

Conception et fabrication d'un banc d'essai pour la mesure du
coefficient de friction à haute température des alliages
d'aluminium

par

Guillaume David

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 30 MARS 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Guillaume David, 2021



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Mohammad Jahazi, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Hakim Bouzid, codirecteur
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ngô Anh Dung, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Raynald Guilbault, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 12 MARS 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur, le professeur Mohammad Jahazi, de m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette maîtrise sur un sujet aussi intéressant. Merci aussi pour ses conseils, sa gentillesse et son soutien financier dans cette recherche. Et je remercie aussi mon codirecteur Hakim Bouzid pour ses conseils et son expertise.

Je remercie également Nicolas Bombardier de l'entreprise Verbom pour ses conseils et son soutien tout au long du projet.

Je remercie aussi Michel Drouin, Alain Grimard, Éric Marcoux, Joël Grignon, Serge Plamondon, Gabriel Froment-Lacasse, Radu Romanica, pour leur aide, leurs conseils et leur disponibilité sans lesquels ce projet n'aurait pas été possible.

Enfin un grand merci à ma famille et à mes amis qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ce travail.

Conception et fabrication d'un banc d'essai pour la mesure du coefficient de friction à haute température des alliages d'aluminium

Guillaume David

RÉSUMÉ

Dans le but d'alléger et d'améliorer les véhicules automobiles, de nouveaux procédés de mise en forme de l'aluminium sont développés. Cette étude se consacre à ceux qui exploitent les propriétés de superplasticité de l'alliage AA8053, à haute température (entre 450°C et 500°C) (procédés appelés SPF pour SuperPlastic Forming). Ils permettent des taux de déformation très importants, ce qui rend possible la fabrication de pièces de carrosserie à géométrie complexe, que les méthodes traditionnelles de formage ne permettent pas d'obtenir. Afin d'optimiser ces procédés et d'augmenter leur productivité, l'industrie utilise souvent des simulations numériques par éléments finis. Celles-ci, pour être fidèles à la réalité, requièrent que différents paramètres soient renseignés, et en particulier celui le coefficient de frottement (COF) entre l'aluminium de la pièce formée (qui est recouverte d'une couche de lubrifiant solide, du nitrure de bore dans le cadre de cette étude) et l'acier de la matrice. Une revue de la littérature a permis de mettre en évidence qu'il n'y a que très peu d'informations sur le comportement du COF dans les conditions qui nous intéressent. Elle a également montré qu'il n'existe pas de valeur de référence, mais que le COF dépend fortement des conditions d'essai. Par ailleurs, aucune méthode conventionnelle n'est définie pour mesurer cette grandeur dans un cadre qui reproduit les conditions de température, de pression et de contact que l'on trouve au sein des procédés de SPF. Un banc d'essai a donc été spécialement conçu au cours de ce projet pour répondre à cette problématique. Il s'agit d'une machine unique qui permet d'effectuer des mesures dans des conditions encore jamais testées, et possède un grand potentiel pour explorer le domaine des frottements et de la lubrification à haute température. Le banc d'essai a permis de réaliser une étude qualitative et quantitative sur le COF en fonction des différents paramètres qui ont été identifiés dans la littérature comme ayant le plus d'influence sur sa valeur : la température, la pression de contact, la vitesse et la distance de glissement. L'analyse des résultats a permis de mettre en évidence une forte corrélation entre le COF et les variables de température et de distance de glissement. Les deux autres paramètres ont une influence plus mesurée, mais qui en fonction des conditions peut être notable et jouer un grand rôle dans l'optimisation d'un procédé de SPF.

Mots-clés : Coefficient de frottement, superplasticité, friction, Aluminium AA5083, nitrure de bore, lubrifiant, haute température

Design and manufacture of a test bench for measuring the high-temperature coefficient of friction of aluminum alloys

Guillaume David

ABSTRACT

With the aim of making motor vehicles lighter and better, new aluminum forming processes are being developed. This study focuses on those that exploit the superplasticity properties of the AA8053 alloy (processes called SPF for SuperPlastic Forming). They allow very high deformation rates, making it possible to manufacture body parts with complex geometries that cannot be obtained by traditional forming methods. In order to optimize these processes and increase their productivity, the industry often uses finite element simulations. In order to be representative of the reality, these simulations require various parameters to be filled in, in particular the coefficient of friction (COF) between the aluminum of the formed part (which is covered with a layer of solid lubricant, boron nitride in this study) and the steel of the die. A review of the literature has shown that there is very little information on the behaviour of the COF under the conditions of interest. Even more so as it also showed that there is no reference value, but that COF is highly dependent on the test conditions. Moreover, no conventional method is defined to measure this quantity in a framework that reproduces the temperature, pressure and contact conditions found in SPF processes. A test bench was therefore specifically designed during this project. It is a unique machine that allows measurements to be made under conditions never tested before, and has great potential for exploring the field of friction and lubrication at high temperatures. It has made it possible to carry out a qualitative and quantitative study on COF according to the different parameters that have been identified as having the most influence on its value, temperature, contact pressure, speed and sliding distance. The analysis of the results showed a strong correlation between COF and the temperature and sliding distance variables. The other two parameters have a more moderate influence, but depending on the conditions can be significant and play a major role in the optimization of an SPF process.

Keywords : friction coefficient, superplasticity, friction, Aluminum AA5083, boron nitride, lubricant, high temperature

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE 9

1.1 Les frottements 9

1.1.1 La lubrification, un paramètre crucial de la mise en forme 101.1.1.1 Introduction sur la lubrification, les lubrifiants et les modes d'application 10

1.1.1.2 Les variables et paramètres qui influencent la mesure
du COF 12

1.1.1.3 Comportement des lubrifiants 131.1.2 Approche mécanique de l'étude des frottements 15

1.1.2.1 La mesure des frottements dans les conditions de mise en forme superplastique 15

1.1.2.2 Les variables significatives dans la mesure des frottements 161.2 La mesure du frottement 211.2.1 Les bancs d'essai de la littérature 211.2.2 Bilan de la littérature et de ses lacunes 28

CHAPITRE 2 CONCEPTION ET FABRICATION D'UN APPAREIL DE
MESURE DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT 29

2.1 Plages de mesure 302.2 Cahier des charges 342.3 Fonctionnement général et conception 352.3.1 Modélisation de la presse 352.3.2 Conception du chariot et système de mesure de l'effort normal 362.3.3 Vérin et système de mesure de l'effort tangentiel 382.3.4 Système de pression 442.3.4.1 Piston hydraulique 45

2.3.4.2 Vis et volant 47

2.3.4.3 Mécanisme de contrôle de l'effort 522.3.5 Acquisition des données 56

2.3.6	Contrôle du banc d'essai	57
-------	--------------------------------	----

2.3.7 Branchements électriques et sécurisation 58

2.3.8	Logiciel de contrôle du banc d'essai	59
-------	--	----

2.3.9	Post-traitement des données	59
-------	-----------------------------	----

2.4	Étude approfondie de solutions techniques clés	66
-----	--	----

2.4.1	Solution technique permettant d'assurer le parallélisme entre la pastille et l'échantillon	66
-------	--	----

2.4.1.1 Début de la conception et maintien de la rotule 68

2.4.1.2	Modélisation 3D et dimensions de la pastille	69
2.4.1.3	Contraintes liées au basculement de la pastille	70
2.4.1.4	Liaison rotule	70
2.4.1.5	Première approche pour le dimensionnement de la rotule	72
2.4.1.6	Seconde approche pour le dimensionnement de la rotule	75
2.4.1.7	Finalisation du design	79
2.4.2	Système de mesure de l'effort normal	80
CHAPITRE 3	CALIBRATION DU BANC D'ESSAI	87
3.1	Calibration de l'effort tangentiel	88
3.1.1	Calibration par comparaison avec les mesures de la littérature	88
3.1.2	Montage d'application d'une charge tangentielle connue	90
3.1.3	Essais à vide	91
3.1.4	Essais sous charge	93
3.1.5	Protocole	93
3.1.6	Analyse et traitement des résultats	96
3.1.7	Répétabilité et validation des paramètre de calibration	103
3.1.8	Programme Matlab : routine de calibration et correction des essais	104
3.2	Calibration de l'effort normal	106
3.2.1	Calibration avec la conception initiale	107
3.2.1.1	Essais avec chariot immobile	108
3.2.1.2	Essai avec chariot en mouvement	111
3.2.1.3	Amélioration de la conception initiale	113
3.2.2	Refonte du système de mesure	115
3.2.2.1	Diagnostic	115
3.2.2.2	Solution pour comparer la mesure de l'effort normal à une valeur connue	116
3.2.2.3	Méthodologie	119
3.2.2.4	Conclusion et modification du système de mesure	125
3.3	Calibration des paramètres expérimentaux	127
CHAPITRE 4	DÉTERMINATION DU COF POUR LE PROCÉDÉ HSBF	129
4.1	Méthodologie	129
4.1.1	Conditions expérimentales	130
4.1.1.1	Matériaux	130
4.1.1.2	Plan d'expérience	133
4.1.2	Protocole expérimental	137
4.2	Résultats des essais	140
4.2.1	Influence des variables étudiées sur le COF	140
4.2.1.1	Influence de la pression	141
4.2.1.2	Influence de la distance de glissement	143
4.2.1.3	Influence de la vitesse de glissement sur le COF	145
4.2.1.4	Influence de la température	148

4.2.2	Influence des conditions et du protocole sur les essais	149
4.3	Conclusion et récapitulatif des résultats	150
4.4	Incertitudes et sources d'erreur	151
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		153
ANNEXE I DONNÉES COMPLÉMENTAIRES		159
BIBLIOGRAPHIE		168

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Tableau récapitulatif des plages de mesure que le banc doit être capable de mesurer 34
Tableau 2.2	Tableau présentant les caractéristiques techniques des composants du vérin 39
Tableau 2.3	Résumé des caractéristiques techniques principales du banc d'essai 55
Tableau 2.4	Tableur Excel des résultats, automatiquement exportés depuis l'application de post-traitement des essais 65
Tableau 3.1	Tableau de statistiques permettant de comparer les résultats d'un essai de calibration avant et après correction des mesures 103
Tableau 4.1	Tableau des variables et de leurs niveaux 135
Tableau 4.2	Tableau présentant tous les essais réalisés 136

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Schéma du procédé de mise en forme superplastique traditionnel 3
Figure 0.2	Schéma du procédé HSBF 5
Figure 0.3	défauts observés pour le HSBF 7
Figure 1.1	Comparatifs des bancs d'essai de la littérature les plus pertinents pour l'étude. Les couleurs indiquent pour chaque condition expérimentale si elle correspond à l'objectif visé par cette étude 17
Figure 1.2	Schéma explicatif des définitions de course et de distance de glissement utilisées dans ce mémoire 19
Figure 1.3	Schéma du <i>Load scanning test rig</i> 22
Figure 1.4	Schéma du <i>forming tribo-simulator</i> ou tribo-simulateur de mise en forme 23
Figure 1.5	Illustration du montage de friction 24
Figure 1.6	Schéma du banc d'essai de la <i>hot flat drawing test machine</i> ou machine d'essai d'emboutissage à chaud 25
Figure 1.7	Schéma de la <i>reciprocating flat-on-flat tribo-test machine</i> ou machine d'essai de frottement plat sur plat à mouvement alternatif 26
Figure 2.1	Vue au microscope de la couche de lubrifiant appliquée par Verbom sur les pièces d'aluminium pour le procédé HSBF 30
Figure 2.2	Schéma des 3 parties principales du banc d'essai 31
Figure 2.3	Schéma de la zone d'essai 31
Figure 2.4	Image d'une simulation pour déterminer la pression de contact maximale lors du HSBF 32
Figure 2.5	Image d'une simulation pour déterminer la vitesse de glissement maximale lors du HSBF 33
Figure 2.6	Image d'une simulation pour déterminer la distance de glissement maximale lors du HSBF 33

Figure 2.7	Comparaison entre : a) la modélisation 3D de la presse et b) une photo de la presse	36
Figure 2.8	Vue en coupe du chariot	37
Figure 2.9	Image du modèle 3D du système de mesure de l'effort normal et du chariot	38
Figure 2.10	Schémas cinématiques des différentes possibilités pour le montage du vérin	40
Figure 2.11	Organigramme présentant les différents types d'erreurs de mesure que peuvent engendrer chaque type de défaut	41
Figure 2.12	Schéma pour le calcul de l'erreur de mesure de l'effort tangentiel en cas d'un défaut d'alignement des pièces, vue de face du banc d'essai	41
Figure 2.13	Comparaison entre : a) la modélisation 3D du vérin et b) une photo celui-ci installé sur le banc d'essai	44
Figure 2.14	Photographie du piston hydraulique installé sur la presse servant de châssis au banc d'essai	46
Figure 2.15	Photographies du système de pression d'une ancienne presse manuelle, a) encore installé sur l'ancienne presse et b) démonté	47
Figure 2.16	Première version du design du système de pression basé sur le mécanisme de vis	48
Figure 2.17	Schéma expliquant la première version de l'assemblage permettant d'adapter le mécanisme de vie et volant sur le banc d'essai	49
Figure 2.18	Photographie du système de pression installé sur le banc d'essai	51
Figure 2.19	Schéma du système de pression dans la zone du ressort, vue en coupe	53
Figure 2.20	Comparaison entre le système de pression en position haute et en position basse	54
Figure 2.21	Schéma cinématique du banc d'essai au complet	55
Figure 2.22	Schéma complet du système de pression vu en coupe	56
Figure 2.23	Schéma de la transformation du signal PID en un signal modulé en largeur d'impulsion (PWM)	58

Figure 2.24	Schéma électrique du banc d'essai	60
Figure 2.25	Photo du panneau électrique du banc d'essai	61
Figure 2.26	Panneau principal de l'interface	61
Figure 2.27	Panneau de réglage	62
Figure 2.28	Panneau de paramétrage de l'enregistrement des données	62
Figure 2.29	Panneau principal de l'application Matlab de post-traitement des données	63
Figure 2.30	Fenêtre de sélection des données	63
Figure 2.31	Panneau de présentation des résultats, affiché après que le bouton <i>Process</i> du panneau principal ait été pressé	64
Figure 2.32	Panneau d'analyse des résultats qui permet de montrer toutes les variables utilisées lors du traitement des données et de faire des analyses plus approfondies, et d'exporter les courbes	64
Figure 2.33	Schéma permettant de visualiser le problème de parallélisme lorsqu'un effort tangentiel est appliqué sur le système de pression lors du frottement	66
Figure 2.34	Solutions possibles pour remédier au problème de perte du parallélisme entre la pastille et l'échantillon	67
Figure 2.35	Schéma du principe de fonctionnement de la rotule permettant de garantir le parallélisme entre la pastille et l'échantillon	68
Figure 2.36	Différentes étapes de conception de la rotule	68
Figure 2.37	Schéma version finale de la rotule	69
Figure 2.38	Comparaison entre une rotule radiale et une rotule axiale	71
Figure 2.39	Schéma du principe de fonctionnement de la rotule permettant de garantir le parallélisme entre la pastille et l'échantillon	73
Figure 2.40	Tracé de $\frac{r}{R}$ en fonction de α , en radians	74
Figure 2.41	Schéma cinématique superposé à une image de la rotule, permettant de montrer comment le mécanisme a été modélisé pour l'étude	76

Figure 2.42	Schéma cinématique utilisé pour l'étude de mécanique statique sur la rotule	77
Figure 2.43	Schéma permettant de visualiser les frottements parasites qui perturberaient la mesure si la cellule de charge était située dans le système de pression	81
Figure 2.44	Schéma pour mettre en évidence la zone morte dans la mesure lorsque la cellule de charge est au-dessus de la zone de frottements	82
Figure 2.45	Schéma cinématique de l'ensemble système de mesure de l'effort normal, chariot et vérin	83
Figure 2.46	Schéma pour le calcul des efforts de frottement parasites dans le système de mesure de l'effort normal	83
Figure 2.47	Nouveau système de mesure de l'effort normal, avec en rouge les cellules de charge	85
Figure 2.48	Photo du système de mesure de l'effort normal prêt à être installé sur le banc d'essai	86
Figure 3.1	Organigramme général de la calibration	87
Figure 3.2	Organigramme de la calibration des efforts	89
Figure 3.3	Modélisation de la poulie et du bras de fixation conçu pour s'emboîter facilement dans l'extrusion du châssis du banc d'essai	90
Figure 3.4	Photo du montage permettant la calibration de l'effort tangentiel	91
Figure 3.5	Mesure de l'effort tangentiel lors d'allers-retours du chariot à vide	92
Figure 3.6	Mesure de l'effort tangentiel en fonction du temps lors du protocole de calibration de l'effort tangentiel	96
Figure 3.7	Erreur pour chacun des trajets dans la direction droite lors d'un essai de calibration en fonction de la position du chariot	97
Figure 3.8	Erreur pour chaque trajet dans la direction gauche lors d'un essai de calibration en fonction de la position du chariot	97
Figure 3.9	Corrélation entre la charge tangentielle appliquée sur le chariot et l'erreur de mesure de l'effort tangentiel	98

