et le pion ne sont pas à la même température et sont constitués de matériaux différents. La couche de lubrifiant déposée est donc différente de celle qui se forme sur la matrice de forge. Cette particularité empêche l'utilisation de ces bancs d'essai pour quantifier l'influence du lubrifiant sur la durée de vie des outils et les exclut donc de la présente étude.

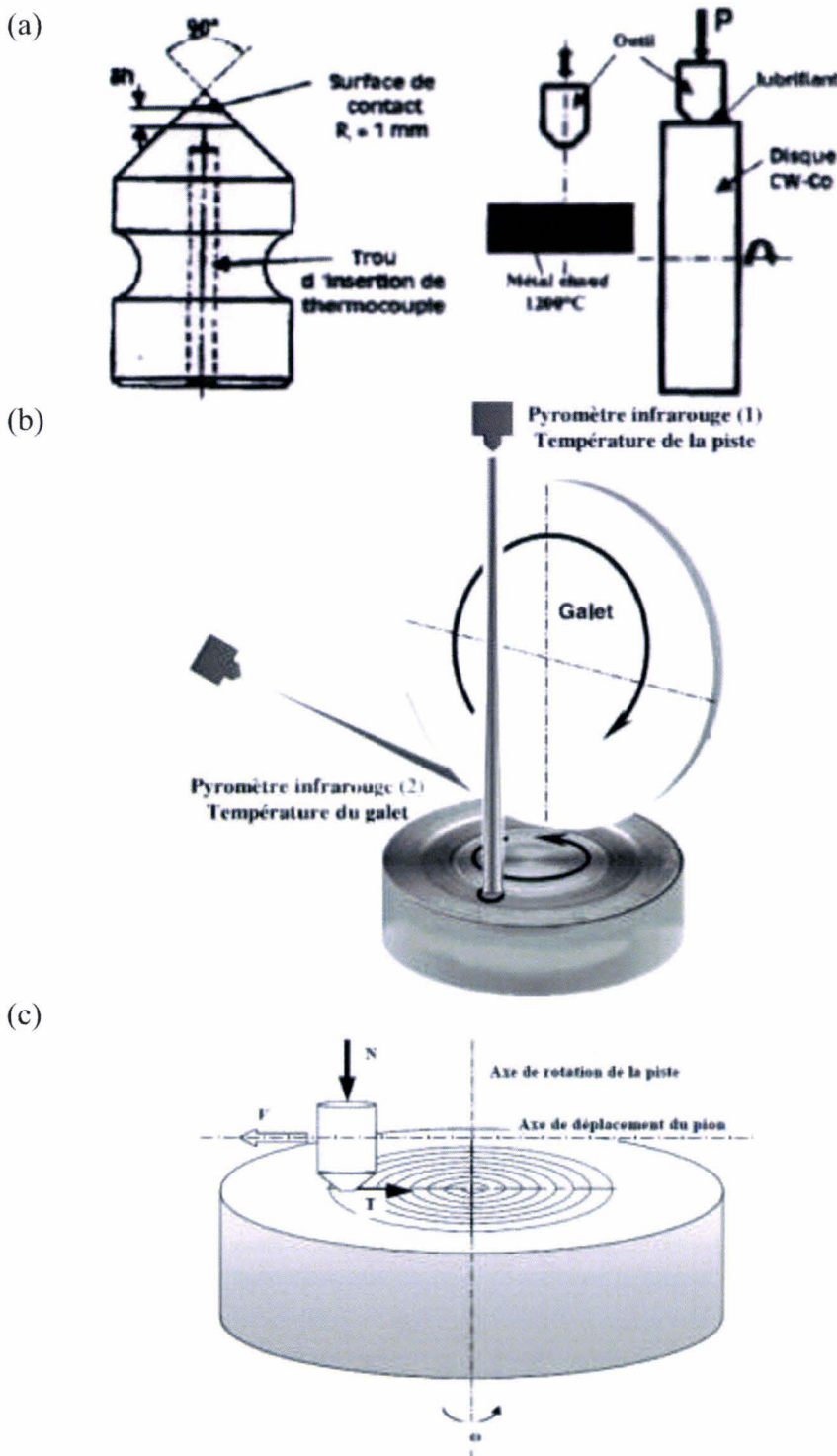


figure 10 :
Caractérisation tribologique, schémas de principe des bancs d'usure à chaud
(a) du CEMEF [Fel06]
(b) de l'UTC [Sal00]
(c) de l'UTC [Mar07]

Toujours dans la catégorie des essais de simulation à déformations localisées, le LAMIH développe depuis une quinzaine d'année l'essai de compression-translation, développements en partie cofinancés par le CETIM de Saint-Etienne [Dub95, Laz98]. Pour se rapprocher des conditions industrielles, le test utilise les mêmes matériaux que le procédé de mise en forme étudié (matrices, lopins, lubrifiants) et permet d'appliquer des sollicitations thermomécaniques comparables aux grandeurs industrielles (vitesses de glissement, pressions de contact, températures de contact, etc.).

Le principe de fonctionnement est le suivant : un frotteur pénètre légèrement la surface de l'éprouvette sous une pression de contact donnée, puis glisse le long de sa surface en maintenant la pénétration du frotteur constante. Durant l'essai, les efforts de contact sont enregistrés (figure 11).

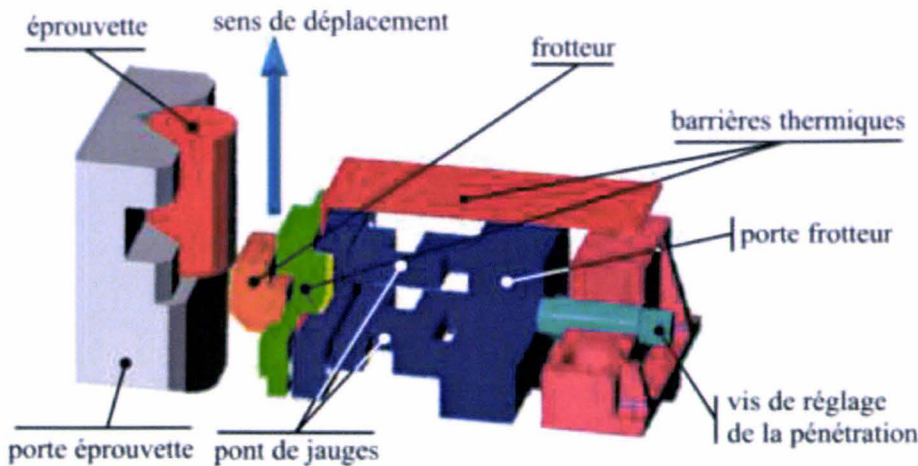


figure 11 :
Caractérisation tribologique, schéma de principe WHUST, banc de caractérisation tribologique à chaud du LAMIH [Mor00]

A l'origine exclusivement dédié aux études de mise en forme à froid, Morgado a apporté quelques améliorations significatives au dispositif permettant d'utiliser ce banc d'essai pour l'étude du filage à chaud [Mor03]. Suite à ces perfectionnements, le test de compression-translation a été renommé Warm Hot Upsetting Sliding Test (WHUST). L'un des avantages de ce banc par rapport aux autres bancs de simulation, est qu'il n'est pas basé sur une technologie pion-disque : le frotteur ne passe qu'une seule fois sur chaque éprouvette. Il est ainsi possible d'étudier la formation de défauts sur la surface du frotteur sans que les résultats ne soient pollués par les débris des passages précédents. L'essai de compression-translation à chaud semble être la solution adéquate pour reproduire les conditions de contact et de lubrification en mise en forme à chaud dans le cadre de notre étude. Toutefois quelques développements complémentaires, permettant notamment d'imposer au contact des conditions de lubrification proches des conditions industrielles, sont nécessaires. Ces améliorations sont détaillées dans le paragraphe suivant.

IV. WHUST : méthodologie d'utilisation et d'exploitation

IV.1. WHUST : Méthodologie d'utilisation

Pour que les résultats fournis soient exploitables d'un point de vue industriel, le banc d'essai doit simuler les conditions de contact représentatives des procédés de mise en forme étudiés.

La démarche mise en place au LAMIH sur l'utilisation de ses bancs d'essais repose sur une approche « process » où l'utilisation du banc, que ce soit en terme de réglage ou d'exploitation, est centrée sur le procédé industriel [Dub00]. Cette démarche garantit le respect de la reproduction des paramètres physiques, chimique et mécaniques du contact.

IV.1.1. Respect des paramètres physico-chimiques du contact

L'un des principes de base du WHUST est d'utiliser comme éprouvettes des lopins prélevés sur site industriel (ou une partie de lopin). De même, le frotteur utilisé sur le banc d'essai est extrait d'une « vraie » matrice. Lorsque pour des raisons techniques cela est impossible, le frotteur est usiné, traité à partir des mêmes matériaux et suivant les mêmes procédés de fabrication que l'outil industriel. En procédant de la sorte les surfaces en contact sur le banc d'essai et sur le procédé de mise en forme étudié sont quasiment identiques.

La figure 12 montre un exemple d'éprouvettes et de frotteurs utilisés sur le banc d'essai du LAMIH. Ainsi lors des essais, le WHUST reproduit de façon implicite les paramètres physiques Π_P et chimiques Π_C du procédé étudié.

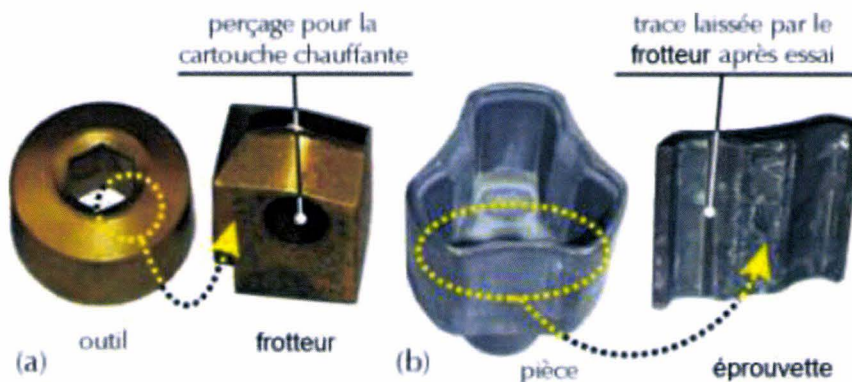


figure 12 : WHUST, exemples de frotteurs (a) et d'éprouvettes (b) utilisables sur le banc de compression-translation d'après [Dub03]

IV.1.2. Respect des paramètres mécaniques du contact

Pour garantir la représentativité des essais vis-à-vis du procédé industriel des simulations numériques par éléments finis du banc d'essai sont réalisées. Ces simulations permettent de relier les paramètres de réglage du banc d'essai (paramètres d'entrée) aux grandeurs mécaniques reproduites par le banc. Le régime de lubrification recherché en mise en forme étant généralement le régime de lubrification mixte, voir limite, une attention particulière est portée aux respects de la pression de contact, la déformation plastique et la vitesse de glissement, qui sont les paramètres mécaniques les plus influents dans ces régimes de lubrification [Bay94].

IV.1.3. Méthodologie

La méthodologie mise en place pour garantir la représentativité du banc d'essai par rapport à un procédé industriel opère en cinq étapes (figure 13) :

Etape 1 : données rhéologiques. Les lois de comportement des matériaux en contact sont identifiées en cœur et en surface. Cela permet la prise en compte de revêtement ou d'un éventuel écrouissage en surface. La loi de comportement rhéologique en cœur de l'éprouvette est issue d'essais de compression (ou de bases de données). Durant la mise en forme, en condition normale, les outils ne subissent que des déformations élastiques. Leurs données rhéologiques sont donc un coefficient de Poisson, un module d'Young et une limite élastique. La rhéologie de surface est identifiée selon la méthodologie proposée par Dubar et al. [Dub01]. Cette méthode basée sur l'exploitation de mesure de dureté est essentiellement utilisée pour l'étude du comportement rhéologique à froid. Toutefois cette méthode permet également de déterminer avec précision la limite élastique du matériau de l'outil [Ver02].

Etape 2 : paramètres mécaniques à l'interface lopin/matrice. Le procédé de mise en forme cible est simulé numériquement avec les données rhéologiques recueillies à l'étape 1 et des données tribologiques estimées (le choix se porte en général sur un coefficient de frottement de Coulomb égal à 0,1 pour les procédés de forgeage à froid, 0,05 pour le laminage, 0,15 pour l'emboutissage). La simulation fournit les pressions de contact, déformations plastiques et vitesses de déformation plastiques à reproduire sur le banc d'essai.

Etape 3 : identification des paramètres de réglages du banc. Des simulations numériques du banc d'essai sont réalisées pour différentes valeurs des paramètres d'entrée. Pour chaque simulation, les grandeurs mécaniques simulées par le banc sont comparées aux valeurs cibles calculées à l'étape 2. Les paramètres de réglage du banc sont obtenus lorsqu'il y a égalité entre les paramètres mécaniques simulés par banc d'essai et ceux calculés pour le procédé.

Etape 4 : réalisation des essais. Une fois les paramètres d'entrée du banc identifiés, les essais sont réalisés. Dans le cadre d'une campagne relative aux procédés de forge à chaud, les essais se déroulent en cinq étapes :

1. le frotteur est réglé à sa température de consigne et sa position est réglée en fonction de la pression de contact qu'il doit imposer à l'éprouvette,
2. l'éprouvette est chauffée par induction à une température légèrement supérieure à la température d'essai. Durant la chauffe l'éprouvette s'oxyde en surface,

3. une fois la température de consigne atteinte, l'éprouvette est transférée du système de chauffe au banc d'essai où elle est bridée,
4. le lubrifiant est appliqué sur le frotteur,
5. le frotteur translate et glisse sur l'éprouvette où il crée une déformation plastique. Les états de surface du frotteur et de l'éprouvette sont modifiés par le contact. Durant le test, les forces de contact que subit le frotteur sont enregistrées.

Etape 5 : Exploitation des résultats du WHUST. Plusieurs niveaux d'exploitations sont possibles, directs ou indirects, fournissant des résultats quantitatifs ou qualitatifs. Mais l'objectif de cette étape est également de valider les résultats de l'étape 3. En effet, la validation a posteriori des résultats de l'étape 3 s'impose par le fait que les paramètres de réglage du banc découlent du choix arbitraire d'un coefficient de frottement en étape 1. Cette validation s'appuie sur une nouvelle simulation du procédé de mise en forme, réalisée cette fois-ci avec le coefficient de frottement identifié à l'issu des essais. Les paramètres mécaniques à l'interface lopin/matrice résultants de cette seconde simulation sont comparés aux paramètres déterminés en étape 2. Lorsque les paramètres correspondent, les réglages du banc d'essai sont validés. Le coefficient de frottement identifié en étape 5 est représentatif des conditions réelles de contact et de frottement à l'interface lopin/matrice du procédé. A l'inverse, si les paramètres mécaniques varient de façon sensible avec ce nouveau coefficient de frottement, une itération est effectuée sur les étapes 3, 4 et 5 jusqu'à convergence.

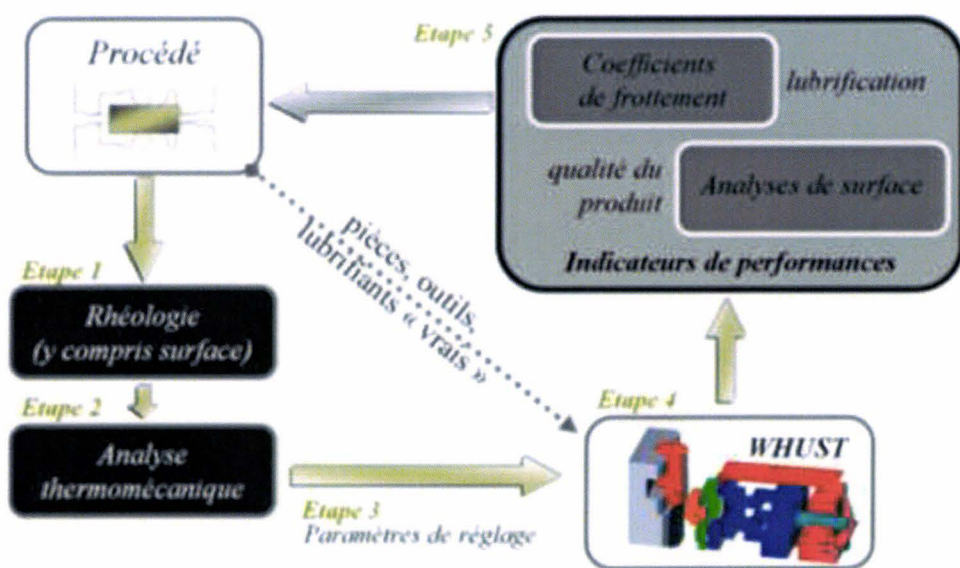


figure 13 : WHUST, schéma de la méthodologie d'utilisation du banc d'essai

IV.2. Les paramètres d'entrée du WHUST

Les paramètres d'entrée du banc sont :

- la forme du frotteur,
- la température du frotteur,
- la température de l'éprouvette,
- le taux de calamine de l'éprouvette (cas des éprouvettes en acier),
- la pénétration du frotteur dans l'éprouvette,
- l'apport de lubrifiant, épaisseur déposée,
- la vitesse de déplacement du frotteur.

Forme du frotteur

La géométrie du frotteur influe sur la forme des champs de pressions de contact et de déformations plastiques. Les frotteurs retenus dans notre étude sont de forme cylindrique. Cette géométrie permet d'avoir des champs de contraintes et de déformations au voisinage de la zone de contact ne présentant pas de variations brutales (figure 14).

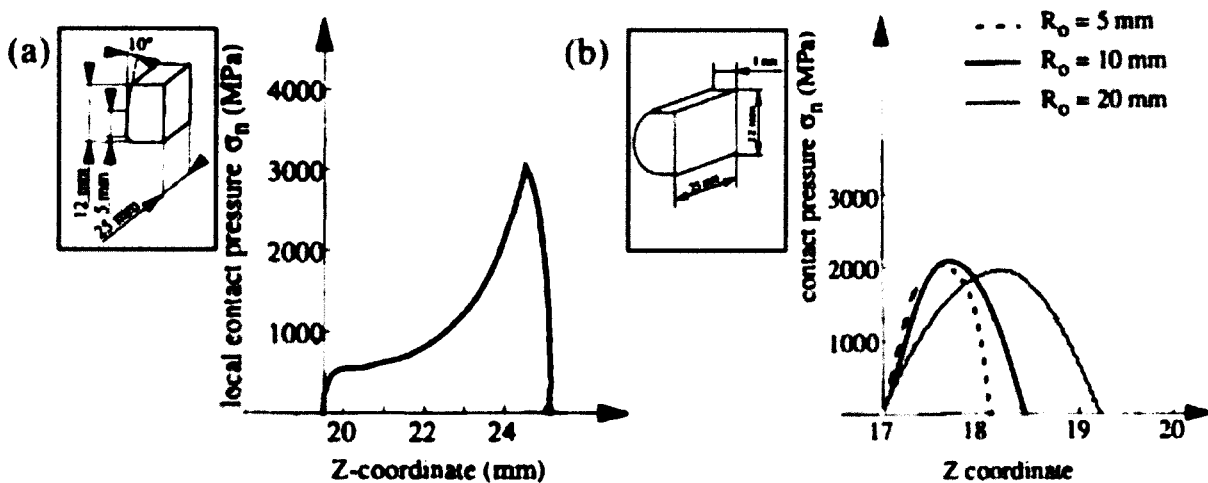


figure 14 : WHUST, paramètres d'entrée : exemple de profils du champ de pression à l'interface éprouvette/frotteur en fonction de la géométrie du frotteur. Essais de compression-translation à froid sur éprouvette en acier bas carbone [Dub96a, Dub96b].

Température du frotteur

Le frotteur est chauffé à l'aide d'une cartouche chauffante, insérée suivant un axe parallèle à la surface de contact. La température de surface atteinte est réglable entre l'ambiante et 300°C (figure 15). Celle-ci est contrôlée à l'aide d'un thermocouple soudé en surface (non représenté sur la photo). Cette gamme de température permet de reproduire les températures de surface rencontrées sur les outils de forge à chaud en régime stabilisé.

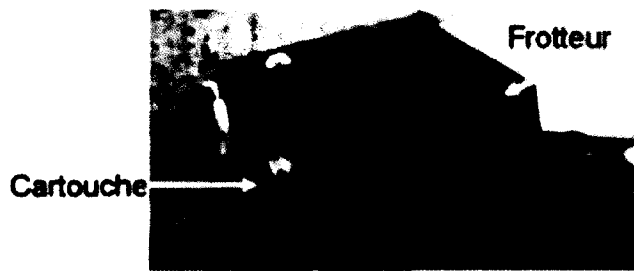


figure 15 : WHUST,
paramètres d'entrée : dispositif
de chauffage du frotteur

Température de l'éprouvette

Le WHUST utilise un chauffage par induction d'une puissance utile de 25kW, travaillant à des fréquences comprises entre 12,5 et 25Hz. Ce système permet de chauffer des éprouvettes cylindriques d'un diamètre compris entre 20 et 60 mm, d'une hauteur comprise entre 30 et 100 mm, avec une vitesse de chauffe variant de 0,5 °C.s⁻¹ à 30 °C.s⁻¹. Ces caractéristiques suffisent à chauffer une éprouvette en acier avec des temps de chauffe comparable à ceux rencontrés en industrie (moins d'une minute pour passer de l'ambiante à 1200 °C). Durant la chauffe, le contrôle de la température est assuré par des thermocouples de type k. Trois thermocouples sont répartis uniformément sur la hauteur du lopin de façon à s'assurer de l'homogénéité de la chauffe.

Le dispositif de chauffage est annexe au banc d'essai. Le temps de transfert nécessaire pour amener l'éprouvette du système de chauffe au dispositif de frottement est compris entre 15 et 40 secondes. Durant ce laps de temps, la température de l'éprouvette peut perdre jusqu'à 200°C. Cette perte de température est prise en compte lors des réglages pour respecter la température au moment du premier contact éprouvette/lopin :

$$\theta_e = \theta_c - \Delta\theta_t \quad (5)$$

avec θ_e température d'essai, θ_c température à l'issue de la chauffe, $\Delta\theta_t$ perte de chaleur durant le transfert. Lors des réglages, une attention particulière est portée au fait que le matériau testé ne présente pas de changement de phase dans l'intervalle $[\theta_e; \theta_c]$.

Le taux de calamine

A l'image des procédés industriels, la chauffe des éprouvettes sur le WHUST s'effectue sous atmosphère non contrôlée. Une couche d'oxyde est par conséquent susceptible de se développer en surface de l'éprouvette.

Dans le cas d'éprouvettes en acier, l'oxyde qui se forme est de la calamine dont la structure et l'épaisseur dépendent de la température, du temps de chauffe, de l'atmosphère et de la composition de l'alliage. Pour des températures de chauffe comprises entre 700 et 1250°C, la couche d'oxyde se développe proportionnellement à la racine carrée du temps de chauffe [Zha05] :

$$e = k' \sqrt{t}, \quad (6)$$

où e est l'épaisseur de la couche (μm), t le temps (sec) et k' la constante d'oxydation ($\mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) [Tzv04]. Toutefois, d'un point de vue industriel, l'épaisseur de calamine est rarement mesurée. Elle varie beaucoup d'une zone à une autre du lopin et nécessite des moyens de mesure qui ne sont pas toujours compatibles avec la taille imposante de certaines pièces. C'est une mesure de perte au feu qui est généralement effectuée sur site pour déterminer le taux de calamine Tx_{cal} créé lors de la chauffe :

$$Tx_{cal} = \frac{100(m_i - m_f)}{m_i}, \quad (7)$$

où m_i est la masse du lopin froid et m_f la masse du lopin décalaminé à l'issue de la chauffe. Cette mesure ne permet pas de connaître précisément l'épaisseur de calamine qui s'est développée en surface, mais permet d'avoir une idée fiable de l'oxydation que subit le lopin avant sa mise en forme. C'est par conséquent, ce paramètre qui est utilisé comme paramètre d'entrée sur le WHUST. Des essais, conduits avec différentes cinétiques de chauffe, montrent qu'il est possible de produire sur le WHUST des taux de calamine variant de 0,1 à 1%.

La pénétration du frotteur dans l'éprouvette

La pénétration du frotteur dans l'éprouvette, combinée à la géométrie du frotteur, fixe la pression de contact qui sera exercée à l'interface éprouvette/frotteur. La valeur de la pénétration est déterminée par simulation numérique du WHUST en fonction de la pression cible à reproduire. Suivant le type de matériau et les températures mises en jeu, les pressions exercées par le frotteur peuvent atteindre 2 à 3 GPa.

La vitesse de déplacement de frotteur

Le déplacement du frotteur est assuré par un vérin hydraulique. Le système est composé d'un vérin dont la course est supérieure à 250 mm, d'un groupe hydraulique de 280 bars et d'un rack de commande électronique permettant une régulation en effort ou en déplacement du vérin. Ce dispositif permet au WHUST d'imposer des vitesses de déplacement comprises entre 0,01 et 0,5 m.s⁻¹, sous des charges pouvant atteindre 25 kN. Cette gamme de réglage est suffisamment large pour permettre de reproduire les vitesses de glissement locales rencontrées dans une large gamme de procédés industriels [Mor00].

La lubrification du frotteur

Il s'agit ici de l'un des paramètres clés de la présente étude. En effet, les technologies utilisées pour apporter du lubrifiant à l'interface pièce/outil dans les procédés de mise en forme conditionnent la qualité du film lubrifiant, donc son efficacité. Il est par conséquent essentiel, pour le succès de l'étude, que l'apport de lubrifiant à l'interface éprouvette/frotteur sur le WHUST soit représentatif de la réalité industrielle.

Les technologies utilisées en industrie dépendent directement de la nature du lubrifiant utilisé. Contrairement, aux procédés de mise en forme à froid où c'est généralement la pièce qui est lubrifiée, la majorité des procédés de forge à chaud utilise un lubrifiant liquide déposé directement sur l'outil. L'application s'effectue sous forme de jet, de pulvérisation, de micro-pulvérisation ou de brouillard, soit automatiquement (système piloté par un automate), soit manuellement (opérateur muni d'un pistolet).

Un module d'apport du lubrifiant a été développé spécifiquement pour cette étude et implanté sur le WHUST. Ce module permet de pulvériser le lubrifiant sur le frotteur avant essais. Il est constitué

- d'un pulvérisateur travaillant à des pressions de 3 à 9 bars, avec des produits de viscosité inférieure à 250cst,
- d'un régulateur d'air qui règle la pression de pulvérisation,
- d'un système de guidage qui gère la distance buse/cible,
- d'une électrovanne qui détermine le temps de pulvérisation,
- d'une buse sous vis qui fait varier l'angle de pulvérisation,
- d'un réservoir de lubrifiant (1L),
- d'un agitateur magnétique permettant d'éviter la formation de dépôt en fond de réservoir.

Avant chaque essai, l'épaisseur de lubrifiant déposé est mesurée par une sonde à induction magnétique. La précision de la mesure est de $2\mu\text{m}$. Le module de lubrification permet de déposer des épaisseurs de lubrifiant variant de 10 à $50\mu\text{m}$ sur des surfaces de l'ordre du centimètre carré en respectant les conditions de pulvérisation industrielles.

IV.3. Les paramètres de sortie et l'exploitation des résultats

Les paramètres de sortie du WHUST correspondent aux résultats bruts que fournit l'essai. Il s'agit essentiellement des efforts exercés sur le frotteur et de l'évolution des surfaces de contact, côté éprouvette et côté frotteur.

Force de l'éprouvette sur le frotteur

En cours d'essai l'effort exercé sur le frotteur par l'éprouvette est mesuré dans deux directions perpendiculaires : la direction tangente et la direction normale au sens de déplacement du frotteur. Ces mesures sont effectuées à l'aide de capteurs équipés d'une technologie à jauges de contraintes en pont complet. L'effort tangentiel au sens de déplacement du frotteur F_t est mesuré par une cellule force de 25kN dont la précision est de 0,2 %. L'effort normal au sens de déplacement F_n est mesuré par un capteur d'une capacité de 6 kN et d'une précision de 0,1%. Ce dernier a été conçu spécifiquement pour le banc d'essai [Mor03]. Il est équipé de barrières thermiques permettant de l'isoler de la source de chaleur émise par le frotteur et l'éprouvette.

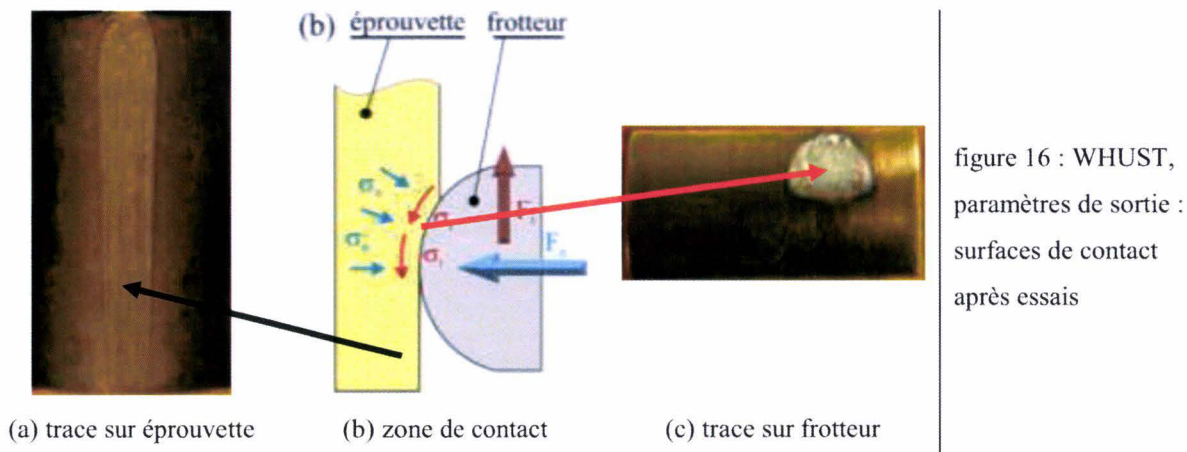
L'acquisition des données est assurée par un rack de commande électronique travaillant à des fréquences d'acquisition de 5kHz. Ce système garantit une acquisition fiable des données, même lors d'essais réalisés à grande vitesse de glissement (essais pouvant durer moins d'un dixième de seconde).

Surfaces de contact après essais.

Les conditions de contact sévères générées par le glissement du frotteur sur l'éprouvette modifient de façon sensible les surfaces en contact (figure 16). Ainsi après les essais, les surfaces de contact sont analysées à l'aide de différents outils :

- Microscope optique,
- MEB muni d'une sonde EDS,
- Profilomètre 3D sans contact,
- Sonde à induction magnétique.

Ces analyses permettent d'établir un état comparatif entre avant et après essais en donnant, par exemple, accès à : l'évolution des rugosités, la composition chimique du troisième corps, l'épaisseur résiduelle de lubrifiant présente sur le frotteur...



Il est ici important de vérifier que les paramètres de sortie du banc d'essai nous fournissent des informations pertinentes permettant de répondre à l'étude, à savoir quantifier l'influence de la lubrification sur les phénomènes de collage et d'endommagement de surface rencontrés en forge à chaud. Pour cela les observations et mesures réalisées doivent être capable de qualifier, voire quantifier, les lubrifiants en terme de :

- pouvoir de réduction du frottement,
- pouvoir de protection des surfaces en contact.

La quantification du pouvoir de réduction du frottement d'un lubrifiant peut se faire en lui associant, par exemple, une valeur de coefficient de frottement. Plus le coefficient de frottement sera faible, plus le lubrifiant sera apte à réduire les contraintes tangentielles et, en conséquence, les sollicitations mécaniques encaissées par l'outillage. Le coefficient de frottement est alors utilisé comme un indicateur et non pas comme valeur intrinsèque caractéristique du contact.

Qualifier le pouvoir de protection des surfaces est un peu plus complexe. Cela nécessite de définir a priori quel facteur est influent sur l'endommagement de la surface et de suivre son évolution. Ainsi, dans la suite de nos travaux, nous appellerons « **indicateur de performances** » tous résultats obtenus à partir des paramètres de sortie du WHUST et permettant de comprendre en quoi le lubrifiant permet ou non de protéger les surfaces, que ce soit côté lopin ou côté matrice.

IV.3.1. Quantifier le pouvoir de réduction du frottement : identification d'un coefficient de frottement

L'identification d'un coefficient de frottement se fait par rapport à un modèle. Les principaux modèles de frottement utilisés en mise en forme sont :

- le modèle de Coulomb,
- le modèle de Tresca,
- les modèles basés sur la déformation plastique des aspérités en surface.

La loi de frottement de Coulomb énonce que la contrainte de frottement σ_t est proportionnelle à la pression de contact σ_n . Le facteur de proportionnalité est le coefficient de frottement μ :

$$\bar{\sigma}_t = -\mu \sigma_n \frac{\bar{v}_g}{\|\bar{v}_g\|} \Rightarrow \mu = \frac{\sigma_t}{\sigma_n} \quad (8)$$

où \bar{v}_g est la vitesse de glissement. En théorie, le coefficient μ est compris entre zéro et l'infini.

En pratique, il demeure inférieur à 0,6. Ce n'est que lorsque les surfaces en contact subissent des défauts importants, notamment lorsqu'il y a une forte usure adhésive, que le coefficient peut atteindre des valeurs supérieures à 1. Ce modèle est surtout valable pour de faibles pressions de contact (pressions inférieures à la contrainte d'écoulement de l'éprouvette).

Le modèle de Tresca exprime la contrainte de frottement en fonction de la contrainte d'écoulement σ_0 :

$$\bar{\sigma}_t = -m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \frac{\bar{v}_g}{\|\bar{v}_g\|} \Rightarrow m = \sqrt{3} \frac{\sigma_t}{\sigma_0} \quad (9)$$

Les lois de la plasticité imposent au coefficient de frottement de Tresca m d'être compris entre 0 (frottement supposé inexistant) et 1 (la contrainte de frottement est alors égale à la contrainte d'écoulement en cisaillement). Ce modèle est surtout valable lorsque les pressions de contact sont très élevées (supérieures à trois fois la contrainte d'écoulement de l'éprouvette) ou lors de régimes de lubrification à film solide épais [Bay90].

Les modèles basés sur la déformation plastique des aspérités s'expriment généralement sous la forme :

$$\bar{\sigma}_t = -f \alpha'(\sigma_N, \sigma_0) \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \frac{\bar{v}_g}{\|\bar{v}_g\|} \Rightarrow f = \frac{\sqrt{3} \sigma_t}{\alpha'(\sigma_N, \sigma_0) \sigma_0} \quad (10)$$

où f est le coefficient de frottement de la loi et α' est le rapport entre la surface réelle de contact et la surface apparente. α' est généralement une fonction de la pression de contact, de la contrainte d'écoulement et de la géométrie des aspérités.