Figure 3.10	Erreur de mesure lors d'un essai de calibration après application de la correction dans la direction gauche 99
Figure 3.11	Schéma montrant que deux essais ne peuvent pas être comparés directement, mais doivent au préalable être découpés en zones pour que les valeurs moyennes dans ces zones puissent être comparées entre elles 100
Figure 3.12	Comparaison entre l'erreur initiale et l'erreur par zone 100
Figure 3.13	Comparaison entre l'erreur de mesure lors d'un essai de calibration dans la direction droite après décorrélation avec la charge tangentielle et le motif moyen d'erreur par zone 101
Figure 3.14	Comparaison entre l'erreur de mesure lors d'un essai de calibration dans la direction gauche après décorrélation avec la charge tangentielle et le motif moyen d'erreur par zone 101
Figure 3.15	Erreur de mesure lors d'un essai de calibration après avoir appliqué les corrections de décorrélation et de soustraction du motif d'erreur, dans la direction gauche 102
Figure 3.16	Erreur de mesure lors d'un essai de calibration après avoir appliqué les corrections de décorrélation et de soustraction du motif d'erreur, dans la direction droite 102
Figure 3.17	Panneau principal du module de traitement des essais de calibration de l'application Matlab d'analyse des résultats du banc d'essai 105
Figure 3.18	Panneau de présentation des résultats d'un essai après avoir appliqué les résultats de calibration 106
Figure 3.19	Schéma de l'ancien système de mesure de l'effort normal 107
Figure 3.20	Histogramme représentant la différence entre les poids ajoutés sur le chariot et l'effort mesuré 108
Figure 3.21	Image montrant l'arc-boutement dans le chariot lorsque l'effort qui s'exerce dessus n'est pas centré sur la cellule de charge 109
Figure 3.22	Schéma permettant d'expliquer le phénomène d'hystérésis observé dans le mécanisme de mesure de l'effort normal 110
Figure 3.23	Mesure de l'effort normal lors de l'ajout et du retrait répétés d'un poids sur le chariot afin d'observer la répétabilité des mesures du système de calibration normal en fonction du temps 111

Figure 3.24	Mesure de l'effort normal au cours du temps et position du chariot lors de l'ajout progressif de poids et déplacement du chariot après l'ajout de chaque poids	112
Figure 3.25	Affichage de l'erreur par rapport aux poids ajoutés pour l'essai de la figure 3.24 après que les portions où le chariot se déplace aient été isolées	113
Figure 3.26	Photo du montage du comparateur pour la calibration du système de mesure de l'effort normal	117
Figure 3.27	Schéma du système de pression	118
Figure 3.28	Montage de test pour mesurer la déformation du système de pression lors d'un essai	122
Figure 3.29	Montage du comparateur pour évaluer le mouvement de la plaque de support du chariot lors d'un essai de frottement	123
Figure 3.30	Comparaison entre la mesure faite par la cellule de charge et la mesure déduite des données du comparateur	124
Figure 3.31	Modélisation 3D du nouveau système de mesure de l'effort tangentiel. En rouge on observe les 3 cellules de charge	125
Figure 3.32	Essai de calibration du nouveau système de mesure de l'effort normal : des poids sont ajoutés et le chariot réalise un aller-retour entre chaque ajout	126
Figure 3.33	Schéma vu du dessus de la plaque chauffante du chariot, présentant les trois zones de chauffages contrôlées indépendamment	128
Figure 3.34	Histogramme des essais de calibration de la température	128
Figure 4.1	Photographie d'échantillons	131
Figure 4.2	Schéma d'une pastille circulaire, premier design non fonctionnel	132
Figure 4.3	Schéma d'une pastille rectangulaire, celle utilisée pour la majorité des essais	132
Figure 4.4	Photographie des pastilles utilisées pour les essais, telles que reçues	133
Figure 4.5	Guide pour le positionnement de la rotule pour le chauffage	138

Figure 4.6	COF affiché par l'application Matlab, cas d'un essai où le COF reste stable au cours du déplacement	141
Figure 4.7	COF affiché par l'application Matlab, cas d'un essai où le COF fluctue beaucoup au cours du déplacement	142
Figure 4.8	COF en fonction de la pression et de la vitesse à 25°C. Distance de glissement : 26mm ; pastille : rectangulaire	142
Figure 4.9	COF en fonction de la pression et de la distance de glissement à 470°C. Vitesse : 1mm/s ; pastille rectangulaire (pour les distances de glissement de 26 et 52 mm) et circulaire (pour les distances de glissement de 14 et 52 mm)	143
Figure 4.10	COF en fonction de la distance de glissement. Pastille : circulaire ; vitesse : 5mm/s ; pression : 1,6 MPa ; température : 25°C	144
Figure 4.11	COF en fonction de la distance de glissement à 470 °C. Pastille : rectangulaire et circulaire ; vitesse : 1 mm/s ; pression : 0,8 MPa	144
Figure 4.12	COF en fonction de la distance de glissement à 500°C. Pastille : rectangulaire ; vitesse : 10 mm/s ; pression : 0,8 MPa	145
Figure 4.13	Comparaison entre deux trajets d'un même essai (Pastille : rectangulaire endommagé ; vitesse : 3 mm/s ; température : 25°C ; pression : 0,8 MPa) avec pour a) une distance de glissement de 26 mm et pour b) une distance de glissement de 52 mm	146
Figure 4.14	COF en fonction de la vitesse de glissement à 25°C. Pastille : rectangulaire ; distance de glissement : 26 mm ; pression : 0,8 MPa	146
Figure 4.15	COF en fonction de la vitesse de glissement à 470°C. Pastille : rectangulaire ; distance de glissement : 26 mm ; pression : 0,8 MPa	147
Figure 4.16	COF en fonction de la vitesse de glissement à 500°C et de la distance de glissement. Pastille : rectangulaire ; pression : 0,8 MPa	147
Figure 4.17	COF en fonction de la vitesse et de la température. Pastille : rectangulaire ; distance de glissement : 26 mm ; pression : 0,8 MPa	148
Figure 4.18	Influence de l'usure de la pastille sur le COF	149
Figure 4.19	Photographie des pastilles après les essais	152

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ÉTS	École de Technologie Supérieure
COF	Coefficient de Frottement
HSBF	High Speed Blow Forming
SPF	Super Plastic Forming (Mise en forme superplastique)
BN	Boron nitride hexagonal (Nitrure de bore hexagonal)
MAZ	Mise à zéro ou tare

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

mm	Millimètre
kg	Kilogramme
kg _f	Kilogramme-force
N	Newton
MPa	Mégapascal
mm/s	Millimètre par seconde
s	Seconde
N.m	Newton mètre
tr/min	Tours par minutes
kW	Kilowatt
mm/tr	millimètre par tour

INTRODUCTION

L'industrie de l'automobile est une industrie très compétitive qui doit sans cesse s'améliorer, que ce soit pour rester concurrentielle ou faire face aux contraintes environnementales, qui sont de plus en plus prises en compte dans le secteur automobile. Le domaine a récemment vu apparaître la démocratisation d'un nouveau type de véhicule : la voiture électrique. Cette avancée a été entre autres portée par l'entreprise Tesla qui a produit les premiers véhicules électriques ayant des caractéristiques semblables, voire meilleures qu'un véhicule thermique pour un prix comparable. Pour parvenir à produire un tel véhicule, Tesla a dû faire face à de nombreux défis, en particulier celui qui est le sujet de ce mémoire, la fabrication des pièces de carrosserie. En effet l'entreprise a choisi d'utiliser en majorité de l'aluminium pour la carrosserie, un matériau permettant à la fois légèreté et solidité, et qui contribue au fait que les véhicules Tesla soient réputés pour leur sécurité en cas d'accident. Le modèle 3 a par exemple reçu la note maximale à tous les tests (test de la Tesla par l'IIHS) de "l'Insurance Institute for Highway Safety" (IIHS). L'aluminium apporte donc de grands avantages, mais il est plus complexe à mettre en forme par rapport aux matériaux plus traditionnels comme l'acier ou les plastiques et composites. Pour le formage de la tôle de carrosserie, Tesla a sollicité l'entreprise québécoise Verbom spécialisée dans la transformation de métal en feuille. Pour la mise en forme, Verbom utilise un procédé spécialement développé, le HSBF (High Speed Blow Forming). Il s'agit d'un procédé qui se base sur des techniques de mise en forme qui exploitent les propriétés superplastiques de certains alliages d'aluminium, en les combinant au matriçage classique afin d'obtenir une mise en forme à la fois rapide et permettant de grandes amplitudes de déformations. Ce projet de recherche se concentre sur l'étude d'un aspect précis de ce procédé, la friction. En effet plusieurs défauts peuvent apparaître sur les pièces formées, et le manque de connaissance sur les mécanismes tribologiques dans les conditions du HSBF empêche leur résolution. Les phénomènes qui se produisent lors du contact entre deux corps matériels peuvent être étudiés à l'échelle macroscopique d'un point de vue mécanique en les

caractérisant par un coefficient de frottement, mais aussi au point de vue microscopique en étudiant les déformations générées par exemple sur les grains d'un acier lors du frottement.

La suite de cette introduction détaille donc les principes de la déformation superplastique et du HSBF, puis développe les difficultés rencontrées avec les procédés et les défauts qui peuvent apparaître sur les pièces afin de, en troisième point, pouvoir détailler le problème et les méthodes qui ont été employées pour les corriger.

Contexte

La déformation superplastique

La superplasticité est une propriété de certains matériaux leur permettant de se déformer jusqu'à 10 fois leur longueur initiale (Abu-Farha & Khraisheh, 2008). Les matériaux superplastiques s'amincissent de manière homogène lors de la déformation et ne présentent pas de striction (affinement localisé qui conduit à la rupture). L'explication la plus commune pour expliquer ces propriétés est la diffusion atomique et le glissement des grains (Jean-Jacques & Michel, 1996). Ce phénomène apparaît dans des conditions très particulières, que l'on peut résumer en trois critères principaux :

- une température élevée, supérieure à 0,5 fois la température de fusion du matériau.
- une structure cristalline fine, généralement de l'ordre de quelques micromètres.
- une vitesse de déformation très faible.

La déformation superplastique se fait grâce à une cavité de la forme de la pièce finale dans laquelle la plaque est poussée par un gaz sous pression (Figure 0.1). Le procédé ne requiert donc qu'une matrice contrairement aux procédés de matriçage classique qui en requièrent deux. Ce procédé présente de nombreux avantages, on peut noter parmi les plus significatifs les suivants :

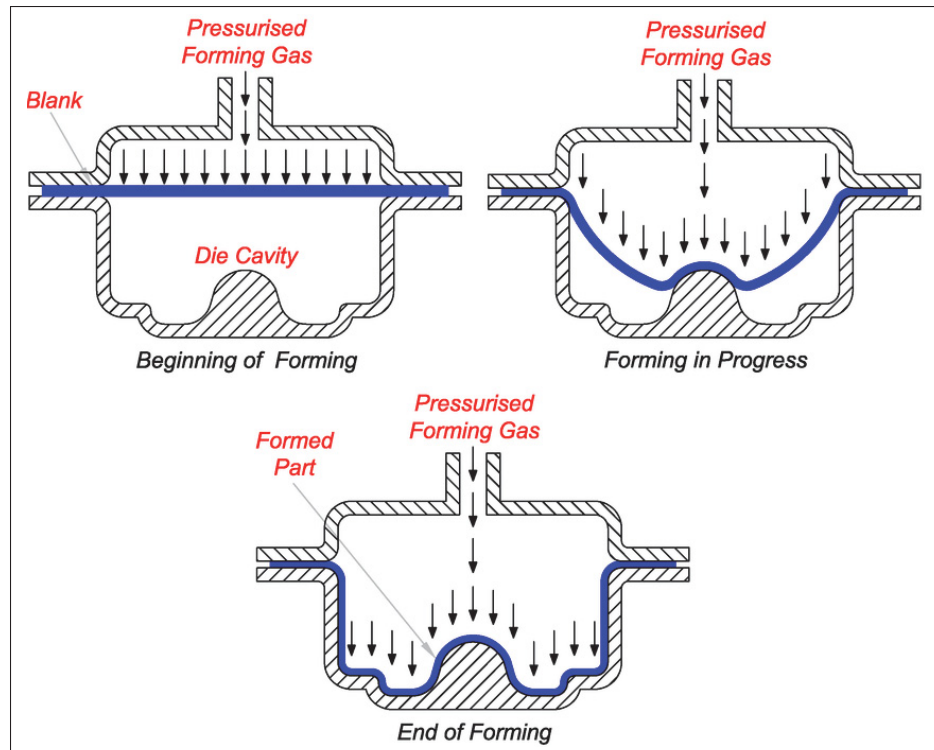


Figure 0.1 Schéma du procédé de mise en forme superplastique traditionnel

Tirée de Abu-Farha & Khraisheh (2008)

- la possibilité de produire des formes très complexes, qu'il serait impossible de créer avec des techniques de formage conventionnelles en une étape.
- le coût réduit de l'outillage grâce à la simplicité du montage : il n'y a pas besoin de presse contrairement au matriçage, puisqu'il ne faut qu'une seule matrice.
- la possibilité de travailler des matériaux très complexes à mettre en forme par d'autres techniques, comme des alliages de titane.

La mise en forme superplastique est donc un procédé qui possède des caractéristiques intéressantes pour le domaine automobile, mais qui présente comme principal inconvénient un temps de cycle long pour respecter les faibles vitesses de déformation. Selon la pièce cela peut durer plusieurs dizaines de minutes.

Le HSBF (High Speed Blow Forming)

Le HSBF permet d'apporter une réponse à ce problème en proposant une solution mixte entre le matriçage classique et le SPF (*Super Plastic Forming* ou mise en forme superplastique). Contrairement à la déformation superplastique usuelle, il présente la particularité d'être beaucoup plus rapide tout en conservant une capacité de déformation très élevée. Le principe qui permet ces performances s'appuie sur le fait que la majeure partie de la déformation est faite par matriçage classique, alors que la fin de la déformation se fait par la pression d'un gaz (Figure 0.2). Ainsi la première phase de déformation peut être faite à plus grande vitesse, car l'aluminium n'atteint pas encore des taux de déformation critiques. Quant à la partie restante de la déformation, elle se fait à plus faible vitesse, ce qui permet une durée totale par pièce inférieure à la minute. Une des composantes importantes du procédé est la friction entre la plaque qui se déforme et la matrice contre laquelle elle est pressée. Lors de l'écoulement du matériau dans la matrice ce frottement peut entraîner un certain nombre de défauts comme le déchirement de la plaque, de la striction ou un endommagement de la surface de la pièce. La plaque d'aluminium est donc recouverte d'une couche de lubrifiant avant d'entrer dans la machine de HSBF. Le lubrifiant utilisé est un lubrifiant solide à base de nitrure de bore (BN), ce qui lui permet de résister aux hautes températures de la mise en forme. Il est appliqué sur la surface de la plaque sous la forme d'une solution de BN pulvérisée par atomisation qui recouvre la pièce de micro gouttelettes. Ainsi l'acier de la matrice et l'aluminium ne sont pas en contact direct lors de la déformation puisque le contact ne se fait, en théorie, que sur ces micro gouttelettes.

Pour la suite de ce mémoire, le terme "*matrice*" désigne les pièces en bleu et vert sur le schéma 0.2, et la *pièce* désigne la pièce en aluminium mise en forme lors du procédé, représentée en rouge sur le schéma 0.2.