Le coefficient f correspond au coefficient de Tresca au niveau des aspérités en contact. Parmi ces modèles de frottement, nous pouvons citer les modèles de vague plastique [Avi86, Bai94, Wil88] et de frottement généralisé de Bay et Wanheim [Wan78, Bay87] (figure 17). Ces modèles offrent l'avantage d'être valables quelque soit la pression de contact et permettent, dans certaines limites, la prise en compte de poches de lubrifiant emprisonné entre les aspérités du lopin et de la matrice [Vid02]. L'inconvénient majeur de ces modèles est qu'ils sont rarement implémentés dans les codes de calcul commerciaux ; leur utilisation impose par conséquent des développements informatiques de la part des utilisateurs [Gué99].

Les résultats expérimentaux fournis par l'essai WHUST sont les forces normales F_n et tangentes F_t . Dans de nombreux cas, ces seules informations ne sont pas suffisantes pour identifier les coefficients de frottement présentés ci-dessus.

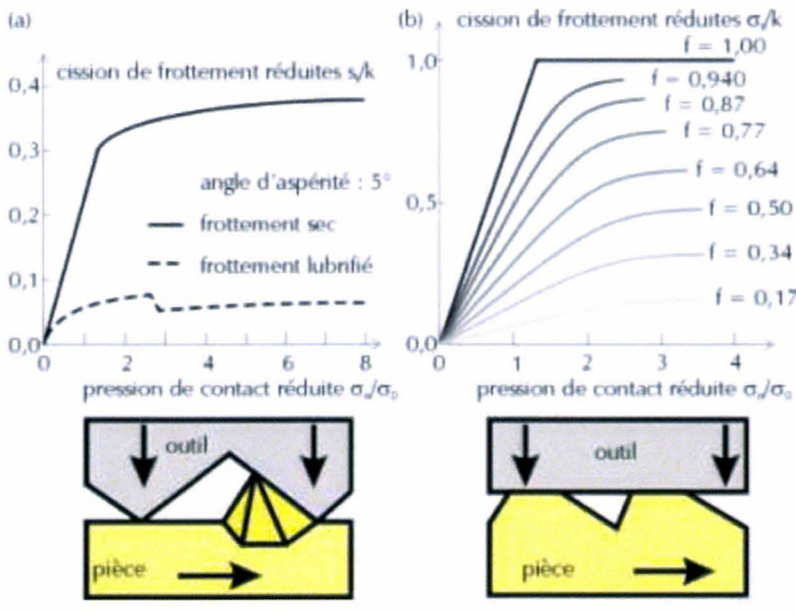


figure 17 – WHUST, paramètres de sortie : exemples de lois de frottement non linéaires.

(a) modèles de la vague plastique d'après [Avi86, Bai94].

(b) modèle de frottement généralisé d'après [Wan78, Bay87].

La considération d'un champ de contraintes moyen à l'interface éprouvette/frotteur permet d'exprimer la pression de contact σ_n et la contrainte de frottement σ_t en fonction de la géométrie de l'éprouvette, des paramètres de l'essai et des efforts normaux F_n et tangents F_t (figure 18) :

$$\sigma_t = \frac{F_t q' - F_n p}{L_{\text{éq}} (p^2 + q'^2)}, \quad (11)$$

$$\sigma_n = \frac{F_t p + F_n q'}{L_{\text{éq}} (p^2 + q'^2)} \quad (12)$$

où p est la pénétration du frotteur dans l'éprouvette, q' et $L_{\text{éq}}$ désignent des grandeurs caractérisant respectivement la longueur et la largeur de la zone de contact. Les valeurs de q' et $L_{\text{éq}}$ sont fonctions des géométries du frotteur et de l'éprouvette. Les références [Dub96a] et [Dub96b] donnent leurs expressions dans le cas d'éprouvettes cylindriques et de frotteurs à géométries « biplan » ou cylindrique. Le rapport de ces deux équations conduit directement à l'identification du coefficient de frottement de Coulomb moyen μ :

$$\mu = \frac{(F_t/F_n)q' - p}{(F_t/F_n)p + q'} \quad (13)$$

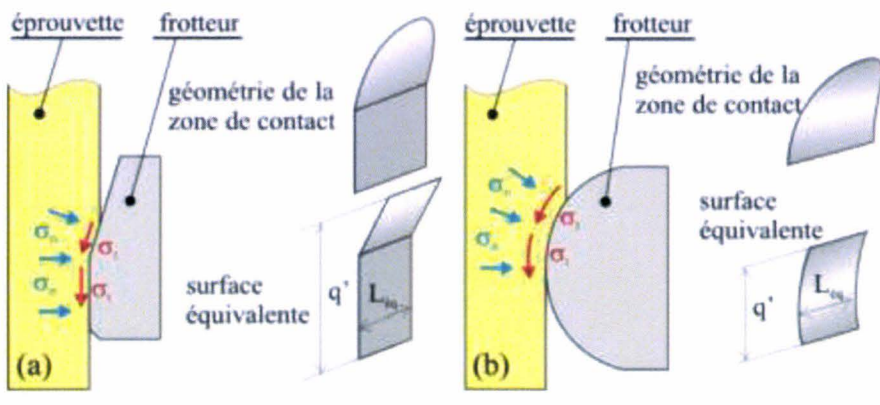


figure 18 - WHUST, paramètres de sortie : contraintes moyennes et géométries des zones de contact :
 (a) frotteur biplan [Dub96a] ;
 (b) frotteur cylindrique [Dub96b].

Toutefois sous certaines conditions de contact, notamment lors de l'utilisation de frotteur cylindrique, la géométrie de la zone de contact est fortement perturbée par la création d'un bombé face au frotteur. De même, en mise en forme à froid, le retour élastique n'est pas toujours négligeable et doit être pris en compte. L'expression du coefficient de frottement moyen μ est alors donnée par [Laz97] :

$$\mu = \frac{(F_t/F_n)q' - p + \delta}{(F_t/F_n)(p - \delta) + q'}, \quad (14)$$

où δ correspond à la hauteur du retour élastique (figure 19). La hauteur du bombé ω ainsi que le paramètre δ sont difficilement mesurables en cours d'essais. Ils sont donc déterminés par simulation numérique. Les grandeurs ω et δ étant peu sensibles aux variations du coefficient de frottement, la simulation numérique est réalisée avec le coefficient de frottement identifié par l'équation 13.

La simulation numérique permet également d'avoir accès à la contrainte d'écoulement au niveau de la zone de contact. Cette grandeur permet l'identification du coefficient de frottement de Tresca m .

Celui-ci s'exprime directement en fonction des efforts F_t et F_n et de la contrainte d'écoulement moyenne $\bar{\sigma}_0$ relevée aux points d'intégration de l'ensemble des éléments finis volumiques avoisinant la surface de contact :

$$m = \sqrt{3} \frac{\sigma_t}{\sigma_0} = \frac{\sqrt{3} F_n [(F_t/F_n) q' + (\delta - p)]}{\bar{\sigma}_0 L_{eq} [q'^2 + (\delta - p)^2]} \quad (15)$$

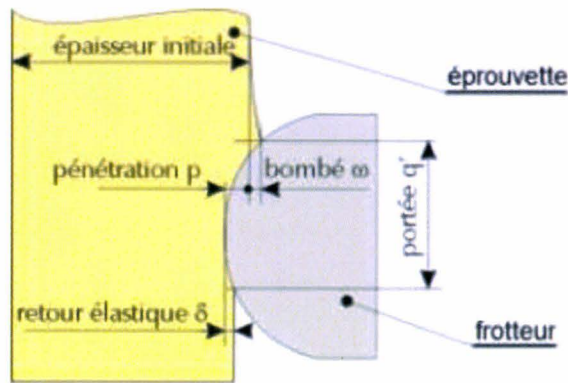


figure 19 - WHUST, paramètres de sortie : section de la zone de contact frotteur/éprouvette. Prise en compte de la géométrie déformée de l'éprouvette sur la surface de contact [Laz97].

Les lois de frottement non linéaires dépendent d'un trop grand nombre de paramètres pour permettre une identification directe à partir des efforts tangents et normaux. L'identification de tels coefficients repose alors sur une méthodologie itérative comparant efforts expérimentaux et numériques [Gué99]. L'avantage de cette méthode est de n'émettre aucune hypothèse sur la géométrie du contact ou la répartition de contraintes en surface. Les inconvénients majeurs sont, premièrement, d'avoir affaire à un procédé itératif pouvant requérir un nombre important de calculs MEF, et, deuxièmement, de posséder un code de calculs disposant du modèle de frottement non linéaire. Toutefois, les modèles de frottement de la vague plastique et Bay-Wanheim sont développés et implémentés uniquement en 2D. Ceci est rarement problématique, de nombreux procédés de mise en forme étant modélisables en axisymétrique ou en déformations planes. Par contre, ces modèles de frottement sont incompatibles avec la simulation de l'essai WHUST qui requiert une modélisation par éléments finis 3D. Ce problème peut toutefois être contourné en reconstruisant la distribution de contrainte de frottement à l'interface à partir du champ de pression de contact et de la loi de frottement. Cette méthode donne des résultats moins précis que ceux obtenus par la méthode itérative mais ne nécessite qu'une seule simulation numérique de l'essai [Pic95, Dub96c].

Au final, il apparaît que l'identification d'un coefficient de frottement de type Coulomb ou Tresca est assez simple à mettre en œuvre à partir des paramètres de sortie du WHUST, mais nécessite la réalisation de simulations numériques pour connaître un certain nombre de paramètres.

Ces paramètres à connaître sont essentiellement des données géométriques (pénétration du frotteur dans l'éprouvette, longueur de contact, bombé, retour élastique, etc.). Pour des conditions de réglage données, ces grandeurs sont fixes. Ainsi, si nous réalisons des essais sur le WHUST avec les mêmes paramètres d'entrée mais en modifiant uniquement le lubrifiant utilisé, seul le rapport F_t/F_n serait modifié dans l'équation 14. Nous proposons par conséquent d'utiliser ce rapport F_t/F_n comme indicateur de performances. Il ne correspond pas réellement à un coefficient de frottement dans le sens où les forces F_t et F_n ne sont pas respectivement tangente et normale à la surface de contact. Toutefois ce rapport traduit bien l'influence que peu avoir le lubrifiant sur le frottement. De plus, il présente l'avantage de ne nécessiter aucun calcul par éléments finis du WHUST, il s'obtient directement à partir des paramètres de sortie du banc d'essai. Dans la suite du mémoire, cet indicateur est appelé indice de lubrification et est noté L_i .

IV.3.2. Quantifier le pouvoir de protection des surfaces en contact

Des contacts intermétalliques apparaissent entre les surfaces de l'éprouvette et du frotteur lorsqu'une rupture du film lubrifiant apparaît. Ceci se produit notamment lorsqu'un lubrifiant est peu adhérent aux surfaces ou lorsqu'il est déposé en quantité insuffisante. Dans ce cas de figure, les surfaces ne sont plus protégées et des défauts de type rayures, annonciateurs d'usure abrasive, apparaissent. Pour analyser l'apparition de ce défaut, nous utilisons un microscope optique équipé d'un éclairage jaune, adapté à l'aspect sombre des éprouvettes calaminées. Cet équipement permet de visualiser les premières rayures créées le long de la trace de frottement sur l'éprouvette et de mesurer la distance de glissement à partir de laquelle ce défaut apparaît (figure 20). Par la suite la longueur de glissement sans apparition de défaut sera appelée longueur critique et sera notée L_c .



figure 20 - WHUST, paramètres de sortie : schéma de l'indice de performance L_c , longueur critique avant l'apparition de rayures

Lorsque le lubrifiant permet d'éviter tout contact direct entre l'éprouvette et le frotteur du début à la fin de l'essai, les rayures n'apparaissent pas : L_c est égal à la longueur de l'éprouvette. Inversement, quand les contacts métal/métal ont lieu dès le début de l'essai, les rayures sont présentes sur toute la trace : L_c est égal à 0 mm. La mesure de la longueur critique L_c est donc un indicateur de performances qui permet de quantifier la capacité du film de lubrifiant à retarder les premiers contacts intermétalliques lors de l'essai.

Toutefois la détection des premières rayures est relativement subjective et n'est pas toujours suffisante pour quantifier l'amplitude du défaut. L'analyse des surfaces de contact est par conséquent complétée par des mesures de rugosité réalisées soit sur l'éprouvette, soit sur la surface du frotteur. Pour cela nous utilisons un profilomètre 3D sans contact. Ce profilomètre fournit des profils de rugosités moyennes de la surface sélectionnée sur une étendue de $5 \times 5 \text{ mm}^2$. Le résultat de chaque analyse est conservé sous la forme de trois profils (figure 21) :

- deux profils tracés en rouge représentant les points les plus hauts et les plus bas de la surface. Ils constituent l'enveloppe des rugosités,
- un profil tracé en bleu représentant l'évolution du R_a le long de la surface analysée.

Cet indicateur permet par exemple de quantifier l'amplitude des rayures sur l'éprouvette ou de déceler une modification importante de la rugosité du frotteur, signe de détérioration de sa surface ou de l'apparition de collage de particules (prémices d'une usure adhésive).

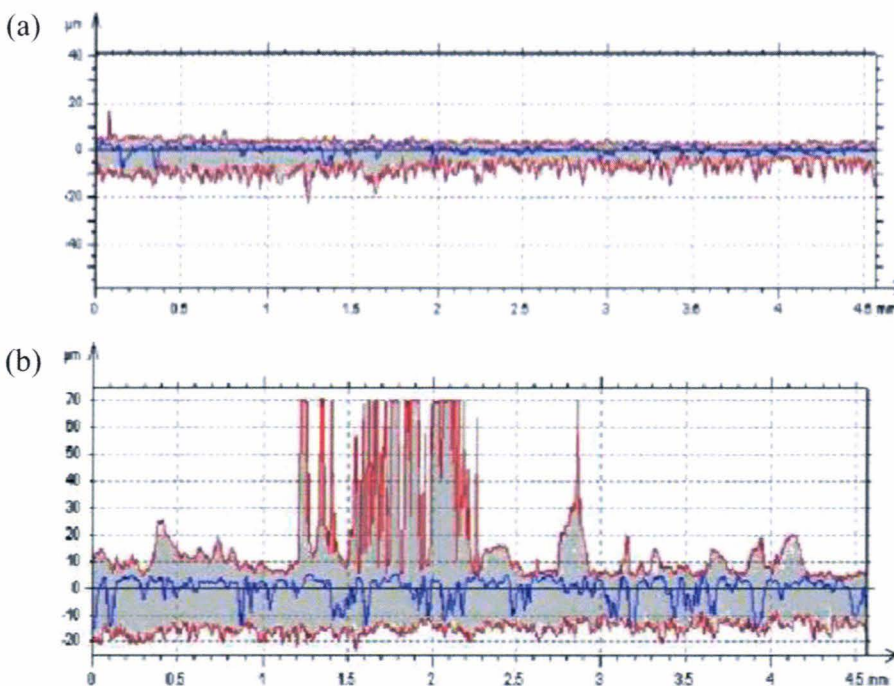


figure 21 - WHUST,
paramètres de sortie :
exemples de profils de
rugosités du frotteur
(a) avant essais
(b) après essais
*(essais réalisés sans
lubrifiant suivant les
conditions de contact de
références définies au
chapitre 2)*

Si le profilomètre 3D et les observations au microscope permettent de détecter les premiers transferts de matière entre l'éprouvette et le lopin, ils ne permettent pas de connaître la nature exacte de ces transferts. Pour cela nous couplons les observations au MEB sur les surfaces du frotteur à des analyses par sonde EDS. Lors des analyses, deux cartographies EDS sont établies : une pour qualifier la présence d'oxydes et l'autre pour qualifier la nature du dépôt de lubrifiant. Pour les oxydes, l'analyse a pour but de quantifier leur présence sur le frotteur, présence qui proviendrait d'un transfert depuis la surface de l'éprouvette. Les éléments recherchés de ce cas sont essentiellement l'oxygène, le fer et le chrome [Qua83]. Pour le lubrifiant, l'analyse permet de quantifier le reste de produit sur le frotteur après essais. Dans le cas d'une lubrification par dispersion aqueuse graphitée, tel que cela sera développé dans le chapitre suivant, les éléments recherchés sont essentiellement le carbone, le sodium et le silicium.

V. Conclusion

Dans le domaine de la mise en forme à chaud, les sollicitations thermomécaniques sévères génèrent des défauts qui réduisent la durée de vie des matrices. Pour la plupart d'entre eux, ces défauts prennent origine en surface de l'outillage. L'étude de ces défauts repose par conséquent sur l'utilisation d'essais tribologiques spécifiques et le développement de procédures d'exploitation des résultats associées.

Développé au LAMIH sous diverses formes depuis une quinzaine d'année maintenant, nous proposons l'utilisation du Warm and Hot Upsetting Sliding test (WHUST) pour l'étude des conditions de contact, de frottement et de lubrification en mise en forme à chaud. Le principe du banc consiste à reproduire sur une éprouvette une déformation plastique localisée en surface à l'aide d'un frotteur qui pénètre légèrement cette dernière puis glisse le long de sa surface. Les paramètres du banc sont la valeur de la pénétration du frotteur dans l'éprouvette, la forme du frotteur, sa vitesse de déplacement, les températures de l'éprouvette et du frotteur. Pour garantir la représentativité des résultats du banc vis-à-vis des procédés de mise en forme étudiés, les éprouvettes, les frotteurs et les lubrifiants utilisés sur le banc d'essai sont prélevés sur les sites de production industriels. Ceci permet de respecter de façon implicite les paramètres physico-chimiques de l'interface (rugosité, dureté, composition chimique du troisième corps, gaz adsorbés, etc.). Les paramètres de l'essai sont ensuite déterminés pour reproduire à l'interface éprouvette/frotteur les grandeurs mécaniques jugées essentielles pour l'étude (généralement la vitesse de glissement, la température, la pression de contact, les déformations et vitesses de déformation plastiques).

L'étude développée dans les chapitres suivants étant centrée sur l'analyse du comportement du lubrifiant à l'interface mise en jeu lors de la forge à chaud, une attention particulière a été portée sur l'application du lubrifiant à l'interface éprouvette/lopin. Le WHUST dispose ainsi d'un pulvérisateur capable d'appliquer sur le frotteur un film lubrifiant similaire à celui déposé sur les matrices industrielles.

Les résultats bruts de l'essai sont les forces normales et tangentielles exercées sur le frotteur durant l'essai, ainsi que la topographie et la composition chimique de la surface de l'éprouvette et du frotteur. Un ensemble d'indicateurs de performances a été défini afin de garantir la portée des résultats fournis par le banc d'essai :

- L'indice de lubrification L_i , quantifie les capacités d'un lubrifiant à réduire le frottement ;
- la longueur critique L_c , quantifie les capacités d'un lubrifiant à retarder les premiers contacts métal/métal, et par conséquent à protéger la matrice ;
- les profils de rugosité, quantifient les défauts géométriques de surface résultants soit de contact métal/métal (rayures), soit de transfert de matière (adhésion, pollution) ;
- les analyses EDS précisent la nature chimique des transferts de matière ainsi que le lubrifiant résiduel après essais.

Ces indicateurs de performances permettent d'analyser l'évolution des paramètres physico-chimiques observés sur les surfaces du frotteur et de l'éprouvette. Ces évolutions de surfaces avant et après contact frottant sont représentatives des évolutions observées sur les procédés industriels : structure du film de lubrifiant avant contact, contraintes appliquées lors du contact, « modifications » de surfaces de l'éprouvette et du frotteur après contact. Les résultats du banc d'essai permettent donc :

- l'alimentation des codes de calculs en coefficients de frottement fiables et représentatifs des conditions de contact du procédé étudié,
- l'amélioration de la lubrification avec, notamment, des procédures de choix de lubrifiants basées sur des critères d'intégrité de surface et non uniquement sur des critères de performance mécanique (réduction des contraintes de frottement),
- l'analyse des défauts de surface et la recherche de leurs origines.

Ainsi, nous avons donc regroupé les conditions indispensables permettant d'analyser le comportement du lubrifiant à l'interface mise en jeu lors de la forge à chaud.

Chapitre 2 : WHUST et caractérisation des lubrifiants – application à un procédé d'estampage

I. Introduction

L'estampage est le terme qui désigne le forgeage à chaud de lopins en alliage ferreux, généralement en acier. La gamme de mise en forme d'une pièce se décompose généralement en cinq étapes :

- Chauffage du lopin,
- Frappe de décalaminage,
- Frappe d'ébauche,
- Frappe de finition,
- Ebavurage.

Le chauffage du lopin a comme objectif l'augmentation de la ductilité du matériau et la réduction de sa contrainte d'écoulement. Il est ainsi possible d'effectuer des mises en forme impliquant de très grandes déformations avec des presses de tailles raisonnables.

Toutefois, le chauffage a pour conséquence la création d'une couche d'oxyde en surface du lopin. Cette couche a un comportement mécanique fragile. Elle est peu adhérente à la surface du lopin et ne suit pas la déformation de celui-ci. Lorsque le lopin est écrasé, la calamine se détache sous forme d'écaillés qui se déposent sur les matrices, polluent l'interface pièce/outils et sont sources d'usures abrasives. La frappe de décalaminage a pour unique objectif d'éliminer un maximum de calamine avant la mise en forme de la pièce. Généralement le lopin est simplement écrasé entre deux tas de compression plans. Les surfaces libres du lopin se déforment et la calamine se détache. La géométrie simple des tas de compression permet de facilement éliminer les débris de calamine (un jet d'air comprimé suffit).

Suite à la frappe de décalaminage, la frappe d'ébauche confère une première forme au lopin, se rapprochant de la forme finale désirée. Cette étape intermédiaire permet de réduire les contraintes que subiraient les matrices si le lopin était mis en forme directement [Ter04] ou d'éviter l'apparition de défauts géométriques, tel qu'un repli de matière [Do06]. La frappe de finition donne ensuite au lopin sa géométrie finale. Comme cela a été souligné dans le premier chapitre, la géométrie des matrices utilisées en ébauche et en finition impose la formation d'une bavure autour de la pièce. Une dernière étape est donc nécessaire pour éliminer cette bavure. Cette opération est effectuée par cisailage.

Les matrices sont lubrifiées avant chaque frappe. Les lubrifiants employés en forge à chaud sont généralement des suspensions de lubrifiants solides dans un support fluide. Les lubrifiants utilisés le plus couramment sont des dispersions aqueuses de graphite. Le graphite est employé en raison de sa structure lamellaire, propriété qui en fait un très bon lubrifiant à chaud [Jeo01]. L'eau est utilisée en raison de son absence de nocivité avec l'environnement, de son pouvoir refroidissant, ainsi que pour sa réaction avec le graphite, réaction qui facilite le glissement de couches de graphènes les unes sur les autres [Pie93]. L'inconvénient majeur de ces lubrifiants est que le graphite est un élément salissant pour les opérateurs, la machine et les alentours du poste de travail. Des développements ont été menés pour remplacer le graphite par d'autres substances moins salissantes. Ceux-ci ont conduit à une nouvelle génération de produits, dits « blancs » [She01]. Si à l'heure actuelle ces derniers sont opérationnels, ils ne donnent pas encore totalement satisfaction, en particulier dans le cas de gravures profondes. De plus certains de ces produits blancs sont d'une élimination ou d'un rejet plus difficiles que les produits graphités.

Nous avons montré dans le chapitre précédent que l'étude des conditions de contact, de frottement et de lubrification des procédés de mise en forme passe par l'utilisation de bancs d'essai de laboratoire. L'étude de caractérisation de la lubrification en forge à chaud proposée dans ce mémoire s'appuie sur l'utilisation du banc d'essai WHUST. La stratégie d'utilisation de ce banc d'essai requière le choix d'un procédé de mise en forme pour définir les grandeurs mécaniques à reproduire sur le banc. Un procédé générique doit par conséquent être sélectionné pour l'étude.

L'intérêt s'est porté sur le procédé de mise en forme à chaud d'un carter en acier 20MnCr5. Les températures des lopins et des matrices sont respectivement de 200 °C et de 1100 °C. La presse utilisée est une presse mécanique développant une vitesse maximale de 1 m.s⁻¹. Nos recherches sont centrées sur l'étude de la zone de contact au niveau du flan de la matrice lors de la phase d'ébauche, car c'est lors de cette étape que la matrice se dégrade plus rapidement. Ce choix a été validé avec nos partenaires industriels dans le cadre d'un groupe de travail animé par le CETIM de Saint-Etienne. Ce procédé est un procédé représentatif du métier de la forge à chaud : les principaux types d'endommagement des matrices y sont présents, la gamme de température et les cadences de frappe sont dans la moyenne de ce qui est fait sur d'autres sites de production, le lubrifiant utilisé est une dispersion de graphite dans l'eau pulvérisée avant chaque frappe. De plus ce procédé est utilisé régulièrement par l'un des partenaires de l'étude et est par conséquent accessible pour réaliser d'éventuelles mesures complémentaires sur site.

Dans ce second chapitre, nous appliquons la méthodologie d'utilisation du WHUST à l'étude de ce procédé générique. Tout d'abord une analyse thermomécanique du procédé est présentée. Une attention particulière est apportée à la caractérisation de l'interface lopin/matrice. Les paramètres d'entrée du banc sont ensuite identifiés. Enfin une première campagne d'essais est menée à bien. A ce stade de l'étude, la campagne vise deux objectifs prioritaires :

- quantifier la fiabilité des mesures : les essais réalisés à chaud avec un apport de lubrifiant sont-ils répétitifs ?
- définir la sensibilité du banc : le banc d'essai est-il capable de différencier le comportement de deux lubrifiants a priori identiques ?

II. Analyse du procédé générique

II.1. Les lopins

Les lopins mis en forme sont des cylindres de diamètre 72 mm, de longueur 150 mm en acier 20MnCr5. L'acier 20MnCr5 est un acier doux faiblement allié couramment utilisé en construction mécanique.

La préchauffe des lopins se fait à l'aide d'un four à induction. La chauffeuse peut contenir 20 pièces simultanément. Un temps de chauffage voisin de 200 secondes permet de faire passer la température du lopin de 20 °C à 1220 °C (température visée sortie chauffeuse).

Lors de la montée en température, la surface du lopin est modifiée par différents phénomènes, tels que la décarburation ou la formation d'une couche d'oxydes. Dans le cas des aciers faiblement alliés, cette couche est constituée principalement de wüstite (FeO), de magnétite (Fe₃O₄) et d'hématite (Fe₂O₃). Pour des températures inférieures à 570 °C, le fer et l'oxygène présent dans l'air réagissent pour former de la magnétite :



Aux températures supérieures, le fer et l'oxygène se combinent pour former de la wüstite :



La wüstite réagit alors avec le dioxygène pour former de la magnétite :



Enfin, quelque soit la température, la magnétite réagit avec les atomes d'oxygène et forme une couche d'hématite :



La wüstite étant instable aux températures supérieures à 570 °C, dès que la température décroît la wüstite s'appauvrit en oxygène et précipite avec la magnétite [Gen08]. Cette réaction étant favorisée par la présence importante d'oxygène, elle s'effectue principalement du côté de la couche d'oxyde exposée à l'air (figure 22).

La couche de calamine, bien que composée en majeure partie de fer et d'oxygène est également affectée par les éléments d'alliage de l'acier, même si ceux-ci sont en faibles quantités. Ainsi dans le cas du 20MnCr5, dont la composition chimique est résumée dans le tableau 1, le silicium a tendance à migrer à l'interface lopin/calamine où il forme une couche d'oxyde SiO_2 [Hun03]. Le chrome va quant à lui s'oxyder sous la forme Cr_2O_3 , composé qui va ensuite réagir avec la wüstite pour former la chromite de fer FeCr_2O_4 . Ces composés de chrome ayant une faible solubilité dans la wüstite vont se former dans la couche de calamine plutôt qu'à l'interface lopin/calamine [Gen08]. Ces oxydes créés par les éléments d'alliage, présents à l'interface lopin/calamine ou précipités dans la wüstite, font qu'une partie de la calamine peut rester adhérente à la surface du lopin après la frappe de décalaminage.

Lorsque la chauffe du lopin est achevée, le lopin est acheminé à température ambiante au poste de travail. Le lopin passe d'une température de 1220 °C en sortie de four à une température de 1160 °C au poste de d'ébauchage.

Des mesures de taux de calamines ont été effectuées sur site industrielle. Des lopins ont été mesurés précisément avant et après chauffage. Une perte au feu de dix grammes a été calculée pour des pièces pesant en moyenne 4,8 kg avant chauffage. Le taux de calamine produit durant la chauffe est par conséquent égal à :

$$Tx_{cal} = 100 \frac{m_i - m_f}{m_i} = \frac{10 \times 100}{4800} \approx 0,21\% \quad (20)$$

tableau 1 : Composition de l'acier 20MnCr5 [Mur02]

Eléments	Fe	C	Mn	Cr	Si	P	S
pourcentage	balance	0,17-0,22	0,70-0,90	0,70-0,90	0,15-0,30	<0,035	<0,04

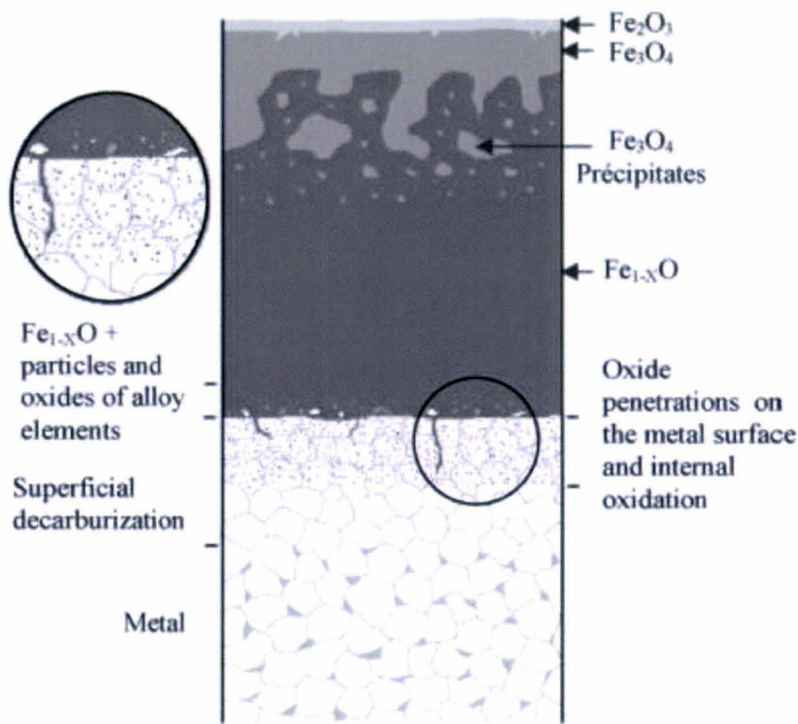


figure 22 : Forgeage à chaud des aciers : vue schématique de la surface oxydée à haute température à l'air libre d'un acier faiblement allié [Gen08]

II.2. Les matrices

Les matériaux utilisés pour les outillages sont déterminés pour résister aux sollicitations thermomécaniques importantes imposées par le procédé de mise en forme. Le procédé d'estampage du carter étudié dans ce chapitre utilise des matrices en X38CrMoV5-3. Le X38CrMoV5-3 est un acier fortement allié constitué à 0,38 % de carbone, 5 % de chrome et 3 % de molybdène (tableau 2). Cette nuance se classe dans les aciers résistant aux chocs thermiques du fait de la présence de chrome, de molybdène et de vanadium. Cet aspect en fait l'un des aciers le plus souvent utilisé dans le cadre de la forge à chaud [Rab79].

Toutefois, pour augmenter sa durée de vie, la matrice est traitée par nitruration gazeuse. La nitruration est un traitement thermochimique superficiel d'enrichissement en azote par diffusion [Ler91]. Pour faire diffuser superficiellement l'azote dans de l'acier, il existe trois milieux de circulation : une phase plasma où l'azote est ionisé à partir du gaz N_2 , une phase gazeuse où l'azote sera dissocié du gaz ammoniac NH_3 et une phase liquide dans des bains de sels fondus. A ces trois milieux correspond respectivement trois types de nitruration : ionique, gazeuse et en bains de sels. Dans tous les cas, la concentration d'azote diffusé diminue depuis la surface traitée vers le cœur où la concentration est nulle.

tableau 2 : Composition chimique moyenne du X38CrMoV5-3 [Lev04]

Eléments	Fe	C	Cr	Mo	V	Mn	Si
pourcentage	balance	0,35-0,40	4,80-5,20	2,70-3,20	0,40-0,60	0,30-0,50	0,30-0,50

La nitruration apporte deux modifications essentielles à la structure du matériau traité. Tout d'abord un traitement de conversion chimique superficiel se produit conduisant à la formation en extrême surface d'une « *couche de combinaison* ». Cette couche est composée de trois types de nitrures de fer et mesure jusqu'à 50 μm . Dans l'ordre d'apparition de la surface vers le cœur du matériau, les trois nitrures sont : la solution ϵ de composition allant de Fe_3N à Fe_2N présentant en surface des porosités, la solution γ' de structure chimique Fe_4N et la solution α de très faible solubilité en azote. La couche de combinaison, aussi appelée couche blanche, peut éventuellement être éliminée par polissage, si elle présente trop de porosités. Ensuite l'azote apporté par le traitement diffuse en solution solide interstitielle et de combinaison avec certains éléments d'alliage contenus dans l'acier. Les nitrures finement dispersés conduisent à un durcissement par renforcement structural sur une profondeur pouvant atteindre 250 μm . cette zone est appelée « *couche de diffusion* » [Ler91]. La figure 23 schématise la structure d'une surface nitrurée.

La nitruration améliore quatre caractéristiques de l'acier de base [Ter07] :

- *La résistance à l'usure* : l'augmentation de la dureté de la couche de combinaison (dureté pouvant atteindre 1200 Hv) permet d'améliorer la résistance à l'usure abrasive. Mais cette propriété est limitée aux situations d'abrasion douce du fait de la profondeur limitée de la couche de combinaison. La résistance à l'usure adhésive est quant à elle particulièrement améliorée après nitruration, par le bon coefficient de frottement des couches nitrurées.
- *La tenue à la fatigue mécanique* : la dureté et la profondeur de la zone de diffusion de l'azote permettent d'améliorer la tenue en fatigue. Cette limite de fatigue augmente avec l'épaisseur nitrurée mais également avec la résistance à cœur de l'acier.
- *La résistance à la déformation plastique en surface* : l'obtention d'une résistance mécanique élevée est essentiellement due à l'augmentation de la profondeur de la couche de diffusion et la présence d'azote interstitiel grâce à la précipitation des nitrures avec les éléments d'alliages. La structure de la couche de combinaison apporte peu dans ces cas-là.
- *La tenue à la corrosion* : Les procédés de nitruration donnent d'excellents résultats de tenue en corrosion. Les résultats sont comparables à ceux obtenus avec des pièces en inox et bien supérieurs aux solutions avec pièces chromées.

La matrice du procédé générique est représentée en figure 24. A l'état initial, la matrice industrielle est protégée par nitruration gazeuse non polie après traitement. La surface de l'outil présente donc une couche de combinaison en superficie lors de sa mise en service. La matrice est préchauffée à 200 °C.

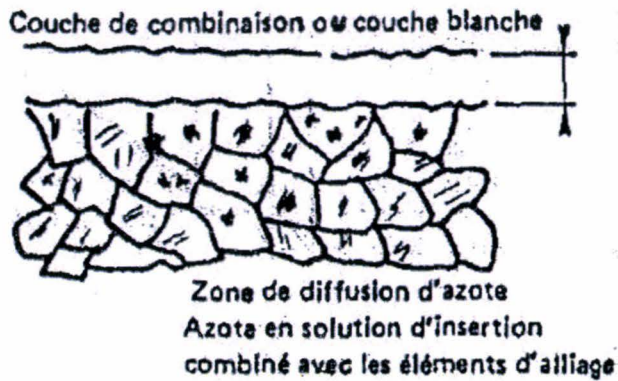


figure 23 : Forgeage à chaud des aciers, schéma d'une couche nitrurée [Ler91]

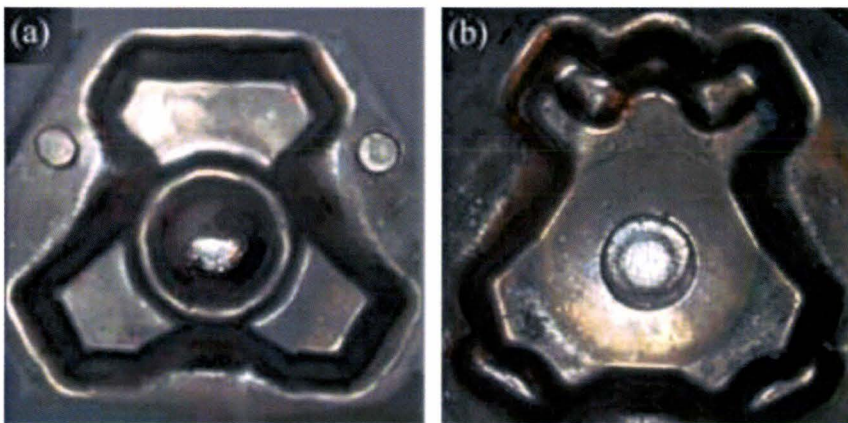


figure 24 : Forgeage à chaud des aciers, matrices d'ébauche (a) et de finition (b) utilisées pour la mise en forme du carter.

II.3. L'apport de lubrifiant

Le lubrifiant utilisé pour assurer la lubrification du procédé est une dispersion de graphite dans de l'eau. Ces solutions sont généralement composées de grains de graphites de granulométrie fixée et de différents additifs, notamment de dispersant et d'un liant servant à assurer l'accroche des grains de graphites sur la surface pulvérisée. Dans le cas du procédé étudié, le lubrifiant correspond à une dispersion de graphite diluée à 5 % dans de l'eau, les grains de graphite ont une granulométrie à 80% égale à 20 µm, le liant est constitué de particules de sodium et de silicium en pourcentage inconnu (données non communiquées par le fournisseur).

Les matrices sont lubrifiées avant chaque frappe, par des systèmes de pulvérisation fixes automatisés. Ces systèmes sont composés chacun de deux buses « fixes » : l'une est fixée au niveau de la matrice supérieure pour pulvériser la matrice inférieure et l'autre est fixée au niveau inférieur pour pulvériser la matrice supérieure.

Lorsqu'une goutte de lubrifiant se dépose sur l'outil, l'eau s'évapore et refroidit la surface. Le graphite reste alors sur la surface et forme une couche plus ou moins homogène, dépendante notamment de la température de surface et des composants associés au graphite [Yan05]. L'épaisseur de produit déposée sur la matrice dépend essentiellement de cinq paramètres :

- La pression de l'air servant à pulvériser le lubrifiant,
- le temps de pulvérisation,
- le volume injecté de lubrifiant,
- la distance buse/matrice,
- la géométrie de la surface de la matrice.

Des mesures sur sites ont été effectuées pour quantifier l'apport de lubrifiant sur la matrice, avant et après chaque frappe. Ces mesures ont été effectuées sur quatre matrices à l'aide de notre sonde à induction magnétique dont la précision de mesure est de 2 μm . Dix-huit mesures ont été prises sur chaque outil. Ces mesures montrent que l'épaisseur de lubrifiant varie du simple au quadruple en fonction de la zone matrice. De plus, si les différences d'épaisseurs entre la matrice supérieure et la matrice inférieure sont négligeables lors de la pulvérisation (donc avant la frappe), les épaisseurs résiduelles après frappe sont quant à elles différentes (figure 25). Cette différence s'explique par le fait que le lopin est déposé sur la matrice inférieure. Les temps de contact avec la matrice supérieure sont donc moins importants, ce qui se traduit par une « consommation » moindre du lubrifiant.

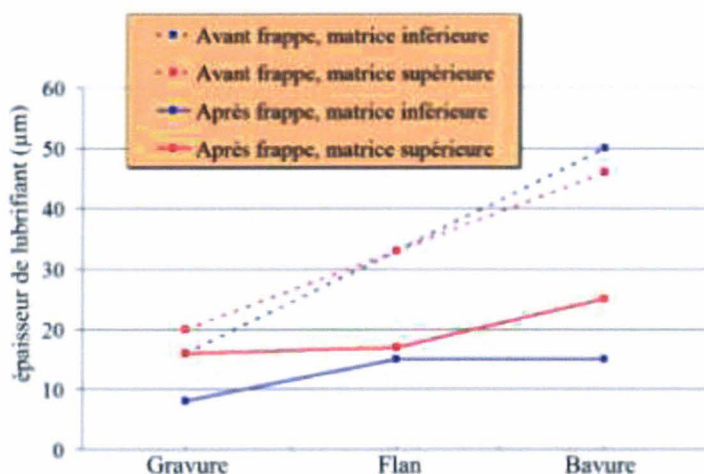


figure 25 : forgeage à chaud des aciers, moyennes des mesures d'épaisseur de lubrifiant en fonction de la zone matrice

Le refroidissement de la surface va dépendre du volume d'eau volatilisé lors de la pulvérisation. Si la chute de température liée à l'application du lubrifiant est difficilement mesurable sur site, il est par contre assez simple de connaître le volume moyen de liquide évaporé. Le système de pulvérisation du procédé est réglé pour pulvériser 50 ml de produit avant chaque frappe. Ce volume est réparti sur une surface de 190 cm². Le volume d'eau évaporée est par conséquent égal à 0,26 g.cm⁻².

II.4. Analyse thermomécanique du procédé

La simulation numérique du procédé de mise en forme a été réalisée sous Forge3®. La loi de comportement élastoviscoplastique affectée au lopin, correspondant au modèle Hansel–Spittel, est issue de la littérature [Gro00, For03]:

$$\sigma_0 = 1324,34.(e^{-0,00257 T}).(\epsilon_p^{-0,1941}).(e^{-0,06521/\epsilon}).(\dot{\epsilon})^{0,1468} \quad (21)$$

où σ_0 est la contrainte d'écoulement plastique, ϵ_p la déformation plastique, $\dot{\epsilon}$ la vitesse de déformation et T la température. La relation (21) est valable pour des températures comprises entre 732 °C et 1250 °C.

Les outils sont supposés rigides. Les valeurs par défaut ont été prises pour les propriétés d'interface, que ce soit pour le frottement ou les échanges thermiques. Puisque nous cherchons à reproduire des conditions de contact et de frottement génériques, représentatives de la profession de la forge à chaud, ces « approximations » ne sont pas préjudiciables à l'étude et permettent de calculer un ordre de grandeur tout à fait réaliste des contraintes, températures et vitesses de glissement au niveau des zones de contact.

L'étude se focalise sur la zone de la matrice située au niveau du flan, juste avant la zone de bavure, zone où la matrice s'endommage rapidement. La simulation par éléments finis montre que dans cette région, les pressions de contact sont égales à 190 MPa, la vitesse de glissement atteint la valeur de 60 mm.s⁻¹ et la température de l'éprouvette au moment du contact est de 1100 °C.

II.5. Bilan

Un procédé générique a été choisi pour être représentatif des opérations d'estampage. Ce procédé met en œuvre :

- Un lopin en acier 20MnCr5 amené à une température de 1100 °C lors du contact,
- Un taux de calamine de 0,2 % sur le lopin,
- Un lubrifiant graphité pulvérisé sur la matrice à raison de 0,26 g.cm⁻², et formant une épaisseur de graphite égale à 33 μm,
- Une matrice en acier X38CrMoV5-3 nitruré, préchauffée à 200 °C,
- Une pression de contact à l'interface lopin/matrice égale à 190 MPa,
- Une vitesse de glissement à l'interface lopin/matrice égale à 60 mm.s⁻¹.

Le paragraphe suivant présente comment les réglages du WHUST sont déterminés pour permettre de reproduire ces mêmes conditions de contact sur le banc d'essai du LAMIH.

III. Réglage des paramètres du banc d'essai

Lors du paragraphe précédent, nous avons caractérisé les conditions de contact industrielles de la phase d'ébauche de l'estampage d'un carter. L'objectif principal est ici de déterminer les paramètres de réglage du banc d'essai WHUST de façon à simuler au mieux ses conditions industrielles en laboratoire. Pour cela, nous suivons la méthodologie proposée au chapitre précédent (figure 13 du chapitre 1).

III.1. Les éprouvettes

Matériau

La simulation en laboratoire d'un contact respectant les paramètres physico-chimiques du contact « générique » passe par l'utilisation des mêmes matériaux pour l'ensemble des protagonistes du tribosystème : mêmes matériaux pour l'éprouvette et le lopin, pour le frotteur et la matrice, même lubrifiant pour le banc d'essai et le procédé industriel.

Les éprouvettes utilisées sur le WHUST sont par conséquent extraites de barres en acier 20MnCr5, fabriquées suivant la même gamme que les lopins du procédé générique. Les éprouvettes sont de forme cylindrique, d'une hauteur de 50 mm et d'un diamètre de 30 mm.

Les extrémités hautes et basses des éprouvettes sont chanfreinées pour que la mise en contact éprouvette/frotteur se réalise de façon progressive, évitant ainsi le contact entre le frotteur et une arête vive de l'éprouvette en début d'essai et fin d'essai (figure 26).

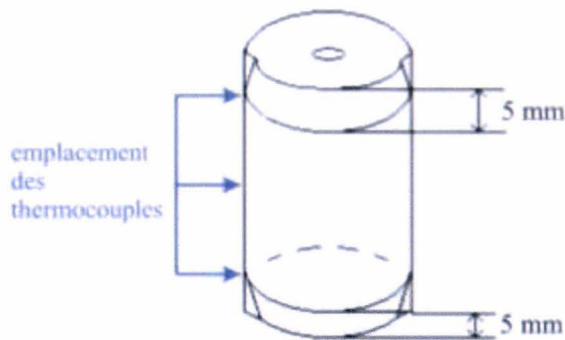


figure 26 : WHUST, géométrie de l'éprouvette

Paramètre de chauffe

La température de l'éprouvette doit être égale à 1100 °C lors du contact avec le frotteur. Pour nous assurer que ce paramètre soit bien respecté nous avons instrumenté les éprouvettes à l'aide de trois thermocouples de type K, soudés à la surface de l'éprouvette et répartis le long de sa hauteur (figure 26). Les éprouvettes ont été positionnées dans l'inducteur, chauffées jusqu'à 1200 °C, puis transférées sur le banc d'essai (figure 27). Nous remarquons tout d'abord qu'après 62 secondes, à la fin de la phase de chauffage, la température de l'éprouvette n'est pas homogène. La face supérieure est à 1200 °C alors que la face inférieure est à 1100 °C. Cette différence s'explique par les échanges de chaleur entre l'éprouvette et le support sur lequel elle repose. Toutefois la chaleur diffuse rapidement au sein du matériau et la différence de température le long de l'éprouvette devient rapidement négligeable. Vingt secondes après la fin de la chauffe, la température de l'éprouvette en surface est homogène et égale à 1100 °C, la température de consigne. Ce temps de transfert est compatible avec la technologie disponible au niveau du WHUST : le bras manipulateur disponible sur le banc permet de transférer l'éprouvette, depuis le support de chauffage jusqu'à WHUST en quinze secondes.

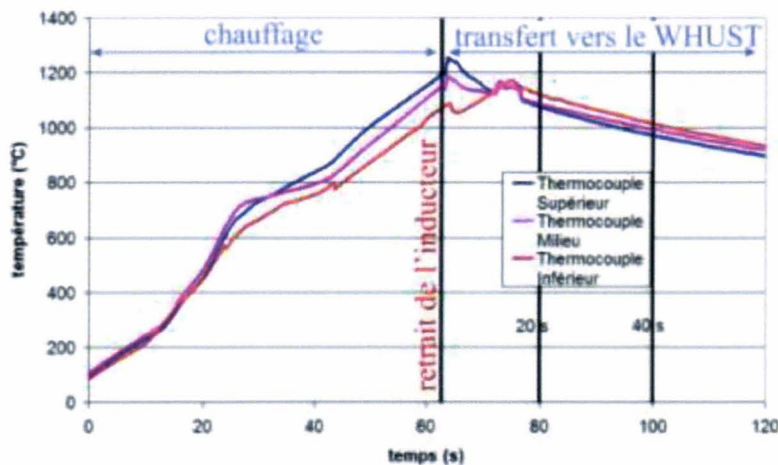


figure 27 : WHUST, températures en surface des éprouvettes durant les phases de chauffe et de transfert vers le banc d'essai.

Couche de calamine

La croissance de la calamine, de la température ambiante à la température de consigne, se décompose en deux étapes [Zha05] :

- *de l'ambiante à 700 °C*, l'oxydation est gouvernée par la diffusion de l'oxygène dans les couches gazeuses de frontière. La calamine formée est trop mince pour empêcher l'écoulement d'électron vers la surface et son épaisseur peut être négligée.
- *au-delà de 700 °C*, valeur du point de curie pour les aciers, l'éprouvette perd son magnétisme et la température austénitique initiatrice de la croissance de la calamine est atteinte. La couche d'oxyde devient suffisamment épaisse, l'épaisseur de calamine croît suivant une loi parabolique en fonction du temps [Tzv04] :

$$e = k' \sqrt{t} \quad (22)$$

où e est l'épaisseur de la couche en microns, t le temps en secondes et k' la constante d'oxydation en $\mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Nous pouvons donc agir sur le temps de chauffe pour ajuster le taux de calamine produit sur l'éprouvette. L'éprouvette est mise en température suivant un cycle de chauffe en deux étapes :

- une montée en température rapide est imposée de l'ambiante à 700 °C,
- une montée plus lente est ensuite imposée jusqu'à 1200 °C en fonction du taux de calamine souhaitée

A partir de ce principe, nous avons mis en température des éprouvettes suivant des cinématiques de chauffe différentes. Les éprouvettes ont été chauffées jusqu'à 1200 °C, laissées 20 secondes à l'air libre jusqu'à ce que leur température de surface atteigne 1100 °C, puis refroidies brutalement pour figer la couche d'oxyde et permettre la mesure de la perte au feu suivant l'équation (20). Les résultats obtenus montrent que le taux de calamine générique de 0,2 % est obtenu pour une vitesse de chauffe de 20 °C.s⁻¹.

III.2. Les frotteurs

Matériau, aspect de surface

Par les raisons évoquées précédemment, le matériau des frotteurs est le même que celui des matrices du procédé générique. Sauf indications particulières, les frotteurs utilisés dans la suite de l'étude ont été usinés, polis et traités par le fournisseur ayant réalisés les matrices industrielles, suivant les mêmes gammes de fabrication et de traitement thermique.

Ces frotteurs sont en acier à outil X38CrMoV5-3 nitruré par gaz. Ils présentent en surface une couche blanche de nitruration d'une épaisseur égale à 50 μm (figure 28a), similaire à celle qui recouvre la surface des matrices en début de vie. L'aspect de surface (figure 28b) présente des porosités caractéristiques de la couche blanche. Toutefois le profil de rugosité ne révèle aucun défaut géométrique significatif (figure 29). La rugosité arithmétique moyenne des frotteurs est voisine de 0,6 μm . La géométrie du frotteur est déterminée suite à l'analyse mécanique du banc d'essai, au paragraphe III.3.

L'ensemble des frotteurs nécessaires à l'étude a été fabriqué en début de projet et traité en même temps. Par conséquent ils proviennent tous du même approvisionnement matière et ont subi le même traitement thermique.

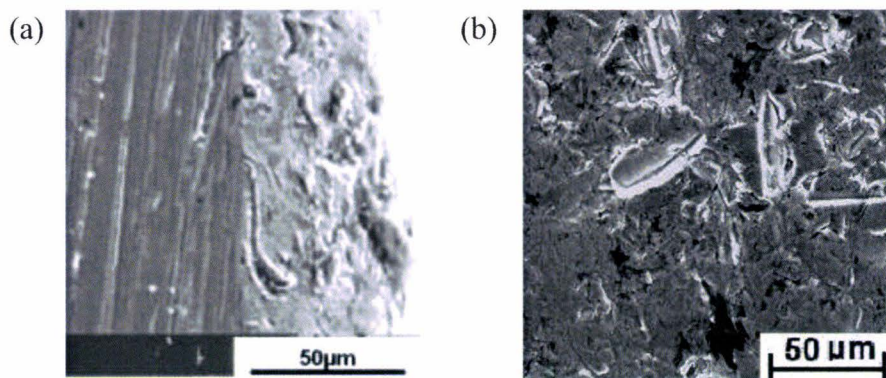


figure 28 : WHUST, observations MEB de la couche blanche de nitrure en surface des frotteurs.
(a) vue en coupe
(b) vue de dessus

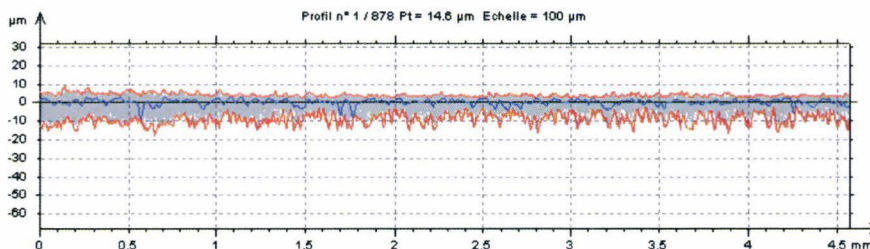


figure 29 : WHUST, exemple de profil de rugosité d'un frotteur avant essais.
 $R_a = 0,6 \mu\text{m}$

Lubrifiant

Les paramètres de réglage du WHUST, pour appliquer le lubrifiant sur la surface du frotteur, sont :

- La pression d'air du pulvérisateur (comprise entre 3 et 9 bars),
- le temps de pulvérisation,
- l'angle de la buse de pulvérisation,
- la distance entre la buse et la surface du frotteur,
- la température de la solution lubrifiante.

Ces paramètres doivent être ajustés pour pulvériser $0,26 \text{ g.cm}^{-2}$ de lubrifiant sur le frotteur et y former une couche de graphite de $33 \mu\text{m}$ d'épaisseur.

Dans un premier temps, la température de la solution utilisée sur le WHUST est directement ajustée à celle du procédé générique.

Ensuite trois séries de mesures ont été effectuées, pour quantifier l'influence des paramètres distance de pulvérisation, pression et temps de pulvérisation sur le volume de lubrifiant pulvérisé et l'épaisseur de graphite obtenue (figure 30). La surface du frotteur sur laquelle sera déposé le graphite mesurant 320 mm^2 , $0,83 \text{ ml}$ de lubrifiant devront être pulvérisés sur la surface pour respecter le taux de recouvrement de $0,26 \text{ g.cm}^{-2}$.

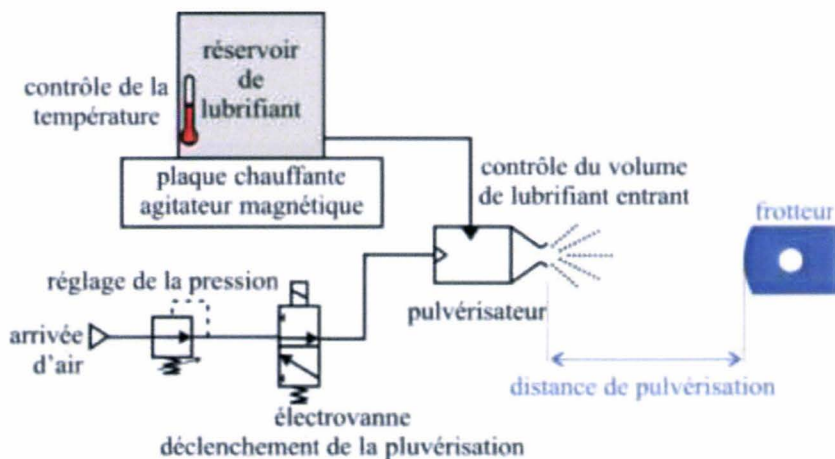


figure 30 : WHUST, schéma du circuit de pulvérisation.

Distance de pulvérisation :

L'influence de la distance de pulvérisation, sur la couche de graphite déposée, a été testée pour une pression de 5 bars et pour un temps de pulvérisation de 1 seconde. Pour des distances inférieures à 100 mm, nous constatons que la surface n'est pas recouverte de façon uniforme et que le film de graphite présente un cercle au centre. Les mesures d'épaisseur montrent qu'au niveau du cercle l'épaisseur est plus faible. Pour ces distances de pulvérisation, la pression est trop importante et chasse le graphite vers l'extérieur de la surface. Pour des distances supérieures ou égales à 200 mm, le film est réparti de façon homogène mais il est trop mince et laisse apparaître l'acier. Le meilleur résultat est obtenu pour une distance égale à 150 mm. Dans ce cas, le film présente un aspect uniforme et recouvre bien l'ensemble de la surface du frotteur. La distance buse/frotteur est par conséquent fixée à 150 mm.

Pression, temps de pulvérisation

Pour évaluer l'influence des paramètres pression et temps de pulvérisation un ensemble de mesures a été effectué avec une pression évoluant entre 3 et 6 bars, et un temps compris entre 1 et 6 secondes. Les volumes injectés par le pulvérisateur ont été relevés en fonction du temps et de la pression (figure 31). Le volume croît quasi linéairement avec le temps de pulvérisation. Il augmente également avec la pression. Quelque soit la pression choisie, le volume pulvérisé dépasse la valeur cible après deux secondes de pulvérisation.

Si l'évolution du volume en fonction du temps et de la pression est monotone, il n'en est pas de même avec l'épaisseur de la couche de graphite. Le tableau 3 présente les épaisseurs de graphite mesurées au centre de la surface du frotteur en fonction de la pression et du temps de pulvérisation. Pour une pression de 3 bars, l'épaisseur de la couche augmente avec le temps. Ce résultat est cohérent avec les courbes de la figure 31. Par contre pour une pression de 5 bars c'est l'effet inverse qui opère : l'épaisseur de graphite décroît, alors que le volume pulvérisé augmente. La pression est trop importante et l'air comprimé chasse le graphite vers l'extérieur de la surface. Les relevés pour la pression de 4 bars sont plus difficilement explicables. Dans un premier temps la couche augmente avec le temps et atteint des épaisseurs importantes, de l'ordre de grandeur de celles relevées sur site industriels. Puis pour des temps de pulvérisation plus important l'épaisseur décroît. Il est probable que les effets cumulés de l'épaisseur importante de graphite, du volume d'eau évaporé et de l'air comprimé aient fortement refroidi la surface [Yan05]. L'eau de la dispersion graphitée pulvérisée ne s'évapore donc plus et tend à laver la surface du frotteur en emportant une partie de la couche de graphite précédemment formée.

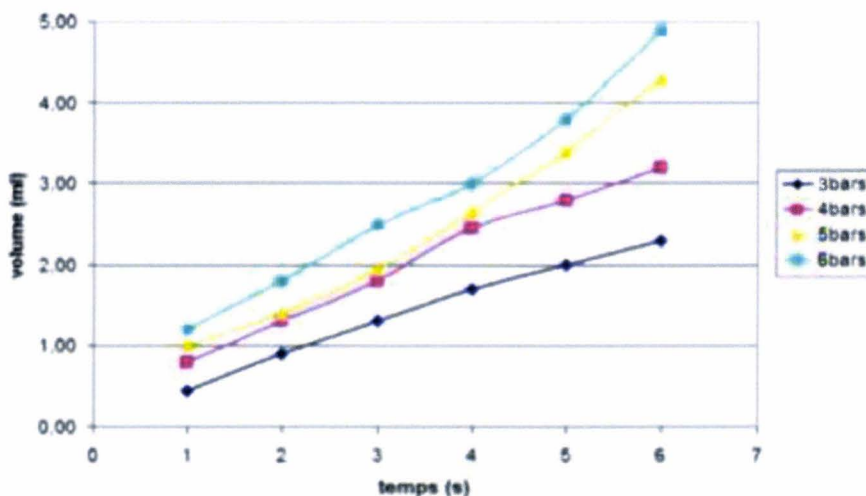


figure 31 : WHUST, volume de lubrifiant pulvérisé en fonction de la pression et du temps de pulvérisation.

tableau 3 : WHUST, épaisseurs des couches de graphite déposées sur le frotteur

Pression (bars)	durée de pulvérisation		
	1 seconde	2 secondes	3 secondes
3 bars	14 μm	17 μm	21 μm
4 bars	31 μm	45 μm	20 μm
5 bars	22 μm	12 μm	5 μm

La figure 32 présente les relevés d’épaisseurs de lubrifiant, le long de la surface du frotteur pour les conditions de pulvérisation suivantes :

- distance buse/frotteur = 150 mm,
- pression de pulvérisation = 4 bars,
- temps de pulvérisation = 1 seconde.

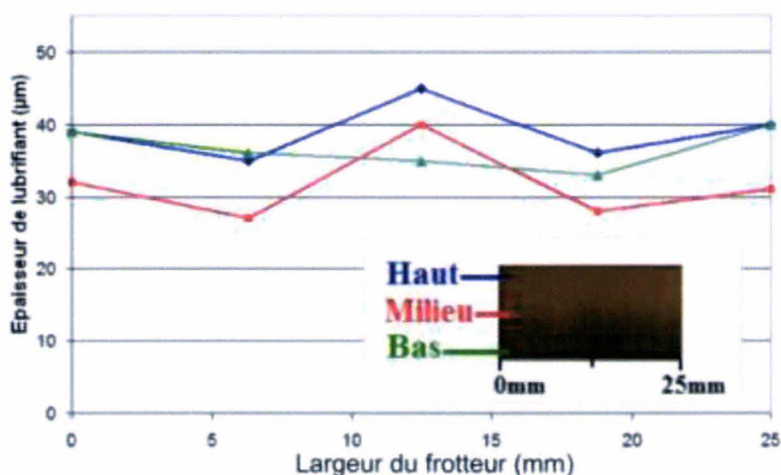


figure 32 : WHUST, épaisseurs de graphite le long de la surface du frotteur pour une pression de pulvérisation de 4 bars et un temps de pulvérisation de 1 seconde.

Le film est plus épais aux bords et au centre du frotteur. L’épaisseur moyenne du film est de 35 μm , très proche de la valeur cible. L’épaisseur varie localement entre 30 et 45 μm mais ne présente pas de forte inhomogénéité. Nous pouvons donc valider ces réglages, pour reproduire sur le WHUST les conditions de lubrification du procédé générique.

III.3. Réglage des paramètres mécaniques

A ce stade de l’étude, nous sommes capable de reproduire sur le WHUST les paramètres physicochimiques du procédé générique : matériaux, rugosité, couche superficielle, apport de lubrifiant. La température des matériaux en contact est également reproduite avec précision. Il reste à identifier les paramètres de réglage du banc d’essai permettant de reproduire les grandeurs mécaniques du contact.

La vitesse de glissement moyenne à l'interface éprouvette/frotteur est directement contrôlée par le vérin hydraulique du dispositif. La vitesse de ce dernier sera par conséquent réglée à une vitesse de 60 mm.s^{-1} .

Des simulations numériques du WHUST sont maintenant nécessaires pour identifier les paramètres pénétration et géométrie du frotteur permettant de reproduire la pression de contact générique. Le frotteur étant de forme cylindrique, identifier sa géométrie équivalra à déterminer son rayon R_0 .

Les conditions de chargement font que la simulation ne peut pas être traitée en axisymétrique. Par conséquent, et par cohérence avec l'analyse numérique du procédé générique, la simulation est réalisée avec le code de calcul par éléments finis Forge3®. La symétrie du problème par rapport au plan $X = 0$ fait que seule une demi-éprouvette est modélisée. Le maillage comporte 70 670 éléments volumiques tétraédriques. La grande majorité de ces éléments est concentrée sur une hauteur de 35 mm (direction Z), une profondeur de 1 mm (direction Y) et une largeur de 4 mm (direction X). Les dimensions de cette zone de raffinement sont déterminées pour conserver un nombre d'éléments en contact entre l'éprouvette et le frotteur suffisamment important pour garantir la fiabilité des résultats calculés à l'interface. La taille moyenne des éléments dans cette zone est inférieure à 0,15 mm (figure 33).

A chaque élément, nous affectons

- la loi de comportement élastoviscoplastique de l'acier 20MnCr5 :

$$\sigma_0 = 1324,3375.(e^{-0,00257 T}).(\epsilon_p^{-0,1941}).(e^{-0,06521/\epsilon}).(\dot{\epsilon})^{0,1468} \quad (23)$$
- le coefficient de dilatation linéaire α (T),
- la chaleur massique C et la conductivité thermique K,
- une température initiale de 1100°C , température stabilisée de l'éprouvette avant essais.

Les supports inférieur et supérieur sont maillés avec 2 500 éléments tétraédriques rigides. Le frotteur est quant-à-lui composé de 49 000 mailles tétraédriques rigides. Tout comme l'éprouvette, le maillage de ces trois corps est raffiné au niveau des zones de contact.

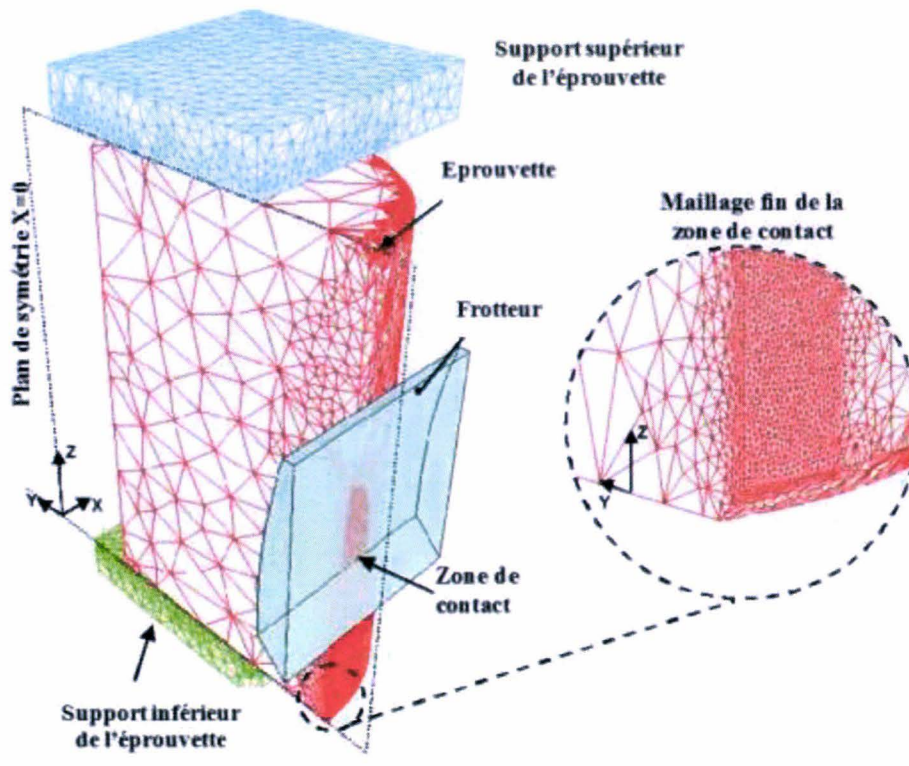


figure 33 : WHUST, modélisation éléments finis de l'essai.

Les supports supérieur et inférieur sont fixes. A l'instant initial, le frotteur n'est pas en contact avec l'éprouvette (ses nœuds ont des coordonnées Z négatives). La position des nœuds du frotteur dans la direction Y est ajustée en fonction de la pénétration p à simuler.

Un déplacement vertical du frotteur est imposé sur 30 mm (direction Z). Cette distance de 30 mm est suffisante au calcul pour obtenir une réponse stationnaire (variation des efforts subits par le frotteur inférieure à 2 % entre deux incréments).

Les simulations numériques lancées dans ces conditions requièrent un temps CPU de 7 heures sur un PC biprocesseur Xéon 2,4 GHz.

Des simulations numériques du WHUST ont été réalisées avec des rayons de frotteur variant de 2 à 30 mm et de pénétrations du frotteur dans l'éprouvette variant de 0,1 à 0,4 mm. Lorsque la pénétration augmente, la pression augmente également. Ainsi faire évoluer la pénétration de 0,1 à 0,4 pour un frotteur de rayon 20 mm fait augmenter la pression de 75 à 200 MPa. A l'inverse, l'augmentation du rayon du frotteur implique une augmentation de la surface de contact qui se traduit par une diminution de la pression (figure 34).

A partir de ces résultats, nous avons choisi comme paramètres une pénétration de 0,4 mm et un rayon de frotteur égal à 20 mm. Ces paramètres permettent de produire une pression de contact égale à 200 MPa, valeur de la pression de contact proche du procédé générique d'estampage.

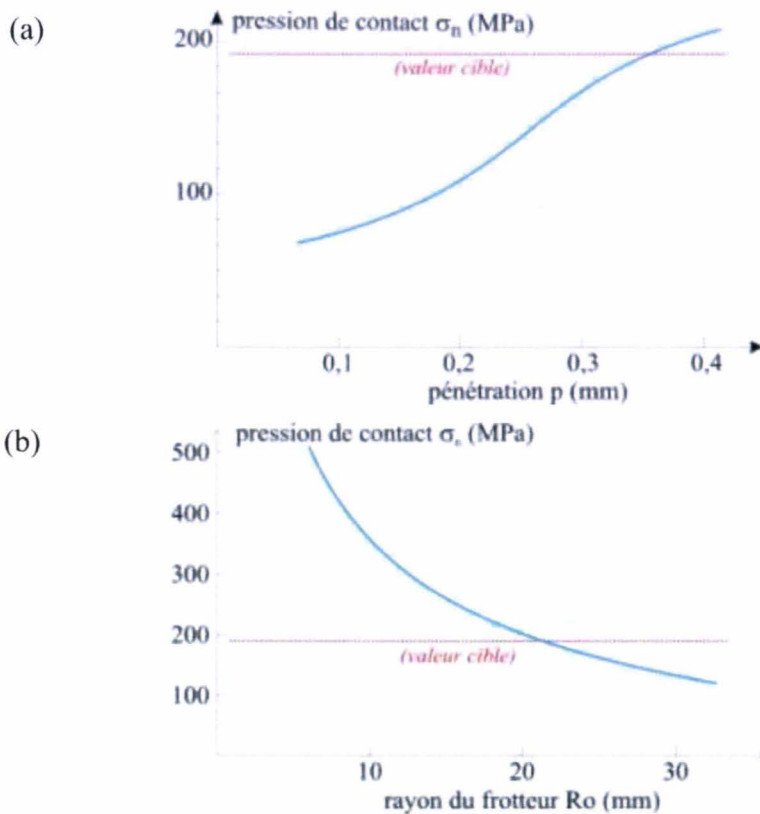


figure 34 : WHUST, variation de la pression de contact à l'interface éprouvette/frotteur. Eprouvette en 25MnCr5 à 1100°C,
 (a) effet de la pénétration (frotteur de rayon 20 mm)
 (b) effet du rayon du frotteur (pénétration égale à 0,4 mm)

III.4. Bilan

Les réglages du WHUST ont été identifiés de façon à reproduire au mieux les conditions de contact générées par mise en forme du procédé générique. Les matériaux en contact sont ceux du procédé industriel étudié :

- éprouvette en acier 20MnCr5 de diamètre 30 mm et de longueur 50 mm,
- frotteur en acier X38CrMoV5-3 nitruré au gaz, non poli après nitruration,

Les conditions de chauffe sont

- chauffage de l'éprouvette par induction à une vitesse de $20 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ jusqu'à 1200°C,
- transfert de l'éprouvette de l'inducteur au banc d'essai en 20 secondes,
- frotteur préchauffé à 200°C.