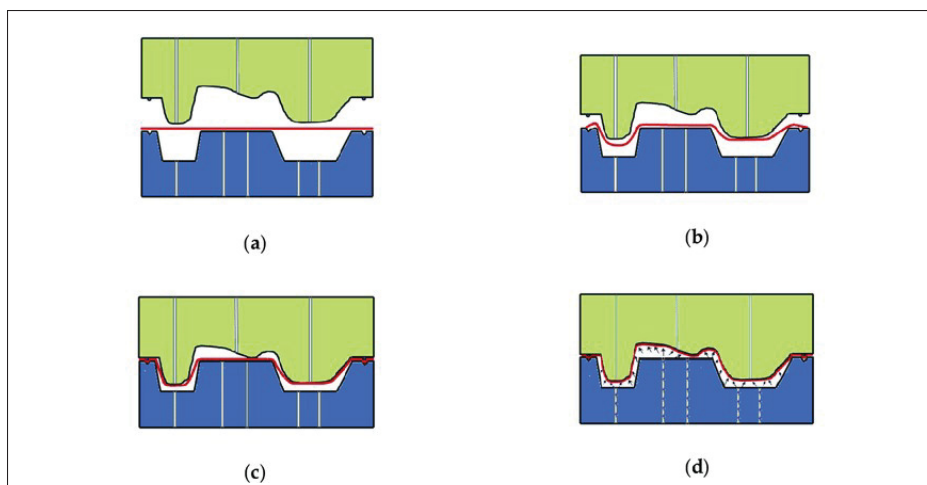


Figure 0.2 Schéma du procédé HSBF
Tirée de Majidi *et al.* (2018)

Problématique

Pour étudier la mise en forme d'une pièce par le procédé HSBF, Verbom utilise une simulation numérique réalisée sur le logiciel AutoForm™. Pour que cette simulation soit la plus précise possible et permette de modéliser la réalité au plus proche, il est nécessaire de renseigner un certain nombre de paramètres. La plupart de ces paramètres sont connus de Verbom comme les caractéristiques mécaniques de l'alliage AA5083 utilisé. La valeur du coefficient de frottement entre la matrice et la plaque d'aluminium fait partie des paramètres à renseigner pour pouvoir modéliser la déformation de la plaque, cependant il existe peu d'informations à ce sujet. Il existe plusieurs méthodes pour mesurer le coefficient de frottement comme pin-on-a-disk (ASTM G99 - 17) ou four balls wear test (ASTM D5183 - 05(2016)), mais aucune de ces méthodes ne permet d'obtenir des valeurs de coefficient de frottement (COF) qui puissent être exploitées pour le HSBF. La partie 1.2.1 de la revue de littérature fournit plus de détails sur ce point, en indiquant la liste des bancs utilisés dans la littérature et en expliquant pourquoi aucun ne permet de répondre au besoin. Ainsi le COF est inconnu au cours du procédé, Verbom a donc utilisé une valeur déterminée par l'expérience, en se basant sur une valeur du COF qui permet d'obtenir le

résultat le plus proche possible de la réalité. Cependant aucune valeur ne permet de reproduire la réalité de manière précise et on observe dans la réalité plusieurs défauts que la simulation n'avait pas indiqués. On peut identifier, en particulier, 4 types de défauts :

- un déchirement de la pièce (Figure 0.3a).
- un amincissement local de la plaque (striction) (Figure 0.3b).
- un endommagement de la surface de la plaque, ou *galing*, dû à la rupture de la couche de lubrifiant qui entraîne le contact direct entre l'acier de la matrice et la pièce d'aluminium (*galing* est un mot tiré de l'anglais qui pourrait être traduit par grippage, mais cette traduction est assez limitée, car le *galing* peut aussi retranscrire des notions d'endommagement des deux surfaces en contact, par adhésion et transfert de matière, par arrachement de matière, ou par marquage de la surface. Ce terme est utilisé dans la suite de ce mémoire afin d'exprimer simplement les différents phénomènes qui se produisent dans le HSBF lors du contact direct aluminium acier) (Figure 0.3c).
- le décrochage de BN de l'aluminium et son accumulation sur le moule à des endroits précis. L'accumulation formée par le BN peut alors marquer les pièces suivantes. La matrice doit alors être nettoyée manuellement, ce qui nécessite un arrêt de la ligne de production et représente une grande perte de temps pour l'entreprise (Figure 0.3d).

Lors de la déformation à chaud, la friction qui a lieu entre la pièce d'aluminium et l'acier de la matrice influence l'écoulement de la matière et la répartition des contraintes dans la pièce. Une des hypothèses qui a donc été formulée est que cette modélisation du coefficient de frottement par une valeur constante n'est peut-être pas représentative de la valeur du COF réel. Et en effet, la littérature montre que le COF dépend de nombreux paramètres qui sont détaillés dans la partie 1.1.2.2. C'est donc ce problème qui est étudié dans ce mémoire : quels paramètres influencent la valeur du COF et comment peut-on mesurer et modéliser le COF en fonction de ces paramètres.

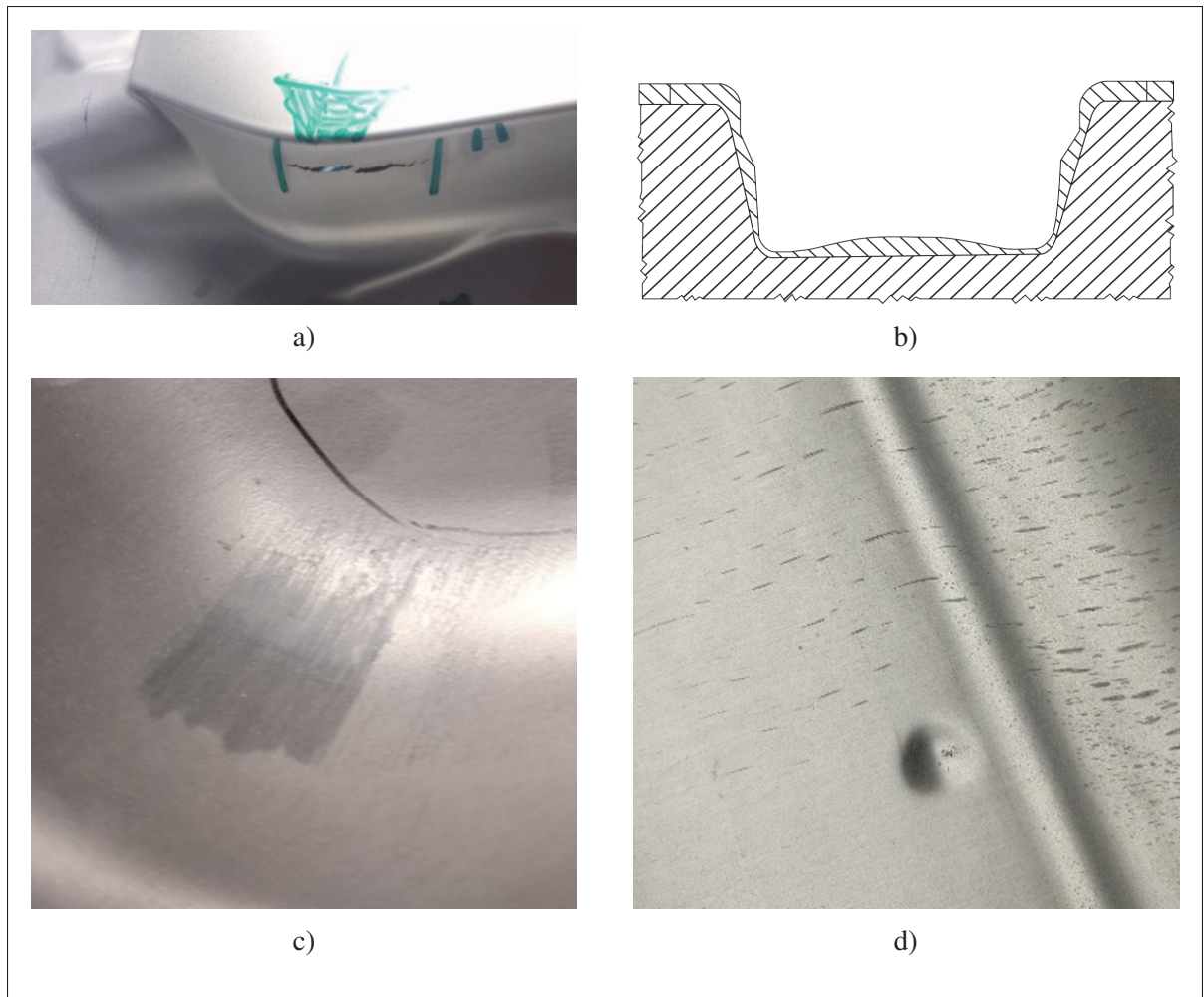


Figure 0.3 Défauts observés pour le HSBF : a) Rupture de la pièce

Tiré de Majidi *et al.* (2018)

b) Illustration d'une distribution d'épaisseur typique pour le SPF (défaut d'amincissement et de striction)

Tiré de Friedman *et al.* (2005)

c) Endommagement de la surface de la plaque par rayures ou arrachement de matière (*galing*)

d) Indentation dans la plaque causée par le décrochement et l'agglomération de BN

Objectifs

Afin d'apporter des éléments de réponse à la problématique précédente, une série d'objectifs est définie.

- concevoir et fabriquer un banc d'essai qui permette de mesurer le COF en reproduisant aussi fidèlement que possible les conditions du HSBF.
- calibrer le banc d'essai afin de s'assurer que les mesures effectuées sont bien représentatives du COF réel que l'on observe dans le HSBF.
- générer une série de mesures de COF pour valider le bon fonctionnement du banc.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Les frottements

À température ambiante et dans des conditions simples de frottement, avec des solides homogènes, il est possible de modéliser le contact grâce à la loi de coulomb (Wagoner & Chenot, 1997), qui permet d'exprimer l'intensité des forces de frottements qui s'exercent sur les solides. On considère, en particulier, la force normale au contact, qui compresse les solides ensemble, et la force tangentielle, c'est-à-dire la force qui s'oppose au glissement. La loi de coulomb indique que l'on peut relier l'intensité de ces forces par le coefficient de frottement (COF), souvent noté μ , par la relation suivante :

$$F_T = \mu \cdot F_N \quad (1.1)$$

Le COF μ est un coefficient constant qui dépend des deux matériaux en contact et de leur état en surface (par exemple leur rugosité ou bien s'ils sont recouverts d'un lubrifiant). Cette relation sous entend que le COF est indépendant de l'effort normal F_N . On distingue deux cas avec deux coefficients μ , un cas statique où il n'y a pas de mouvement relatif entre les objets, et un cas dynamique où il y a un glissement entre les deux solides. C'est le cas dynamique qui est considéré dans la suite de ce mémoire, en effet dans le HSBF les frottements qui nous intéressent sont ceux qui ont lieu lors du glissement de la pièce dans le moule. Cette relation est donc, comme précisé plus haut, valable dans un cas très simple de contact entre deux solides, mais dès que l'on s'intéresse à des cas plus complexes elle ne l'est plus. Dans un cas pratique, lorsque les conditions changent (comme lorsque la pression de contact est modifiée, la température, la vitesse, etc.) la relation n'est alors plus vérifiée. Or le frottement d'un point de vue énergétique correspond à la transformation d'énergie mécanique en énergie thermique (c'est-à-dire en chaleur), ce qui signifie qu'au cours du frottement la température des surfaces en contact augmente, ce qui nécessairement change les conditions et donc potentiellement le COF

(Dante, 2015). Afin de caractériser un frottement plus complexe, il faut donc soit connaître la valeur de μ dans toutes les conditions que traversent les surfaces en contact au cours du frottement, soit avoir un modèle qui donne la valeur en fonction des conditions.

Le frottement se fait selon deux mécanismes principaux, l'adhésion et les interactions mécanique. Il existe plusieurs manières de connaître le COF en fonction des conditions ou de créer un modèle du COF. Un premier point est de connaître les conditions de contact et les propriétés du contact, en particulier si par exemple un lubrifiant est présent sur les surfaces. Une fois que l'on connaît les conditions du contact, il est possible d'étudier le frottement d'un point de vue mécanique, en réalisant des essais dans chacune des conditions afin d'avoir une idée des paramètres qui influencent la valeur du COF. Mais dans certains cas il est difficile de mesurer ou d'expliquer certains phénomènes. Une analyse des surfaces en contact peut être pertinente (Cui, 2016), que ce soit par exemple avec une mesure de rugosité ou par l'analyse microscopique des affinités entre les précipités du matériau et le métal de la matrice (Gali, 2017). C'est donc dans cet ordre que la revue de littérature est structurée.

1.1.1 La lubrification, un paramètre crucial de la mise en forme

1.1.1.1 Introduction sur la lubrification, les lubrifiants et les modes d'application

La lubrification est un point essentiel dans le cadre du HSBF qui permet de faciliter l'écoulement de la matière jusqu'à sa forme finale, c'est un des éléments clés du procédé. Bien que notre objectif ne soit pas directement d'améliorer la lubrification, mais seulement de mesurer le COF, il est tout de même très utile de s'intéresser aux différents aspects de la lubrification afin d'avoir une meilleure compréhension des phénomènes qui peuvent être observés pendant les mesures. Ces connaissances sur le sujet permettent de pouvoir comparer les résultats obtenus lors de notre étude avec ceux de la littérature de manière pertinente : la lubrification étant un paramètre crucial et complexe du procédé, des résultats pourraient être mal interprétés et de mauvaises conclusions tirées si les mécanismes qui entrent en jeu sont mal connus. Il existe de nombreux types de lubrifiants et sous de nombreuses formes, des films liquides, des graisses, des

solides (Wagoner & Chenot, 1997). Mais les conditions sévères que l'on trouve dans le HSBF restreignent particulièrement le choix. En particulier tous les lubrifiants liquides sont éliminés, bien qu'il en existe certains qui soient capables de résister aux hautes températures du HSBF. Pour ces derniers, leurs propriétés sont dues à un film du lubrifiant qui se crée entre les pièces en mouvement et empêche leur contact par effet hydrodynamique (Farrell, Drabek & Qarni (2017), p. 978). Or dans le HSBF la friction se fait à une vitesse très lente qui prévient l'apparition de cet effet hydrodynamique (Farrell *et al.*, 2017). On ne retrouve ainsi de manière générale que 3 composés de base pour ce type de lubrifiants (Friedman *et al.*, 2005 ; Ghiotti, Bruschi & Medea, 2017) :

- le graphite.
- le disulfure de molybdène (composé chimique semblable au graphite).
- le nitrure de bore.

Ces 3 composés ont la particularité d'être stables à très haute température. Le mécanisme qui est généralement reconnu pour expliquer leurs propriétés lubrifiantes est lié à leur arrangement atomique en feuilles qui possèdent une grande résistance (pour le graphite ces feuilles sont appelées graphène, un matériau bien connu pour ses propriétés mécaniques), mais la résistance au glissement entre ces feuilles est très faible (Friedman *et al.*, 2005), et c'est ce phénomène qui se produit lors du frottement qui permet à ses composés d'offrir une faible friction. Afin qu'ils puissent être facilement appliqués sur la pièce et qu'ils y adhèrent, ces lubrifiants sont utilisés en solutions dans divers solvants. Il existe plusieurs lubrifiants de ce type disponibles dans le commerce et plusieurs études se sont penchées sur certains d'entre eux (Ghiotti *et al.*, 2017 ; Shi, Wang, Mohamed, Balint, Lin, Stanton, Watson & Dean, 2017 ; Podgornik, Kafexhiu, Kosec, Jerina & Kalin, 2017 ; Hanna, 2009 ; Tomala, Hernandez, Rodriguez Ripoll, Badisch & Prakash, 2014 ; Medea, Ghiotti & Bruschi, 2015) pour des procédés similaires au HSBF.

Ces lubrifiants peuvent être appliqués selon une grande variété de méthodes, allant de la simple application au pinceau à l'atomisation par des machines spécifiquement conçues. On peut en particulier noter l'appareil décrit par l'étude de Medea *et al.* (2015), qui est entièrement dédié à l'application d'une couche de graphite qui soit répétable entre les essais. Dans le cadre du HSBF

le lubrifiant à base de nitrure de bore dans une solution liquide est pulvérisé par des buses sur les plaques d'aluminium, puis le liquide est évaporé et il ne reste qu'un résidu solide composé en majorité de nitrure de bore réparti à la surface de la plaque en micro gouttelettes. Plusieurs outils ont été développés pour étudier cette répartition (Le Royer, 2017b), entre autres un programme d'analyse d'images afin d'obtenir le taux de recouvrement et un protocole expérimental utilisant un microscope confocal pour obtenir l'épaisseur de ces gouttelettes.

1.1.1.2 Les variables et paramètres qui influencent la mesure du COF

La lubrification est très complexe à étudier pour le procédé, car de très nombreux facteurs sont à prendre en compte pour avoir une connaissance complète sur le lubrifiant et son fonctionnement. Dans le cadre du HSBF et de la répartition en micro gouttelettes, on peut noter les paramètres évoqués précédemment (1.1.1.1), le taux de recouvrement et l'épaisseur des gouttelettes, mais de nombreux autres paramètres viennent s'ajouter à ceux-ci pour pleinement caractériser la couche de lubrifiant. Un autre paramètre est particulièrement important, l'adhésion du lubrifiant, c'est-à-dire sa capacité à résister à une force tangentielle qui décrocherait la gouttelette de la pièce, et plusieurs études s'y sont intéressées (Ghiotti *et al.*, 2017 ; Hanna, Krajewsk & Schroth, 2007). Ensuite sa ductilité ou capacité à se déformer pour suivre la déformation de la pièce. En effet, même si le lubrifiant a une très bonne adhérence, lorsque la pièce se déforme s'il est très rigide il peut s'écailler et se décrocher de la surface, comme c'est par exemple généralement le cas pour le graphite (Hanna *et al.*, 2007). Pour chacun des paramètres cités ci-dessus Verbom a développé ou est en train de développer des méthodes pour les caractériser, grâce à, par exemple, des tests de cisaillement de la couche de lubrifiant ou des essais de Nakazima (Nakazima, Kikuma & Hasuka, 1968) pour étudier l'adhérence lors de la déformation.