Le lubrifiant est

- une dispersion aqueuse de graphite,
- pulvérisé à une pression de 4 bars durant une seconde à une distance de 150 mm de la surface du frotteur.

Les réglages du WHUST sont :

- un rayon du frotteur égal à 20 mm,
- une pénétration du frotteur dans l'éprouvette de 0,4 mm,
- une vitesse de déplacement du frotteur égale à 60 mm.s⁻¹.

Ces paramètres permettent d'assurer au niveau du contact éprouvette/frotteur :

- une température de 1100 °C lors du contact,
- un taux de calamine de 0,2 % sur le lopin,
- une densité surfacique de lubrifiant de 0,26 g.cm⁻², formant une épaisseur de graphite égale à 35 µm,
- une pression de contact à l'interface lopin/matrice égale à 200 MPa,
- une vitesse de glissement à l'interface lopin/matrice égale à 60 mm.s⁻¹.

Les écarts entre les grandeurs simulées sur le banc d'essai et celles générées par procédé générique sont inférieurs à 6%. Nous pouvons donc valider ces réglages. Dans la suite du mémoire, nous appellerons « *essais génériques* » les essais WHUST réalisés avec ces réglages.

IV. Précision et sensibilité des mesures

IV.1. Objectifs

La réalisation d'essais WHUST fournit un ensemble de résultats quantitatifs et qualitatifs. Ces résultats ont été décrits au chapitre précédent :

- les résultats quantitatifs sont l'évolution de la rugosité Ra, l'indice de lubrification Li et la longueur critique Lc. Ils fournissent des informations sur la capacité qu'a le lubrifiant à réduire le frottement et de protéger les surfaces en contact.
- les résultats qualitatifs sont relatifs à la caractérisation du troisième corps (composition chimique, géométrie des particules transférées...). Ces résultats sont obtenus à l'aide d'observations MEB d'analyses EDS.

Avant d'effectuer des campagnes d'essais exhaustives et interpréter les résultats, nous avons réalisé une étude de sensibilité sur la base des essais génériques. Cette étude répond à trois objectifs principaux :

- vérifier la robustesse du WHUST en s'assurant de la répétitivité des mesures quantitatives,
- s'assurer de la capacité du banc à suivre la dérive des conditions de contact en cours de production,
- s'assurer de la capacité du banc à différencier le comportement de deux lubrifiants différents, mais proche en terme de composition chimique.

IV.2. Répétitivité des mesures

Une première campagne de douze essais génériques est réalisée pour quantifier la fiabilité du banc vis-à-vis de la répétitivité des mesures. Le lubrifiant étudié est produit par la société Condat SA. Il s'agit de graphite dilué à 10% dans de l'eau. La granulométrie du graphite relevée à 80% est égale à 8 μm . Le liant est un composé de silicium et de sodium. La dilution est opérée en laboratoire. Ce lubrifiant sera appelé SG10-8 par la suite. Un frotteur neuf est utilisé pour chaque essai.

Dans un premier temps, les moyennes et les écarts types sont évalués. Le test de Kolmogorov-Smirnov (KS) est ensuite utilisé pour vérifier la normalité de la distribution des résultats obtenus. Ce test offre l'avantage de pouvoir étudier la normalité d'une distribution à partir d'une faible population de mesures. Contrairement au test du chi-deux et du théorème de Pearson, aucune discrétisation de la distribution n'est requise, faisant du KS un test plus robuste [Fer62, Ozt06, Yaz07]. Le tableau 4 présente les statistiques relatives aux trois résultats quantitatifs fournis par le WHUST.

tableau 4 : Robustesse des résultats, variabilités des marqueurs d'usure

Paramètre	Moyenne	Ecart type	Etendue
Longueur critique Lc (mm)	40 (pas de rayures)	0	0
Indice de lubrification Li	0,46	0,05	0,17 (de 0,38 à 0,55)
Rugosité Ra (μm)	0,77	0,14	0,34 μm (de 0,64 à 0,98)

Il apparaît que la longueur critique, distance de glissement du frotteur avant l'apparition de rayures le long de la trace de l'éprouvette, demeure égale à 40 mm pour tous les essais réalisés. Ce résultat montre que la couche de graphite lubrifiant déposée sur le frotteur est suffisante pour protéger les surfaces en contact.

L'indice de lubrification L_i possède quant à lui un écart type faible. La mesure est donc répétitive avec des mesures proches de la valeur moyenne. Toutefois l'étendue des mesures est égale à 0,17, soit 37% de la valeur moyenne. Nous avons donc une distribution proche de la moyenne avec quelques mesures dispersives.

L'écart type relatif aux mesures de rugosité avoisine les 20% de la valeur moyenne. L'étendue des mesures est égale à 44% de la valeur moyenne, et elle n'est pas centrée sur celle-ci. La mesure de la rugosité R_a est par conséquent moins répétitive. Ce résultat s'explique par le fait que la rugosité est un paramètre très complexe à reproduire de façon fiable. Chaque essai est réalisé avec un frotteur neuf, donc avec une nouvelle surface qui possède sa propre rugosité initiale. Bien qu'étant un paramètre quantitatif, la rugosité doit donc être considérée comme donnée qualitative et être utilisée en comparaison par rapport à sa valeur initiale.

Pour étudier la distribution de ces résultats, nous utilisons le test de Kolmogorov-Smirnov. Pour cela nous trions les mesures dans l'ordre croissant. Nous calculons ensuite la fonction des probabilités cumulées de la population f_0 :

$$f_0\left(\frac{i}{n}\right) = \frac{X_i - X_1}{X_n - X_1}, \quad (24)$$

où n est le nombre de mesures, X_1 la plus petite mesure, X_n la plus grande, i l'indice variant entre 1 et n . Un exemple de graphe des probabilités cumulées est présenté en figure 35 pour les mesures de la rugosité.

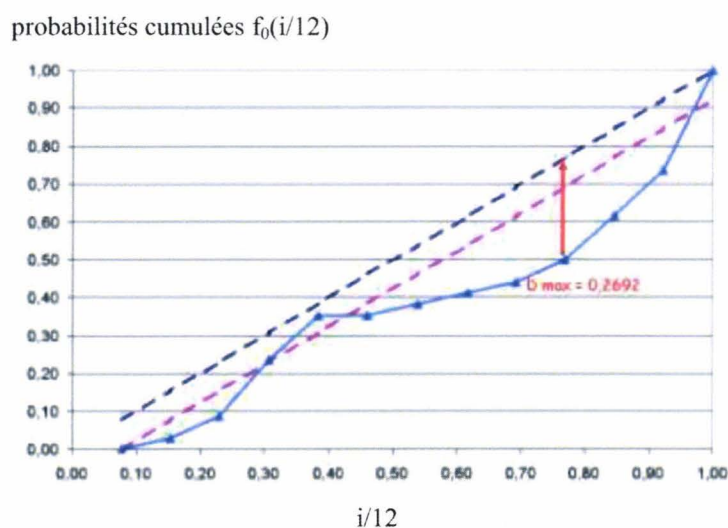


figure 35 : Robustesse des résultats, probabilités cumulées pour les populations de mesures de rugosité R_a .

Ensuite nous calculons le seuil D donné par :

$$D = \max \left\{ \max_{1 \leq i \leq n} \left(\frac{1}{n} - X_i \right) - \max_{1 \leq i \leq n} \left(X_i - \frac{i-1}{n} \right) \right\} \quad (25)$$

Le seuil D est comparé au seuil critique théorique $D\alpha(n)$. Si D est plus petit que $D\alpha(n)$ la population suit bien la distribution théorique et peut être validée. Les valeurs de $D\alpha(n)$ sont fonction du nombre de mesures n et du taux de confiance α (tableau 5).

Les valeurs de D pour les populations de mesures de rugosité et d’indice de lubrification sont respectivement égales à 0,269 et 0,280. Ces valeurs demeurent inférieures à 0,295, valeur critique pour une population de douze mesures, quelque soit α compris entre 0,01 et 0,2.

tableau 5 : Robustesse des résultats, valeur du seuil critique théorique de KS

Nombre de mesures (n)	Taux de confiance α				
	0,20	0,15	0,10	0,05	0,01
1	0,900	0,925	0,950	0,975	0,995
5	0,446	0,474	0,510	0,565	0,669
10	0,322	0,342	0,368	0,410	0,490
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,356
25	0,210	0,220	0,240	0,270	0,320
30	0,190	0,200	0,220	0,240	0,290
35	0,180	0,190	0,210	0,230	0,270
Plus de 35	$1,07/\sqrt{n}$	$1,14/\sqrt{n}$	$1,22/\sqrt{n}$	$1,36/\sqrt{n}$	$1,63/\sqrt{n}$

Nous pouvons en conclure que les résultats quantitatifs fournis par le WHUST sont répétitifs et peuvent être utilisés pour analyser les propriétés d’un lubrifiant en forgeage à chaud.

IV.3. Approche multi-passes

Nous avons effectué une seconde campagne d'essais afin d'étudier la réponse des indicateurs de performances lors d'une seconde passe vue par les frotteurs. Dans cette approche multi-passes, nous utilisons le même frotteur deux fois de suite, sur deux éprouvettes différentes. La réalisation de l'essai se décompose alors en six étapes :

- Chauffage de la première éprouvette et transfert sur le WHUST,
- Pulvérisation du lubrifiant sur le frotteur neuf préchauffé à 200°C,
- Réalisation du premier essai,
- Chauffage de la seconde éprouvette et transfert sur le WHUST,
- Pulvérisation du lubrifiant sur le frotteur préchauffé à 200°C,
- Réalisation du second essai.

Le frotteur n'est ni démonté ni nettoyé entre les deux essais.

Le tableau 6 présente les données des trois résultats quantitatifs selon leur variabilité.

tableau 6 : Robustesse des résultats, variabilités des marqueurs d'usure en seconde passe

Paramètre	Moyenne passe 1	Moyenne passe 2	Ecart type passe 2	Etendue passe 2
Longueur critique L_c (mm)	40	25	2	4 mm (de 23 à 27 mm)
Indice de lubrification L_i	0,46	0,49	0,03	0,11 μm (de 0,44 à 0,55)
Rugosité R_a (μm)	0,77	0,58	0,09	0,22 μm (de 0,46 à 0,68)

Contrairement aux essais précédents, la longueur critique n'est plus égale à 40 mm pour les essais réalisés. La rugosité du frotteur a évolué entre les deux essais : le lubrifiant, bien qu'appliqué dans les mêmes conditions que précédemment, n'est plus suffisant pour assurer l'intégrité de la surface des éprouvettes. Des rayures apparaissent en surface de l'éprouvette après un glissement de 25 mm. L'écart type est faible ce qui souligne bien la répétitivité du phénomène à l'origine de l'apparition des rayures.

La seconde passe modifie également l'indice de lubrification. L'indice L_i augmente légèrement entre les deux passes. Toutefois son écart type reste faible : la mesure est répétitive et les valeurs mesurées restent proches de la valeur moyenne. Tout comme pour la première passe, l'étendue des mesures est importante. Nous avons donc une distribution proche de la moyenne avec quelques mesures dispersives. La rugosité finale du frotteur après la seconde passe décroît légèrement de 0,77 à 0,58 μm . L'écart type et l'étendue des mesures décroissent également de façon sensible.

Le test de Kolmogorov-Smirnov est appliqué aux mesures des indicateurs de performances Lc, Li et Ra. Le tableau 7 présente les valeurs de D calculées. Ces valeurs sont inférieures à 0,295, valeur critique pour une population de douze mesures, quelque soit α compris entre 0,01 et 0,2. L'ensemble de ces résultats confirment la répétitivité de résultats fournis par le WHUST.

tableau 7 : Robustesse des résultats, évolution du seuil D en fonction des passes

Paramètre	D première passe	D seconde passe
Longueur critique Lc (mm)	–	0,222
Indice de lubrification Li	0,280	0,288
Rugosité Ra (μm)	0,269	0,242

Les indicateurs quantitatifs permettent de mettre en évidence l'effet de l'endommagement de la surface du frotteur résultant des passes précédentes. La rugosité du frotteur, avant essais de la passe 2, a augmenté après la passe 1. Cela entraîne en passe 2, l'apparition de rayures et l'augmentation de l'indice de lubrification.

IV.4. Sensibilité du WHUST

Le paragraphe précédent a montré que le banc d'essai fournissait des résultats répétitifs. La question qui se pose alors est « quelle est la sensibilité du banc d'essai ? ». En effet, supposons que le banc soit peu sensible aux variations des conditions de contact, les essais conduiront systématiquement aux mêmes résultats : la répétitivité des essais ne ferait alors que traduire l'incapacité du banc à distinguer les performances de deux produits différents. L'objectif de cette partie est par conséquent de vérifier que la bonne répétitivité des essais ne cache pas un manque de sensibilité du banc d'essai face aux variations des conditions de contact.

Pour répondre à cet objectif, une nouvelle campagne d'essais a été menée avec comme objectif la comparaison de trois configurations de lubrification différentes : sans lubrifiant, avec un lubrifiant « neuf », avec un lubrifiant « industriel ». Ces deux lubrifiants sont des produits du commerce provenant de deux fournisseurs différents.

Le lubrifiant neuf correspond au produit SG10-8 utilisé lors de la première campagne d'essais. Le produit « industriel » a été prélevé sur site, dans la cuve de lubrifiant du procédé générique. Il s'agit d'une dispersion de graphite diluée à 5% dans l'eau, sa granulométrie à 80% est égale à 40 μm (figure 36). Tout comme pour le SG10-8, le liant du lubrifiant prélevé sur site industriel est à base de silicium et de sodium. Ce produit sera noté SG5-20 dans la suite du paragraphe.

Pour chaque configuration, deux passes successives sont simulées à partir d'un frotteur neuf. Les essais sont triplés pour garantir la fiabilité de la mesure. Le WHUST est réglé de façon à simuler les conditions de contact du procédé cible. Le lubrifiant SG5-20 ayant une dilution plus importante que le lubrifiant neuf, les paramètres de pulvérisation sont ajustés de façon à déposer une épaisseur de graphite de 35 μm à chaque passe (figure 37). Les résultats de ces essais sont analysés à l'aide des indicateurs de performances définis dans le chapitre 1.

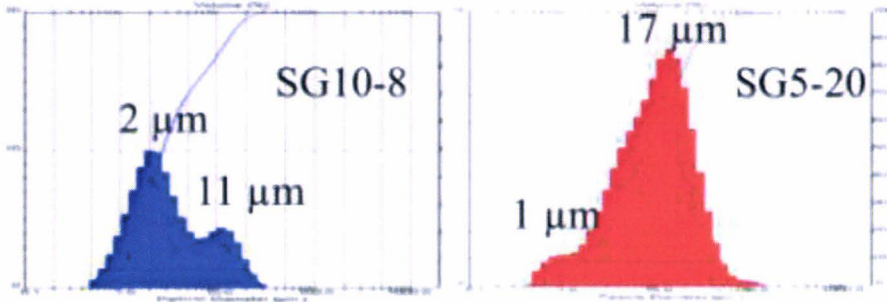


figure 36 : Robustesse des mesures, granulométries des lubrifiants SG10-8 (bleu) et SG5-20 (rouge)

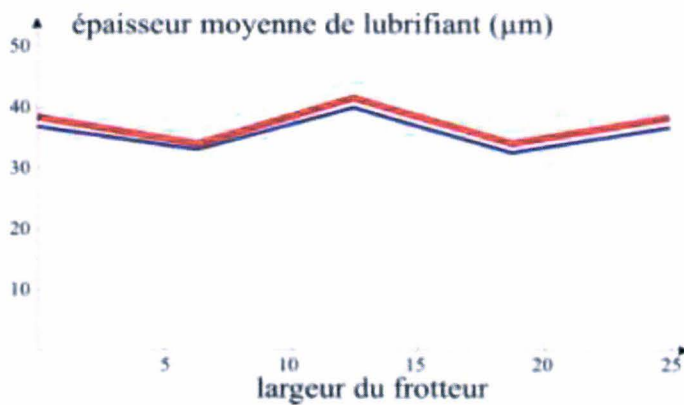


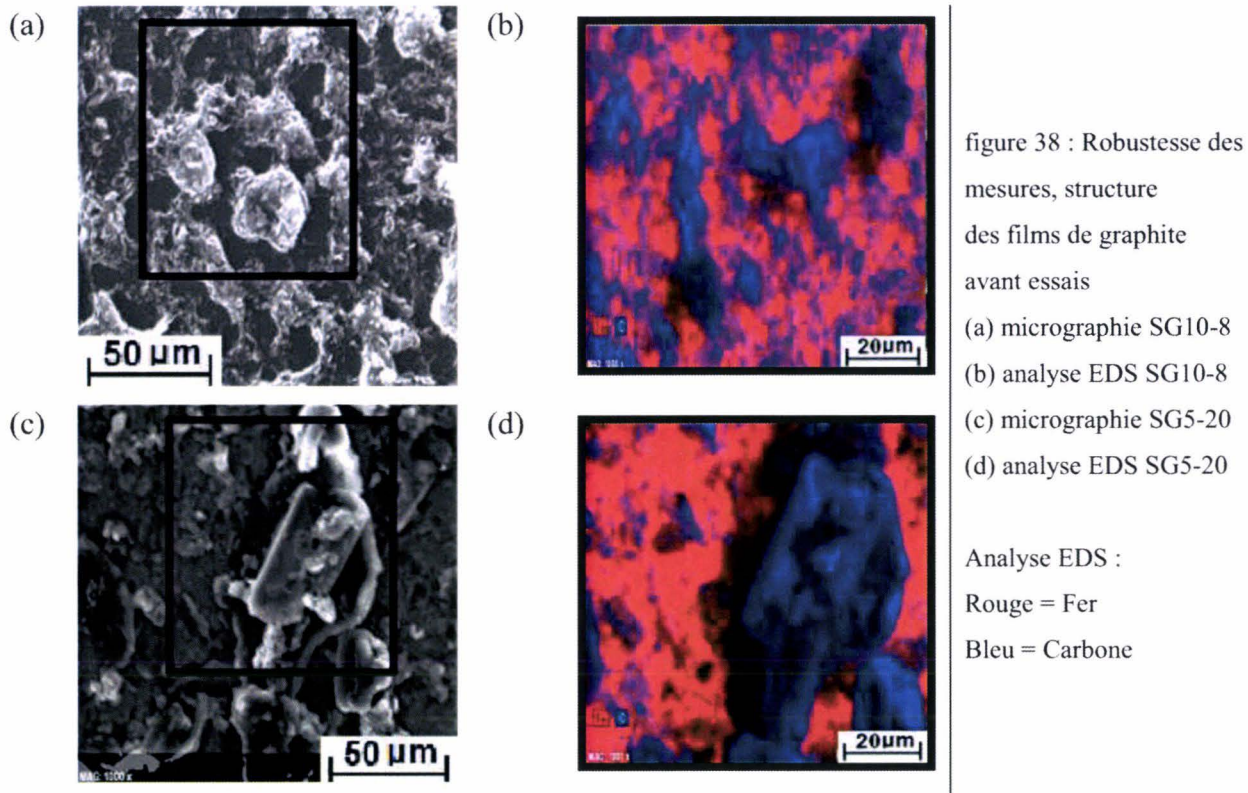
figure 37 : Robustesse des mesures, épaisseurs des lubrifiants déposés sur les frotteurs. SG10-8 en bleu, SG5-20 en rouge.

IV.4.1. Résultats

Morphologie des couches de graphites avant essais

La figure 38 présente l'aspect structurel des films de graphite SG10-8 et SG5-20 formés sur le frotteur avant essais. Le lubrifiant SG10-8 forme un film de structure alvéolaire (figure 38a). La répartition de carbone (en bleu sur la figure 38b) est uniforme et couvre bien l'ensemble de la surface. Le lubrifiant SG5-20 forme quant à lui un film hétérogène (figure 38c). Nous voyons clairement apparaître des grains de graphite de tailles différentes. L'analyse EDS montre des zones où la surface du frotteur est restée vierge (en rouge sur la figure 38d). Il faut toutefois noter que l'analyse EDS ne permet pas de voir le graphite si celui-ci a une épaisseur inférieure à 3 μm . La granulométrie du produit SG5-20 faisant apparaître deux distributions à 1 et 17 μm , il est possible que les grains de plus petites tailles soient tout de même présents sur l'ensemble de la surface.

Nous pouvons toutefois conclure que l’analyse de la surface des frotteurs avant essais montre clairement que la granulométrie joue un rôle sur la structure de la couche de graphite formée après évaporation de l’eau.



Rugosité des frotteurs

La rugosité arithmétique moyenne des frotteurs sont données dans le tableau 8. Quelque soit le type de lubrification, le Ra augmente nettement entre le début et la fin de la première passe. La présence de lubrifiant permet toutefois d’atténuer ce phénomène.

Lors de la seconde passe, la rugosité continue d’augmenter pour les essais sans lubrifiant. La rugosité double, passant de 1,2 à 2,4 μm, soit huit fois la valeur initiale. Par contre en présence de lubrifiant, la rugosité du frotteur décroît légèrement. Les valeurs obtenues avec les deux lubrifiants sont trop proches pour nous permettre de différencier leur comportement à l’aide de cet indicateur.

tableau 8 : Robustesse des mesures, rugosité du frotteur après essais

Lubrification	Rugosité initiale	Rugosité - passe1	Rugosité – passe2
Sans lubrifiant	0,3 μm	1,2 μm	2,4 μm
Lubrifiant SG10-8	0,3 μm	0,7 μm	0,6 μm
Lubrifiant SG5-20	0,3 μm	0,8 μm	0,7 μm

Longueur critique L_c

Les traces réalisées sur les éprouvettes lors des essais sont observées au microscope optique pour mesurer la longueur critique L_c . Les graphes de la figure 39 montrent en violet la présence des rayures sur la trace. Les essais réalisés à sec induisent systématiquement l’apparition de défauts sur la surface des éprouvettes. Ces défauts apparaissent après 20 mm lors de la première passe et dès le début du glissement lors de la seconde passe. Avec le lubrifiant SG10-8, l’éprouvette ne présente pas de rayures suite à la première passe. Par contre, les défauts apparaissent après 25 mm de glissement lors de la passe 2. Les essais conduits avec le lubrifiant SG5-20 induisent des rayures en fin de chaque passe. La lubrification retarde donc l’arrivée des défauts mais ne suffit pas à les empêcher. Le lubrifiant SG10-8 est plus efficace lors de la première passe mais s’avère moins performant lors de la seconde.

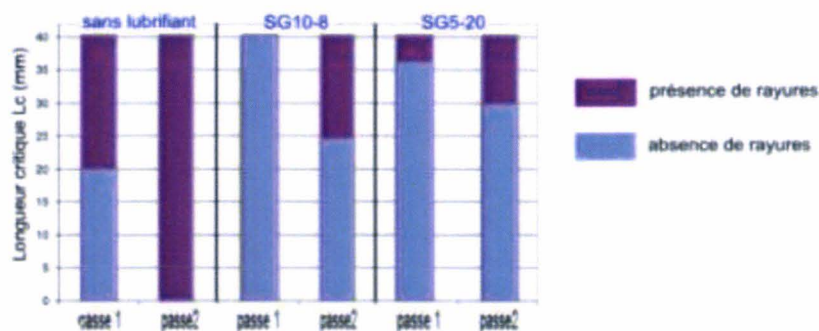


figure 39 : Robustesse des mesures, évolution de la longueur critique L_c en fonction de la lubrification et du nombre de passes

Indice de lubrification L_i

La figure 40 montre l’évolution de l’indice de lubrification en fonction du nombre de passes pour les trois cas de lubrification. En 1^{ère} passe, l’utilisation de lubrifiant fait chuter l’indice de lubrification : L_i baisse de 52% en présence de SG10-8, de 42% en présence SG5-20. En 2^{ème} passe, quelque soit le type de lubrification, L_i augmente. Ces augmentations sont évidemment à rapprocher des dégradations de la surface du frotteur résultant de la première passe, caractérisée entre autre par l’augmentation de la rugosité. En mesurant la variation de l’indice de lubrification L_i entre les deux passes, nous pouvons quantifier l’accumulation de « défauts » subit par le frotteur.

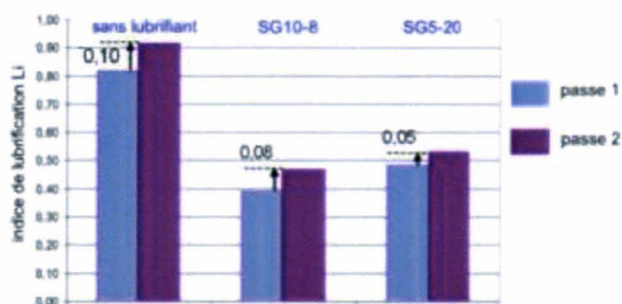


figure 40 : Robustesse des mesures, évolution de l’indice de lubrification L_i en fonction de la lubrification et du nombre de passes

Analyse des surfaces

La figure 41 présente la micrographie prise au MEB des surfaces des frotteurs après essais, pour chaque type de lubrification. A l'issue des essais sans lubrifiant, les frotteurs sont couverts d'une couche de matière. Ces transferts, présents dès la première passe, s'amplifient en seconde passe. Les cartographies EDS mettent en évidence la présence de fer, chrome et d'oxygène (figure 42). La matière présente en surface est donc constituée d'écaillés de calamine arrachées de l'éprouvette et restant collées sur le frotteur.

Les micrographies de frotteurs lubrifiés avec le produit SG10-8 présentent une surface lisse, sans transfert de matière notable à l'exception de quelques zones blanches. Des analyses EDS mettent en évidence trois zones différentes en surface. Les zones de couleur anthracite sont constituées de carbone, de sodium et de silicium (figure 43, spectroscopie A). Il s'agit de lubrifiant restant adhérent en fin d'essai. Les zones de couleur grise sont constituées de Fer, de Chrome et de Silicium. L'oxygène, le carbone et le sodium n'apparaissent pas. Il s'agit par conséquent de zones où l'acier du frotteur est à nu : il n'y a plus de graphite, plus de liant et aucune trace d'oxyde n'est détectée (figure 43, spectroscopie B). Enfin les zones blanches sont constituées de carbone et de liant (figure 43, spectroscopie C). Il s'agit de « copeaux » de graphite qui restent adhérents à la surface. Lors de la seconde passe, ces copeaux sont écrasés. La surface du frotteur ne fait plus apparaître que des zones anthracite où il reste du graphite et des zones grises où l'acier est nu.

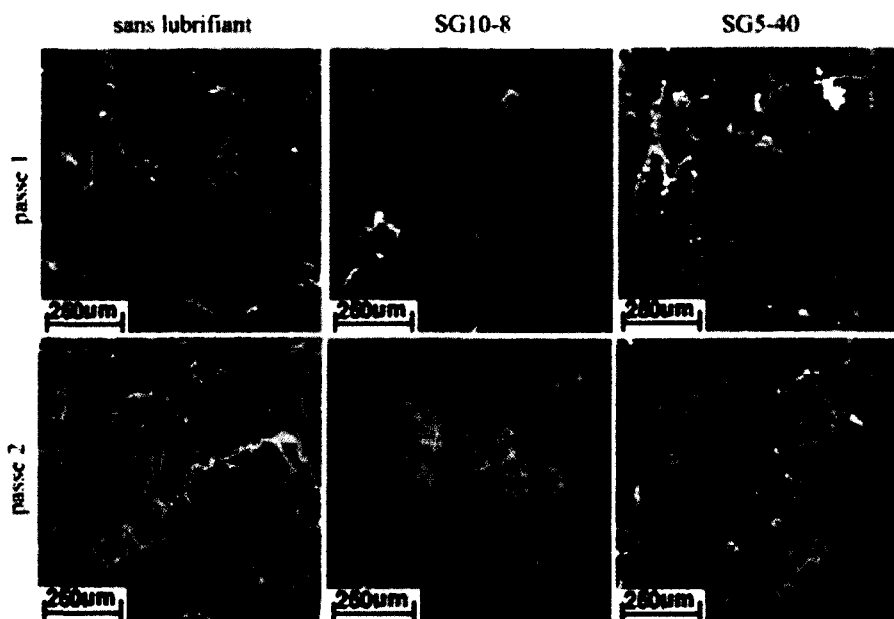


figure 41 : Robustesse des mesures, micrographies des surfaces des frotteurs en fonction de la lubrification et du nombre de passes

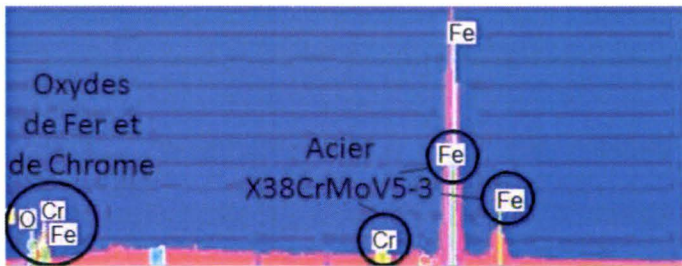


figure 42 : Robustesse des mesures, analyse EDS des frotteurs après essais sans lubrifiant

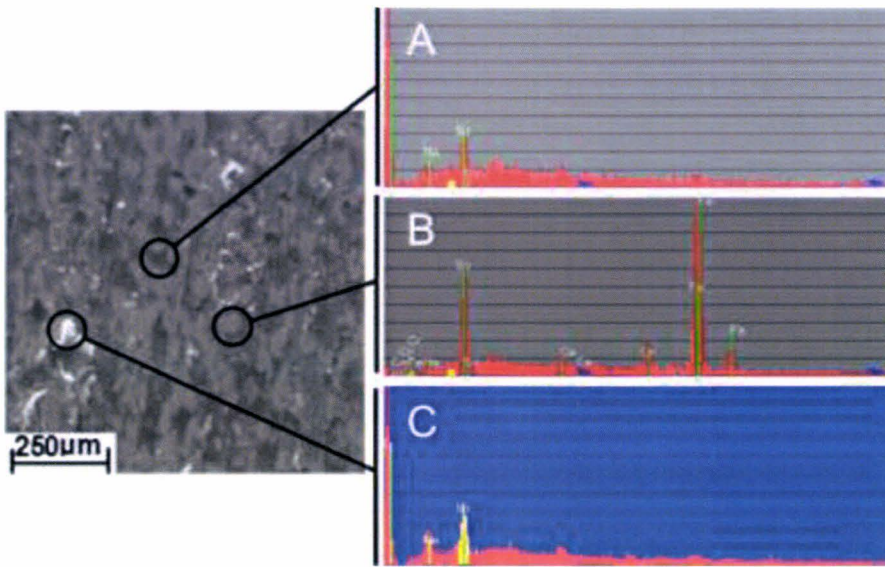


figure 43 : Robustesse des mesures, analyse EDS des frotteurs après essais lubrifiés au SG10-8.

Les micrographies de la figure 41 mettent en évidence la présence de dépôts de matière sur la surface des frotteurs lubrifiés au SG5-20. L'analyse EDS montre que ces dépôts sont des « poussières » et des écailles de calamine (figure 44, spectroscopie C).

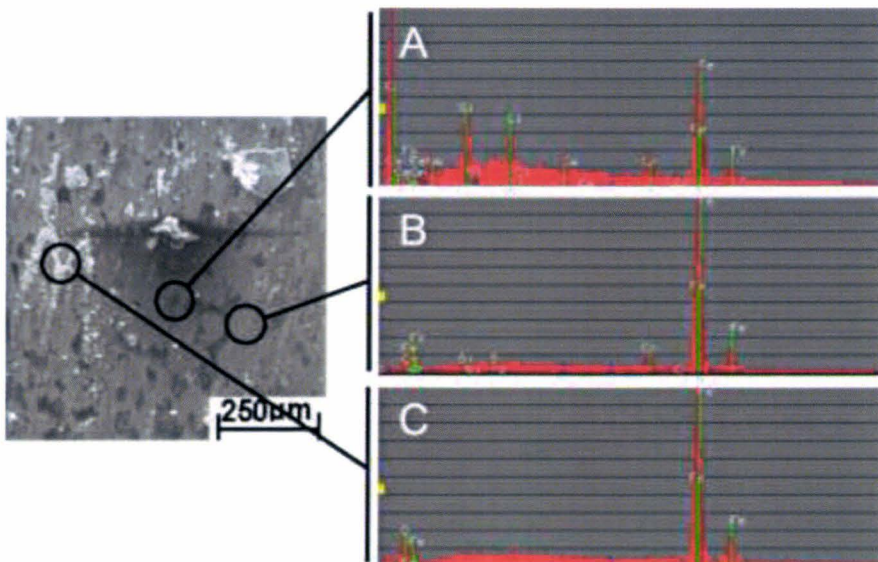


figure 44 : Robustesse des mesures, analyse EDS des frotteurs après essais lubrifiés au SG5-20.

Les spectroscopies effectuées sur zones anthracite laissent apparaître du fer, du chrome, du silicium, du sodium et du carbone. Nous avons donc des zones où il reste du graphite, mais en épaisseur suffisamment faible pour que l'acier du substrat soit détecté (figure 44, spectroscopie A).

Les zones apparaissant en gris ne révèlent quant à elles que les composants de l'acier du frotteur : du fer, du chrome, du silicium. Ni carbone ni oxygène n'apparaissent dans ces zones, soulignant ainsi l'absence de lubrifiant résiduel ou d'oxydation (figure 44, spectroscopies B). Les analyses effectuées après la seconde passe aboutissent aux mêmes résultats, avec une augmentation du taux de transfert d'écailles de calamine.

IV.4.2. Bilan

Sans lubrifiant

Lors de la première passe, des transferts de matière se créent en surface du frotteur, d'où une augmentation importante de la rugosité. Ces transferts induisent l'apparition de rayures à la surface de l'éprouvette après quelques millimètres de glissement. L'indice de lubrification devient alors important, atteignant des valeurs de l'ordre de 0,8. La calamine transférée à la surface du frotteur durant la première passe est toujours présente lors des seconds essais. Cette pollution de surface génère des rayures tout le long de l'éprouvette. L'indice de lubrification augmente, s'élevant à une valeur de 0,9. Les transferts de matière adhérents à la surface du frotteur se sont amplifiés, impliquant une nouvelle augmentation de la rugosité mesurée.