Ces variables permettent de considérer les aspects mécaniques de la couche de lubrifiant. Cependant d'autres aspects entrent en compte dans le choix du lubrifiant. On peut noter en plus du coût la facilité de nettoyage, la toxicité et la pollution engendrée par le composé ou sa recyclabilité (Wang, Xu & Liu, 2012).

1.1.1.3 Comportement des lubrifiants

Plusieurs études ont été menées sur les lubrifiants pour une utilisation proche du HSBF, mais en général le lubrifiant utilisé pour l'étude est une recette industrielle qui n'est pas partagée par le constructeur. Il est donc difficile de tirer des conclusions sur les composants les plus bénéfiques à la friction. L'étude menée par Hanna *et al.* (2007) est intéressante de ce point de vue, car elle se consacre à la comparaison entre les bases graphite ou BN et non pas simplement entre deux recettes. D'après l'auteur le graphite pur présente de très bonnes propriétés de friction, avec un COF de l'ordre de 0.1, qui reste faible pendant une longue durée. Le BN, quant à lui présente un COF plus élevé, environ 0,3, et qui ne reste pas constant. Il augmente rapidement au cours du frottement. Ces observations à l'échelle macroscopique semblent cohérentes avec les modélisations à l'échelle moléculaire de l'effort de cisaillement entre les feuilles atomiques de nitrures de bore. Celui-ci qui serait 6 fois supérieur à la force de cisaillement entre deux feuilles de graphite (Li, Zhang, Guo & Datta, 2017). En revanche le BN présente une meilleure adhésion que le graphite sur l'aluminium, ce dernier ayant tendance à se décrocher et à s'écailler, surtout lorsqu'il est utilisé pour de la déformation superplastique où il se décroche rapidement de la surface. L'auteur dans cette étude tente donc de trouver un ratio entre graphite et BN qui présenterait à la fois de bonnes propriétés d'adhérence et un COF faible et stable qu'il obtient pour un ratio de graphite - BN de 0.45. Ces résultats sont particulièrement intéressants pour le HSBF, car les paramètres des essais sont très proches de ceux rencontrés dans le procédé. En particulier le contact se fait sur une surface et non pas un point ou une ligne (contact hertzien, c'est-à-dire un contact quasi ponctuel ou linéique comme par exemple une bille sur une surface plate). Les matériaux sont identiques à ceux utilisés par Verbom et la température est très proche, les seules informations qui ne sont pas fournies par Hanna *et al.* sont la vitesse de glissement et la pression de contact. Un autre auteur s'est intéressé au travers de plusieurs études (Podgornik *et al.*, 2017; Podgornik, Kosec, Kocijan & Donik, 2015) à l'impact de la composition du lubrifiant et plus spécifiquement à l'influence de la taille des particules de BN dans le lubrifiant. L'inconvénient de cette étude est que les essais sont basés sur des contacts quasi ponctuels et ne sont donc pas nécessairement applicables pour le HSBF, mais elle peut

néanmoins fournir des indices intéressants sur le comportement du BN. L'étude se concentre sur la taille et la concentration des particules de BN dans une base de graisse de lithium. Les résultats obtenus sont cependant assez contradictoires entre les deux études, mais l'on peut tirer un enseignement général assez similaire à celui de Hanna *et al.*. Le graphite a de meilleures performances en termes de COF et de durabilité dans le temps, mais il est néanmoins possible de trouver des compositions de BN qui permettent des performances proches voir même meilleures tout en éliminant les inconvénients du graphite. Cette étude évoque d'ailleurs un autre défaut du graphite, les tâches noires qu'il laisse sur les pièces après déformation. Ghiotti *et al.* a aussi mené une étude similaire (Ghiotti *et al.*, 2017) au cours de laquelle il examine les 3 bases de lubrifiants citées plus haut, mais cette fois-ci en étudiant des recettes du commerce et dont la composition n'est donc pas détaillée. L'auteur mène une première étude comparative entre ces 3 types de lubrifiants puis dans une seconde étude (Ghiotti, Simonetto & Bruschi, 2019) il réalise une analyse plus poussée du candidat ayant présenté les meilleures performances. Les résultats de cette première étude sont que le BN ne présente pas d'assez bonnes propriétés de lubrification et de résistance au *galling*, la recette utilisée pour les tests se dégrade au-dessus de 250°C. La recette à base de disulfure de molybdène présente de meilleures performances, mais néanmoins inférieures à celle de la recette à base de graphite, *Bonderite® L-GP Aquadag*. L'étude a aussi permis de mettre en évidence les différents mécanismes de friction qui pouvaient avoir lieu, en particulier du glissement entre l'acier et la couche de lubrifiant ou un *flux intrafilm*, c'est-à-dire que c'est à l'intérieur de la couche de lubrifiant que le glissement a lieu à la manière d'un écoulement laminaire entre une surface fixe et une surface mobile.

Ces études permettent donc de montrer les phénomènes qui entrent en jeu lors du frottement pour le HSBF ainsi que tous les paramètres à surveiller lors de l'étude de la tribologie du procédé. Toute fois dans notre étude ne se concentre pas sur la caractérisation du lubrifiant, mais plutôt sur la mesure du COF. L'ensemble des échantillons qui sont utilisés dans le cadre de ce mémoire ont été fournis par Verbom : ils sont tous lubrifiés de manière identique, par le procédé utilisé en usine, ce qui permet de fixer l'ensemble des paramètres cités ci-dessus.

1.1.2 Approche mécanique de l'étude des frottements

1.1.2.1 La mesure des frottements dans les conditions de mise en forme superplastique

Il existe de nombreuses manières d'étudier les frottements, une partie de ces approches est détaillée dans la section suivante (1.2), mais celle qui nous intéresse dans le cadre de cette étude est l'approche macroscopique, qui considère le frottement d'un point de vue purement mécanique. Comme évoqué dans l'introduction de la partie 1.1, d'un point de vue mécanique le frottement est caractérisé par un coefficient μ qui correspond au rapport entre la force tangentielle à la surface de contact dans le sens opposé au glissement sur la force normale au contact. En mesurant ces deux forces, on peut en déduire le COF. Or c'est cette approche qui nous intéresse, l'objectif étant d'étudier le frottement dans le cadre des procédés de déformation superplastique, et en particulier le HSBF, et de mesurer l'influence des différents paramètres du contact et de l'environnement sur la valeur du COF. Pour être au plus proche du HSBF, les essais doivent respecter une série de contraintes :

- les essais doivent utiliser les mêmes matériaux, c'est-à-dire de l'acier à outils et de l'aluminium avec une couche de lubrifiant identique à celle utilisée pour le HSBF.
- le contact lors des essais doit être une surface suffisamment grande pour que le frottement soit homogène. En effet le lubrifiant étant réparti en gouttelettes, si la taille du contact est trop petite le frottement n'est pas homogène, nous avons estimé que la surface doit au moins être d'un ordre de grandeur supérieur à la taille d'une gouttelette de lubrifiant. Le contact lors des essais doit être surfacique pour s'approcher le plus possible des conditions réelles de la matrice du HSBF. De surcroit, le lubrifiant étant appliqué de manière non homogène (en gouttelettes), le contact doit se faire sur une zone de taille suffisante pour ne pas être influencée par la répartition du lubrifiant.
- un maximum de conditions expérimentales doivent être connues pour pouvoir être renseignées dans la table de valeurs.

Au sein de la littérature disponible sur le sujet, une partie des études s'intéresse aux frottements par une approche qualitative. Cela signifie qu'elles se consacrent plus à la variation de COF en

fonction des conditions qu'à sa mesure intrinsèque, alors que dans notre problématique c'est ce dernier point qui nous intéresse. Ces recherches sont tout de même intéressantes à étudier, car elles apportent de l'information sur les paramètres qui influencent la friction, comme la pression ou la vitesse de glissement, ainsi que l'influence qu'ont ces paramètres. Une liste des principales recherches menées sur le sujet a donc été établie et condensée en un tableau donnant un rapide aperçu des conditions expérimentales et des objectifs de chacune de ces recherches (voir le tableau 1.1).

Les études recensées dans ce tableau sont principalement celles qui utilisent un lubrifiant solide lors de l'essai et qui ont des conditions expérimentales proches du HSBF, surtout les cas où la pression est connue. Les couleurs indiquent pour chaque condition expérimentale si elle correspond à l'objectif de notre étude, qui est la réalisation d'une table de COF en fonction des variables les plus significatives, le vert correspondant aux conditions les plus proches et le rouge indiquant une condition qui ne correspond pas à nos objectifs et qui rend l'étude potentiellement moins exploitable.

1.1.2.2 Les variables significatives dans la mesure des frottements

Les études présentées sur le tableau 1.1 permettent d'établir une bonne base sur les différentes variables qui peuvent influencer le COF. La température en particulier est un paramètre présent dans la quasi-totalité des études, mais son influence n'est pas la même dans tous les cas. Dans les études les plus proches du cadre qui nous intéresse (Ghiotti *et al.*, 2019 ; Hanna, 2009 ; Shi *et al.*, 2017) avec le BN pour lubrifiant, le COF diminue lorsque la température augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur proche de 300°C. Au-dessus de cette température, le COF augmente brutalement, et cette augmentation est souvent accompagnée de *galling*. 300°C semble donc être une température critique pour la plupart des lubrifiants à base de nitrure de bore, et certaines recettes semblent même être incapables de fournir des performances suffisantes à partir de ce seuil. Par exemple *Pulve™ BN D 60 A*, utilisé dans l'étude de Ghiotti *et al.* (2017), n'a pas été soumis à tous les tests que les autres lubrifiants ont subis à cause de ses mauvaises performances au-dessus de 300°C.

Label	année	matériau moule	matériau pièce	Température (°C)	intervalle de pression	intervalle de vitesses (mm/s)	distance de glissement	cours	lubrifiant	procédé étudié	procédé de test	COF moyen mesuré	objet du focus
huttunen2018	2018	tool steel H13	Alu 6082	400-450-500	500-800 MPa	50	30min & 60 min d'essai	30min & 60 min d'essai	non	extrusion	pin-on-disc	0,4 à 0,6 + pics à plus de 1,5 (galling)	usure sur le long terme dans le cadre de l'extrusion
ghiotti2019	2019	EN X38CrMoV5-1 alloy steel	AA7075	200-450	5-10MPa	oct-50	14mm ?	60mm	graphite (Bonderite® L-GP Aquadag)	hot stamping	HFSD (très similaire)	0,25 à 0,5	influence des paramètres et du galling
shi2017	2017	tool steel H13	AA5754	20-350	3,3-12,8 MPa	25-150	8mm	125mm	Forge Ease 278 (BN?)	hot stamping	banc très similaire	0,15 vers 0,05 jusqu'à 250°C, 0,4 à 0,6 après	performances d'un lubrifiant pour le hot stamping et présentation banc de mesure
podgornik2017 (reciprocating ball)	2017	tool steel	AA2014 extrudé	20	Hertz 500 MPa	50	?	30m	graphite et différentes tailles de particules de BN	hot forming	reciprocating ball	0,15 à 0,2	savoir si le BN peut remplacer le graphite dans le formage à chaud de l'aluminium
podgornik2017 (load scanning)	2018	DIEVAR tool steel	AA2014 extrudé	20-400	Hertz (20-2800N)	10	hertz load scanning	?	graphite et différentes tailles de particules de BN	hot forming	load scanning (crossed cylinders)	0,2 à 0,6	savoir si le BN peut remplacer le graphite dans le formage à chaud de l'aluminium
ghiotti2017	2017	EN X38CrMoV5-1 alloy steel	AA6016	300-400	5-10-15 MPa	10-25	16mm	90mm	3 recettes testées : BN, Mb, Graphite	hot forming	HFSD (très similaire)	0,05 graphite, 0,2 reste, 1 quand galling	comparaison de 3 recettes de lubrifiant, adhésion, modes de friction, ...
farrell2017	2017	52Ni-27Fe-18Cr	Ti-6Al-4 V	900	*	*	*	*	*	SPF	formage dans 16 cavités indépendants pour tester 16 recettes	*	comparaison pratique qualitative de 16 recettes de lubrifiants
Cui2016	2016	P20	AA6061 (magnesium-silicon)	350-545	Hertz	?	~3*3mm	?	non	SPF	étiage bande pendant test de COF	1,5	influence de la vitesse de déformation sur le COF
Tomala2014	2014	tool steel	Al-Si coated steel	500-800	6,6-20 MPa	30	4mm-augmente en continu	~50mm	bismuth base //MoS2 base //BN-graphite	hot steel forming	pin plat ET 'O' en rotation autour de son centre	pour BN 0,2 à 0,6	performance de différents lubrifiants
Galli2013	2013	P20	AA5083	0-450	?(0,22N)	?	10mm ?	~100mm	non	hot forming	étiage bande pendant test de COF	0,6 à 1,5	phénomènes microscopiques lors de l'adhésion
Yanagida2010	2010	SKD61	SPHC (0.15% C-0.6% Mn) steel	800	15-45 MPa	5-20	20mm	500mm	non	hot steel forming	bande tirée à travers un four puis entre 2 mâchoires	0,2	caractériser l'influence de chaque variable, vitesse, pression, température
Hanna2009	2009	P20	AA5083	0-450	?(100N-50N)	?	15mm	15mm	tes: de différentes recettes de BN et graphite	SPF	banc oscillant très proche du notre	0,02 à 0,14	caractérisation du COF selon les variables et le lubrifiant

Figure 1.1 Comparatifs des bancs d'essai de la littérature les plus pertinents pour l'étude. Les couleurs indiquent pour chaque condition expérimentale si elle correspond à l'objectif visé par cette étude

La vitesse de glissement est aussi un des paramètres qui est souvent étudié, mais son influence est plus ambiguë. Certaines études lui donnent une influence sur le COF (Ghiotti *et al.*, 2019) alors que d'autres non (Medea *et al.*, 2015; Shi *et al.*, 2017). Cependant parmi ces études,

aucune ne réalise d'essai à des vitesses de glissement très faibles, le minimum observé est de 10mm/s (Ghiotti *et al.*, 2019). La vitesse dans le HSBF est au maximum de 10 mm/s, mais la moyenne est plus proche de 3 mm/s (voir partie 2.2). Aucune de ces données n'est donc réellement pertinente pour prédire le comportement du COF au cours du procédé que l'on étudie.

La pression est un autre paramètre qui nous intéresse, comme ce paragraphe va le montrer. Mais tout d'abord il est important de clarifier ce que l'appellation pression signifie dans ce mémoire. D'un point de vue microscopique, la surface de contact réelle est différente de la surface apparente. Les deux pièces en contact n'étant pas parfaitement plates, le contact ne se fait que sur des zones réduites, sur lesquelles la pression n'est pas une valeur constante. Mais la pression que nous considérons est la pression d'un point de vue mécanique à l'échelle macroscopique, définie par le rapport entre la surface de contact apparente et la force normale, car c'est ce paramètre que l'on peut mesurer et étudier pour le SPF. L'influence de la pression sur le COF varie selon la littérature. Une partie des études ont des résultats de COF qui augmente avec la pression (Podgornik *et al.*, 2017) alors que d'autres montrent au contraire une diminution du COF avec l'augmentation de la pression (Medea *et al.*, 2015 ; Ghiotti *et al.*, 2017, 2019). Ces trois dernières études ont toutes été réalisées sur le même banc d'essai de l'université de Padoue (*niversità degli Studi di Padova (UNIPD), Padoue, Italie*). Il s'agit du seul banc existant s'intéressant aux conditions proches du HSBF avec un contact surfacique et qui ne réalise pas un mouvement alternatif (Hanna par exemple utilise un banc d'essai oscillant qui produit un mouvement alternatif à une certaine fréquence). En revanche l'étude menée par Podgornik *et al.* en 2017 utilise un contact ponctuel pour ses essais. Cette différence dans les paramètres expérimentaux est peut-être la cause de cette opposition dans les résultats. Le banc d'essai conçu dans notre étude permet qu'un deuxième banc d'essai à contact surfacique puisse apporter des données et étayer l'une ou l'autre de ces observations (voir partie 4).

La distance de glissement est un paramètre très peu étudié dans la littérature. C'est un paramètre qui peut porter à confusion, car il peut être facilement confondu avec ce qui est appelé dans ce mémoire la *course*. Plusieurs études emploient le terme de distance de glissement pour faire

référence à la course, car la nuance entre les deux n'est pas prise en compte ou considérée comme significative par la majorité de la littérature. Les définitions que l'on considère dans ce mémoire sont précisées ci dessous, et reprises sur le schéma 1.2

- la distance de glissement représente la longueur de frottement vue par un point de la pièce. Elle correspond donc à la longueur de l'*outil*, c'est à dire du composant qui représente le moule dans le procédé.
- la course représente la distance parcourue par l'outil pendant l'essai sur la pièce.