Avec le lubrifiant SG10-8

Le lubrifiant SG10-8, qui possède des tailles de grains de 2 et 11 μm , forme un film uniforme, structurés sous la forme d'un réseau. La présence du film de graphite sur le frotteur fait chuter l'indice de lubrification à 0,4, valeur deux fois plus faible que pour les essais sans lubrifiant. Après la première passe, la trace résiduelle laissée sur l'éprouvette ne présente pas de rayure. La surface du frotteur est peu modifiée : elle ne présente ni de transfert de matière, ni trace d'oxyde. Nous observons juste du « pelage » de lubrifiant, qui se redépose sur le frotteur sous forme de petits copeaux de graphite. La sévérité du contact a modifié la rugosité du frotteur. Néanmoins la présence de ces copeaux induit une augmentation artificielle de la rugosité du frotteur. En effet, les mesures de rugosité étant réalisées à l'aide d'un profilomètre sans contact, les débris présents en surface sont pris en compte lors de la mesure. En seconde passe, le lubrifiant protège toujours le frotteur : celui-ci ne présente toujours aucune trace de pollution ou d'adhésion en surface. Toutefois l'augmentation de la rugosité lors de la première passe semble influencer négativement les conditions de contact : l'indice de lubrification L_i augmente, les traces présentent des rayures et il reste moins de lubrifiant sur le frotteur après essais.

Avec le lubrifiant SG5-20

La granulométrie du lubrifiant SG5-20 est constituée de deux distributions centrées autour de grains de 1 et 17 μm . L'amplitude entre ces deux distributions fait que les grains de graphites se relient difficilement entre eux. En première passe, les essais de frottement conduisent à un indice de lubrification de 0,48 et des rayures apparaissent en fin d'essais sur la trace de l'éprouvette. Après ces essais, il reste peu de lubrifiant sur le frotteur, nous détectons la présence de dépôts de calamine et la rugosité augmente légèrement. Lors de la 2^{ème} passe, ces défauts de surface s'aggravent : l'indice de lubrification L_i augmente et les rayures apparaissent plus tôt sur la trace de l'éprouvette. Après essais, les transferts de matière sur le frotteur sont plus nombreux.

Synthèse

L'efficacité de la lubrification durant la première passe est facilement mesurable :

- La présence de graphite améliore les conditions de contact en réduisant le frottement,
- En l'absence de lubrifiant, les contraintes tangentielles sont trop importantes et l'intégrité de la surface de l'éprouvette n'est plus assurée.

En première passe, le lubrifiant SG10-8 empêche l'apparition de défaut de type rayures. Bien que déposé en quantité équivalente, le lubrifiant SG5-20 n'y parvient pas, laissant apparaître les premiers défauts après 30 à 35 mm de glissement. Il semble donc que la structure et le liant du SG10-8 permettent à ce lubrifiant d'avoir une meilleure accroche à la surface du frotteur, et de mieux s'accommoder aux longues distances de glissement. A l'issue de la première passe, l'effet de la lubrification est déjà visible sur l'aspect de surface du frotteur :

- Sans lubrifiant, le frotteur présente d'importants transferts de calamine.
- Le SG5-20 limite ces transferts de matière mais le frotteur présente tout de même quelques dépôts de calamine.
- Le SG10-8 empêche les transferts de calamine.

Les essais en seconde passe ne font que mettre en évidence les résultats obtenus en première passe. Une lubrification qui induit des transferts de matière en première passe voit le taux de transfert augmenter en seconde passe. Les défauts, résultants de la passe 1, induisent une dégradation des indices de performance, mais ne modifie pas l'ordre de classement des lubrifiants testés.

Trois conclusions ressortent de ces observations :

- Le WHUST montre clairement l'efficacité des produits graphités pour la lubrification des procédés d'estampage.
- Deux lubrifiants a priori semblables (dispersion de graphite dans l'eau, granulométrie moyenne, même type de liant) peuvent générer des réponses tribologiques différentes.
- Les résultats du WHUST sont suffisamment sensibles pour permettre de mettre en évidence ces différences de comportement.

V. Conclusion

Un procédé de mise en forme d'un carter en 20MnCr5 à 1100°C par des matrices en X38CrMoV5-3 nitrurées a été choisi comme procédé générique. Ce procédé, de part les sollicitations thermomécaniques qu'il engendre, de part les matériaux qu'il met en œuvre, de part le lubrifiant utilisé, de part l'endommagement des matrices qu'il génère, est représentatif des métiers de la forge à chaud des aciers. Les conditions de contact et de frottement de ce procédé sont étudiées à l'aide du WHUST, banc d'essai tribologique développé au LAMIH.

Il a été décidé avec les partenaires industriels de focaliser la présente étude sur la zone flan des matrices d'ébauche, juste avant le rayon de sortie de bavure, zone où les outils se détériorent le plus rapidement. Une étude sur site industrielle couplée à des simulations numériques du procédé permet de préciser les conditions de contact régnant à l'interface lopin/matrice dans cette région :

- lopins à 1100°C
- matrices à 200°C,
- taux de calamine, essentiellement FeO, égal à 0,2%,
- épaisseur de graphite déposé égale à 33 μm ,
- pression de contact égale à 190 MPa,
- vitesse de glissement égale à 60 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Les paramètres de réglage du WHUST sont identifiés de façon à reproduire les conditions de contact du procédé. Cela assure la représentativité des résultats fournis par le banc d'essai vis-à-vis du procédé générique. Tout d'abord les éprouvettes et les frotteurs sont issus des mêmes matériaux que les lopins et les matrices. Ils sont usinés suivant les mêmes gammes de fabrication et ont subis les mêmes traitements de surface. Le cycle de chauffe de l'éprouvette est optimisé pour que la couche d'oxyde qui se développe en surface présente un taux de calamine semblable à celui des lopins du procédé générique.

De plus, un système de pulvérisation dérivé d'un système industriel a été installé sur le banc. Ce dispositif permet d'appliquer le lubrifiant dans des conditions similaires aux conditions du procédé générique, respectant la quantité pulvérisée ainsi que l'épaisseur de graphite déposée. La nature des surfaces en contact est donc respectée, tant d'un point de vue rhéologique qu'en terme de composition chimique.

Des simulations par éléments finis du WHUST sont réalisées pour connaître la pression de contact régnant à l'interface en fonction des paramètres de banc d'essai : rayon du frotteur, pénétration du frotteur dans l'éprouvette. Le meilleur compromis est un rayon de 20 mm et une pénétration de 0,4 mm. Ces paramètres conduisent à une pression égale à 200 MPa, soit un écart de 5 % par rapport au procédé cible. La vitesse de déplacement du frotteur est ajustée à la vitesse de glissement du procédé. Les conditions de contact mécaniques simulées sur le WHUST sont par conséquent en adéquation avec celle du procédé industriel générique.

Trois campagnes d'essais ont été menées avec ces réglages. La première a clairement montré la répétitivité des essais, notamment au niveau des résultats quantitatifs. La seconde et la troisième campagne d'essais ont mis en évidence la sensibilité du banc. Le WHUST est capable de suivre la dérive des conditions de contact et de frottement suite aux contacts répétés lopins/matrices en cours de production. Le banc d'essai est également capable de distinguer le comportement de deux lubrifiants a priori identiques, déposés dans des conditions semblables : dispersions graphitées, granulométrie moyenne, même type de liant, déposés en même épaisseur. Les résultats d'essais ont été traités à l'aide des indicateurs de performances définis au chapitre 1. A l'exception de la rugosité arithmétique moyenne R_a , tous les indicateurs ont montré une différence de comportement des deux lubrifiants testés. L'indicateur R_a a montré des différences entre les essais lubrifiés et les essais non lubrifiés, mais il n'est pas suffisamment sensible pour distinguer le comportement entre deux lubrifiants.

Ces premières campagnes d'essais ont également permis de mettre en évidence l'importance de la structure du dépôt de lubrifiant, et par conséquent l'influence supposée de sa granulométrie et de son système de liant.

Au final, nous avons montré que le banc d'essai était robuste, répétitif et sensible. A ce stade de l'étude, nous disposons donc d'un outil fiable pour étudier et optimiser les paramètres de la lubrification à l'interface lopin/matrice en estampage.

Chapitre 3 : Lubrification et mécanismes d'endommagement en surface des outils de forges à chaud

I. Cadre de l'étude

L'objectif de ce chapitre est d'appréhender la lubrification d'un procédé de forge à chaud et comprendre en quoi un lubrifiant peut protéger une matrice en réduisant ou en retardant l'apparition de défauts de surface.

Une étude exhaustive de l'influence de tous les paramètres d'une gamme de forgeage sur les phénomènes d'endommagement et de frottement étant impossible, il est dans un premier temps nécessaire de dégager les paramètres clés à étudier. Ces paramètres sont fonctions du lubrifiant et de la façon dont celui-ci est déposé et sollicité :

- *La lubrification.* Dans les procédés de mise en forme, il est souvent recherché un régime de lubrification limitant les contacts directs métal/métal à l'interface pièce/outil, ceci afin de préserver l'intégrité des surfaces, côté pièce et côté outils. Le régime de lubrification dépend de nombreux facteurs, notamment des vitesses de glissement (liées au procédé de mise en forme), de la nature du lubrifiant (solide, liquide) et du volume de lubrifiant apporté dans la zone de contact.
- *Le lubrifiant.* La nature et la composition du lubrifiant jouent évidemment un rôle essentiel dans son comportement en travail. Il a été montré dans le chapitre 2, que deux lubrifiants peuvent conduire à des résultats sensiblement différents en terme de protection des surfaces des outillages même si, a priori, ces lubrifiants semblent identiques (dispersion de graphite de moyenne granulométrie dans le l'eau).
- *Le procédé de mise en forme.* Le procédé de mise en forme va agir essentiellement sur paramètres mécaniques du contact. Les facteurs importants sont la forme, les vitesses et les températures des outillages. Suivant la forme de l'outil et la zone étudiée le long de sa surface, les pressions de contact, les vitesses de glissement, les déformations plastiques imposées à la pièce seront différentes. Cela se traduira par une évolution des conditions de contact le long de la surface, pouvant favoriser l'apparition de défauts de différentes natures (usure abrasive, adhésive, fatigues de contact, fatigue thermique, etc.).

Nous pouvons ajouter à cette liste la nature des matériaux en contact ou encore l'effet de l'usure de l'outillage en cours de production sur l'efficacité de la lubrification. En effet, si le matériau de la pièce est imposé par le client, celui de l'outillage est fixé lors de l'élaboration de la gamme de fabrication et il est par conséquent à la charge de l'industriel. De même, un lubrifiant performant sur un outil neuf est-il toujours compétitif lorsqu'il est déposé sur une surface « usée » ?

Dans un premier temps nous allons établir la liste des paramètres jugés essentiels pour la présente étude et définir leur plage de variation en fonction des spécificités des gammes d'estampage. Ensuite les essais seront présentés et commentés, tout d'abord en terme de réglages, puis en terme de résultats.

II. Plan d'expérience - étendue des paramètres de l'étude

II.1. La lubrification.

Au cours d'une étape de forgeage cinq régimes de lubrification sont généralement distingués [Hél04] :

- *Régime hydrodynamique* : le lubrifiant sépare l'outil du lopin avec une épaisseur supérieure à dix fois la somme de la rugosité des deux surfaces.
- *Régime élastohydrodynamique* : ce régime intervient lorsque l'épaisseur du film de lubrifiant est comprise entre trois et dix fois la somme des rugosités des deux surfaces. Le film est toujours continu et évite encore tout contact entre les deux pièces.
- *Régime mixte* : les contacts entre aspérités du lopin et du frotteur sont nombreux, le film est discontinu. L'épaisseur du film équivaut à la somme des rugosités des deux surfaces. On est dans un cas de lubrification mixte.
- *Régime limite* : il n'y a pas de lubrifiant intercalé, l'épaisseur du film est très mince de l'ordre de la taille de la molécule. L'épaisseur du film est inférieure à la somme des rugosités des deux surfaces.
- *Régime à film solide épais* : le lubrifiant sépare l'outil du lopin avec une épaisseur supérieure à dix fois la somme de la rugosité des deux surfaces.

Les trois premiers régimes existent uniquement en présence d'un lubrifiant liquide. Les régimes limites et à film solide épais sont quant à eux présents lors de l'utilisation de lubrifiant solide, voire en l'absence de lubrifiant dans les cas extrêmes de régime limite.

Le régime de lubrification, quel qu'il soit, dépend de nombreux paramètres, tels que la nature du lubrifiant, les rugosités des corps en contact et de paramètres mécaniques tels que la vitesse de glissement ou la pression de contact [Bay90]. Seule l'épaisseur de lubrifiant déposée sur l'outil est étudiée ici. Les paramètres liés à la nature du lubrifiant seront traités dans la partie « composition du lubrifiant ». Quant aux rugosités et aux paramètres mécaniques, ils seront évoqués dans la partie « procédé ». Une enquête a été menée auprès des partenaires industriels de l'étude pour connaître leurs habitudes relatives à l'application du lubrifiant. Des mesures d'épaisseurs de lubrifiant ont été réalisées avant mise en forme sur quatre procédés différents. Ces procédés correspondent tous à de l'estampage de lopins en acier 20MnCr5 par des matrices en acier X38CrMoV5-3 (ou X38CrMoV5) lubrifiées par une dispersion aqueuse de graphite. Le tableau 9 montre les résultats de ces mesures en fonction de la zone matrice où ont été effectués les relevés. Ces mesures ont été effectuées avec la sonde à induction magnétique servant à contrôler les épaisseurs déposées sur le frotteur du WHUST. Il apparaît que pour les procédés A et B, l'épaisseur de graphite déposée est croissante depuis le centre de la matrice jusqu'à l'extérieur. Ces réglages s'expliquent par le fait que les zones de flanc et de bavure sont des zones de fort glissement, où les marques d'usure apparaissent en priorité. Les opérateurs ont par conséquent tendances à y appliquer plus de lubrifiants. Le procédé C présente par contre une épaisseur de graphite en bavure beaucoup plus faible que les procédés A et B. Cette différence est due à la forme de la matrice, matrice peu profonde qui présente donc peu de différence de hauteur entre les zones de gravure et de bavure.

tableau 9 : Plan d'expérience, évolutions de l'épaisseur de graphite déposée sur les matrices de forge à chaud.

	Epaisseur (μm)	Gravure	Flanc	Bavure
Avant frappe	Procédé A	8	40	53
	Procédé B	12	33	46
	Procédé C	12	43	13

De ces résultats nous constatons que les épaisseurs de graphite déposées sur les matrices industrielles varient entre 8 μm et 53 μm . Nous proposons d'étudier l'influence de cette épaisseur sur la réponse tribologique du système lopin/lubrifiant/matrice. De façon à ne pas mélanger les influences, nous nous placerons dans les conditions de contact génériques définies au chapitre 2, correspondant à la zone de flanc. Nous testerons sur le WHUST trois épaisseurs incluses dans l'intervalle des valeurs mesurées sur site. Les valeurs retenues sont 10 μm comme valeur basse, 30 μm comme valeur intermédiaire, et 40 μm comme valeur haute. L'influence de la zone matrice sera quant à elle étudiée dans la partie procédé. Le lubrifiant pulvérisé sera le produit « neuf » employé dans les campagnes précédentes et fournit par la société Condat.

II.2. La composition du lubrifiant.

Même si des essais prospectifs sur des produits « blancs » ont été réalisés sur le WHUST, l'objectif de notre étude concerne prioritairement la détermination de la qualité des dispersions aqueuses graphitées. Il ne s'agit donc pas de tester de nouvelles molécules ou de nouveaux additifs, mais de faire varier la formulation d'un produit de référence autour de sa composition de base.

Les résultats des premières campagnes d'essais, présentés dans le chapitre précédent, ont clairement mis en évidence la différence de comportement entre deux lubrifiants dont la composition variait, a priori, uniquement de par la granulométrie et le système de liant. En conséquence, les paramètres testés dans le plan d'expérience ne sont relatifs qu'à la granulométrie du graphite et sa teneur en liant.

La taille des grains de graphite couramment utilisées s'étend de 2 à 50 μm . La granulométrie du produit donne un histogramme présentant la distribution de la taille des grains de graphite présents dans la solution. Les dispersions aqueuses graphitées sont classées en trois grandes catégories de granulométrie :

- les petites granulométries avec des tailles de grains inférieures à 3 μm ,
- les moyennes granulométries avec des tailles de grains comprises entre 10 et 30 μm ,
- les grosses granulométries avec des tailles de grains supérieures à 40 μm .

Trois granulométries sont testées autour du produit de référence du chapitre précédent :

- une granulométrie « fine » avec une population majoritairement composée de grains de 3 μm ,
- une granulométrie moyenne, composée de deux populations majoritaires de tailles 2 μm et 11 μm ,
- une grosse granulométrie, de taille de grain majoritaire de 40 μm (figure 45).

Trois teneurs en liant sont également étudiées :

- une teneur faible (10% de liant, 90% de graphite),
- une teneur de référence (28% de liant, 72% de graphite),
- une teneur volontairement élevée (50% de liant, 50% de graphite).

Ces formulations ont été développées spécifiquement pour les besoins de l'étude et ne correspondent pas à des produits existants commercialisés. Le tableau 10 synthétise les configurations qui seront testées. Les valeurs médianes correspondent aux valeurs du produit de référence.

tableau 10 : Plan d'expérience, synthèse des propriétés des lubrifiants testés

X : configuration testée - : configuration non testée		Granulométrie		
		Petite (3 μm)	Moyenne (2 + 11 μm)	Grosse (40 μm)
Teneur en liant	Faible (10 %)	-	X	-
	Moyenne (28%)	X	X	X
	Forte (50 %)	-	X	-

II.3. Le procédé de mise en forme.

Etudier l'influence du procédé revient à simuler sur le banc d'essai les conditions de contact mécaniques propres aux différentes zones matrices, donc différentes vitesses de glissement, différentes pressions de contact.

Un certain nombre de partenaires industriels du projet a été consulté de façon à établir des plages de variations représentatives de ces grandeurs mécaniques à reproduire. Si l'ensemble des procédés étudiés relève bien des métiers de l'estampage, les pièces mises en forme sont de géométries très disparates (certaines très volumiques, d'autres beaucoup plus plates), et les presses utilisées sont également différentes d'un procédé à l'autre. La majorité des procédés est réalisée sur des presses mécaniques, mais par exemple le procédé G utilise une presse à vis, d'où des vitesses de glissement particulièrement élevées. Les différents procédés retenus dans le cadre de cette enquête montrent que d'une façon générale, l'évolution des pressions de contact s'oppose à l'évolution des vitesses de glissement : les zones de fortes pressions de contact correspondent aux zones de faibles vitesses de glissement (tableau 11). De plus à l'exception des procédés F et G, les pressions sont maximales au niveau de la gravure et minimales en sortie de bavure.

Puisqu'il n'apparaît pas de zones où les pressions et les vitesses sont maximales ou minimales en même temps, il a été décidé par le groupe de travail réunissant les partenaires industriels de coupler les paramètres pressions de contact et vitesses de glissement dans l'étude.

Les valeurs retenues pour le plan d'expérience sont celles du procédé H. Ce choix s'explique premièrement par le fait que ce procédé de mise en forme couvre une large gamme de vitesse de glissement et de pressions de contact. De plus, ce procédé est utilisé régulièrement par l'un des partenaires de l'étude : il est facilement accessible pour réaliser d'éventuelles mesures complémentaires sur site si cela s'avère nécessaire (le procédé H est en fait le procédé générique déjà étudié dans le chapitre 2).

tableau 11: Plan d'expérience, pressions de contact et vitesses de glissement calculées sur procédés industriels

Paramètres	procédés	Gravure	Flanc	Bavure
Pressions de contact (MPa)	Procédé D	< 1050	< 622	< 408
	Procédé E	< 1150	< 345	< 115
	Procédé F	200	80	130
	Procédé G	190	150	190
	Procédé H	400	190	90
Vitesse de glissement (mm.s ⁻¹)	Procédé D	135	225	450
	Procédé E	85	68	77
	Procédé F	20	150	400
	Procédé G	300	600	3000
	Procédé H	25	60	360

Le fait de prendre les valeurs d'un procédé permet également de rester cohérent avec la méthodologie d'utilisation du banc d'essai WHUST. Nous aurions pu par exemple construire le plan d'expérience à partir des moyennes des valeurs obtenues en gravure, flanc et bavure lors de l'enquête. Mais, ceci aurait limité la portée des résultats pour deux raisons :

- Les valeurs moyennes obtenues n'auraient plus nécessairement de réalité industrielle. En effet si les presses hydrauliques permettent de travailler à 0,5 m.s⁻¹ et les presses à vis d'atteindre de vitesse de l'ordre de 3 m.s⁻¹, rien ne correspond en terme de presse à des vitesses de 1,75 m.s⁻¹, valeur moyenne entre 0,5 et 3.
- Les valeurs du tableau 11 sont le résultat de simulations numériques réalisées par les partenaires, avec leur code de calcul. Les options choisies, les maillages utilisés, les lois de comportement employés peuvent présenter des différences notables. A titre d'exemple, les options de calculs ayant servi à la simulation numérique des procédés D et E ne prennent pas en compte la limite élastique du matériau des outils. Les résultats fournis correspondent à une surestimation des pressions de contact. Par contre, il est légitime de dire que la décroissance des pressions de contact depuis la gravure jusque la bavure reste vraie pour ces deux procédés.

II.4. Les matériaux en contact

L'étude de l'influence des matériaux en contact représente un sujet à part entière. Les propriétés réactives de certains lubrifiants peuvent favoriser leur accroche sur certains types de matériaux et ainsi améliorer leurs performances tribologiques. Un exemple intéressant est celui du phosphate de zinc utilisé en mise en forme à froid. Déposé sur un substrat en acier de teneur en carbone voisine de 0,48%, le phosphate de zinc va former une couche lubrifiante sous forme de blocs fortement agglomérés les uns aux autres. Sur un substrat en acier d'une teneur en carbone autre, le phosphate va développer une structure dite en nid d'aiguilles [Bri95]. Ainsi un même lubrifiant, déposé dans des conditions similaires peut avoir une structure et donc un comportement tout à fait différents en fonction du substrat sur lequel il est déposé.

De même, les traitements de surface utilisés pour protéger les outils de l'usure jouent également un rôle non négligeable dans la réponse du tribosystème. Pour un matériau d'outil donné, les traitements de durcissement vont augmenter la résistance à l'usure, mais risquent de favoriser la fatigue thermique [Kas08].

Toutefois ce sujet est bien trop vaste pour être intégré dans notre étude. Nous nous limiterons donc aux conditions de contact et de frottement entre un lopin en acier 20MnCr5 et une matrice en X38CrMoV5-3, couple de matériaux souvent utilisé en estampage.

II.5. Usure de la matrice en cours de production

L'ensemble des sollicitations thermomécaniques que subissent les matrices en cours de production engendre des détériorations en surface que nous pouvons regrouper sous le terme générique « usure ». Ces phénomènes sont de la fatigue mécanique, thermique, de l'usure abrasive, adhésive... En cours de production, la rugosité de la matrice, sa dureté et sa composition chimique en extrême surface évoluent. Ces paramètres agissent nécessairement sur le comportement du lubrifiant. L'objectif est ici de tenter de qualifier la réponse du lubrifiant lorsque la surface de l'outil n'est plus saine. Le WHUST est un banc d'essai permettant d'étudier les conditions de contact et de frottement mais ce n'est pas un test d'usure au sens strict du terme. Il est par conséquent difficilement envisageable de reproduire une usure « industrielle » sur le banc en y faisant passer un nombre important d'éprouvettes. Nous proposons donc de contourner ce manque en utilisant une des spécificités du banc d'essai : l'utilisation de frotteurs issus de véritables outils. L'idée est simple : réaliser des essais en laboratoire, donc sur le WHUST, en utilisant des frotteurs usinés dans des outils « usés », ayant forgé un certain nombre de lopins. Trois configurations sont étudiées un outil neuf, un outil en milieu de vie (ayant forgé 5000 lopins) et un en fin de vie (ayant forgé 10 000 lopins).

II.6. Bilan

Un plan d'expérience a été défini pour étudier l'influence de la lubrification, du lubrifiant et du procédé sur l'endommagement en surface des outils de forge à chaud. Ce plan d'expérience s'appuie sur le procédé générique étudié dans le chapitre précédent. La plage de variation de chaque paramètre est calibrée pour couvrir un éventail significatif de valeurs rencontrées en industrie.

Le tableau 12 synthétise l'ensemble des configurations du plan d'expérience. Les essais sont répétés trois fois pour s'assurer de la répétitivité des mesures. Un frotteur neuf est utilisé pour chaque essai. Les valeurs communiquées par la suite sont les moyennes arithmétiques des trois mesures.

tableau 12 : Plan d'expérience, plage de variation des paramètres étudiés

Paramètres	Valeur inférieure	Valeur médiane	Valeur supérieure
Epaisseur de graphite	10 μm	30 μm	40 μm
Granulométrie	Petite 3 μm	Moyenne 2 + 11 μm	Grosse 40 μm
Pourcentage de liant	10 %	28 %	40 %
Couple pression de contact / vitesses de glissement	Gravure 400 MPa 25 mm.s^{-1}	Flanc 190 MPa 60 mm.s^{-1}	Bavure 90 MPa 360 mm.s^{-1}
Usure industrielle	Outil neuf	Milieu de vie 5000 lopins	Fin de vie 10000 lopins

III. Effet de la lubrification.

III.1. Influence de l'épaisseur déposée en première passe

Les essais sont conduits dans la configuration suivante (variation autour de la configuration générique) :

- Matériau éprouvette : 20MnCr5
- Température éprouvette : 1100°C
- Taux calamine : 0,2%
- Matériau frotteur : X38CrMoV5-3 nitruré
- Température du frotteur : 200°C
- Pression de contact : 190 MPa
- Vitesse de glissement : 60 mm/s
- Lubrifiant : dispersion de graphite dans l'eau
- Granulométrie : moyenne (2 + 11 μm)
- Liant : 28%
- **Epaisseurs de lubrifiant égales à 0, 10, 30 et 40 μm .**

Réglage du banc d'essai

Les paramètres du banc d'essai sont ajustés pour déposer sur le frotteur l'épaisseur de graphite souhaitée. Seuls les paramètres de pulvérisation sont modifiés par rapport aux réglages génériques. L'épaisseur de 10 μm est obtenue avec une pression égale à 4 bars, une distance buse/éprouvette de 200 mm, et un temps de pulvérisation de 1 seconde. L'épaisseur de 30 μm est obtenue avec une pression égale à 4 bars, une distance buse/éprouvette de 150 mm, et un temps de pulvérisation de 1 seconde. Enfin l'épaisseur de 40 μm est obtenue avec une pression égale à 4 bars, une distance buse/éprouvette de 125 mm, et un temps de pulvérisation de 2 secondes.

Lors de la détermination de ces paramètres, une attention particulière a été portée à l'uniformité des dépôts créés, garantissant une couche de graphite d'épaisseur constante le long de la surface du frotteur.

Observation avant essais

Avant essais, la couche de 10 μm semble essentiellement composée de poudre de graphite, le liant paraissant peu interagir avec les grains de graphite. Pour la couche de 30 μm , correspondant à l'épaisseur mesurée sur site dans les zones de flan de matrice, la structure est alvéolaire : le lubrifiant forme un film structuré et organisé en réseau. Quant à la couche de 40 μm , elle forme une structure stratifiée sur différents niveaux, avec présence de quelques amas de graphite en surface (figure 45).

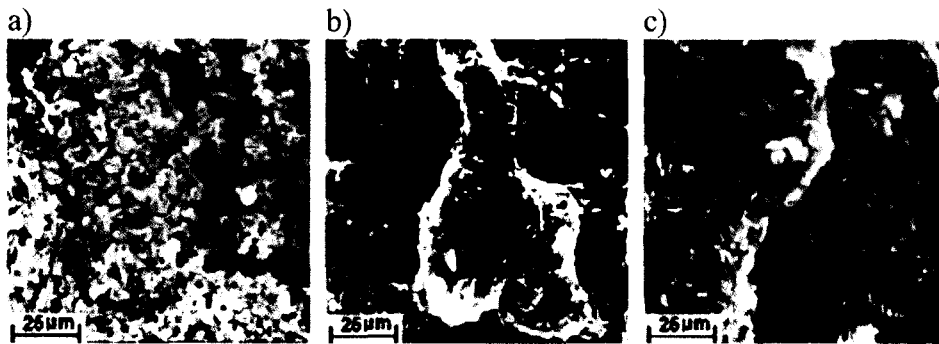


figure 45 : Effet de la lubrification. Analyse des dépôts avant essais
 a) couche de 10 µm,
 b) couche de 30 µm,
 c) couche de 40 µm.

Résultats des essais – indicateurs de performances

Le tableau 13 montre l'évolution de l'indice de lubrification en fonction de l'épaisseur de lubrifiant déposé. L'augmentation de l'épaisseur de la couche de lubrifiant se traduit immédiatement par une chute des forces de frottement. Sans lubrifiant, le contact entre l'éprouvette et le frotteur est très sévère. L'indice de lubrification L_i est égal à 0,82 : l'effort tangent est du même ordre de grandeur que l'effort normal. En présence de lubrifiant, l'indice diminue de façon très sensible : une épaisseur de 10 µm de graphite suffit à faire chuter l'indice de lubrification de 28%. Ainsi, nous constatons que même déposé en faible quantité, le lubrifiant remplit son rôle de réducteur de frottement. Plus l'épaisseur de lubrifiant est élevée, plus l'indice de lubrification L_i est faible, donc plus nous améliorons les conditions de contact en réduisant les forces de frottement.

L'absence ou la trop faible quantité de lubrifiant conduit à des contacts métal-métal entre l'éprouvette et le frotteur qui induisent des défauts de surface (rayures). Ces contacts sont soit causés par une rupture du film lubrifiant, soit liés à des débris adhérant à la surface du frotteur et qui viennent labourer la surface de l'éprouvette. Aucune rayure n'est constatée pour des épaisseurs supérieures ou égales à 30 µm (tableau 14).

tableau 13 : Effet de la lubrification. Evolution de l'indice de lubrification L_i en fonction de l'épaisseur de lubrifiant déposée sur le frotteur.

Epaisseur déposée	0 µm	10 µm	30 µm	40 µm
Indice de lubrification L_i	0,82	0,58	0,38	0,23

tableau 14 : Effet de la lubrification. Evolution de la longueur critique L_c en fonction de l'épaisseur de lubrifiant déposée sur le frotteur.

Epaisseur déposée	0 µm	10 µm	30 µm	40 µm
Longueur critique L_c	20 mm	35 mm	40 mm	40 mm

Les analyses EDS des frotteurs montrent clairement :

Sans lubrifiant (figure 46) : la surface du frotteur est couverte d'une couche de transfert composée de calamine et de chromite de fer (oxyde créé par réaction avec le chrome). Cette couche d'oxydes a été arrachée de la surface de l'éprouvette et s'est adhéree à la surface du frotteur.

Couche 10 μm (figure 47) : la surface du frotteur présence de nombreuses écailles de calamine (zones blanches) provenant de l'éprouvette ainsi que quelques zones de lubrifiant résiduel (zones anthracite).

Couche 30 μm (figure 48) : le frotteur est couvert d'une couche résiduelle composée de lubrifiant sous forme de « pelage », ainsi que de lubrifiant resté sous forme de couche de graphite. Il semble qu'en de nombreuses zones seul le liant soit resté adhéree à la surface (Na-Si), le graphite ayant été entièrement « consommé » lors du frottement (plus trace de carbone). En effet, a priori le pic de sodium ressortant de l'analyse EDS est faible et ne permet d'être catégorique quant à sa présence effective. D'un autre côté, à haute température le silicium contenu dans le X38CrMoV5-3 a tendance à diffuser en surface. Mais si le pic de silicium n'était du qu'au silicium de l'acier, celui-ci aurait réagit avec l'oxygène de l'air pour former de SiO_2 [Gen08]. Or aucune trace d'oxygène n'est détectée, ce qui renforce l'hypothèse de présence de composés Na-Si, donc de liant.

Couche 40 μm (figure 49) : à l'issue des essais avec une couche de lubrifiant épaisse, la surface du frotteur reste couverte d'une couche de graphite, soit sous forme de couche résiduelle (zone grise), soit sous forme de copeaux. L'acier n'apparaît pas lors de l'analyse EDS ce qui implique que la couche de lubrifiant résiduelle est homogène et d'une épaisseur supérieure à 3 μm . Aucune trace d'oxygène n'est relevée, nous pouvons conclure qu'aucune écaille de calamine n'a été transférée depuis la surface de l'éprouvette à la surface du frotteur.

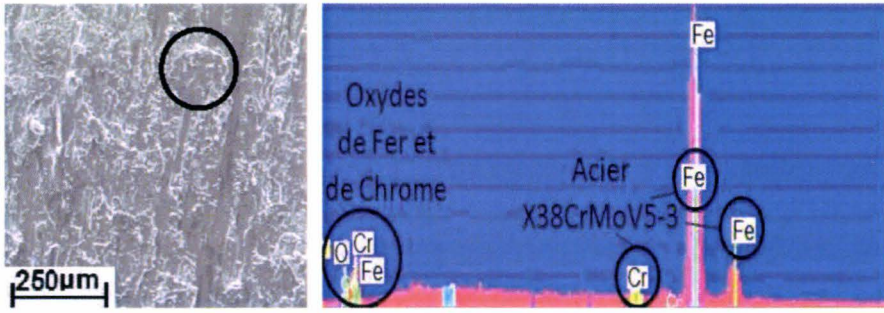


figure 46 : Effet de la lubrification. Surface du frotteur après essais, essais à 0 µm. Mise en évidence de la présence de calamine et de chromite de fer.