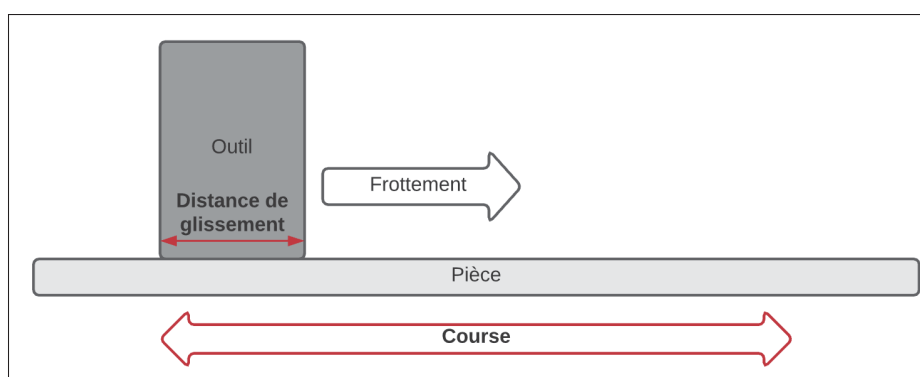


Figure 1.2 Schéma explicatif des définitions de course et de distance de glissement utilisées dans ce mémoire

Certaines études montrent que la tendance du COF est constante durant la course (Shi *et al.*, 2017 ; Yanagida, Kurihara & Azushima, 2010), c'est à dire que dans ces études le COF est indépendant de la distance de glissement. À chaque fois l'outil parcourt une nouvelle portion de la pièce, et la distance de glissement est la même en tout point et le COF reste constant. Les conditions où l'on observe cela sont lorsqu'il n'y a pas de galing. Pour d'autres études dans des conditions expérimentales différentes une variation du COF est observé au cours de la course. Le banc d'essai conçu par *General Motors* (Hanna *et al.*, 2007 ; Hanna, 2009) possède une course très faible, de l'ordre d'une dizaine de millimètres d'après les images, mais une distance de glissement très élevée, car l'outil fait des allers-retours sur la pièce. Dans ce cas on observe donc logiquement une détérioration progressive du lubrifiant au cours de l'essai. Mais dans certaines études (Ghiotti *et al.*, 2017, 2019) pour lesquelles la distance de glissement est constante au cours de l'essai, on observe qu'il subit d'importantes variations le long de la

course. Cela serait, d'après les auteurs, dû au fait que le lubrifiant se décroche de la pièce et s'accumule devant l'outil au cours du mouvement, ce qui entraîne le cisaillement de la couche de lubrifiant et la décroche de la pièce. Une autre cause de variation du COF pour une distance de glissement constante apparaît en conditions de galing : dans ce cas la surface de l'outil est modifiée au cours du mouvement, des accumulations d'aluminium arrachées à la pièce augmentent sa rugosité et la friction générée. Ce phénomène est particulièrement visible et étudié pour les recherches qui se concentrent sur le contact acier aluminium sans lubrification comme Gali, Riahi & Alpas (2015) ou Jerina & Kalin (2014). La distance de glissement semble donc assez cruciale pour caractériser le contact, quand sa valeur augmente le COF augmente, et pour remplir la table de valeur de COF cette donnée est nécessaire. En revanche la course n'est pas un élément nécessaire étant donné qu'en théorie au cours des essais l'apparition de galing devrait être limitée, le COF devrait rester constant au cours de la course. C'est un point qui est néanmoins à surveiller, et potentiellement à corriger en fonction des résultats si cette hypothèse n'est pas vérifiée et que le COF varie au cours de la course.

Les paramètres cités ci-dessus, la température, la pression, la vitesse de glissement, et la distance de glissement sont les variables qui reviennent le plus souvent dans la littérature et semblent avoir le plus d'impact sur le COF. Ce sont aussi les variables qui sont plus facilement intégrées aux logiciels de simulations par éléments finis d'après les communications qui ont été faites avec le service client de Autoform. D'autres paramètres sont cités par quelques études et sont tout de même à surveiller. L'influence de l'humidité sur les conditions d'essai et les propriétés tribologiques du lubrifiant (Chen, He, Xiao & Kim, 2018), la dégradation du lubrifiant à haute température et la ductilité du matériau de base (Ghiotti *et al.*, 2019) sont quelques exemples. Une autre variable qui a été étudiée est l'influence de la déformation sur la friction, mais elle a été étudiée uniquement dans le cas du frottement sans lubrification (Cui, 2016; Gali, Riahi & Alpas, 2013) sur un banc d'essai de l'université de Windsor (*University of Windsor, Ontario, Canada*).

1.2 La mesure du frottement

Dans la plupart des études ci-dessus le frottement a dû être mesuré dans des conditions d'essai spécifiques. Étant donné qu'aucun standard n'existe pour mesurer le COF dans les conditions qui nous intéressent (Podgornik *et al.*, 2017), chaque étude a dû utiliser sa propre méthode, allant de la modification d'un standard existant à la conception d'un tout nouveau système de mesure. Ces différentes solutions sont donc détaillées dans les parties suivantes, dans le but de trouver un système qui permet de réaliser les mesures nécessaires pour notre étude, ou si aucune solution n'existe, de faire un inventaire des solutions existantes sur lequel il est possible de se baser pour fabriquer notre propre système de mesure.

1.2.1 Les bancs d'essai de la littérature

Avant de comparer les appareils de mesure existants, il faut d'abord s'intéresser aux différents objectifs qu'ils visent. On peut tout d'abord de manière générale distinguer les bancs d'essai qui servent à mesurer le COF de manière qualitative ou relative afin par exemple de comparer plusieurs lubrifiants entre eux ou observer l'influence de certains paramètres, et ceux qui servent à mesurer le COF de manière absolue afin d'en connaître la valeur pour une application donnée (par exemple pour renseigner une simulation, comme dans notre cas, ou caractériser les performances d'un lubrifiant (Ghiotti *et al.*, 2017)). Dans la première catégorie, le type de contact est le plus souvent ponctuel (cylindre contre cylindre ou bille sur une surface plane par exemple). La raison est que ces contacts sont très simples à réaliser, la question du parallélisme des surfaces en contact ne se pose pas. On peut citer en premier lieu le montage le plus proche des standards classiques, un système de pin-on-disc adapté pour les hautes températures (Huttunen-Saarivirta, Kilpi, Hakala, Metsäjoki & Ronkainen, 2018 ; Ghiotti, Sgarabotto & Bruschi, 2013). Le principe est qu'un outil, le *pin*, entre en contact avec la surface d'un disque en rotation. L'objectif de ce type d'appareil est d'étudier l'usure sur le long terme, le design avec le disque permettant d'avoir une course ou distance parcourue par l'outil infinie étant donné que l'outil parcourt un cercle. Ce type de montage est ainsi plus souvent utilisé pour étudier des procédés comme l'extrusion d'aluminium où il est important de simuler le contact prolongé. Le contact

exercé par le *pin* n'est pas toujours ponctuel, son extrémité peut dans certains cas être plate, mais sa surface reste très faible (diamètre de 4 mm pour l'étude de (Ghiotti *et al.*, 2013)) et n'est pas suffisante pour les essais que l'on souhaite réaliser. Un autre concept qui a la particularité de permettre d'étudier l'influence de la charge sur le COF, nommé *load scanning test rig* (Podgornik *et al.*, 2017) consiste en deux cylindres orientés à 90 degrés qui glissent l'un contre l'autre (figure 1.3). Chaque point des cylindres a donc un historique de frottement unique. Ce banc permet donc de tester l'influence de la force exercée sur le COF, mais étant donné que le contact est un contact hertzien il n'est pas représentatif du contact que l'on observe en SPF. Il ne permet pas d'étudier la pression apparente pour pouvoir quantifier son impact sur le COF.

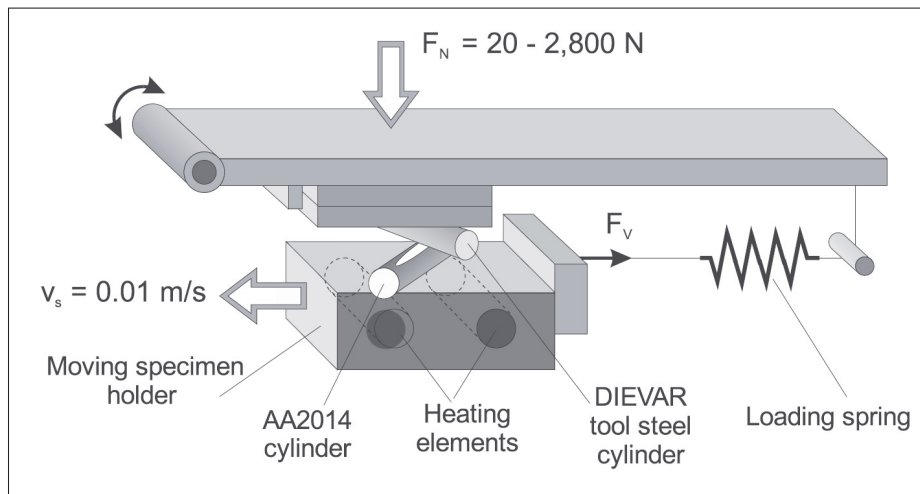


Figure 1.3 Schéma du *Load scanning test rig*
Tirée de Podgornik *et al.* (2017)

Le banc d'essai conçu à l'université de Windsor, utilisé pour plusieurs recherches (Cui, 2016; Gali *et al.*, 2013), présente un concept très intéressant. Il permet de mesurer le coefficient de frottement pendant la déformation plastique de l'aluminium. Ce banc d'essai pourrait être très intéressant pour étudier l'influence de la déformation sur le COF et l'adhérence du lubrifiant, mais l'inconvénient majeur est que le contact est aussi hertzien, et que l'effort normal est très faible, inférieur à 1N, ce qui ne correspond pas du tout aux intervalles qui nous intéressent dans le procédé HSBF (voir partie 2.1). Le schéma de ce banc est montré sur la figure 1.4. Les essais réalisés sur ce banc ne concernaient que des contacts directs acier aluminium, et les résultats

tendent à montrer que le COF augmente avec la vitesse de déformation de la pièce, mais les incertitudes sont assez élevées. S'il advient à la suite de notre étude qu'il serait intéressant d'approfondir le sujet du galing pendant la déformation de l'aluminium, les deux thèses de Gali (2017) ; Cui (2016) pourront apporter une quantité d'informations conséquente sur le sujet, mais qui n'entrent pas dans le cadre de ce mémoire.

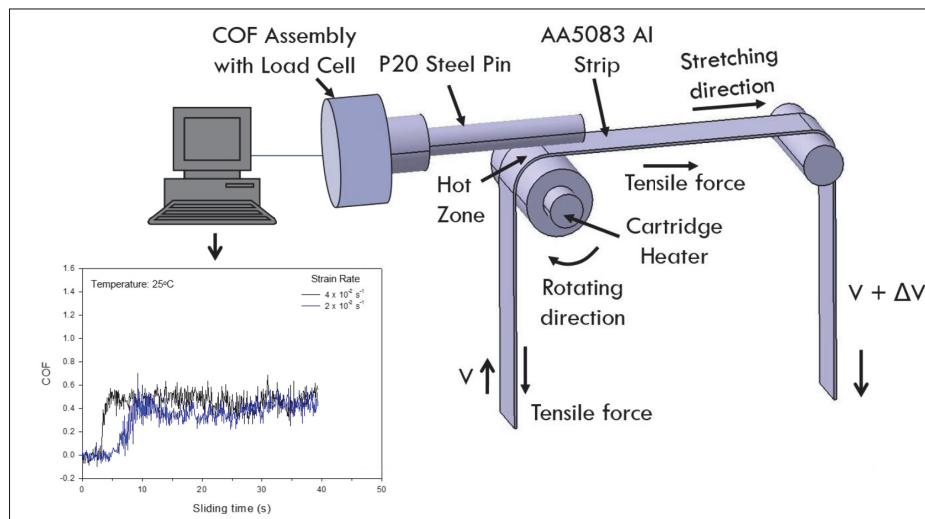


Figure 1.4 Schéma du *forming tribo-simulator* ou tribo-simulateur de mise en forme
Tirée de Gali (2017)

La suite des bancs d'essai présentés traite de ceux ayant une surface de contact significative permettant de calculer la pression de contact et d'avoir un contact homogène sur des gouttelettes de lubrifiant. En premier lieu il est possible de citer le montage de Shi *et al.* (2017) qui tire parti d'une machine de traction à chaud dont l'utilisation est intelligemment détournée pour mesurer le COF. Le principe est qu'une charge normale prédéterminée est appliquée sur la pièce en forme de longue bande d'aluminium par un montage intégré au four de la machine, et cette bande est tirée par le système de traction de la machine. Ce dernier est conçu pour mesurer l'effort de traction, en combinant cette donnée avec l'effort normal appliqué par le montage le COF est facilement calculé (1.5).

Parmi les avantages de ce banc d'essai on peut citer qu'il est facilement déplaçable, léger et peu coûteux à fabriquer par rapport à un montage qui nécessite son propre système d'acquisition de

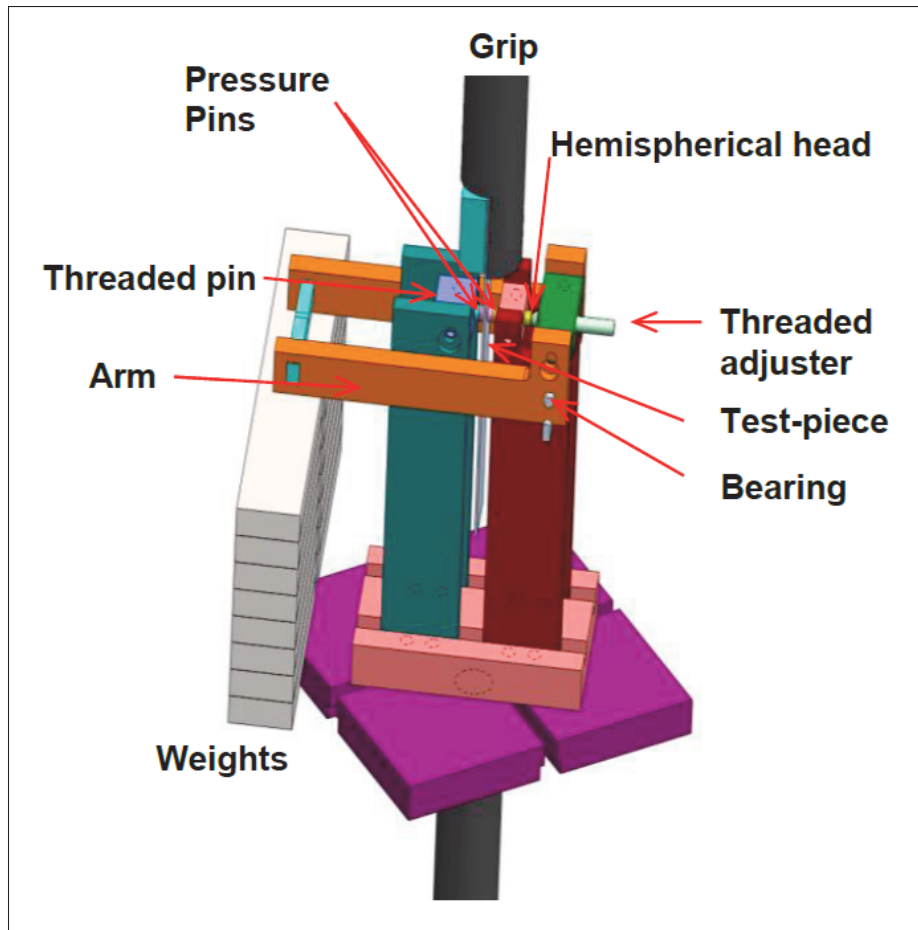


Figure 1.5 Illustration du montage de friction
Tirée de Shi *et al.* (2017)

mesure, qu'il est contenu dans une enceinte à haute température qui assure que tout le montage est à la température ciblée, qu'il permet de tester une course assez grande et qu'il permet de mesurer la plupart des variables que l'on souhaite étudier. En revanche il ne permet pas de faire plusieurs passages sur la même surface : la distance de glissement est fixe (voir partie 1.1.2.2 pour plus de détails à ce sujet), et la surface de contact est très petite (cercle de 8mm diamètre). En complément l'échantillon doit être mis en place avant le chauffage du four, ce qui implique que le lubrifiant est exposé à la haute température pendant toute la durée du chauffage, alors que dans le HSBF ce n'est pas le cas.

Yanagida *et al.* (2010) présente dans son étude un concept plus traditionnel, mais néanmoins très intéressant. Une bande d'aluminium est tirée à travers un four afin d'atteindre une température donnée puis entre deux mors fixe. Le frottement ainsi généré est particulièrement intéressant, car il remplit un grand nombre des conditions de cette étude. Les surfaces de contact sont deux rectangles de 20 par 22mm, ce qui est une surface qui permettrait d'assurer un contact homogène pour un lubrifiant réparti en gouttelettes. En revanche les mors ne sont pas chauffés et peuvent alors fausser les mesures, et un second défaut qui peut potentiellement perturber les mesures est le parallélisme des mors qui doit être parfait et le rester lorsque l'effort de frottement est exercé afin que la pression de contact soit homogène sur toute la surface.