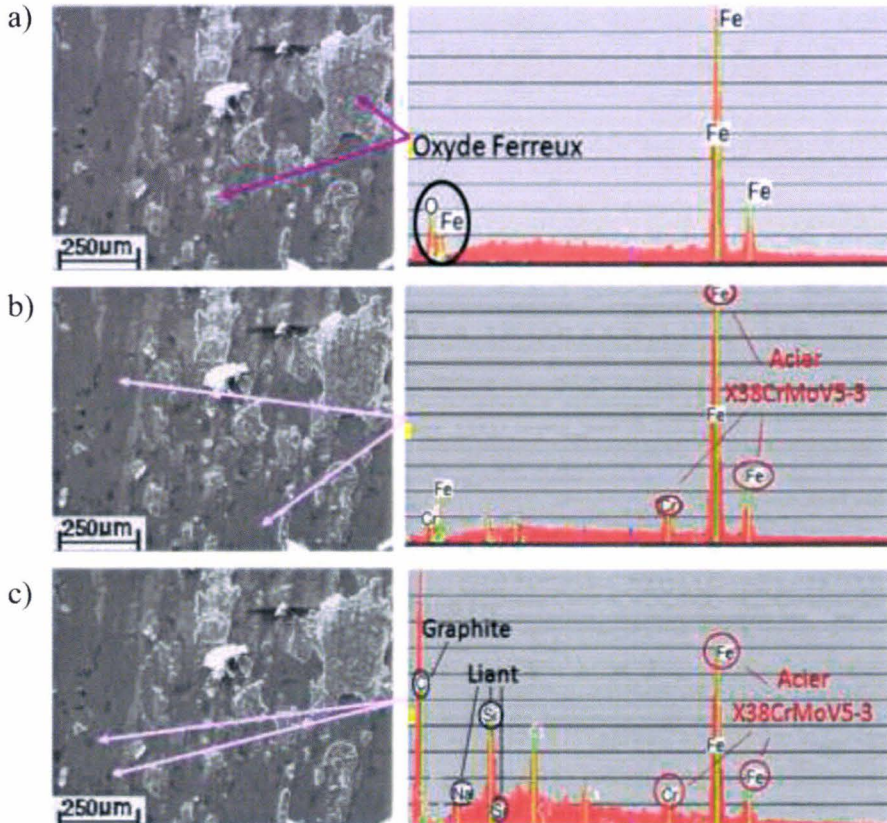


figure 47 : Effet de la lubrification. Surface du frotteur après essais, essais à 10 µm.
 a) présence de calamine,
 b) présence d'acier non revêtu,
 c) présence de traces de graphite résiduel.

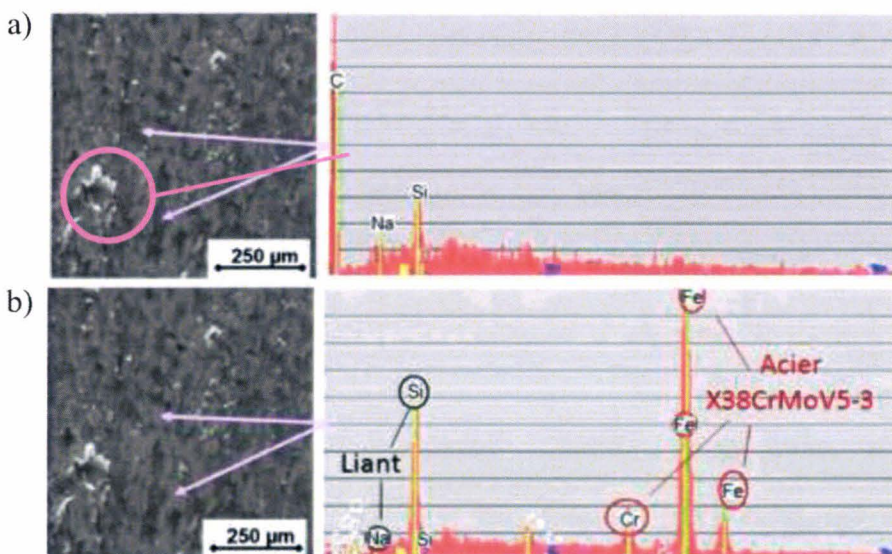


figure 48 : Effet de la lubrification. Surface du frotteur après essais, essais à 30 µm.
 a) présence de « copeaux » de graphite (cercle), et de zones de graphite résiduel
 b) présence de nombreuses zones de liant sans graphite.

En conclusion sur l'influence de l'épaisseur de lubrifiant déposée, si la lubrification met en œuvre peu ou pas de lubrifiant, de forts transferts de matière s'opèrent, la surface du frotteur est alors couverte d'oxydes, probablement responsables des rayures observées sur les éprouvettes. Il s'ensuit alors une augmentation des forces de frottement.

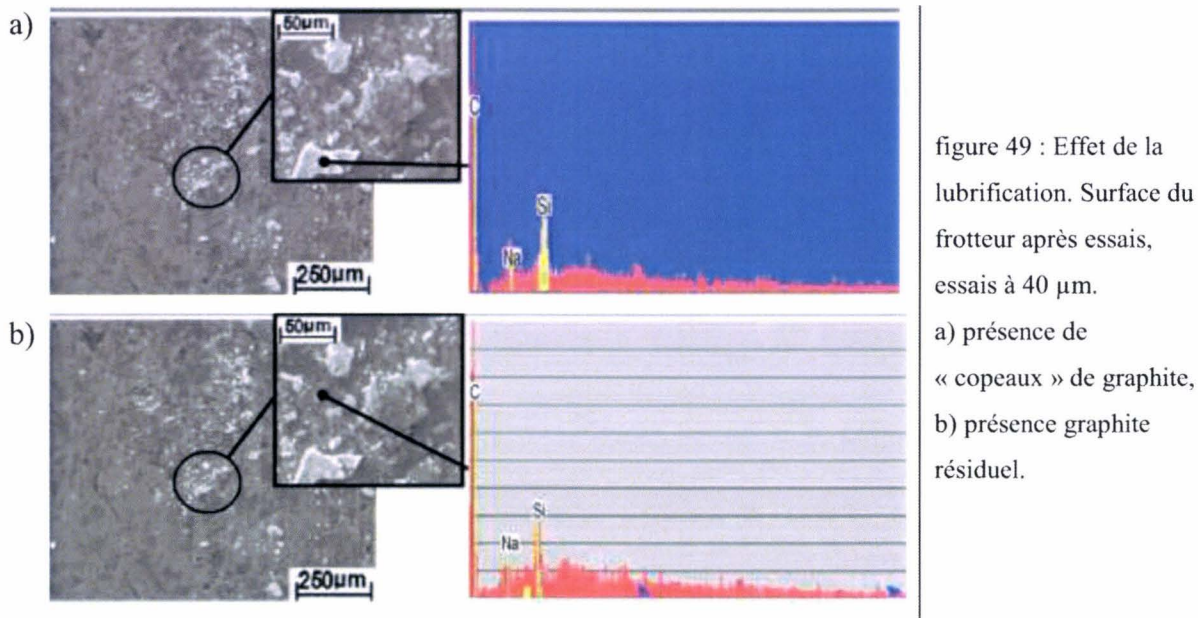


figure 49 : Effet de la lubrification. Surface du frotteur après essais, essais à 40 µm.

a) présence de « copeaux » de graphite,
b) présence graphite résiduel.

D'un autre côté, lorsque le lubrifiant est pulvérisé sous forme de couche plus épaisse, le liant présent dans le lubrifiant permet au graphite de se structurer et d'adhérer à la surface du frotteur. Une couche de lubrifiant résiduel est encore décelable sur le frotteur après essais. Cette couche limite de façon nette les phénomènes d'adhésion d'oxydes (transfert depuis l'éprouvette). Il s'en suit qu'aucune rayure n'apparaît sur l'éprouvette lors des essais et que les forces de frottement sont réduites.

III.2. Effet du cumul de lubrifiant à la surface du frotteur

Les résultats des essais avec différentes épaisseurs de lubrifiant montrent qu'à premier abord la présence d'une couche résiduelle épaisse, telle que celle constatée après les essais à 40 µm, semble intéressante de part la réduction du frottement et la protection des outillages qu'elle engendre. Toutefois une épaisseur trop importante peut à terme être synonyme d'encrassement des outils, ou conduire à la construction de couches stratifiées (alternance de graphite et de liant) dont l'efficacité reste à quantifier.

Une nouvelle série d'essais a été menée avec les mêmes paramètres de réglage et d'application du lubrifiant qu'en III.1, mais dans une configuration « multi-passes » : deux essais sont réalisés consécutivement avec le même frotteur. Les essais sont menés sur deux éprouvettes neuves. A l'issue du premier essai, le frotteur n'est pas nettoyé et une nouvelle couche de lubrifiant est déposée dans les mêmes conditions qu'en passe 1.

Observations avant essais

La figure 50 présente la structure des dépôts de graphite avant la seconde passe, donc suite à une pulvérisation du lubrifiant sur les surfaces présentées en figure 47 et figure 49. La couche de graphite de 10 µm est homogène et couvre bien toute la surface du frotteur. Pour la configuration avec une épaisseur de 40 µm, le graphite recouvre complètement la surface y compris les dépôts de graphite présents en surface à l'issue de la première passe. L'analyse EDS fait clairement apparaître une couche épaisse de graphite avec uniquement quelques rares zones laissant apparaître le fer.

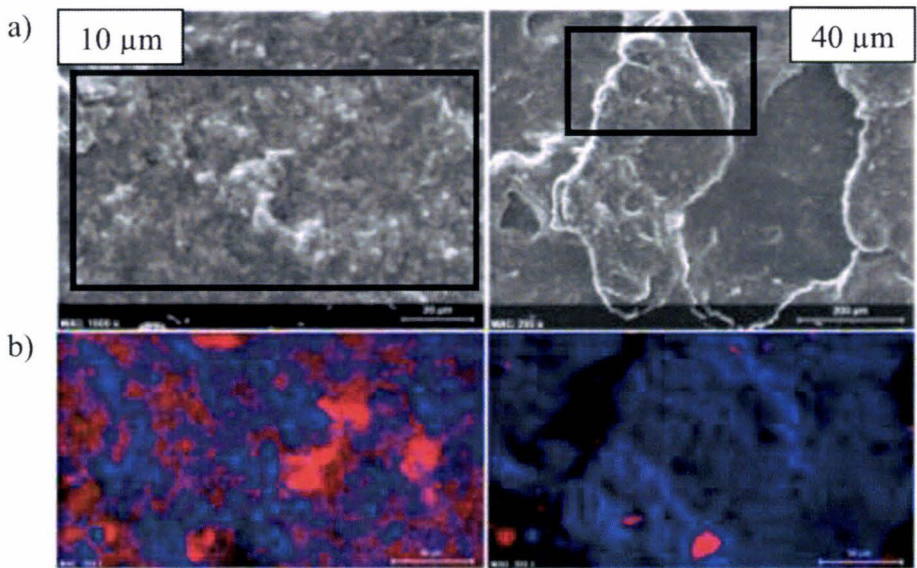


figure 50 : Effet de la lubrification.

a) Micrographies des surfaces des frotteurs avant les seconds essais, essais à 10 et 40 µm.

b) Analyse EDS des surfaces

Carbone = bleu

Fer = rouge

Résultats des essais – indicateurs de performances

Exception faite des essais à 10 µm, l'indice de lubrification augmente entre la première et la seconde passe. Ce résultat s'explique facilement de par le fait que les surfaces des frotteurs ne sont plus neuves. Elles ont subi des contacts sévères, leur rugosité a augmenté et certaines d'entre elles ont été le siège de transfert de matière. Toutefois, et même si la valeur obtenue reste importante, l'indicateur Li décroît dans le cas du graphite déposé avec une épaisseur de 10 µm (tableau 15).



Il apparaît donc que le lubrifiant restant de la première passe, bien qu'en faible quantité, améliore la tenue de la couche déposée lors de la seconde passe. Par contre, les dépôts de calamine présents en surface engendrent des défauts en surface de l'éprouvette dès le début des essais, la longueur critique L_c passant de 35 à 0 mm (tableau 16).

D'un autre côté, la couche de 40 μm de graphite ne permet plus d'assurer l'intégrité de la surface de l'éprouvette en seconde passe, alors qu'aucun transfert de calamine n'avait été relevé à l'issue de la première passe (tableau 16). Il apparaît en conséquence que le dépôt composé des couches de graphite déposées en première et seconde passes, possède un comportement tribologique différent de celui déposé en première passe. La présence de copeaux de lubrifiant en surface, avant la seconde pulvérisation, nuit à l'action du liant. Le graphite est présent en quantité, mais adhère peu à la surface du frotteur, il se consomme rapidement lors du contact et ne permet plus de protéger les surfaces durant tout l'essai. La figure 51 montre qu'à l'issue de la seconde passe le graphite a quasiment disparu de la surface du frotteur.

tableau 15 : Effet de la lubrification. Evolution de l'indice de lubrification L_i en fonction de l'épaisseur de lubrifiant déposée sur le frotteur. Seconde passe

Epaisseur déposée	0 μm	10 μm	30 μm	40 μm
Indice de lubrification L_i passe 1	0,82	0,58	0,38	0,23
Indice de lubrification L_i passe 2	0,92	0,47	0,46	0,37

tableau 16 : Effet de la lubrification. Evolution de la longueur critique L_c en fonction de l'épaisseur de lubrifiant déposée sur le frotteur. Seconde passe

Epaisseur déposée	0 μm	10 μm	30 μm	40 μm
Longueur critique L_c passe 1	20 mm	35 mm	40 mm	40 mm
Longueur critique L_c passe 2	0 mm	0 mm	25 mm	30 mm

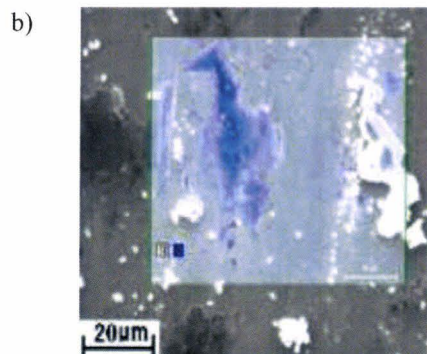
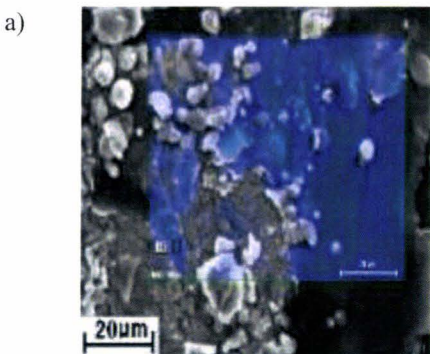


figure 51
Effet de la lubrification.
Présence de carbone (bleu)
en surface du frotteur après
essais.
a) 30 μm
b) 40 μm

IV. Effet de la formulation du lubrifiant.

IV.1. Influence de la granulométrie.

Les essais sont conduits dans la configuration suivante :

- Matériau éprouvette : 20MnCr5
- Température éprouvette : 1100°C
- Taux calamine : 0,2%
- Matériau frotteur : X38CrMoV5-3 nitruré
- Température du frotteur : 200°C
- Pression de contact : 190 MPa
- Vitesse de glissement : 60 mm/s
- Lubrifiant : dispersion de graphite dans l'eau
- **Granulométrie : fine (3 µm), moyenne (2 + 11 µm) et grosse (40 µm)**
- Liant : 28%
- Epaisseur de lubrifiant égale à 30 µm.

Réglage du banc d'essai

Ici seule la nature du lubrifiant est modifiée. Les réglages du banc d'essai sont par conséquent les mêmes que ceux définis pour la configuration générique.

Observations avant essais

Quelque soit la granulométrie testée, le lubrifiant est déposé sous forme de couche d'une épaisseur moyenne de 30 µm. Les distributions des granulométries testées sont présentées en figure 52a. Les graphites de fine et grosse granulométries sont constitués d'une seule distribution de grains, centrée respectivement sur 3 et 40 µm. Le graphite de moyenne granulométrie est constitué de deux familles centrées sur 2 et 11 µm. Ces différentes populations sont visibles sur les micrographies présentant les couches de graphite déposées sur les frotteurs (figure 52b).

Comme cela a été mentionné dans le paragraphe précédent, le graphite de granulométrie moyenne crée une structure alvéolaire, le lubrifiant forme alors un film structuré, organisé en réseau et couvrant bien l'ensemble de la surface du frotteur.

La couche de graphite de granulométrie fine semble également former une structure alvéolaire mais à une échelle plus fine que pour la granulométrie moyenne. Dans cette configuration, le graphite est réparti de façon homogène et couvre efficacement la surface du frotteur (figure 52c).

La grosse granulométrie présente quant à elle de gros grains qui ne peuvent pas former une structure homogène avec les grains de taille plus petite. La répartition aléatoire de ces gros grains induit la présence de larges zones ayant une couche de graphite inférieure à $3\ \mu\text{m}$, non détectable par les analyses EDS et apparaissant en rouge dans la figure 52c.

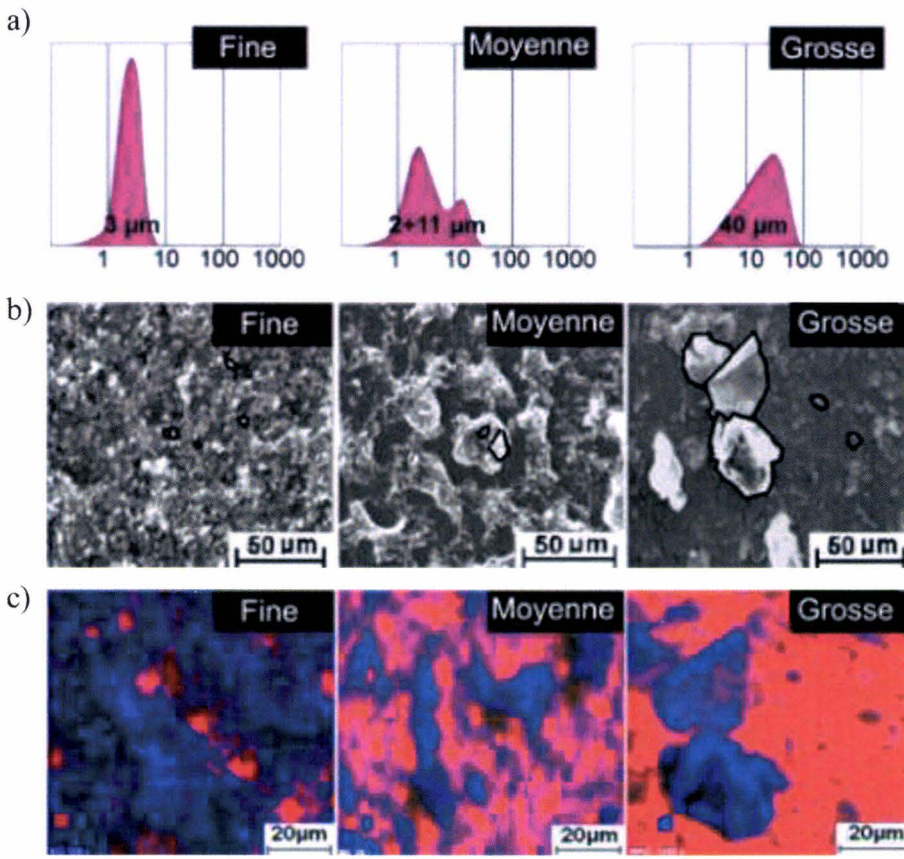


figure 52 : Effet du lubrifiant, Granulométrie. Analyse des dépôts avant essais.
 a) Distribution des granulométries testées : fine ($3\ \mu\text{m}$), moyenne ($2+11\ \mu\text{m}$) et grosse ($40\ \mu\text{m}$),
 b) micrographies des dépôts
 c) répartition du graphite en surface
 Carbone = bleu
 Fer = rouge

Résultats des essais – indicateurs de performances

Dans les configurations testées, l'augmentation de la granulométrie se traduit par une augmentation de l'indice de lubrification (tableau 17). Cette augmentation est égale à 26 % lors du passage d'une granulométrie moyenne à une grosse granulométrie. La granulométrie agit donc de façon significative sur la lubrlicité du lubrifiant et par conséquent sur les forces de frottement à l'interface éprouvette/frotteur.

D'un autre côté la structure composée de gros grains de graphite répartis aléatoirement ne permet pas de protéger la surface du frotteur sur de grandes distances de glissement. Des rayures apparaissent après une longueur de glissement de 32 mm, alors que pour les granulométries fine et moyenne aucun défaut n'est constaté en surface des éprouvettes (tableau 18).

Ces résultats s'expliquent par la répartition homogène de graphite pour les granulométries fine et moyenne. Après essais, les surfaces des frotteurs restent protégées par une couche de lubrifiant résiduelle (figure 53). Les seuls dépôts présents en surface pour ces lubrifiants sont des « copeaux » de graphite. Dans le cas du graphite à grosse granulométrie, les analyses EDS n'ont pas permis de mettre ou non en évidence la présence de liant au niveau de la surface. Par contre la répartition non homogène de graphite favorise de nombreux dépôts d'oxydes en surface, que ce soit de la calamine ou de la chromite de fer (figure 53b).

En conclusion, les résultats de la campagne d'essais montrent clairement que la granulométrie joue un rôle déterminant dans le comportement du lubrifiant. Dans la configuration générique, une forte granulométrie ne peut pas se déposer de façon uniforme. Les grains trop gros n'adhèrent pas à la surface du frotteur, il ne reste pas de trace notable de lubrifiant après essais. La surface de l'outil est mal protégée : des dépôts d'oxydes se détachent de l'éprouvette et se fixent sur le frotteur, des rayures apparaissent sur l'éprouvette, le coefficient de frottement augmente. A l'opposé, les produits de petites et moyennes granulométries se déposent de manière homogène. La couche de lubrifiant est plus structurée et adhère bien à la surface du frotteur. Le coefficient de frottement reste faible, aucune trace de transfert d'oxydes vers le frotteur n'est relevée.

tableau 17 : Effet du lubrifiant, Granulométrie. Evolution de l'indice de lubrification Li en fonction de la taille des grains de graphite.

Granulométrie	Fine	Moyenne	Grosse
Indice de lubrification Li	0,30	0,38	0,48

tableau 18 : Effet du lubrifiant, Granulométrie. Evolution de la longueur critique Lc en fonction de la taille des grains de graphite.

Granulométrie	Fine	Moyenne	Grosse
Longueur critique Lc	40 mm	40 mm	32 mm

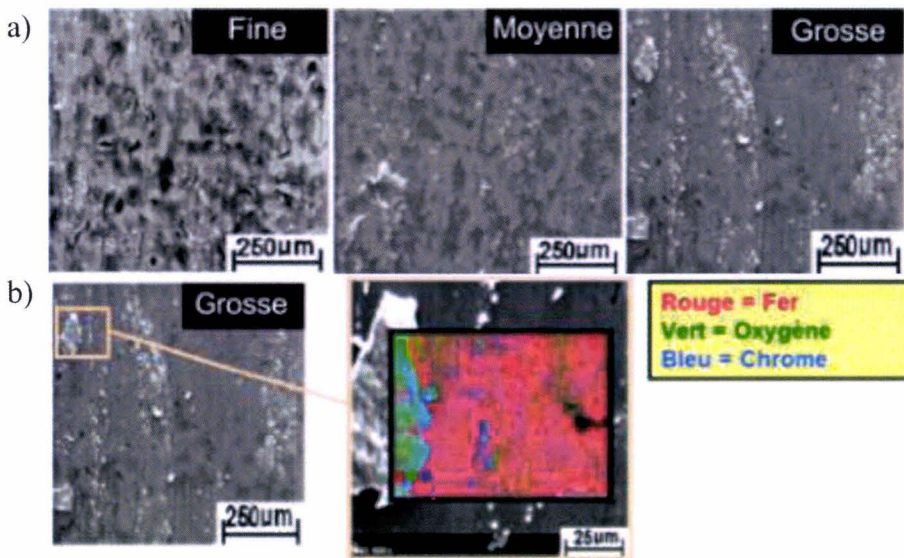


figure 53 : Effet du lubrifiant, Granulométrie.

a) Micrographies des surfaces des frotteurs après essais.

b) Mise en évidence de transferts de calamine et de chromite de fer pour les essais avec lubrifiant à grosse granulométrie.

IV.2. Influence de la teneur en liant.

Les essais sont conduits dans la configuration suivante :

- Matériau éprouvette : 20MnCr5
- Température éprouvette : 1100°C
- Taux calamine : 0,2%
- Matériau frotteur : X38CrMoV5-3 nitruré
- Température du frotteur : 200°C
- Pression de contact : 190 MPa
- Vitesse de glissement : 60 mm/s
- Lubrifiant : dispersion de graphite dans l'eau
- Granulométrie : moyenne
- **Liant : 10, 28 et 50 %**
- Epaisseur de lubrifiant égale à 30 µm.

Réglage du banc d'essai

Tout comme dans le paragraphe précédent, pour les essais servant à quantifier l'influence de la teneur en liant seule la nature du lubrifiant est modifiée. Les réglages du banc d'essai sont par conséquent les mêmes que ceux définis pour la configuration générique.

Observations avant essais

L'analyse des dépôts de graphite avant essais, montre que le manque de liant pour une formulation à 10% empêche la formation de la structure alvéolaire observée à 28%. De même, pour une formulation à 50%, le dépôt est saturé en liant et ne présente pas de structure particulière (figure 54).

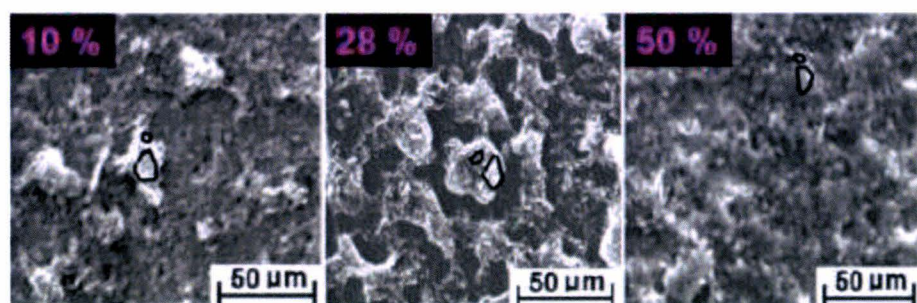


figure 54: Effet du lubrifiant, Liant. Micrographies des dépôts avant essais.

Résultats des essais – indicateurs de performances

Les forces de frottement ne varient pas de manière significative lorsque le pourcentage de liant augmente de 28 à 50% (tableau 19). Par contre, l'indice de lubrification Li augmente de 20% dans le cas d'une teneur en liant 10%. Ainsi en présence d'un faible pourcentage de liant, les grains de graphite, bien que plus nombreux (puisque constituant 90% du dépôt), adhèrent peu à la surface. Le graphite est rapidement consommé lors du glissement sur l'éprouvette. Les premières rayures apparaissent après 20 mm de glissement (tableau 20). La surface n'est alors plus protégée et les premiers transferts de matière, essentiellement de la calamine, ont lieu (figure 55b).

Par contre pour des teneurs en liant supérieures, le lubrifiant protège la surface tout au long de l'essai (longueur L_c égale à 40) et aucun transfert d'oxydes sur le frotteur n'est noté (figure 55).

tableau 19 : Effet du lubrifiant, Liant. Evolution de l'indice de lubrification Li en fonction du pourcentage de liant dans la formulation.

Pourcentage de liant	10%	28%	50%
Indice de lubrification Li	0,46	0,38	0,34

tableau 20 : Effet du lubrifiant, Liant. Evolution de la longueur critique L_c en fonction du pourcentage de liant dans la formulation.

Pourcentage de liant	10%	28%	50%
Longueur critique L_c	20 mm	40 mm	40 mm

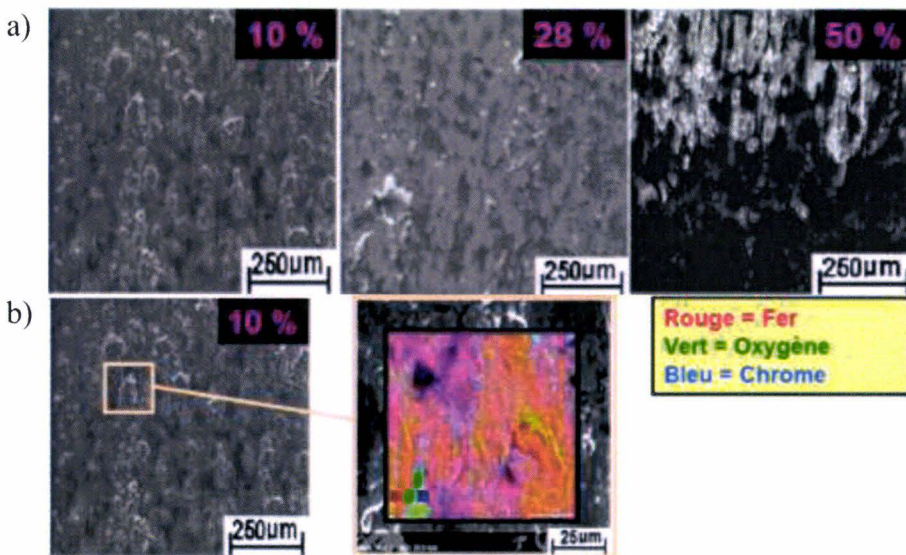


figure 55: Effet du lubrifiant, Liant. Surface du frotteur après essais.
a) micrographies,
b) mise en évidence de transferts de calamine et de chromite de fer pour les essais avec lubrifiant à grosse granulométrie.

En conclusion, si le rôle du liant est d'assurer une bonne adhérence du dépôt lubrifiant sur l'outil, son influence sur le comportement global du lubrifiant en terme de frottement ou de protection des surfaces est totalement inconnue. Les résultats de la présente campagne d'essais nous permettent de conclure que **la teneur en liant joue un rôle essentiel dans la composition du lubrifiant** : elle assure la tenue du graphite sur l'outil et, en conséquence, prévient des phénomènes de transferts de calamine. Utilisé en trop faible quantité, le manque de liant empêche la formation d'une couche de graphite adhérente au substrat, la surface du frotteur n'est pas protégée de façon efficace, le coefficient de frottement augmente, des rayures apparaissent sur l'éprouvette, des dépôts d'oxydes sont arrachés de l'éprouvette et se fixent sur le frotteur. Par contre, dans les configurations d'essais testées, une utilisation d'un taux anormalement haut de liant ne semble pas nuire à la lubrification. Le coefficient de frottement reste faible et la surface du frotteur reste vierge de tout dépôt.

V. Influence du procédé : effet de la zone matrice.

Les essais sont conduits dans la configuration suivante :

- Matériau éprouvette : 20MnCr5
- Température éprouvette : 1100°C
- Taux calamine : 0,2%
- Matériau frotteur : X38CrMoV5-3 nitruré
- Température du frotteur : 200°C
- **Pression de contact : 90, 190, 400 MPa**
- **Vitesse de glissement : 360, 60, 25 mm/s**
- Lubrifiant : dispersion de graphite dans l'eau
- Granulométrie : moyenne
- Liant : 28 %
- Epaisseur de lubrifiant égale à 30 µm.

Réglage du banc d'essai

Tester le lubrifiant dans des conditions de bavure, de flan ou de gravure revient à le solliciter sous des pressions croissantes de 90 à 400 MPa et des vitesses décroissantes de 360 à 25 mm/s. Il est donc nécessaire de modifier les réglages génériques du WHUST.

Le réglage de la vitesse de glissement sur le WHUST se fait en agissant sur la vitesse du vérin hydraulique pilotant le déplacement du frotteur. Le réglage est donc direct et ne pose donc aucun problème technique.

Le réglage de la pression de contact nécessite de connaître le champ de contraintes induit par la géométrie frotteur au niveau de la zone de contact. Le champ de contraintes est influencé par deux paramètres du banc : le rayon du frotteur et la pénétration de celui-ci dans l'éprouvette.

Dans un premier temps, des simulations numériques par éléments finis du WHUST ont été réalisées avec une pénétration du frotteur dans l'éprouvette variant de 0,1 à 0,4 mm et un rayon de frotteur R_0 de 20 mm. Ces simulations ont montré que dans le cas présent ce paramètre influait peu sur la pression de contact (voir paragraphe III.3 du chapitre 2). Pour atteindre une pression de contact de 90 MPa il faudrait une pénétration extrêmement faible, inférieure à 0,1 mm, donc du même ordre de grandeur que la couche de calamine et par conséquent non compatible avec les conditions d'essais à chaud.

En conséquence, il a été choisi de reproduire les différentes pressions de contact en conservant une pénétration égale à 0,4 mm, mais en agissant sur la forme des frotteurs. Différentes simulations numériques du WHUST ont donc été effectuées avec le modèle éléments finis décrit au chapitre 2, chacune avec un rayon de frotteur différent. Les résultats numériques fournis par ces simulations conduisent à la réalisation d'essais avec des frotteurs de rayons 6 mm pour reproduire la pression de 400 MPa, de 20 mm pour la pression de 190 MPa et 30 mm pour la pression de 90 MPa.

Observations avant essais

Les frotteurs utilisés dans les campagnes d'essais ont été usinés et traités en même temps, en début d'étude. Les états de surfaces et le traitement par nitruration étaient semblables sur l'ensemble des frotteurs. La fabrication des frotteurs de rayons 6 et 30 mm a été décidée plus tard dans l'étude et a par conséquent été réalisée à partir d'un nouveau stock matière. Elle a été confiée au même sous-traitant de façon à minimiser les risques de « dérive » inhérents à la préparation de ces nouveaux frotteurs.

Toutefois, malgré les précautions prises, les surfaces des nouveaux frotteurs diffèrent des surfaces de référence (figure 56a). La couche de nitrure des nouveaux frotteurs présente moins de porosités en surface. Ceci a une conséquence directe sur la forme du dépôt de graphite : la structure alvéolaire n'apparaît plus lors du dépôt de graphite (figure 56b). Toutefois, les dépôts sur les frotteurs de rayon 6 et 30 mm sont homogènes, couvrant bien l'ensemble de la surface (figure 56c).

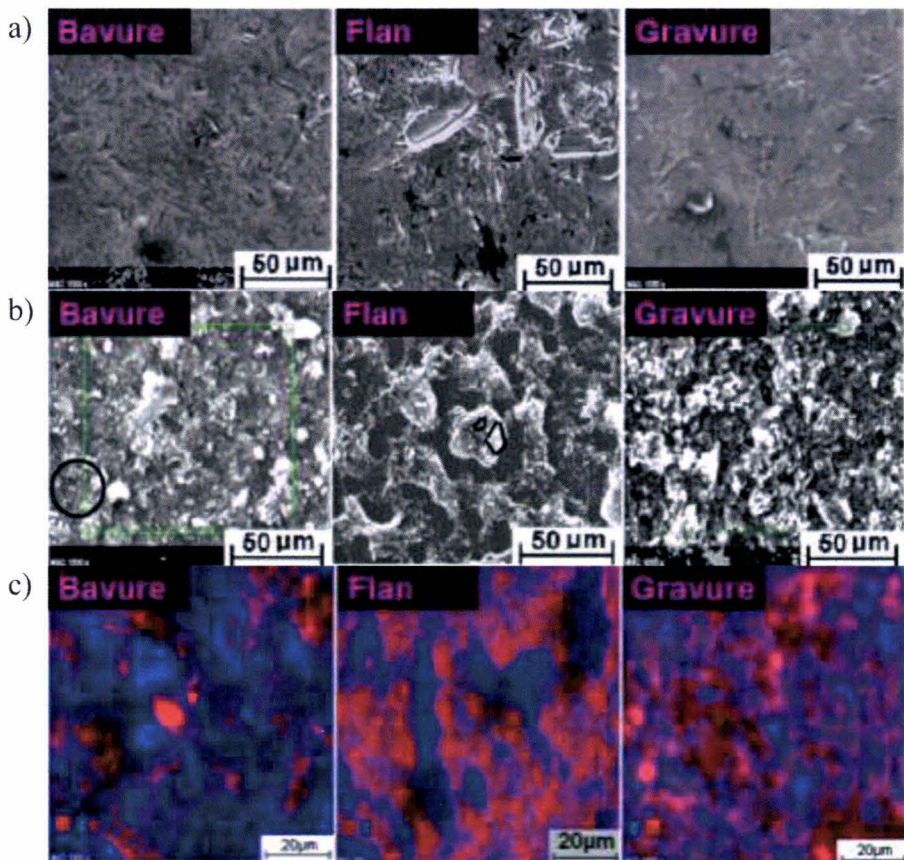


figure 56: Effet de la zone matrice. Surface du frotteur avant essais.
 a) micrographies des surfaces non revêtues.
 b) micrographies des surfaces revêtues.
 c) Répartition du graphite en surface
 Carbone = bleu,
 Fer = rouge.