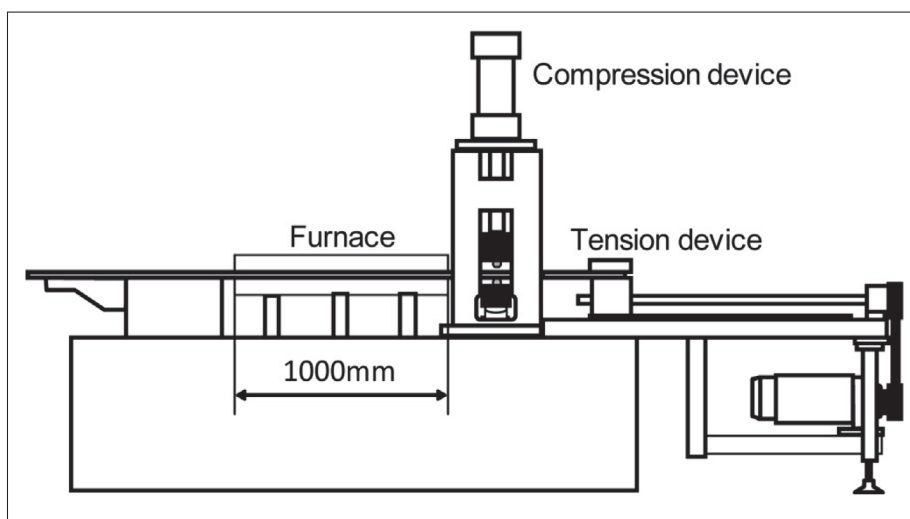


Figure 1.6 Schéma du banc d'essai de la *hot flat drawing test machine* ou machine d'essai d'emboutissage à chaud
Tirée de Uda *et al.* (2016)

La même machine a été utilisée par Uda *et al.* (2016) dans l'objectif de tester différents lubrifiants pour l'emboutissage à chaud d'acier. Les matériaux et les conditions d'expérience ne sont donc pas les mêmes que pour le HSBF, mais l'étude présente tout de même des résultats intéressants pour observer la démarche utilisée : les auteurs ont mis au point plusieurs recettes grâce aux essais de frottement, puis ont validé ces recettes avec des essais d'emboutissage. Cette démarche pourrait être une seconde étape à la suite de cette recherche afin d'utiliser le banc d'essai conçu dans le cadre de notre étude pour créer de nouveaux lubrifiants plus performants.

Deux bancs d'essai restent encore à présenter, les deux derniers possèdent un design très similaire à celui qui a été conçu dans notre étude, avec néanmoins quelques points que nous avons tenté d'améliorer. Le plus ancien de ces deux bancs est celui conçu par General Motors utilisé pour plusieurs publications (Hanna *et al.*, 2007 ; Hanna, 2009). C'est un banc d'essai qui utilise une surface de contact de surface non indiquée, mais qui d'après les images est du même ordre de grandeur que ce qui nous intéresse. La particularité du montage, c'est d'ailleurs le seul de tous les bancs cités à posséder cette caractéristique, est que la liaison entre l'outil qui exerce le contact et le reste de la machine est une liaison rotule. Elle est réalisée par une bille logée dans une indentation sphérique dans l'outil qui permet à ce dernier de tourner librement et ainsi d'aligner sa surface de contact avec l'échantillon. Le principe de fonctionnement de cette liaison est visible sur le schéma 1.7.

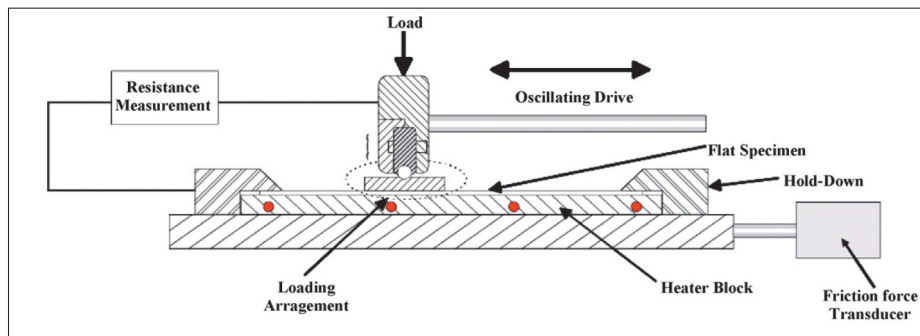


Figure 1.7 Schéma de la *reciprocating flat-on-flat tribo-test machine* ou machine d'essai de frottement plat sur plat à mouvement alternatif
Tirée de Hanna (2009)

Les études menées par Hanna sur ce banc sont très intéressantes, d'autant plus qu'elles concernent le SPF et les mêmes matériaux que ceux utilisés pour le HSBF pour l'outil et la pièce, et leurs résultats ont été cités à plusieurs reprises dans les parties précédentes de la revue de littérature. Ce banc d'essai possède néanmoins un défaut pour les essais que l'on souhaite réaliser, le mouvement est alternatif avec une course très faible. Les variables comme la vitesse et la distance de glissement sont donc quasiment impossibles à déterminer et il est impossible de connaître le COF en fonction de ces paramètres.

Et enfin le banc d'essai le plus intéressant pour cette étude et le plus proche de celui qui a été conçu est celui conçu par Ghiotti, Bruschi, Sgarabotto & Medea (2014). Ses objectifs sont très similaires au nôtre à la différence près que le procédé étudié est du formage à chaud et non pas SPF, et que le but n'est pas de remplir une table de COF en fixant les variables matériau et lubrification, mais au contraire d'étudier l'influence de ces deux variables. L'appareil de mesure consiste, de même que celui conçu lors de notre étude, à une machine avec une table chauffante mobile et un système de pression qui applique un effort normal mesuré par une cellule de charge. Les solutions techniques choisies sont en revanche assez différentes, en particulier au niveau du système de pression. Il n'y a pas dans ce système de mécanisme assurant le parallélisme des surfaces en contact et assurant une répartition de pression homogène sur la surface, contrairement au banc de Hanna *et al.* (2007).

Un dernier banc d'essai qu'il est intéressant de citer, bien qu'il ne permette pas de mesurer le COF, est celui de Farrell *et al.* (2017). Son objectif est de comparer les performances de plusieurs recettes de lubrifiants, et pour cela l'approche qu'il a utilisée est très éloignée des autres méthodes citées ci-dessus : aucune mesure d'effort ou de COF n'est faite, la manière de comparer les lubrifiants est en formant des pièces dans des matrices identiques et en comparant leur distribution d'épaisseur. En effet la distribution d'épaisseur de la pièce finale est grandement influencée par le COF, qui s'il est faible permet l'écoulement de la matière et permet d'obtenir une distribution d'épaisseur homogène 0.3b. Pour faciliter les essais, il utilise une matrice présentant 16 cavités identiques, qui sont donc formées simultanément, mais restent indépendantes les unes des autres de manière à pouvoir utiliser une recette de lubrifiant dans chaque cavité. Cette étude pourrait fournir de nombreuses données intéressantes sur les compositions les plus intéressantes dans un cas réel de mise en forme superplastique, mais il y a très peu d'études disponibles avec cet appareil et elles ne donnent qu'une présentation de la méthode de test sans détails sur les résultats.

1.2.2 Bilan de la littérature et de ses lacunes

En conclusion un certain nombre d'études ont été réalisées sur l'étude des frottements aluminium acier à haute température et l'étude de la lubrification dans ces conditions. Ces études ont fourni une grande quantité de données intéressantes sur les types de lubrifiants et leur performance pour le SPF, mais aucune étude ne se consacre à identifier tous les paramètres qui influencent le COF puis à réaliser la cartographie complète du COF en fonction de ces paramètres. On retrouve souvent dans la littérature l'étude de l'influence de l'une ou l'autre de ces variables, mais chaque étude ayant ses propres conditions expérimentales il est impossible de corréliser toutes ces données entre elles pour avoir une connaissance complète du COF. Notre étude pourra donc permettre d'apporter cette connaissance et ainsi compléter la littérature existante sur la tribologie du SPF. Afin de réaliser cette étude, les bancs d'essais existants ont été étudiés. Plusieurs modèles ressortent comme ayant un potentiel pour réaliser les mesures, mais tout de même avec des inconvénients dans chaque cas. Ces connaissances apportées par ces différents appareils pourront ainsi être mises à profit dans cette étude afin de concevoir un banc d'essai pour réaliser les mesures souhaitées. L'appareil ainsi créé pourra de plus par la suite être mis à profit pour approfondir l'étude du HSBF, il reste de nombreux sujets encore très peu explorés par la littérature comme l'influence des modes d'application des lubrifiants, la préparation de la surface avant application (par exemple le préchauffage de la surface pour augmenter sa mouillabilité), l'influence de la répartition (en gouttelettes ou en une couche plus ou moins épaisse) et bien d'autres paramètres encore. La partie suivante détaille donc la conception de ce banc d'essai afin de, par la suite, présenter sa calibration, puis les résultats obtenus.

CHAPITRE 2

CONCEPTION ET FABRICATION D'UN APPAREIL DE MESURE DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT

La revue de littérature a permis de mettre en évidence qu'aucun équipement de mesure n'est disponible pour réaliser les essais de cette étude. Il faut donc que nous concevions notre propre banc d'essai, en nous basant sur les machines similaires présentées dans la littérature et sur l'étude des besoins spécifiques au HSBF, afin de répliquer au mieux les conditions de frictions subies par la pièce au cours de la mise en forme. Mais l'objectif est aussi de concevoir un banc d'essai polyvalent qui permet d'apporter une nouvelle manière de caractériser les frottements à haute température. Et aussi d'explorer d'autres domaines : caractériser des lubrifiants, étudier le frottement dans d'autres procédés de mise en forme à chaud, . . .

À partir de ces éléments, une analyse du besoin a été menée. Un premier point à noter est que les échantillons que l'on étudie sont lubrifiés et sont donc recouverts d'une pulvérisation de nitrure de bore. Cette couche n'est pas homogène comme on peut le voir sur la vue au microscope de la figure 2.1. Il faut donc que le contact se fasse sur une surface et non pas de manière ponctuelle, ce qui de plus facilite le calcul de la pression de contact.

Ensuite le banc d'essai doit permettre l'étude de l'influence de plusieurs variables sur le COF. Celles-ci ont été mises en évidence dans la revue de littérature :

- la pression de contact.
- la vitesse de glissement ou vitesse relative.
- la température.
- la distance de glissement.

Le banc d'essai doit donc générer le frottement selon une surface de contact et permettre de faire varier et de mesurer plusieurs variables. La suite logique est de s'interroger sur la plage sur laquelle ces valeurs doivent varier, c'est donc le thème de la partie suivante.

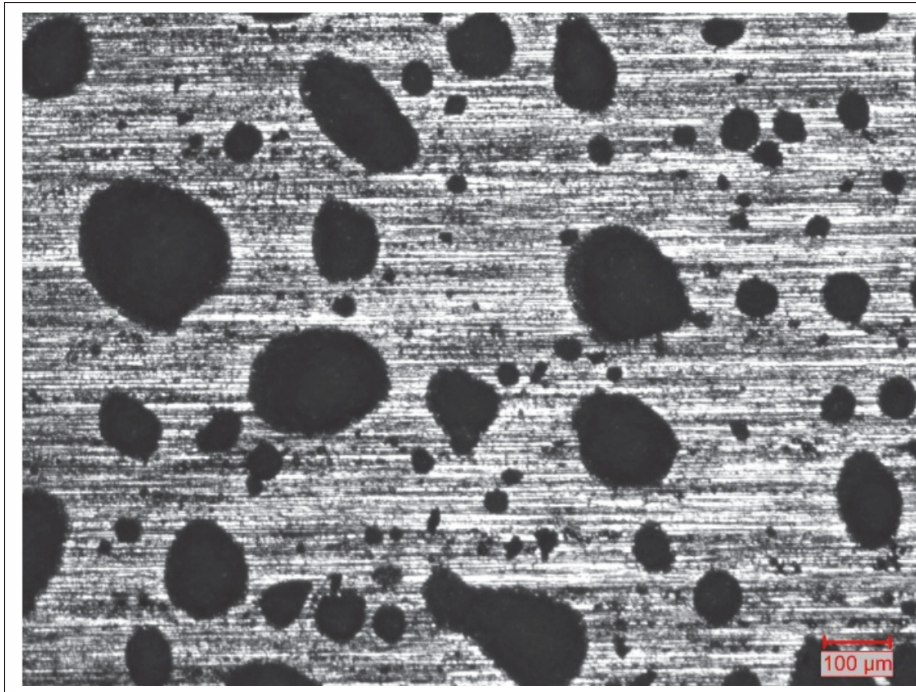


Figure 2.1 Vue au microscope de la couche de lubrifiant appliquée par Verbom sur les pièces d'aluminium pour le procédé HSBF

Tiré de Le Royer (2017b) (2017)

Afin de clarifier les explications qui suivent, un schéma présentant les trois organes principaux du banc est visible sur la figure 2.2 et la zone éléments de la zone d'essai sur la figure 2.3.

2.1 Plages de mesure

Il est important pour concevoir le banc d'essai de connaître les capacités qu'il doit avoir, cela conditionnant la manière dont il est conçu. Les plages de valeurs de ces variables lors du HSBF ont donc été étudiées afin de déterminer sur quels intervalles le banc d'essai doit permettre de les mesurer. Des simulations ont été réalisées par Verbom (Figures 2.4, 2.5, 2.6) pour estimer les maximums atteints au cours du procédé pour la pression, la vitesse et la distance de glissement. Pour la température une série de thermocouples disposés sur la pièce lors de la mise en forme ont permis de montrer que les températures lors du procédé étaient comprises entre 450°C et 500°C. Et pour la distance de glissement étant donné que pour l'augmenter il suffit que le banc

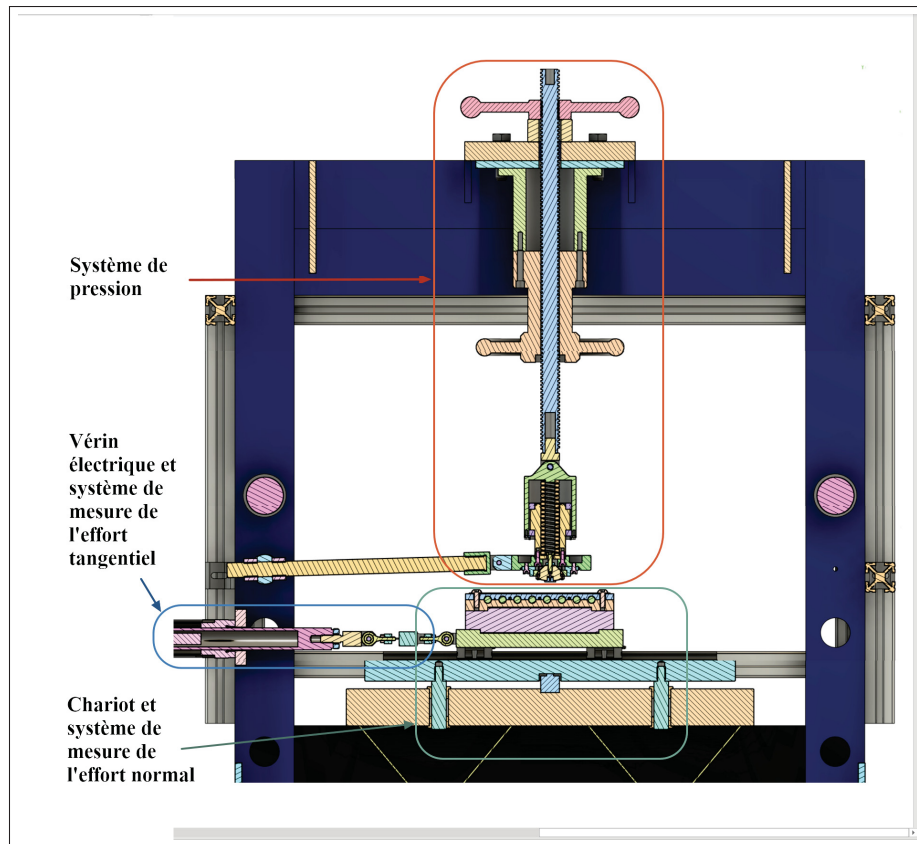


Figure 2.2 Schéma des 3 parties principales du banc d'essai

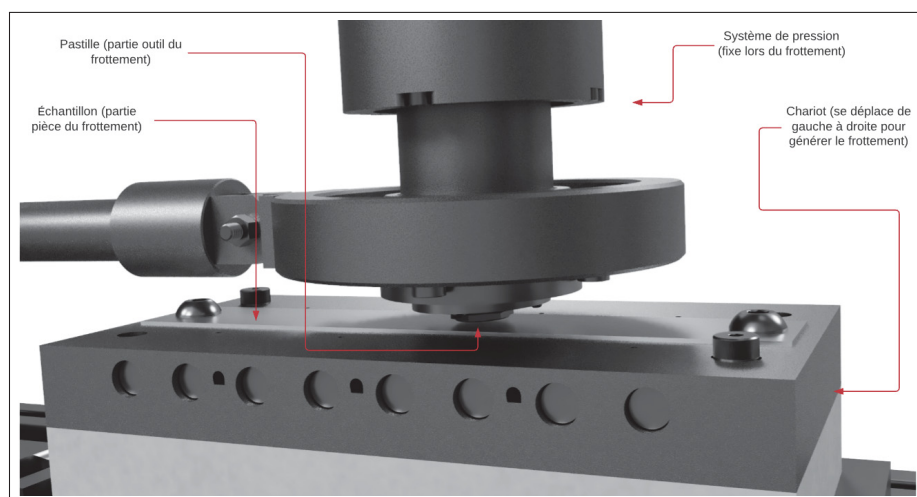


Figure 2.3 Schéma de la zone d'essai

d'essai fasse plus d'allers-retours il n'est pas nécessaire de s'en préoccuper. Ces informations nous fournissent les valeurs maximales de ces variables, mais pas les valeurs minimales. Elles sont triviales pour certaines, pour la température il s'agit de la température ambiante et pour la pression il est possible de mettre une charge normale aussi faible que souhaité, c'est donc 0 MPa. Mais pour d'autres variables, il est plus complexe de définir la valeur minimale, elles ne peuvent pas simplement être mises à zéro : pour la distance de glissement, il est nécessaire d'avoir une surface de contact minimale qui soit suffisamment grande pour permettre un contact homogène, comme expliqué dans la revue de littérature. La distance de glissement a donc initialement été fixée à 10 mm, mais ce point est sujet à modification au cours de la suite de la conception et des essais (voir la partie 2.4.1 pour la conception du porte-pastille et le chapitre 4 pour la définition de sa forme finale). Enfin pour la vitesse, il n'est pas toujours possible de la réduire indéfiniment, lors de la conception le phénomène appelé *stick-slip* en anglais, traduisible par collé-glissé, a empêché de réduire indéfiniment la vitesse. D'après les communications avec le fabricant du vérin *Electromate*, la vitesse minimale dépend de la rigidité du montage, un compromis a donc été choisi entre le coût d'un montage très rigide et la vitesse minimale, définissant la celle-ci à 0.5 cm/s.

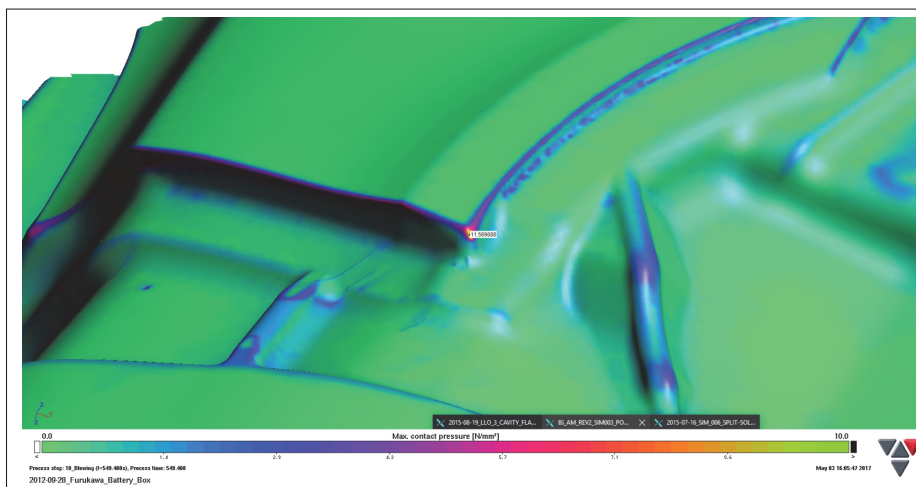


Figure 2.4 Image d'une simulation pour déterminer la pression de contact maximale lors du HSBF

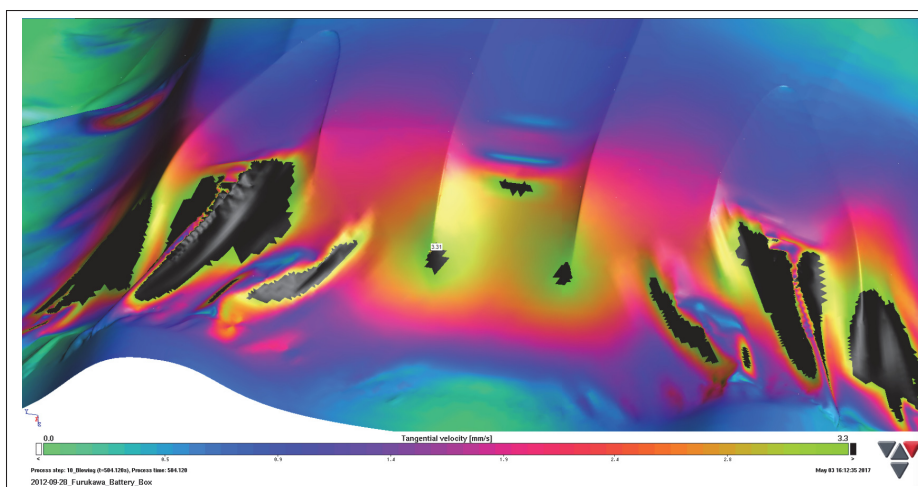


Figure 2.5 Image d'une simulation pour déterminer la vitesse de glissement maximale lors du HSBF

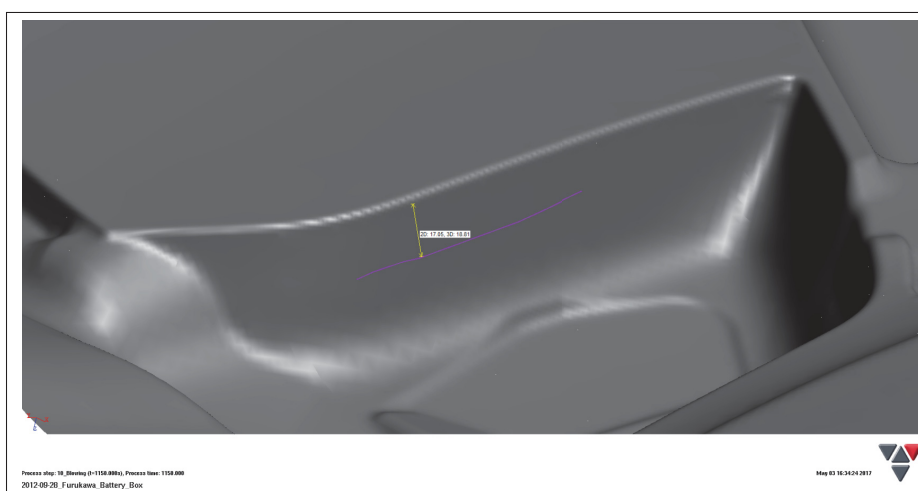


Figure 2.6 Image d'une simulation pour déterminer la distance de glissement maximale lors du HSBF

Un dernier point à définir est la course du chariot. En théorie, le COF est supposé rester constant le long de la course si l'on considère que la pastille reste dans le même état au cours du mouvement. C'est-à-dire que si elle ne s'use pas, étant donné que la pastille parcourt au long du trajet une surface encore vierge seule la longueur de la pastille influence le COF. Autrement dit si l'on se place sur un point de l'échantillon et que l'on observe le frottement, la distance

de frottement que ce point voit passer est la longueur de la pastille. Dans ces circonstances la course ne permet que d'observer la variabilité du COF, et plus elle est grande, mieux elle peut être estimée. En revanche si l'on se place dans des conditions de galing avec endommagement de la pastille ou décrochement et accumulation de lubrifiant l'état de la pastille évolue au cours de la course et peut modifier le COF. Une course longue permet alors d'observer la dégradation de la pastille en fonction de la distance. Au vu de ces deux éléments, la course doit donc être suffisamment longue pour l'observation de ces deux phénomènes. Cela se traduit par une distance de plusieurs fois la longueur de la pastille, idéalement un ordre de grandeur au-dessus. Mais une course longue implique aussi un chariot plus long et encombrant et une zone de chauffage plus grande et plus difficile à maintenir à température homogène. Un compromis a donc été établi, principalement en considérant les contraintes de place disponible, pour une course de 90mm, une longueur raisonnable, mais tout de même quasiment 10 fois supérieure à la longueur de la pastille. Les paramètres sont résumés sur le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Tableau récapitulatif des plages de mesure que le banc doit être capable de mesurer

Grandeur	Borne inférieure	Borne supérieure	Unité
Vitesse	0,5	10	mm/s
Température	20	500	°C
Pression	0	10	Mpa
Distance de glissement	10	-	mm
Course	0	90	mm

2.2 Cahier des charges

Une analyse fonctionnelle a été menée lors d'une étude précédant ma maîtrise (Le Royer, 2017a). Elle a servi de base pour la conception du banc d'essai. Le cahier des charges a aussi été défini dans ce rapport.

Cette étude a aussi recherché les solutions techniques pour apporter une solution à chacune des contraintes du cahier des charges, mais une grande majorité des solutions envisagées ont été modifiées durant la conception.

2.3 Fonctionnement général et conception

Le principe d'action de base du banc d'essai consiste en un chariot mobile qui se déplace de droite à gauche, mû par un vérin. Sur ce chariot une pastille, elle fixe, exerce un effort normal et crée la friction lors du mouvement du chariot. Afin de pouvoir changer l'échantillon d'aluminium et la pastille, celle-ci peut être montée ou descendue. Des capteurs permettent de mesurer l'effort tangentiel nécessaire pour vaincre le frottement et l'effort normal. Le banc d'essai peut ainsi être décomposé en 3 sous-ensembles principaux comme montré sur le schéma 2.2, le système de pression, le chariot et le système de mesure de l'effort normal, et le vérin et le système de mesure de l'effort tangentiel. Le processus suivi est détaillé afin de rendre compte du travail effectué (la conception est la partie de la maîtrise qui a nécessité le plus de temps et de ressources), de donner les informations nécessaires pour de futurs travaux sur la machine, et enfin de démontrer la fiabilité du banc, en détaillant la démarche de sélection et de dimensionnement des composants.

2.3.1 Modélisation de la presse

L'élément de base pour la fabrication du banc d'essai est une ancienne presse hydraulique de soudage qui a été reconvertie pour servir de châssis à notre machine. Elle présente une configuration similaire à notre machine avec un système qui exerce une pression et une table qui résiste à la pression. Un avantage notable de ce composant est qu'il possède une très grande rigidité qui lui servait à résister au 40 tonnes de pressions pour lequel il était prévu. Cette rigidité est très utile pour le banc d'essai de manière à limiter tout mouvement non souhaité. La presse a donc été mesurée puis modélisée dans le logiciel de conception assistée par ordinateur CATIA (CATIA V5 R21, développé par Dassault Systèmes) pour servir de base pour la conception des composants suivants. La modélisation finale est visible sur la figure 2.7a

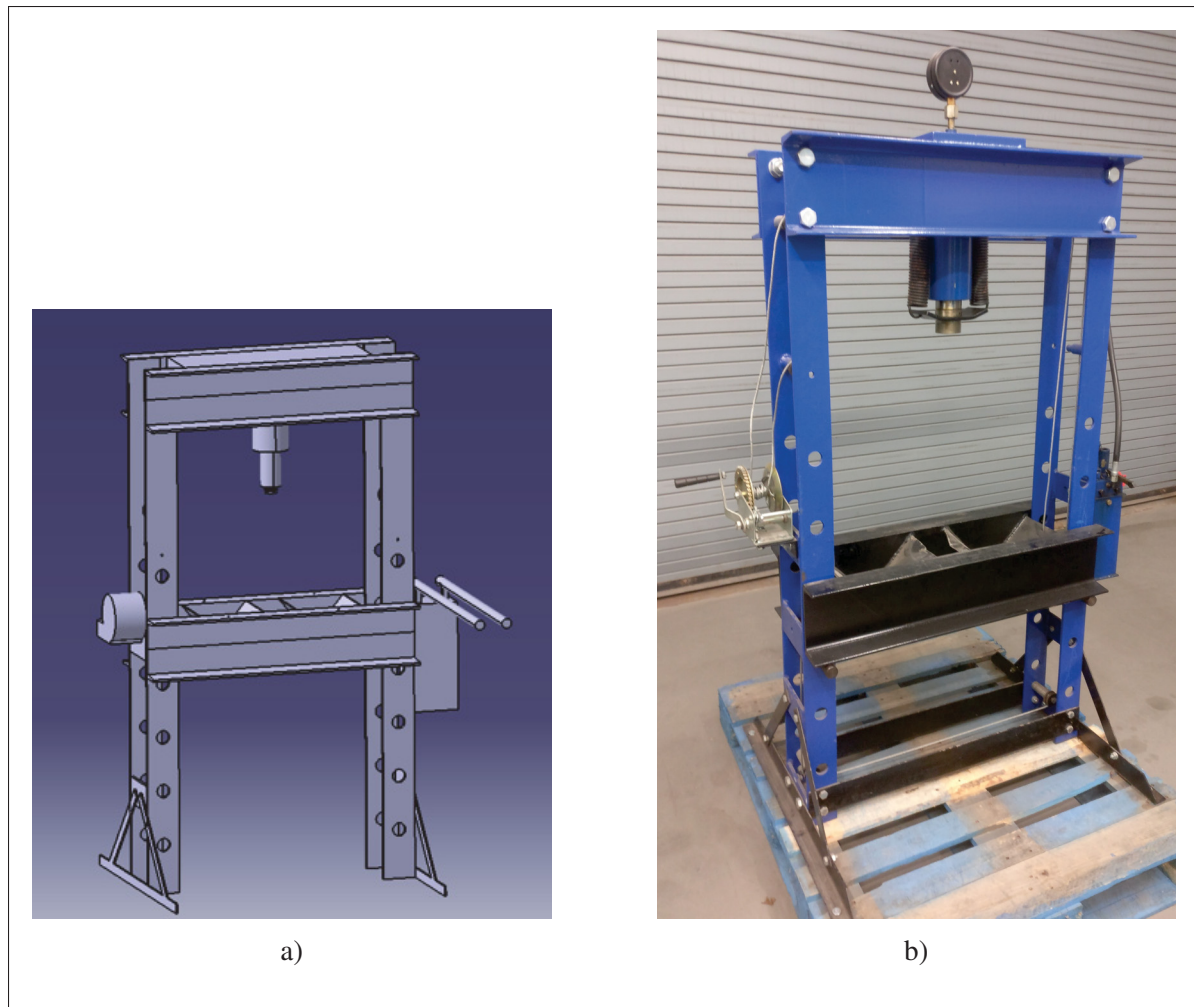


Figure 2.7 Comparaison entre : a) la modélisation 3D de la presse et
b) une photo de la presse

2.3.2 Conception du chariot et système de mesure de l'effort normal

Une fois la presse modélisée il a été possible d'ajouter le chariot. Il doit pouvoir se déplacer de la longueur de la course définie plus tôt (partie 2.1), pour cela il utilise un système de rails et patins à bille. Ces composants avaient été choisis lors de l'étude préalable avant le début de ma maîtrise (Le Royer, 2017a). Il est possible de sélectionner pour ce type de composant d'avoir ou non une certaine précontrainte, ce qui permet une meilleure rigidité du guidage, mais augmente la résistance au déplacement. C'est une version avec précontrainte qui a été sélectionnée, selon le raisonnement que le frottement ne peut pas être entièrement éliminé et doit être supprimé

en post-traitement, qu'il soit important ou faible, il est donc préférable de choisir un guidage rigide.

Une fonction cruciale du chariot est qu'il doit chauffer la zone de frottement à une température homogène qui peut aller jusqu'à 500°C. Mais cette chaleur doit être contenue à la zone de frottement pour ne pas endommager les autres composants, et en particulier les patins qui sont très proches, pour lesquels le fabricant indique une température de service maximale de 80°C. Le chariot est donc composé de 3 couches, au-dessus une plaque chauffante contenant 8 éléments chauffants tel que déterminé par l'étude de Le Royer (2017a), un isolant puis la plaque inférieure sur laquelle sont fixés les patins. De manière à limiter les ponts de chaleur, les couches ne sont pas maintenues entre elles par des vis, mais par emboîtement : l'isolant choisi, de la marinite (référence donnée en annexe I-1), possède de bonnes propriétés mécaniques en plus de ses propriétés thermiques. Elles lui permettent de résister à l'effort de compression exercé sur le chariot et de transmettre l'effort tangentiel par obstacle (comme on peut l'observer sur la vue en coupe 2.8) tout en isolant la plaque inférieure de la chaleur.