Résultats des essais – indicateurs de performances

Les essais reproduisant les conditions de contact rencontrées en gravure, flanc et bavure conduisent à un indice de lubrification voisin de 0,4 (tableau 21). Contrairement aux campagnes d'essais précédentes, ces résultats sont issus d'essais réalisés avec des réglages du WHUST différents. Les variations du frottement régnant à l'interface ne sont donc plus uniquement fonction de l'indice de lubrification Li , mais également du rayon du frotteur qui modifie la géométrie de la surface de contact, et par conséquent la répartition des contraintes à l'interface. L'évolution du frottement ne doit plus être quantifiée par le simple rapport des efforts tangents et normaux, mais par le calcul du coefficient de frottement, conformément à l'équation (14) du chapitre 1.

Ainsi, bien que l'indicateur L_i soit quasiment constant, le coefficient de frottement varie de façon significative. Le coefficient de frottement de Coulomb est minimum en gravure, là où la pression est maximale, et est maximum en bavure, là où la pression est minimale. Ce résultat est en accord avec de nombreuses études montrant la non représentativité du modèle de Coulomb appliqué au domaine de la mise en forme et le fait que celui-ci décroît lorsque la pression de contact augmente [Dub96c].

En bavure, donc à faible pression et forte vitesse de glissement, des rayures apparaissent immédiatement sur l'éprouvette (tableau 22). Ce résultat peut paraître paradoxal dans le sens où nous sommes dans la configuration où la pression de contact est minimale. Les rayures s'expliquent par la présence en faible quantité de particules de calamine emprisonnées dans l'emprise éprouvette/frotteur (figure 57a). Ces rayures ne génèrent toutefois qu'une augmentation de 7 % du coefficient de frottement (tableau 21). Il semble donc qu'en terme de forces de frottement, l'apparition des rayures soit partiellement compensée par l'augmentation de la vitesse de glissement.

En gravure, la forte pression crée un important transfert de matière depuis l'éprouvette vers le frotteur. Les analyses montrent que la calamine vient adhérer à la surface du frotteur (figure 57b) alors que la couche de graphite y est toujours présente (figure 57c). Ce transfert n'est pas dramatique d'un point de vue tribologique pour deux raisons :

- il ne génère des rayures sur l'éprouvette qu'après une longueur de glissement de 37,5 mm. Le mécanisme de formation de ces transferts est par conséquent différent de celui observé dans le cas des faibles épaisseurs de lubrifiant où une apparition rapide de rayures était observée.
- Le frottement reste à un niveau faible. Nous pouvons supposer que ces couches de calamines glissent sur le graphite toujours présent sur le frotteur.

tableau 21 : Effet de la zone matrice. Evolution de l'indice de lubrification L_i .

Zone matrice	Gravure	Flan	Bavure
Indice de lubrification L_i	0,41	0,38	0,42
Coefficient de frottement	0,18	0,27	0,29

tableau 22 : Effet de la zone matrice. Evolution de la longueur critique L_c .

Zone matrice	Gravure	Flan	Bavure
Longueur critique L_c	37 mm	40 mm	0 mm

En conclusion, les essais réalisés montrent qu'aussi bien **en terme de frottement**, qu'**en terme de protection des surfaces**, le lubrifiant se comporte totalement différemment dans les différentes zones matrices. Le coefficient de frottement de Coulomb est minimum au centre de l'outillage et maximum au niveau de la bavure. Les mécanismes d'endommagement des surfaces, que ce soit du côté éprouvette ou du côté frotteur, sont générés par les fortes pressions au centre, par les grandes vitesses en bavure. Il serait intéressant dans le futur d'étudier des paramètres de façon découplé pour mieux quantifier leur influence propre sur la réponse du tribosystème.

Les paramètres de nitruration semblent également avoir un rôle important dans la structure et l'accroche du lubrifiant. Une étude approfondie de ce paramètre semble également pertinente dans la compréhension des phénomènes d'adhésion de la calamine sur la surface des frotteurs.

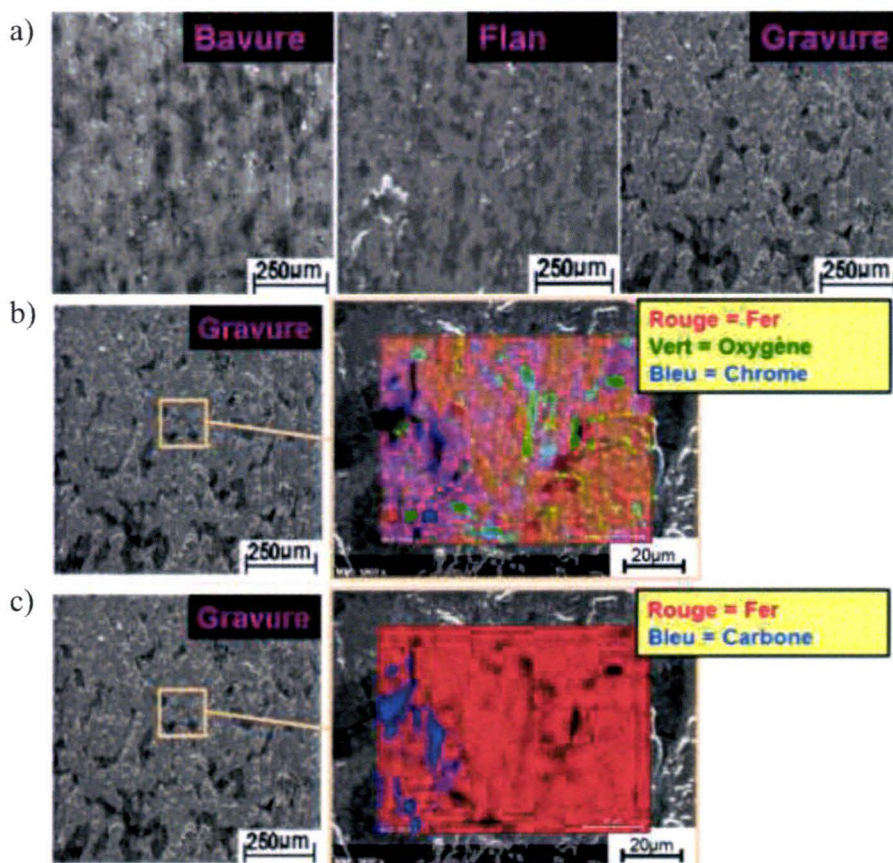


figure 57 : Effet de la zone matrice. Surface du frotteur après essais.
 a) micrographies, présence de petites particules de calamines en Bavure (points blancs),
 b) mise en évidence de transferts de calamine et de chromite de fer en conditions de Gravure.
 c) mise en évidence de graphite présent dans les vallées en condition Gravure.

VI. Usure industrielle

Les essais sont conduits dans la configuration suivante :

- Matériau éprouvette : 20MnCr5
- Température éprouvette : 1100°C
- Taux calamine : 0,2%
- **Matériau frotteur : X38CrMoV5-3 nitruré, neuf, après 5000, après 1000 pièces**
- Température du frotteur : 200°C
- Pression de contact : 190 MPa
- Vitesse de glissement : 60 mm/s
- Lubrifiant : dispersion de graphite dans l'eau
- Granulométrie : 12 μm
- Liant : 28 %
- Epaisseur de lubrifiant égale à 30 μm .

L'idée est ici de quantifier la réponse tribologique du triplet lopin/lubrifiant/matrice lorsque la surface de cette dernière évolue en cours de vie. Il a été décidé avec le partenaire industriel propriétaire du procédé générique de faire des essais avec des outils neufs (configuration générique), en milieu de vie (après 5000 pièces forgées) et en fin de vie (après 10000 pièces forgées). Toutefois, pour des raisons techniques, logistiques et économiques, il ne nous a pas été possible de récupérer un outil en milieu de vie. Ainsi seuls les essais en début (cas de référence) et en fin de vie ont été réalisés.

Réglage du banc d'essai

Les frotteurs pour les essais en fin de vie sont usinés dans la zone du flanc, à proximité des rayons de sortie de bavure, de la matrice fournie par le partenaire industriel. Dans cette zone, la surface de contact de l'outil présente un rayon de 6 mm (figure 58). Un rayon de petite dimension ayant tendance à augmenter la pression de contact sur le WHUST, les paramètres du banc d'essai sont modifiés pour permettre de reproduire la pression de 190 MPa régnant à l'interface lopin/matrice dans cette zone.

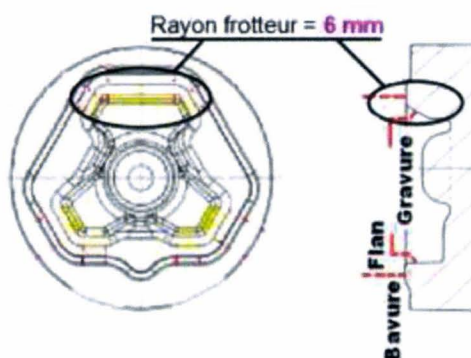


figure 58 : Usure industrielle. Géométrie de la matrice et zone de prélèvement des frotteurs

Un ensemble de simulations numériques du WHUST a été lancé avec comme paramètre un rayon de frotteur imposé à 6 mm et une pénétration du frotteur dans l'éprouvette variant de 0,1 à 0,4 mm. Il s'avère que quelque soit la pénétration choisie, la pression imposée par le frotteur de rayon 6 mm demeure supérieure à la pression cible. Pour faire descendre la pression générée par le frotteur nous avons décidé de réduire la rigidité de l'éprouvette en la perçant en son centre. Les essais ne sont plus opérés sur des cylindres mais sur des tubes. L'un des avantages de cette technique est qu'elle ne modifie en rien la surface des éprouvettes. Nous conservons par conséquent les mêmes propriétés de surface que pour les éprouvettes cylindriques : même matériau, même rugosité, etc.

Une nouvelle série de calculs a été réalisée avec des tubes de diamètre extérieur 30 mm, et de diamètre intérieur variant de 10 à 27 mm. Le modèle éléments finis utilisé est similaire à celui décrit dans le chapitre précédent. La figure 59 présente l'évolution de la pression de contact en fonction du diamètre intérieur de l'éprouvette. Suite à ces résultats, les éprouvettes ont été alésées à un diamètre intérieur de 23 mm.

La cinétique de chauffe des nouvelles éprouvettes a été redéfinie pour assurer un taux de calamine de 0,2 %, conforme à l'ensemble des précédents essais.

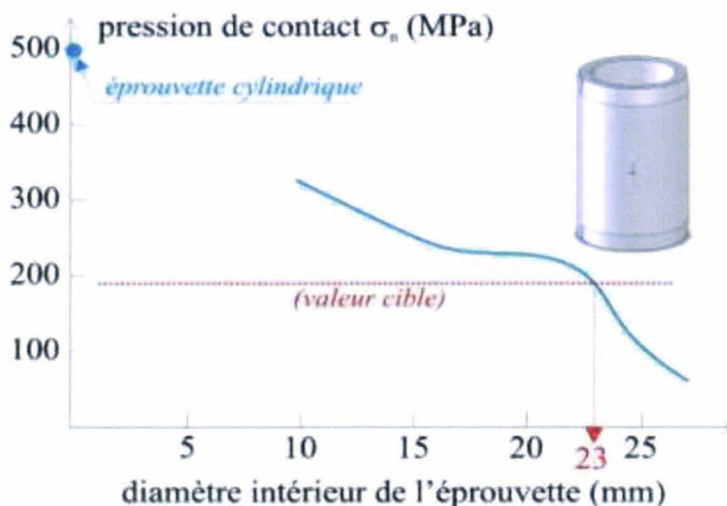


figure 59 : Usure industrielle. Evolution de la pression en fonction du diamètre intérieur de l'éprouvette.
Rayon outil = 6 mm,
Pénétration = 0,4 mm.

Observations avant essais

La figure 60 présente les surfaces de frotteurs avant essais. Sur les frotteurs « en fin de vie » la couche de nitruration a complètement disparue. La rugosité est particulièrement élevée (le Ra égal à 6 μm contre 0,3 sur les frotteurs neufs) et la surface présente de forte fissuration. Malgré cela, le lubrifiant se dépose en formant une structure alvéolaire, certes moins développée que sur la surface neuve, mais elle est bien présente et couvre les défauts de la surface (les fissures ne sont plus visibles).

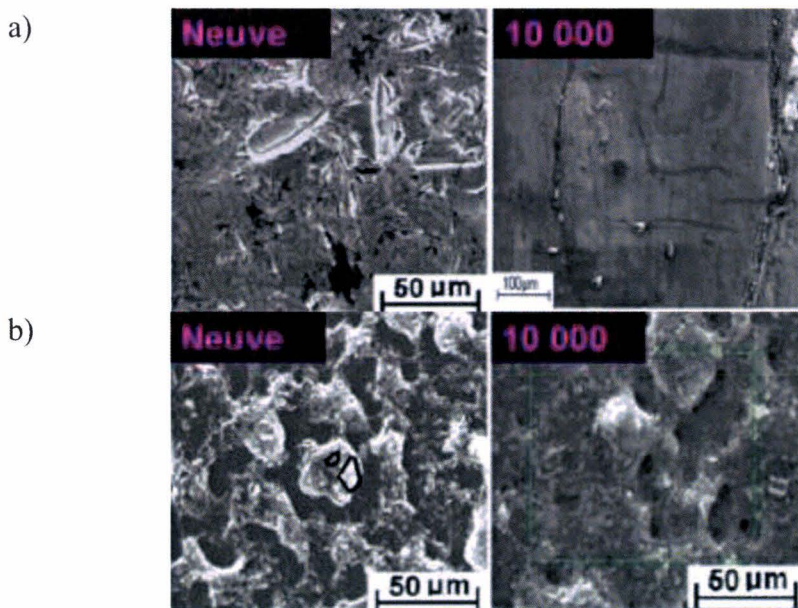


figure 60 : Usure industrielle. Surface du frotteur avant essais.
a) micrographies des surfaces non revêtues.
b) micrographies des surfaces revêtues.

Résultats des essais – indicateurs de performances

Les essais sur frotteur en fin de vie conduisent à un indice de lubrification largement supérieur à celui en début de vie : entre 0,6 et 0,7, contre 0,38. Nous pouvons toutefois noter que ces résultats sont « meilleurs » que les résultats avec frotteurs neufs mais sans lubrifiant (Li égal à 0,82). Toutefois, la longueur critique L_c pour les essais sur matrice usée est nulle : des rayures apparaissent dès le début des essais. Ces résultats s'expliquent par une surface fortement accidentée, présentant de nombreux dépôts de graphite, de calamine, d'oxydes (figure 61). Les fissures présentes en surface du frotteur couvertes par le graphite avant essais réapparaissent après essais.

Le lubrifiant utilisé pour ces essais est identique au produit SG-10-8 présenté dans le paragraphe IV.4 du chapitre 2. Nous avons répétés ces essais avec le lubrifiant SG5-20 et avons obtenus des résultats similaires : un indice de lubrification L_i très élevé (0,65), des rayures dès le début des essais, un fort taux de transfert de matière sur le frotteur (figure 62).

Dans les deux configurations de lubrification testées, les frotteurs extraits de la matrice en fin de vie :

- imposent des forces de frottement nettement plus élevées qu'en début de vie (entre 35 et 65%),
- sont davantage sujets aux transferts de matière (présence de nombreuses traces de calamine après essais),
- ne permettent plus d'assurer l'intégrité de la surface des pièces mises en forme (présence de rayures, même sur de faibles distances de glissement).

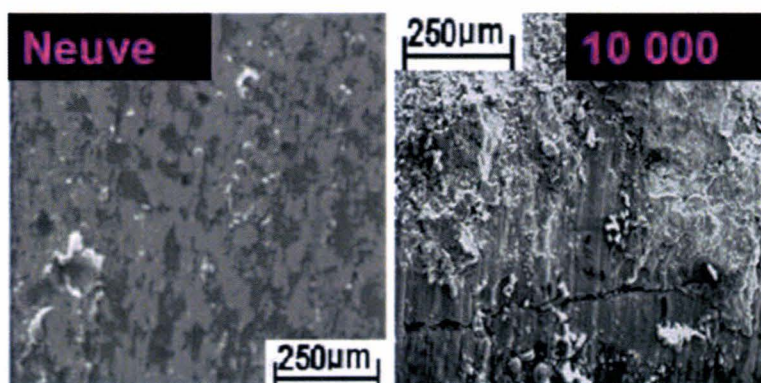


figure 61 : Usure industrielle. Surface du frotteur après essais. Mise en évidence du fort taux de transferts de matière sur frotteur en fin de vie, lubrifiant SG-10-8

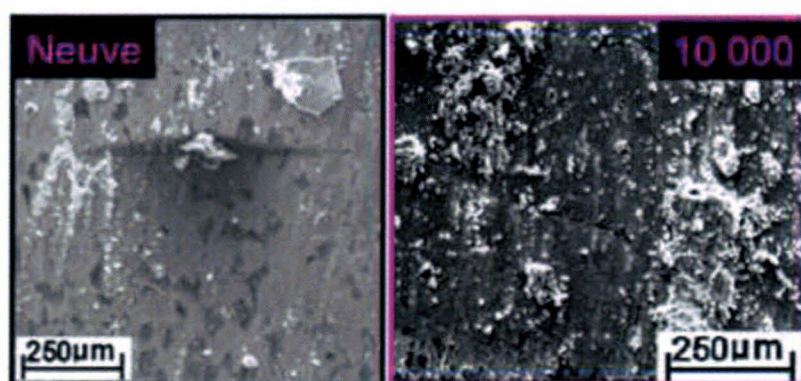


figure 62 : Usure industrielle. Surface du frotteur après essais. Mise en évidence du fort taux de transferts de matière sur frotteur en fin de vie, lubrifiant SG-5-20

A ce stade, la matrice est trop endommagée pour qu'un lubrifiant puisse encore avoir une quelconque utilité. Des frotteurs issus d'une matrice en milieu de vie, voire même ayant simplement forgée quelques centaines de pièces, auraient permis d'étendre les résultats et d'avoir une base de comparaison plus étendue.

VII. Conclusion

Une campagne d'essais a été mise en place pour étudier l'influence de la lubrification, du lubrifiant et du procédé de mise en forme sur les conditions de contact et de frottement à l'interface lopin/matrice. Une attention particulière a été portée sur l'analyse des surfaces, et notamment les phénomènes de transferts de calamine sur les outils. La campagne d'essais présentée dans ce chapitre a montré que :

- L'utilisation d'un lubrifiant, même en faible quantité, est indispensable : il réduit les forces de frottement, protège les surfaces en contact.
- Pour qu'un lubrifiant soit opérationnel, il doit être déposé en quantité « suffisante ». Les essais ont montré qu'au niveau des flancs de la matrice, l'épaisseur de la couche de graphite devait être supérieure à 10 μm .
- A l'inverse, déposé le graphite en épaisseur trop importante peut conduire à la formation de couches stratifiées dont le comportement tribologique engendre des défauts de surface sur les pièces mises en forme,
- Une forte granulométrie ou un liant en trop faible quantité se traduisent par un manque d'adhérence du lubrifiant sur la surface de l'outil. Il s'en suit des transferts de calamine, les forces de frottement augmentent, et des rayures apparaissent sur la pièce mise en forme.

Au niveau de l'étude des procédés de mise en forme, nous pouvons conclure que :

- Les conditions de contact et de frottement rencontrées au niveau des zones de gravure, de flanc et de bavures engendrent des défauts différents. En gravure, les fortes pressions favorisent l'adhésion des écailles de calamines à l'outil. En bavure, les particules de calamines entraînées dans l'emprise, sous l'effet de la vitesse de glissement importante génèrent des rayures sur les lopins mis en forme. A terme, ces particules peuvent générer de l'usure abrasive.
- La matrice en fin de vie testée sur le WHUST était trop accidentée pour mettre en évidence des différences de comportements des lubrifiants testés (pourtant notables sur les frotteurs en début de vie). A ce stade, la surface de la matrice était trop endommagée pour qu'un lubrifiant puisse être d'une quelconque utilité.

L'ensemble des objectifs fixés au début de l'étude ont été atteint, même si certaines questions restent encore en suspens. Ainsi, cinq voies d'études que nous avons entreprises semblent des pistes intéressantes à investiguer :

- étude de matrices en milieu de vie,
- étude de l'effet de la rugosité initiale,
- étude de la nitruration sur la structure,
- étude de la tenue de la couche de graphite
- et étude du découplage des conditions de contact mécaniques
« Pression de contact/Vitesse de glissement ».

Conclusions et perspectives

Les procédés de mise en forme par déformation plastique sont couramment utilisés pour la fabrication de pièces métalliques. Ces procédés s'avèrent très intéressants à plusieurs titres :

- Ils génèrent peu de pertes de matières premières.
- Le durcissement par écrouissage et le fibrage assurent une bonne tenue mécanique à la pièce forgée.
- Contrairement aux pièces usinées conventionnellement, les pièces forgées ne possèdent pas de contraintes résiduelles de traction en surface, contraintes favorisant l'amorçage de fissures par fatigue.

En mise en forme à chaud, la pièce est fabriquée à partir d'un lopin chauffé puis écrasé entre deux outils, appelés matrices. Cette opération est à l'origine de sollicitations thermomécaniques importantes en surface, dont la succession peut conduire à l'endommagement des outils. De façon à réduire ces sollicitations et augmenter leur durée de vie, la surface des outils est protégée par des revêtements durs et par du lubrifiant. Les revêtements durs ont pour objectif principal l'augmentation de la dureté en surface, retardant ainsi l'usure abrasive de l'outil. Le lubrifiant joue quant à lui un triple rôle :

- La réduction du frottement, donc des contraintes tangentielles, et en conséquence de l'usure.
- Le refroidissement des outils.
- Le « nettoyage » des surfaces.

Cette dernière fonction est essentielle. En effet, les particules de matière qui restent adhérentes aux outillages en cours de production sont des sources de pollutions qui peuvent générer de l'usure abrasive et être très nocives pour l'intégrité de la surface des outils.

En mise en forme à chaud des aciers, l'un des lubrifiants les plus couramment utilisés est une dispersion de graphite diluée dans de l'eau. Le lubrifiant est pulvérisé sur la surface chaude de la matrice. L'eau refroidit la surface de l'outil et s'évapore. La matrice est alors couverte d'une couche de graphite. La structure lamellaire du graphite couplée à la présence de vapeur d'eau protège la surface de l'outil en lui conférant un faible « frottement ».

Le travail mené dans la présente étude avait pour objectif de répondre à des questions relativement basiques, mais dont la réponse n'est en rien évidente :

- Quel lubrifiant doit-on utiliser pour un procédé de forgeage donné ?
- En quelle quantité, où, quand et comment faut-il l'appliquer ?

Analyser la réponse d'un lubrifiant sur site industriel n'étant pas possible pour des raisons aussi bien techniques qu'économiques, le choix d'un banc d'essai tribologique s'est avéré nécessaire. Une étude bibliographique a montré que tester un lubrifiant et son mode d'application met en jeu un nombre important de paramètres que le banc d'essai doit reproduire pour assurer la fiabilité des résultats. Le choix du banc s'est porté sur le WHUST, Warm and Hot Upsetting-Sliding Test, banc d'essai développé au sein du LAMIH, en collaboration avec le CETIM de Saint-Etienne. Ce banc d'essai met en œuvre un frotteur qui écrase la surface d'une éprouvette et glisse le long de sa surface avec une pression de contact donnée. Les paramètres du banc d'essai sont nombreux : nature des matériaux en contact, températures du frotteur et de l'éprouvette, pression de contact exercée, vitesse de glissement, mais également taux de calamine présent en surface de l'éprouvette, épaisseur de lubrifiant déposé sur le frotteur, etc. La méthodologie d'utilisation du banc d'essai a été présentée. Cette méthodologie est centrée sur le procédé industriel. Tout d'abord, une étude du procédé industriel permet de connaître les paramètres mécaniques et physico-chimiques régnant à l'interface lopin/matrice. Ensuite, les paramètres du WHUST sont identifiés pour reproduire ces mêmes paramètres à l'interface éprouvette/frotteur. Enfin, les résultats fournis par le WHUST sont exprimés sous forme d'indicateurs de performances permettant de quantifier les propriétés du lubrifiant à réduire le frottement et de qualifier ses capacités à protéger les surfaces en contact, que ce soit côté pièce ou côté outil.

Dans une seconde phase, un procédé générique, représentatif des métiers de l'estampage, a été choisi en accord avec les partenaires industriels de l'étude. Ce procédé met en œuvre l'écrasement d'un lopin en acier 20MnCr5 chauffé à 1100°C par deux matrices en X38CrMoV5-3 chauffées à 200°C et lubrifiées par une dispersion de graphite de granulométrie moyenne. Le WHUST a été réglé pour reproduire les conditions de contact de ce procédé. Deux premières campagnes d'essais ont été réalisées. La première consistait à répéter le même essai douze fois de suite et à regarder l'évolution des résultats fournis par le WHUST. Il apparaît que les résultats sont répétitifs. La seconde campagne consistait à tester dans des conditions de contact identiques deux lubrifiants de même nature. Les résultats ont montré que ces lubrifiants, déposés dans les mêmes conditions et proche de part leur composition chimique, donnaient des résultats différents en terme de coefficients de frottement et de protection des surfaces. L'un d'entre eux montrait des capacités à retarder l'apparition des premiers transferts d'écailles de calamine depuis l'éprouvette vers le frotteur.

Ces résultats ayant montré la robustesse du banc d'essai de LAMIH et ses capacités à étudier la lubrification des procédés de mise en forme à chaud, une nouvelle campagne d'essais a été mise en place pour analyser l'influence de divers paramètres sur le comportement tribologique du triplet éprouvette/lubrifiant/frotteur. Ces paramètres étaient relatifs à l'épaisseur de lubrifiant déposée, à la nature du lubrifiant en terme de granulométrie et de liant, aux conditions de contact mécaniques représentatives des différentes zones de travail de la matrice. La plage de variation de chaque paramètre a été définie en fonction de grandeurs mesurées sur site industriel. Les différents essais ont permis de conclure que :

- L'utilisation d'un lubrifiant, même en faible quantité, est indispensable : il réduit les forces de frottement, protège les surfaces en contact.
- Pour qu'un lubrifiant soit opérationnel, il doit être déposé en quantité « suffisante ». Les essais ont montré qu'au niveau des flancs de la matrice, l'épaisseur de la couche de graphite devait être supérieure à 10 μm .
- A l'inverse, déposé le graphite en épaisseur trop importante peut conduire à la formation de couches stratifiées dont le comportement tribologique engendre des défauts de surface sur les pièces mises en forme.
- Une forte granulométrie ou un liant en trop faible quantité se traduisent par un manque d'adhérence du lubrifiant sur la surface de l'outil. Il s'en suit des transferts de calamine, les forces de frottement augmentent, et des rayures apparaissent sur la pièce mise en forme.
- Les conditions de contact et de frottement rencontrées au niveau des zones de gravure, de flanc et de bavures engendrent des défauts différents. En gravure, les fortes pressions favorisent l'adhésion des écailles de calamine à l'outil. En bavure, les particules de calamine entraînées dans l'emprise sous l'effet de la vitesse de glissement importante génèrent des rayures sur les lopins mis en forme. A terme, ces particules peuvent générer de l'usure abrasive.

Structure du dépôt de graphite, relation liant/nitrure/acier

Ces travaux permettent par conséquent de mieux appréhender certains des mécanismes conduisant à l'endommagement en surface des matrices. Ils mettent clairement en évidence l'importance des composants du lubrifiant et de son mode d'application.

Toutefois, certaines questions méritent d'être approfondies. Des essais ont été réalisés sur deux lots de frotteurs ayant été traités par nitruration au gaz par la même société, dans des conditions de traitement a priori identiques, mais à deux « moments » différents. A l'issue de ces traitements, et de façon bien involontaire, nous avons constaté que les surfaces des frotteurs ne présentaient pas la même rugosité de surface, les frotteurs du premier lot possédaient en surface une couche blanche de nitrure plus poreuse que ceux du second lot. Les couches de graphite déposées sur ces surfaces avaient des morphologies différentes. Les essais réalisés sur des frotteurs prélevés dans des matrices industrielles, usées sur site de production, présentaient quant à elles une surface très accidentée, et où la couche blanche de nitrure avait totalement disparue. Toutefois, les dépôts de graphite sur ces surfaces présentaient une structure alvéolaire, identique à celle formée sur les frotteurs du premier lot, où la couche de nitrure poreuse était bien présente. Ces remarques montrent que l'état chimique de la surface de l'outil joue un rôle important sur la structure de graphite et en conséquence sur sa réponse tribologique. Une étude approfondie sur les réactions possibles entre le liant, le graphite et l'azote de la couche de nitrure pourrait fournir des premiers éléments de réponses quant à la structure du dépôt. Y a-t-il une « structure » de dépôt préférentielle à rechercher ? Cette structure éventuelle dépend-elle de l'état de la couche de nitrure ? Faut-il envisager de lubrifier différemment une matrice en début de vie d'une matrice où la zone affectée par la nitruration est déjà partiellement usée ?

Cette étude pourrait s'appuyer sur les outils et méthodes présentés aux chapitres 1 et 3, avec notamment des essais réalisés sur matrices usées industriellement, prélevées sur site à différentes étapes de leur vie. Des analyses de type EDX pourraient également être envisagées pour obtenir plus d'informations sur la structure des composés chimiques présents à l'interface et la façon dont ils ont réagi.

Produits de substitution au graphite

Si le graphite est un très bon lubrifiant, il est constitué de particules de carbone très salissantes. Les développeurs de lubrifiant proposent depuis plusieurs années maintenant des produits dits « blanc », sans graphite. Si l'avantage majeur est de maintenir les postes de travail propres, ces produits sont également moins polluants, plus facile à pulvériser et colmatent moins les circuits de distribution que le graphite. Certaines gammes de produits blancs sont commercialisées, mais d'une façon générale ces lubrifiants nécessitent encore des développements pour obtenir des performances comparables au graphite.

Des essais prospectifs sur un produit « blanc » ont été réalisés sur le WHUST. Le lubrifiant est un « savon » soluble, dilué dans l'eau et appliqué par pulvérisation. Les réglages du banc d'essai étaient ceux de la configuration générique. Le lubrifiant blanc se dépose bien et forme une couche très homogène, légèrement poreuse. Cependant lors des essais, la réponse du lubrifiant diffère totalement de celle des produits graphités testés préalablement, aussi bien en terme de réduction du frottement qu'en terme de protection des surfaces.

Ainsi lors des essais sur produit blanc, l'indice de lubrification présente une succession de minima et de maxima lors du glissement du frotteur sur l'éprouvette. Localement la force tangente au sens de déplacement dépasse même l'effort normal (L_i supérieur à 1). Dans le cas d'essais avec les produits graphités, l'indicateur L_i atteint un régime stable après un glissement de quelques millimètres puis reste constant (figure 63).

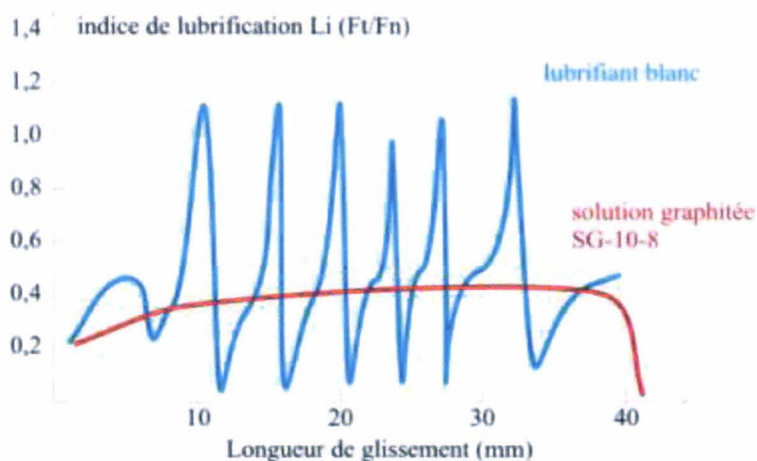


figure 63 : Etude des lubrifiants de substitution. Evolution de l'indicateur L_i en cours d'essai. Comparaison entre la réponse d'une dispersion aqueuse graphitée (en rouge) et un lubrifiant blanc (en bleu)

L'analyse des surfaces de l'éprouvette après essais avec lubrifiant blanc montre une succession de défauts comparables à des fissures, perpendiculaires au sens de glissement (figure 64a). Ces défauts apparaissent très rapidement et semblent présenter une certaine périodicité. Dans le cas du graphite les défauts sont de fines rayures, parallèles au sens de glissement (figure 64b).

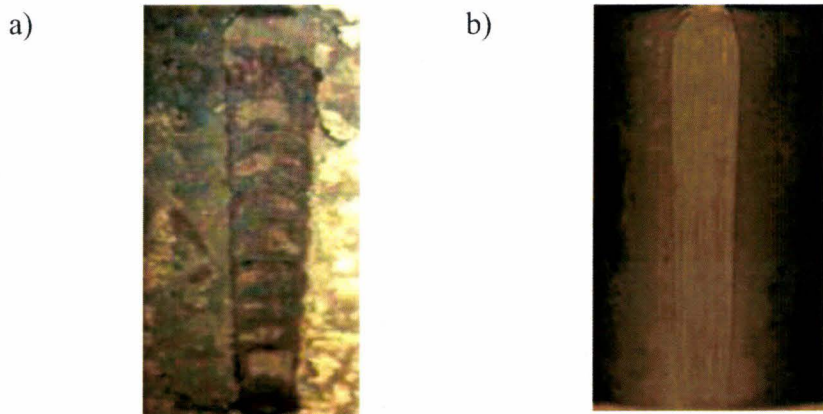


figure 64 : Etude des lubrifiants de substitution. Photographies de la surface des éprouvettes après essais. (a) produit blanc (b) produit graphité

De plus, les essais conduits sur le produit blanc généraient un bruit important.

La réponse du produit blanc s'explique par le fait que ce lubrifiant est développé pour produire un effet diesel. L'objectif recherché est de produire une combustion du produit sous forte pression empêchant ainsi les lopins d'adhérer aux gravures des matrices.

Nous remarquons par conséquent que le WHUST est capable de reproduire cet effet diesel et de mettre en évidence ses conséquences sur l'évolution du frottement et les défauts que les variations brutales de contraintes à l'interface peuvent engendrer. Toutefois, nous voyons également nettement apparaître la limite des indicateurs de performances définis au chapitre 1. Dans le cas du lubrifiant blanc, l'indicateur L_i varie entre 0 et 1,2 et ne fournit par conséquent qu'une réponse partielle à la quantification du frottement. De même, la mesure de la longueur critique L_c n'a ici plus de sens.

Ainsi, caractériser des lubrifiants de substitution au graphite est tout à fait envisageable sur le banc d'essai du LAMIH. La méthodologie de réglage du banc reste valide et permet de mettre en évidence les propriétés intrinsèques des produits testés. Par contre, une étude serait à mettre en place pour définir des indicateurs de performances adéquats, permettant de qualifier les nouveaux lubrifiants. Ces indicateurs pourraient être liés, par exemple, à la détermination des plages de pressions auxquelles réagit le produit, aux distances de glissement avant défauts, etc.

WHUST et usure de la couche de lubrifiant, approche particulière

A l'heure actuelle, les liens entre les propriétés du graphite à l'échelle nanométrique et micrométrique sont encore très mal connus. Les mécanismes de glissement des plans de graphènes, donc à l'échelle du nanomètre, et le rôle des vapeurs d'eau sont bien compris [Pie93]. Par contre, les implications de ceux-ci sur le comportement tribologique des grains de graphite sont très peu traitées dans la littérature et restent relativement obscures. Schmitt et al. ont mené une étude sur le comportement des graphites à différentes échelles [Sch07, Jra07]. Des essais ont été menés sur des graphites de différentes natures (graphites naturels et synthétiques) et différentes granulométries. Les essais ont été réalisés sur un ensemble de tribomètres ainsi que sur un microscope à force atomique. Il a été montré une dépendance du coefficient de frottement de Coulomb en fonction de la charge normale appliquée, l'existence d'une charge « critique » à laquelle le frottement est minimum et génère moins d'endommagement du graphite, mais aucune relation entre le comportement aux échelles nanométriques et micrométriques n'a pu être établie.

De même les actions du liant sur l'accroche des grains de graphite à la surface des outils, ou sur les connexions des grains entre eux sont très peu documentées dans la littérature.

Les raisons expliquant ce « manque » sont probablement liées à la difficulté de mettre en place à la fois des essais à des échelles aussi différentes, mais également à développer des moyens de mesures et d'analyses pertinents, permettant de relier les différents résultats entre eux.

Ces difficultés peuvent potentiellement être contournées par l'utilisation de modèles numériques d'usure, basés sur une approche particulière du troisième corps. Ainsi Iordanoff et al. proposent une démarche axée sur la méthode des éléments discrets et autorisant l'étude des propriétés locales (cohésion, génération thermique, ruptures) sur la réponse d'un procédé [Ior08]. L'idée est de proposer un outil numérique puissant, permettant de comprendre-proposer-confirmer des scénarios physiques rencontrés au niveau des zones de contact.

Les deux surfaces en contact sont supposées rigides et le troisième corps est modélisé par un ensemble de particules supposées sphériques. Ces sphères sont en liaison les unes avec les autres par un ensemble de forces de contact et de liaison. Les forces de contact prennent en compte la « répulsion » des sphères entre elles, l'adhésion ainsi que les phénomènes de dissipation d'énergie :

$$F_c = F_r + F_a + F_e = -K' \delta_{nc} + \gamma - 2\alpha \sqrt{K' M_{ij}} \dot{\delta}_{nc} \quad (26)$$

où

- F_r est la force de répulsion, créée par l'interaction entre deux sphères de raideur K' se « pénétrant » d'une valeur δ_{nc} ,
- F_a est la force d'adhésion, ici supposée constante et égale à γ ,
- F_e est la force d'amortissement, fonction du coefficient d'amortissement α , de la masse équivalente du contact M_{ij} et de la vitesse d'impact $\dot{\delta}_{nc}$.

Les forces de liaison servent quant à elles à unir les sphères d'un même solide. Elles se décomposent en une partie normale F_{nt} et une composante de cisaillement F_s (figure 65) :

- $F_{nt} = K' \cdot \delta_{nt} \quad (27)$

- $F_s = K' \cdot \delta_s \quad (28)$

Les phénomènes thermiques sont pris en compte aussi bien en terme de diffusion de la chaleur entre les particules qu'en terme de création de chaleur liée à la dissipation d'énergie lors des contacts entre sphères.

Enfin, une liaison entre deux particules se rompt si les deux conditions suivantes sont réunies : la force de liaison est en traction ; elle dépasse un seuil critique F_y .

Cette dernière possibilité est très intéressante : elle permettrait de simuler numériquement soit l'action du liant au niveau des grains, soit l'action des plans de graphènes glissant les uns sur les autres. Afin d'étudier la faisabilité d'une telle étude, une série de calculs exploratoires a été menée au LAMEF, Laboratoire Matériaux Endommagement Fiabilité et Ingénierie des Procédés de Bordeaux.

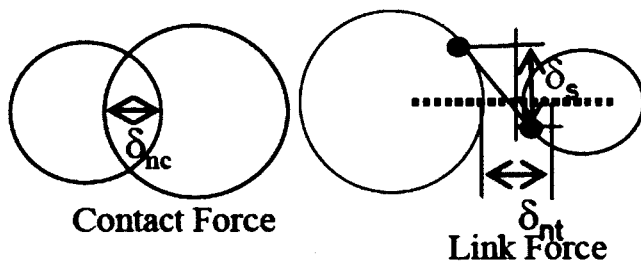


figure 65 : Modélisation de l'usure du lubrifiant. Schémas des variables intervenant dans le calcul des forces de contact et de liaison d'après [Ior08]

La figure 66 présente deux des huit modélisations réalisées. Les sphères vertes correspondent à la matrice (en bas) et au lopin (en haut). Les sphères oranges représentent la couche de calamine. Elles ont un diamètre de 1 μm . Les sphères de couleurs représentent des grains de graphite. Chaque grain de graphite est modélisé sous la forme d'un ensemble de sphères assemblées sous la forme de rectangles. Une force normale est imposée pour reproduire une pression égale à 190 MPa. La vitesse de glissement est imposée à la surface supérieure. Les données relatives au comportement des grains de graphites sont estimées. Huit domaines ont été testés. A chaque domaine correspond un diamètre de sphère de graphite, un nombre de sphère par grain et la possibilité ou non à une plaquette (liaison entre les grains) de se briser (tableau 23).

tableau 23: Modélisation de l'usure du lubrifiant. Domaines testés.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6	Cas 7	Cas 8
Diamètre des sphères	1	1	2	2	0,75	0,75	1	1
Taille des grains	3 x 3	16 x 11	3 x 2	5 x 8	4 x 4	21 x 14	3 x 3	16 x 11
Rupture des grains	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui

Dans ces simulations, l'usure du graphite est quantifiée comme étant le nombre de particules de graphite qui sont entraînées hors du contact par la calamine sur laquelle la vitesse de glissement est imposée. Le nombre de liaisons cassées entre les plaquettes et le nombre de liaisons cassées entre le substrat et les plaquettes sont également calculés. Enfin, la force tangentielle exercée sur le substrat est calculée. Un coefficient de frottement moyen de Coulomb est identifié à partir de la force tangentielle et de force normale imposée. Les résultats sont présentés en figure 67 et figure 68.

Tout d'abord, nous pouvons noter une certaine corrélation entre l'évolution du coefficient de frottement et l'usure du graphite (figure 67 et figure 68). Les cas 1, 5, 6, 7 et 8 ont une usure plus élevée et un coefficient de frottement plus élevé. Les cas 2, 3 et 4 ont une usure presque nulle et un coefficient de frottement également proche de zéro.

Lorsque les sphères qui forment le graphite sont grosses, l'usure et le coefficient de frottement sont proches de zéro (cas 3 et 4). La calamine, dont la taille des sphères est deux fois plus petite, présente alors une surface très plane par rapport au graphite et n'entraîne pas celui-ci. Dans ce cas de figure, la taille des grains influe peu sur le résultat.

Lorsque les sphères qui forment le graphite ont la même taille que celles de la calamine, la taille des plaquettes, donc le nombre de sphères qui les constitue, a un effet non négligeable. De grandes plaquettes réduisent fortement l'usure et le coefficient de frottement.

Dans la configuration où les grains peuvent se rompre (cas 7 et 8), la réponse globale des domaines à grains de grandes tailles tend à rejoindre le cas des petits grains. Ainsi, à taille de grain identique, le cas 8 présente une usure nettement plus importante que le cas 2. Son coefficient de frottement converge même vers celui du cas 1.

Lorsque les sphères de graphènes ont une taille plus petite que celles de la calamine, l'influence de la taille des grains redevient prépondérante. L'usure et le coefficient de frottement sont plus faibles pour les grands grains (cas 6) que pour les petits (cas 5).

Evidemment, certains de ces résultats sont sujets à caution. Les valeurs choisies au niveau des forces d'amortissement ou des seuils critiques à la rupture sont estimées et ont une importance non négligeable sur l'évolution des résultats obtenus.

De même, la liaison entre l'acier 20MnCr5 et la calamine pourrait probablement être améliorée, la nature ductile de la calamine se prêtant bien à une simulation par la méthode des éléments discrets. Les aspects thermiques pourraient également être pris en compte. Mais ces calculs montrent clairement la faisabilité de l'étude, la possibilité d'analyser, de quantifier l'influence de la taille des grains sur la réponse du tribosystème et la façon dont la couche est consommée lors du glissement.

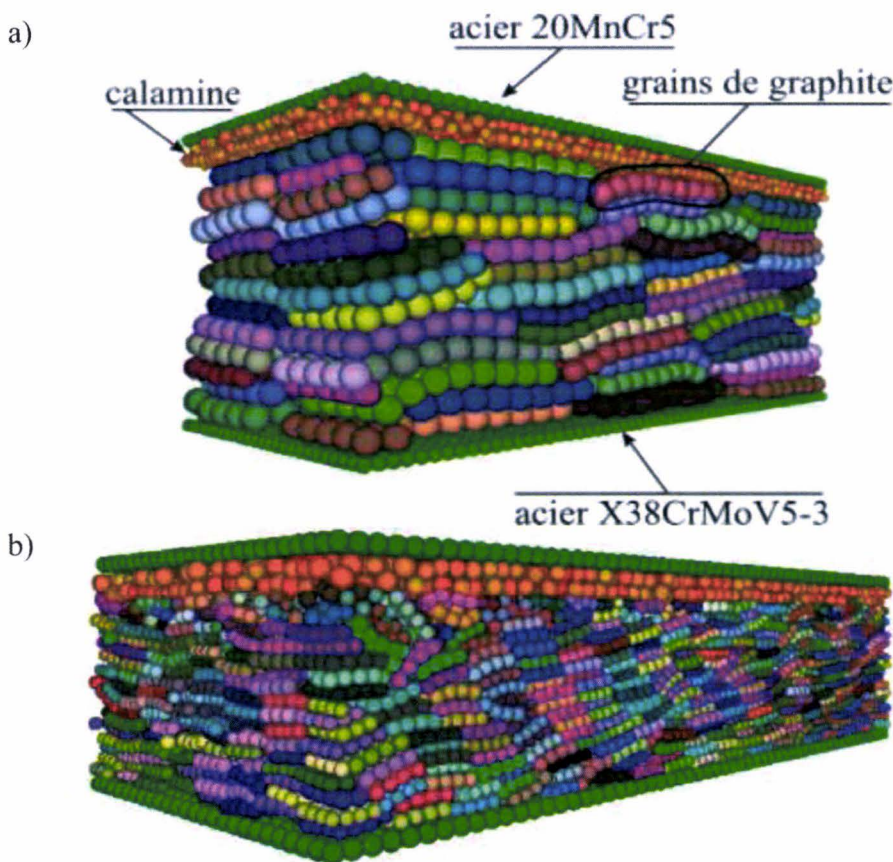


figure 66 : Modélisation de l'usure du lubrifiant. Exemples de domaines testés.
a) Cas 4
b) Cas 5

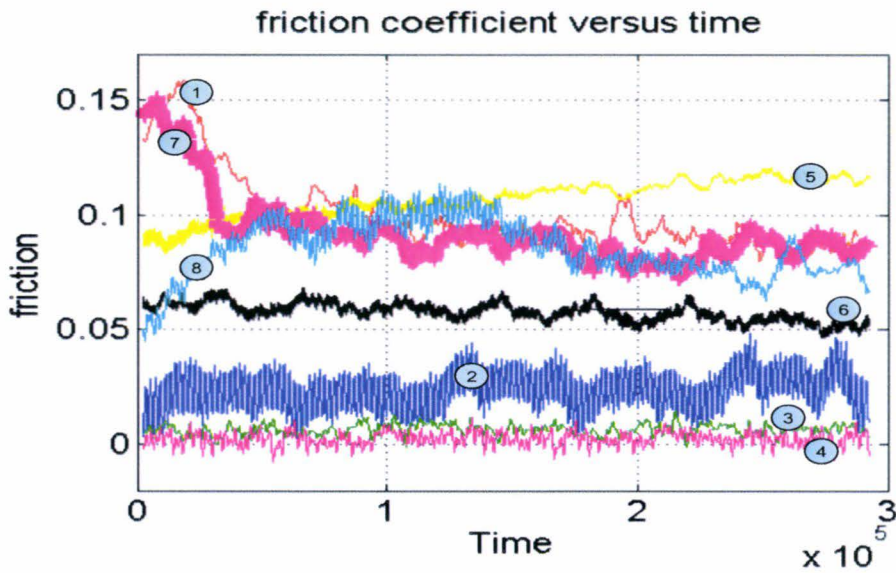


figure 67 : Modélisation de l'usure du lubrifiant. Coefficient de frottement en fonction du temps pour les huit configurations testées

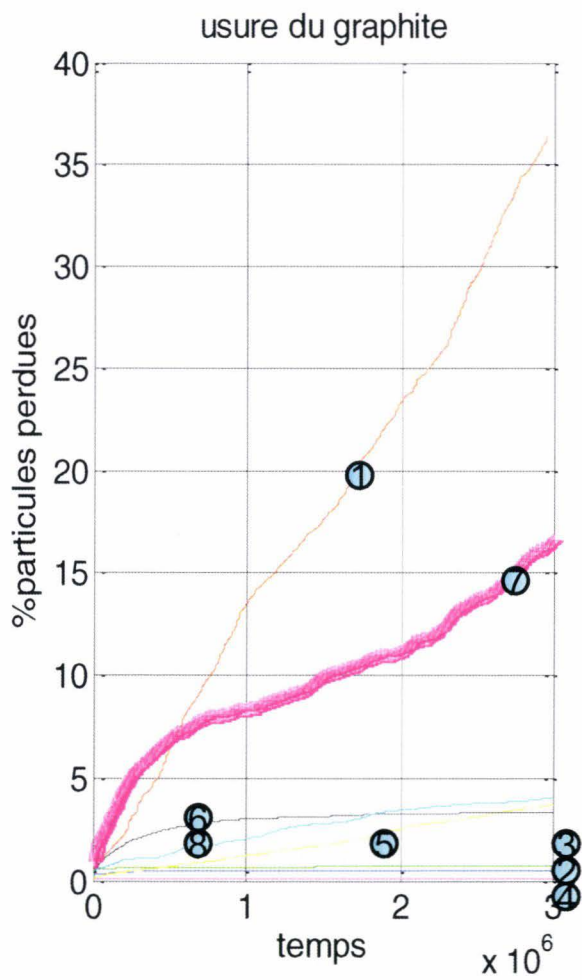


figure 68 : Modélisation de l'usure du lubrifiant. Usure du graphite en fonction du temps pour les huit configurations testées

Références bibliographiques

- [Alt96] T. Altan (1996) « Hammers and Presses for Forging », in Forming & Forging, S.L. Semiatin Edt. ASM Handbook vol. 14, ISBN 0-87170-007-7
- [And99] G. Andreis, K.-D. Fuchs, I. Schruff (1999), « The wear behaviour of hot- work tool steels used in forging processes», in Proceedings of the 5th International Conference on Tooling, Loeben, p593-600.
- [Arc53] J.F. Archard, (1953). « Contact and rubbing of flat surface ». J. Appl., n°24, p 481-488.
- [Arc80] J.F. Archard (1980) Wear theory and mechanisms. Wear handbook theory pp35-80.
- [Avi86] B. Avitzur, Y. Nakamura (1986), « Analytical determination of friction resistance as a function of normal load and geometry of surface irregularities ». Wear, Vol 107, p367-383.
- [Bai94] L. Baillet (1994), « Modélisation du frottement pour les opérations de matriçage ». Thèse, Institut National des Sciences Appliqués de Lyon, Lyon.
- [Bar04] O. Barrau (2004) « Etude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud », Thèse Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Bay87] Bay N. (1987) Friction stress and normal stress in bulk forming processes. *J. Mech. Work. Tech.*, 14 (1987) 203.
- [Bay90] N. Bay, T. Wanheim (1990) Contact phenomena under bulk plastic deformation conditions, Proceeding of Advanced technology of Plasticity 1990, Japan, vol IV, 1677-1692

- [Bay94] **Bay, N. (1994)** « The state of the art in cold forging lubrication ». *J. of Mat. Proc. Techn.*, 46, p. 19-40.
- [Bay02] **N. Bay (2002)** Review on Methods of Testing Friction in Metal Forming, présentation orale à Euromech 435, Friction and Wear in Metal Forming, Valenciennes, 18-20 juin 2002.
- [Bec03] **Becker, P., Jeon, H.J., Chang, C.C. & Bramley A.N. (2003)** Modelling the friction interface in bulk forming processes. In COMPLAS VII, Barcelona.
- [Beh08] **B.A. Behrens (2008)** Finite element analysis of die wear in hot forging processes, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 57, 305-308
- [Bri95] **J.P. Bricout, S. Adjerid, P. Hivart, J. Oudin (1995)** General characterization of phosphate/stearate coatings: seizure resistance and conductivity measurements, in *Proceedings of the 9th International Cold Forging Congress*, Solihull, UK, FMJ International, Redhill, pp. 147-153.
- [Bru99] **O. Brucelle, G. Bernhart (1999)**. « Methodology for service life increase of hot forging tools ». *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 87, p 229-243.
- [Cha79] **J.M. Challen, P.L.B. Oxley (1979)**, « An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models ». *Wear*, Vol 53, p229-243.
- [Cho03] **K.L. Choy (2003)** Chemical vapour deposition of coatings, *Progress in Materials Science*, 48, 57–170
- [Den00] **J. Denape, N. Laraqi (2000)**. « Aspect thermique du frottement : mise en évidence expérimentale et éléments de modélisation, *Méc. Ind.*, Vol.1, p563-579.
- [Do06] **T.T. Do (2006)** *Optimisation de forme en forgeage 3D*. Thèse de doctorat. Ecole des Mines de Paris.

- [Dub01] **L. Dubar, B. Hauw, A. Dubois and J. Oudin (2001)** Numerical identification of coating bulk behaviour in metal forming, *Computers & Structures*, 79, 1027-1037.
- [Dub95] **A. Dubois, (1995)** « Essai de compression-translation : contribution à l'identification des lois de comportement surfaciques et volumiques ». Thèse, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- [Dub96a] **Dubois, A., Oudin, J. & Picart, P. (1996)** Elastoplastic finite element analyses of upsetting–sliding test for the determination of friction at medium and high contact pressure. *Tribology International*, 29, 603-613.
- [Dub96b] **Dubois A., Patalier D., Picart P. & Oudin J.(1996)** Optimization of the upsetting-sliding test parameters for the determination of friction laws at medium and high contact pressures. *Journal of Material Processing Technology*, 62, 140-148.
- [Dub96c] **A. Dubois, P. Picart, L. Dubar, J. Oudin, S. Cescotto (1996)** Determination of the conditions of friction on steel specimen for the cold forging, *Proceedings of the ESDA '96*, Trans. ASME, Vol. 3, 215–220.
- [Dub98] **A. Dubois, L. Dubar, J. Oudin (1998)** Modèles de frottement en mise en forme à froid. In *Lubrification des Opérations de Frappe et de Forgeage à Froid*, Edt CETIM, France.
- [Dub00] **A. Dubois, L. Dubar, M. Dubar, J. Oudin (2000)** Caractérisation du frottement outil–pièce en mise en forme à l'ambiante des aciers, *Mec. Ind.*, 1, 639–649
- [Dub03] **A. Dubois (2003)** « *Macro tribologique et optimisation des procédés de mise en forme* », HDR, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- [Fel06] **E. Felder, N. Mottu (2006)** Influence de la fatigue thermique sur l'usure par abrasion des matrices de forgeage à chaud d'acier. *Tribologie et couplages multiphysiques*, Y. Desplanques & G. Degallaix (Edt), Presse Polytechnique et Universitaire Romandes, 222-231.

- [Fer62] **P. Ferignac (1962)** Test de Kolmogorov-Smirnov sur la validité d'une fonction de distribution, *Revue de Statistique Appliquée*, Tome 10, n°4, p.13-32.
- [For03] **Forge2 V3.1, Forge 3 V6.2 (2003)**. Documents techniques. Transvalor S.A.
- [Gél84] **J.C. Gélén, J. Oudin, Y. Ravalard (1984)**, « Theoretical analysis and experimental applications of barreling and folding in cylinder upsetting test », *International Journal of Mechanical, Science*, 11, 555.
- [Gen08] **D. Genève, D. Rouxel, P. Pigeat, B. Weber, M. Confente (2008)** Surface composition modification of high-carbon low-alloy steels oxidized at high temperature in air, *Applied Surface Science*, 254, 5348–5358
- [Gie03] **M. Gierzyńska-Dolna and P. Lacki (2003)** Some aspects of modelling of metal forming processes, *Computers and Structures*, 81, 605–613
- [God90] **M. Godet (1990)**. THIRD-BODIES IN TRIBOLOGY, *Wear*, 136, 29-45.
- [Gro00] **Z. Gronostajki (2000)**. The constitutive equations for FEM analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.106, p.40-44.
- [Gué99] **Guérin, J. D., Bartys, H., Dubois, A. & Oudin, J. (1999)** Finite element implementation of a generalized friction model: application to an upsetting-sliding test. *Finite Elements in Analysis and Design*, 31, 193-207.
- [Har06] **P. Hartley and I. Pillinger (2006)** Numerical simulation of the forging process. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 195, 6676–6690
- [Hél04] **F. Hélénon (2004)** *Modélisation de l'interface lopin/outil lors des procédés de matriçage* ». Thèse Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

- [Hen04] **P. Henningsen, M. Arentoft, T. Wanheim (2004)** Measurement Of Normal And Tangential Forces In A Rolling Process, in Proceedings of ICTMP 2004, Nybord, Denmark, June 15-18 2004, ISBN 87-91035-12-0, pp733-740
- [Hun03] **A. M. Huntz, V. Bague, G. Beauplé, C. Haut, C. Sévérac, P. Lecour, X. Longaygue, F. Ropital (2003)** Effect of silicon on the oxidation resistance of 9% Cr steels, *Applied Surface Sciences*, 207, 255-275
- [Ior08] **I. Iordanoff, D. Richard, S. Tcherniaieff (2008)** Discrete Element method, a tool to investigate contacts in material forming. In: *Proceedings of ESAFORM*, April 23-25, Lyon, France.
- [Jeo01] **D.J.Jeong, D.J.Kim, J.H.Kim, B.M.Kim, T.A.Dean (2001)** Effects of surface treatments and lubricants for warm forging die life, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.113, p544-550.
- [Jra07] **K. Jradi (2007)** *Etude du comportement trilobique de poudre de graphite*, Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace.
- [Kas08] **H. Kashani, A. Amadeh & M. R. Vatanara (2008)** « Improvement of wear resistance of hot working tool steel by hardfacing, Part 2 – Case study ». *Materials Science and Technology*, vol 24, n° 3, 356-360
- [Kim03] **D.E. Kim, K.H. Chung, K.H. Cha (2003)** Tribological design methods for minimum surface damage of HDD slider. *Tribology International*, Volume 36, Issues 4-6, 467-473
- [Kud79] **H. Kudo, M. Tsubouchi, Y. Fukuhara, Y. Ito (1979)**, « Developpement of friction and wear characteristics of some lubricants and tool materials for cold forging with the simulation testing machine ». *Annals CIRP* 28/1, 159.
- [Laz97] **Lazzarotto, L., Dubar, L., Dubois, A., Ravassard, P. & Oudin, J. (1997)** Identification of Coulomb's friction coefficient in real contact conditions applied to a wire drawing process, *Wear*, 211, 54-63.

- [Laz98] **L. Lazzarotto, (1998)**, « Maîtrise des conditions de contact et de frottement en mise en forme par frappe à froid ». Thèse, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- [Ler91] **C.Leroux (1991)** Les procédés de nitrurations appliqués aux outillages de forge à chaud. *Revue Traitement Thermique*, Vol.247, p35-42.
- [Lev03] **R. Levêque (2003)**, « Aciers à outils, Mise en œuvre », *Les Techniques de L'ingénieur*, M 4 587.
- [Lev04] **R. Levêque (2004)**, « Aciers à outils – Données numériques normalisées », *Techniques de l'ingénieur*, vol. Matériaux métalliques, p3-4
- [Lud92] **K.C. Ludema (1992)** Sliding and Adhesive wear, in *Friction, Lubrication & Wear technologies*. P .J. Blau Edt. ASM Handbook vol. 18, ISBN 0-87170-380-7
- [Mah99] **K. Mahjoub, (1999)** « Usure des matrices de forgeage à chaud des aciers - phénomènes physiques et modélisations », thèse de Doctorat en Sciences et Génie des matériaux, Ecole des Mines de Paris.
- [Mar07] **M. Marzouki, C. Kowandy, C. Richard (2007)** Experimental simulation of tool/product interface during hot drawing, *Wear*, 262, 235–241
- [Miq02] **B. Miquel, S. Jean, S. Leroux, P. Lamesle, F. Rézai-Aria (2002)**. « Heat-checking of hot work tool steels » European Structural Integrity Society, Vol.29, pp185-193
- [Mon00] **P. Montmitonnet, F. Delamare, B. Rizoulières (2000)** « Transfer layer and friction in cold metal strip rolling processes », *Wear*, 245, 125-135
- [Mor00] **N. Morgado, L. Dubar, A. Dubois (2000)**, « Etudes des conditions de frottement et de lubrification en mise en forme par forgeage à chaud et à mi-chaud », Rapport de contrat (CETIM). LAMIH, Université de Valenciennes.

- [Mor03] **N. Morgado (2003)**, « Tréfilage à chaud de l'aluminium 6060 : Nouvelle méthodologie d'identifier du comportement tribologique », Thèse Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- [Mul90] **B. Mulot, R. Rea, G.Borsenberger (1990)** Nitruration et chromage dur - Association de deux traitements superficiels au service de l'industrie de la forge et de l'estampage, *Revue Galvano-Organo-Traitements de surface*, Vol.608.
- [Mur02] **G.Murry (2002)**. « Aciers pour traitements thermiques – Normalisation ». Techniques de l'ingénieur, vol. Matériaux métalliques
- [Nav99] **B. Navinsek, P. Panjan, I. Milosev (1999)** PVD coatings as an environmentally clean alternative to electroplating and electroless processes, *Surface and Coatings Technology*, vol. 116–119, p476–487
- [Ode86] **J.T. Oden and J.A.C Martines (1986)** Models and computational methods for dynamic friction phenomena. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 52, 527–634.
- [Oud90] **J. Oudin, J.M. Rigaut, J.C. Gélin, D. Lochegnies, J.P. Bricout (1990)** Approches expérimentales et numériques des conditions de contact et de frottement. Physique et Mécanique de la Mise en Forme des Métaux. Edt Moussy et Franciosi. Presses du CNRS, Paris, 406-435
- [Ozt06] **D. Öztuna, A.H. Elhan, E. Tüccar (2006)** Investigation of Four Different Normality Tests in Terms of Type 1 Error Rate and Power under Different Distributions, *Turk J Med Sci*, 36-3, 171-176
- [Paw98] **O. Pawelski, W. Rasp, C. Wolff (1998)**, « Analysis of the asymmetric upsetting test with extremely high strain rate as tool for friction measurement». *Journal of materials Processing Technology*, Vol.80-81 , p287-291.

- [Pet97] **S.B. Petersen, P.A.F. Martins, N. Bay (1997)**, « Friction in bulk metal forming : a general friction model vs. the law of constant friction ». *Journal of materials Processing Technology*, Vol.66 , p186-194.
- [Pic95] **P. Picart, J. Oudin & A. Dubois (1995)**. On the determination of friction in the cold forging of coated steel workpieces. *Proc. of the 9th International Cold Forging Congress*, FMJ Int. Pub.Ltd. Redhill, UK.
- [Pic05] **B. Picqué, P.O. Bouchard, P.Montmitonnet, M. Picard (2005)** Mechanical behaviour of iron oxide scale: Experimental and numerical study, *Wear*, Vol. 260, Issue 3, p 231- 242.
- [Pie93] **H.O. Pierson (1993)** *Handbook of carbon, graphite, diamond, and fullerenes: properties, processing and applications*. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA. ISBN 0-8155-1339-9.
- [Qua83] **D. Quantin, J. Becot, (1983)** « Caractéristiques des calamines de tôles à chaud », *Revue CESSID DECAPAGE*, p19-51.
- [Rab79] **A.Rabey, (1979)** Bases de choix des aciers à outils. *Office Technique pour l'Utilisation de l'acier*.
- [Rau86] **D. Rault, M. Entringer, (1986)**, « Influence de la vitesse relative de la tôle par rapport à l'outil d'emboutissage sur les conditions de frottement et la mise en forme des tôles revêtues au zinc», *Proc 14th IDDRG*, 112.
- [Rig97] **D.A. Rigney (1997)** Comments on the sliding wear of metals. *Tribology international* vol 30 N°5 361-367.
- [Sad90] **M. H. Sadeghi, T. A. Dean (1990)** Analysis of ejection in precision forging, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 30, No. 4, 509-551

- [Sah96] **M. Sahi, R. Rahouadj, R. Herbach, D. Choulier (1996)** The influence of viscoplasticity in the interpretation of the ring test, *Journal of Materials Processing Technology*, 58, 286-292
- [Sal00] **I. Sallit (2000)** « Conception et réalisation d'un tribomètre à haute température – application à l'étude du frottement et de l'usure dans les procédés de mise en forme », Thèse, Université Technologie de Compiègne.
- [Sch83] **J.A. Schey (1983)** *Tribology in metalworking: Lubrication, Friction and Wear*, Metals parks, Ohio : American Society For Metals.
- [Sch90] **E. Schedin, A. Thuvander (1990)**, « Surface asperity deformation during sheet forming ». *Advanced Tech. of Plasticity*, Vol. 3, p1269-1276.
- [Sch07] **M. Schmitt, S. Bistac, K. Jradi (2007)** Tribological behaviour of graphite powders at nano- and macroscopic scales, *Journal of Physics: Conference Series*, 61, 1032-1036
- [She01] **S. Sheljaskow (2001)** Tool lubricating systems in warm forging. *Journal of Materials Processing Technology*, 113, p16-21
- [Sta02] **P. Standring (2002)** Tool life in the forging industry, *Euromech435 Colloquium, Friction and Wear in Metal Forming*, June 18-20, Valenciennes, France, 183-192.
- [Tan98] **X. Tan, P.A.F. Martins, N. Bay, and W. Zhang (1998)** Friction studies at different normal pressures with alternative ring-compression tests, *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81, 292-297
- [Ter04] **L. Terzolo (2004)** *Vers une prédiction de la durée de vie des outils de forge à chaud par la détermination numérique du régime thermique et de l'usure abrasive*. Thèse de doctorat. Ecole des Mines de Paris.

- [Ter06] **M. Tercelj, P. Panjan, I. Urankar, P. Fajfar et R. Turk (2006)** A newly designed laboratory hot forging test for evaluation of coated tool wear resistance, *Surfaces & Coating Technology*, Vol. 200, p3594-3604.
- [Ter07] **M. Tercelj, A. Smolej, P. Fajfar et R. Turk (2007)** Laboratory assessment of wear on nitrided surfaces of dies for hot extrusion of aluminium, *Tribology International*, Vol. 40, p374-384.
- [Tzv04] **Tz. Tzvetkoff, J. Kolchackov (2004)**. « Mechanism of growth, composition and structure of oxide films formed on ferrous alloys in molten salt electrolytes – a review », *Materials Chemistry and Physics*, Vol.87, p201-211.
- [Ver02] **A. Verleene, L. Dubar, A. Dubois, M. Dubar, J. Oudin (2002)** « Hardening Behaviour Law Versus Rigid Perfectly Plastic Law: Application To A Cold Forging Tool Steel. », *International Journal Of Plasticity*, 18, pp. 997-1011.
- [Vid02] **E. Vidal-Sallé, L. Baillet, J.C. Boyer (2002)**, « Comparison of different friction laws in numerical modelling of bulk metal forming ». Proceeding of FWMF Euromech 435, Valenciennes, France, p55-62.
- [Wal99] **S. Walter, H. Haferkamp, M. Niemeyer, Fr.-W. Bach, A. Henze (1999)** Material failure mechanisms of forging dies, in: Proceedings of the Fifth International Conference on Tooling, Loeben, pp. 215–224.
- [Wan78] **T. Wanheim & N. Bay (1978)** A model for friction in metal forming processes, *Ann. of CIRP*, 189.
- [Wat96] **M. Watremez, J.P. Bricout, B. Marguet & J. Oudin (1996)**. Friction, temperature & wear analysis for ceramic coated brake discs. *Journal of Tribology - Transaction of the ASME*, 118, 3, pp. 457-465.
- [Web99] **B. Weber, (1999)** Fatigue multiaxiale des structures industrielles sous chargement quelconque. Thèse de doctorat, INSA Lyon.

- [Wil88] **W. R. D. Wilson and S. Sheu (1988)** Influence of surface topography on viscoplastic asperity lubrication.
- [Wil95] **W.R.D. Wilson (1995)** Low-speed mixed lubrication of metal forming processes. *Annals of CIRP*, 44/1/1995, 205-208
- [Yan05] **L. Yang, C. Liu, R. Shivpuri (2005)** Physiothermodynamics of Lubricant Deposition on Hot Die Surfaces, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 54, Issue 1, 253-256.
- [Yan06] **L. Yang, R. Shivpuri (2006)** Spreading Behavior of Water Based Graphite Lubricants on Hot Die Surfaces, *Annals CIRP* 55/1
- [Yaz07] **B. Yazici, S. Yolacan (2007)** A comparison of various tests of normality, *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 77-2, 175–183
- [Zam98] **G. Zambelli & L. Vincent (1998)** Matériaux et contacts, une approche tribologique. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [Zha05] **J. Zhang, N.Li, Y.Chen (2005)** Dynamics of high-temperature oxidation accompanied by scale removal and implications for technological applications. *Journal of Nuclear Materials* Vol. 342, p1-7.
- [Zha08] **Q. Zhang, E. Felder, M. Arentoft, L. Dubar, F. Borsetto, S. Bruschi (2008)** On the results of friction benchmark in cold conditions. In proceedings of Metal Forming 2008, vol.2, pp 781-788, ISBN 978-3-514-00754-3

Bibliothèque Universitaire de Valenciennes



00900665