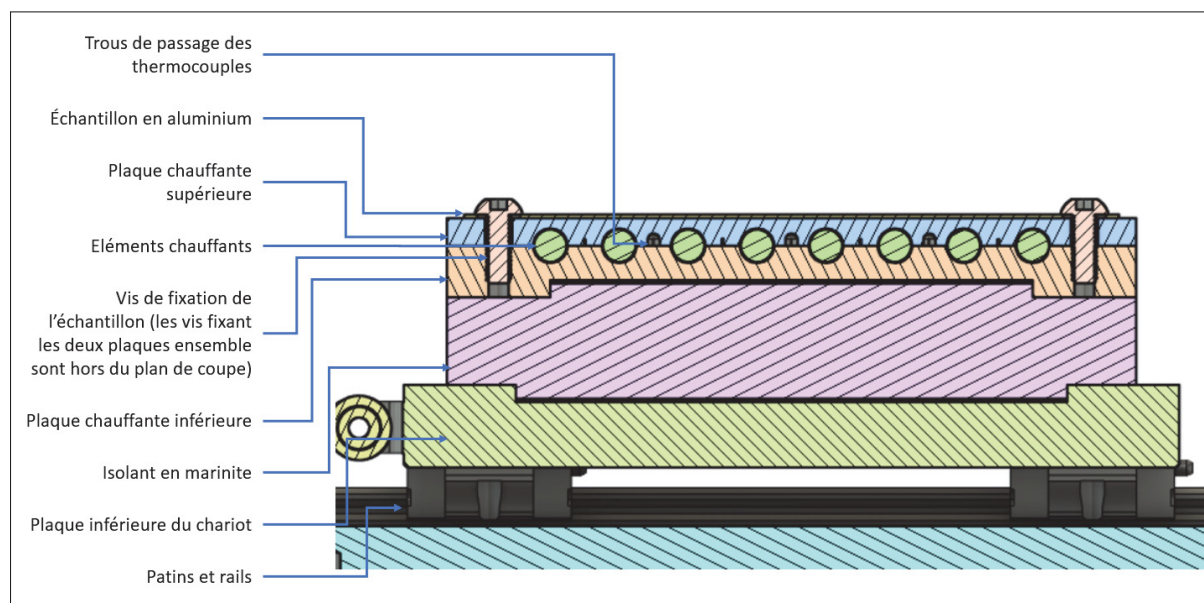


Figure 2.8 Vue en coupe du chariot

Il est important de noter que les vis choisies pour maintenir ensemble les deux parties de la plaque chauffante et celles pour fixer l'échantillon sont des vis à tête fines (hexagonales par exemple) de manière à laisser de l'espace pour ne pas heurter le système de pression lors du mouvement du chariot. On peut aussi observer sur la vue en coupe des trous de passage pour thermocouple dans la plaque chauffante, ceux-ci sont au nombre de 7, permettant de mesurer la température entre n'importe lesquels des éléments chauffants. La surface supérieure de la plaque possède aussi 8 trous filetés de manière à pouvoir y attacher des instruments comme des pinces de maintien de l'échantillon ou des thermocouples. La figure 2.9 présente un rendu de l'ensemble chariot plus du système de pression.

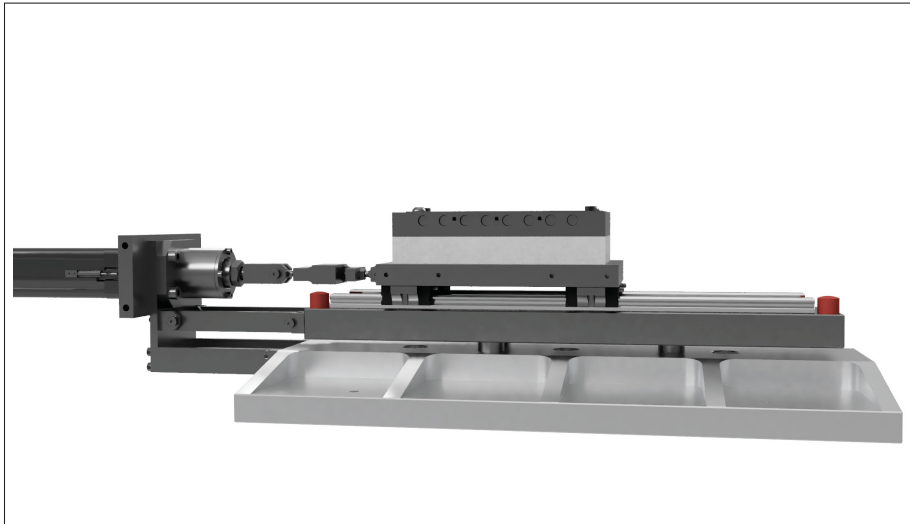


Figure 2.9 Image du modèle 3D du système de mesure de l'effort normal et du chariot

2.3.3 Vérin et système de mesure de l'effort tangentiel

Afin de déplacer le chariot il faut utiliser un actionneur. Celui-ci doit permettre un mouvement à vitesse constante, quel que soit l'effort résistant. Il existe trois grandes familles d'actionneurs : pneumatiques, hydrauliques et électriques (Chevalier, 2003). On peut éliminer le pneumatique en raison de la compressibilité de l'air qui ne permet pas une rigidité suffisante (Chevalier,

2003). Les actionneurs hydrauliques sont surtout utilisés pour exercer un effort très important (Chevalier, 2003). C'est donc l'actionneur électrique qui est retenu.

Un vérin électrique est constitué d'un moteur relié à une vis sans fin qui entraîne le déplacement du piston. Pour assurer la meilleure précision possible, le moteur choisi, selon l'étude de Le Royer (2017a) est un servomoteur accompagné d'un servocontrôleur dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Tableau présentant les caractéristiques techniques des composants du vérin

Servomoteur	référence	VLM32H-ALNR-30
	fabricant	Kollmorgen
	couple	4,53 N.m
	vitesse de rotation max.	6000 tr/min
	puissance max.	1,24 kW
Servocontrôleur	référence	AKD-P00606-NBAN-0000
	fabricant	Kollmorgen
Actionneur linéaire	référence	RSA24 BNL05 SK9.000 LMI ST1 YM117008 FFG CLV PY2
	fabricant	Tolomatic
	vitesse max.	0,41 m/s
	pas de la vis	5,08 mm/tr
	force maximale	3670 N

La cellule choisie est conçue pour mesurer à la fois des efforts de compression et de traction, sa fiche technique est donnée en annexes I-1.

Le montage de cette cellule est un point important : il faut éviter toute perturbation dans les mesures et tout endommagement de la cellule. En effet elle ne doit pas subir d'effort autre que de la compression ou de la traction, et un effort parasite entraînant par exemple la flexion de la cellule pourrait la détériorer.

Un autre point à considérer pour concevoir l'assemblage est qu'il doit être isostatique, c'est-à-dire que les pièces doivent pouvoir être assemblées malgré leurs potentiels défauts géométriques. Plusieurs montages isostatiques sont possibles, mais tous ne se valent pas, et en particulier certains d'entre eux risquent d'entraîner des erreurs dans la mesure des efforts. Sur le schéma

2.10 plusieurs de ces montages sont présentés, en expliquant pour chacun les avantages et inconvénients. Le montage 4 est celui qui a été sélectionné.

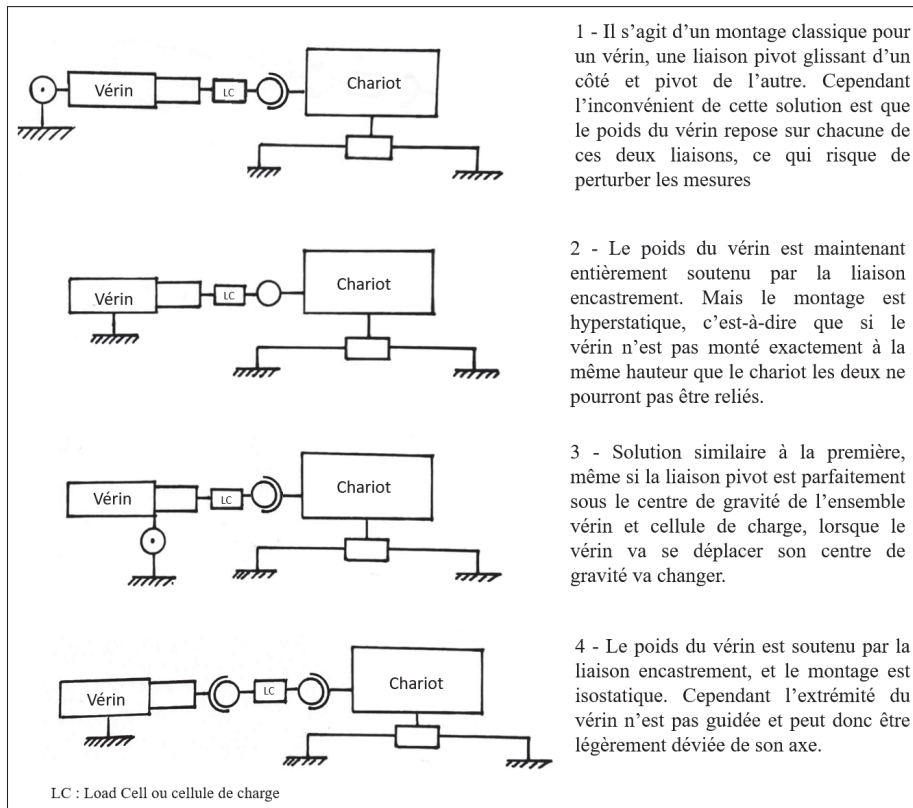


Figure 2.10 Schémas cinématiques des différentes possibilités pour le montage du vérin

L'organigramme 2.11 présente les différents types d'erreurs de mesure que peuvent engendrer chaque type de défaut. Les calculs ont montré que la quatrième proposition entraîne les erreurs de mesure les plus faibles, et est donc celle qui a été sélectionnée. Pour des raisons de lisibilité seuls ceux de la quatrième solution sont présentés, le raisonnement étant identique pour les autres.

L'erreur due au poids est nulle dans ce cas, car le poids de la cellule de charge est réparti entre le vérin et le chariot et conserve la même répartition de masse au cours du mouvement, ce qui fait que la charge exercée est éliminée lors de la mise à zéro. La cause principale de l'erreur est le potentiel mauvais alignement des pièces. On peut alors tracer le schéma 2.12.

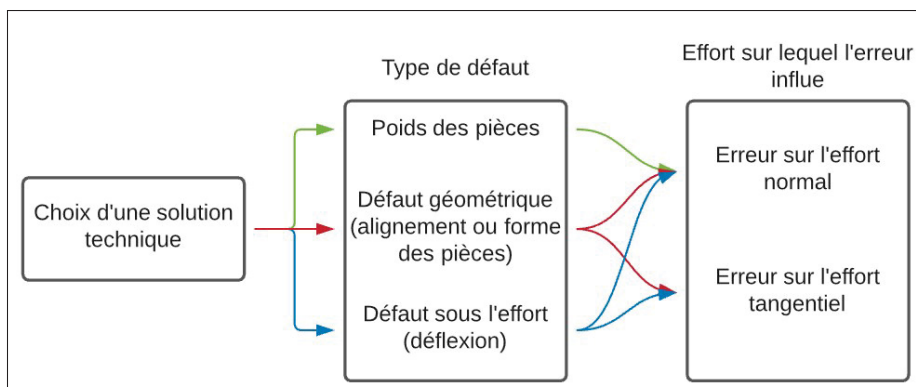


Figure 2.11 Organigramme présentant les différents types d'erreurs de mesure que peuvent engendrer chaque type de défaut

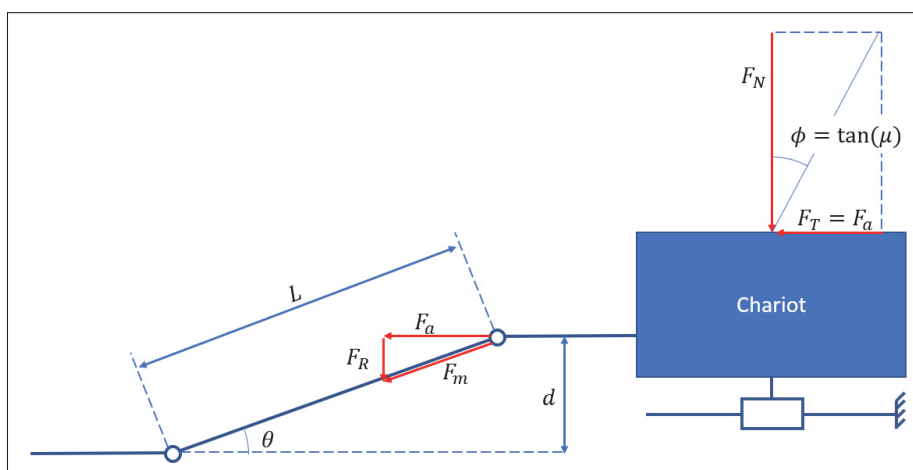


Figure 2.12 Schéma pour le calcul de l'erreur de mesure de l'effort tangentiel en cas d'un défaut d'alignement des pièces, vue de face du banc d'essai

L'effort exercé par le frottement, celui que l'on souhaite mesurer, est F_a . Mais l'effort que l'on mesure réellement est F_m et dépend du défaut d'alignement d . On peut établir la relation suivante :

$$F_m = \frac{F_a}{\cos(\theta)}$$

$$\text{et } \sin(\theta) = \frac{d}{L}$$

$$\Leftrightarrow F_m = \frac{F_a}{\cos(\arcsin(\frac{d}{L}))} \quad (2.1)$$

On peut observer que pour avoir F_m le plus proche de F_a il faut que $\cos \arcsin(\frac{d}{L})$ soit proche de 1. Pour cela $\arcsin(\frac{d}{L})$ doit être proche de 0, et donc $\frac{d}{L}$ doit être le plus petit possible. Pour un défaut d'alignement d donné il faut donc que L soit le plus grand possible. La valeur maximale de L qu'il est possible de faire tenir dans l'espace disponible est 105 mm. On peut ensuite calculer l'erreur de mesure relative par rapport à l'effort tangentiel réel :

$$\left| \frac{F_m - F_a}{F_a} \right| = \frac{1}{\cos(\arcsin(\frac{d}{L}))} - 1 \quad (2.2)$$

Si l'on prend pour erreur maximale de 1%, en manipulant l'équation on obtient que le défaut maximal serait de 14,7 mm. En réalité il est possible d'avoir un défaut d'alignement bien inférieur, l'erreur de mesure sur l'effort tangentiel due à ce phénomène devrait donc être négligeable.

On peut aussi à partir du schéma 2.12 calculer l'effort parasite normal F_R exercé avec un tel décalage. En effet le décalage créerait une composante normale F_R dans l'effort de poussée exercée par le vérin. On cherche à obtenir l'erreur par rapport à l'effort normal exercé par le système de pression lors d'un essai F_N . Pour cela avec un COF pour l'essai μ on a :

$$F_N = \frac{F_a}{\mu}$$

On peut aussi calculer l'effort parasite F_R à partir de la relation suivante :

$$F_R = F_m \cdot \sin(\theta)$$

On peut alors calculer l'effort parasite relativement à F_N :

$$\begin{aligned}
 \frac{F_R}{F_N} &= \frac{\mu \cdot F_R}{F_a} \\
 &= \frac{\mu \cdot F_m \cdot \sin(\theta)}{F_a} \\
 &= \frac{\mu \cdot \sin(\theta)}{\cos(\theta)} \\
 &= \mu \cdot \tan(\theta)
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Si l'on prend un défaut d'alignement d de 3mm et un μ de 0,5, ce qui est raisonnable par rapport à ce qui a été observé lors du montage, l'erreur est de 1,4%. Il faut donc assurer une certaine précision pour le montage des pièces, mais les mesures ne devraient pas être impactées significativement en cas de défaut d'alignement raisonnable.

Un autre type d'erreur que l'on pourrait observer, comme indiqué sur la figure 2.11, avec ce montage est une déflexion de la tige du vérin. En effet celle-ci n'est pas guidée, contrairement aux autres solutions du schéma 2.10, et pourrait fléchir sous l'effort. La flèche a été estimée à l'aide de la théorie des poutres et ne donne pas de déflexion significative.

Malgré tous ces calculs nous avons néanmoins rencontré des difficultés dans le montage du vérin. Au cours des premiers essais avec le vérin une oscillation était visible dans l'effort, et après analyse elle était causée par une déflexion de la tige du vérin, non pas par flexion, mais à cause d'un jeu dans le guidage entre la tige et son corps. Cela n'avait pas été anticipé et il a fallu ajouter un palier lisse pour rigidifier le guidage de la tige du vérin (détaillé dans le chapitre sur la calibration, partie 3.2.1). L'assemblage a donc été modélisé suivant ce design en utilisant des embouts rotulés disponibles dans le commerce pour réaliser les deux liaisons sphériques de part et d'autre de la cellule de charge, permettant de réduire le nombre de pièces à usiner. On peut observer sur la figure 2.13 le design final qui a été modélisé puis usiné.

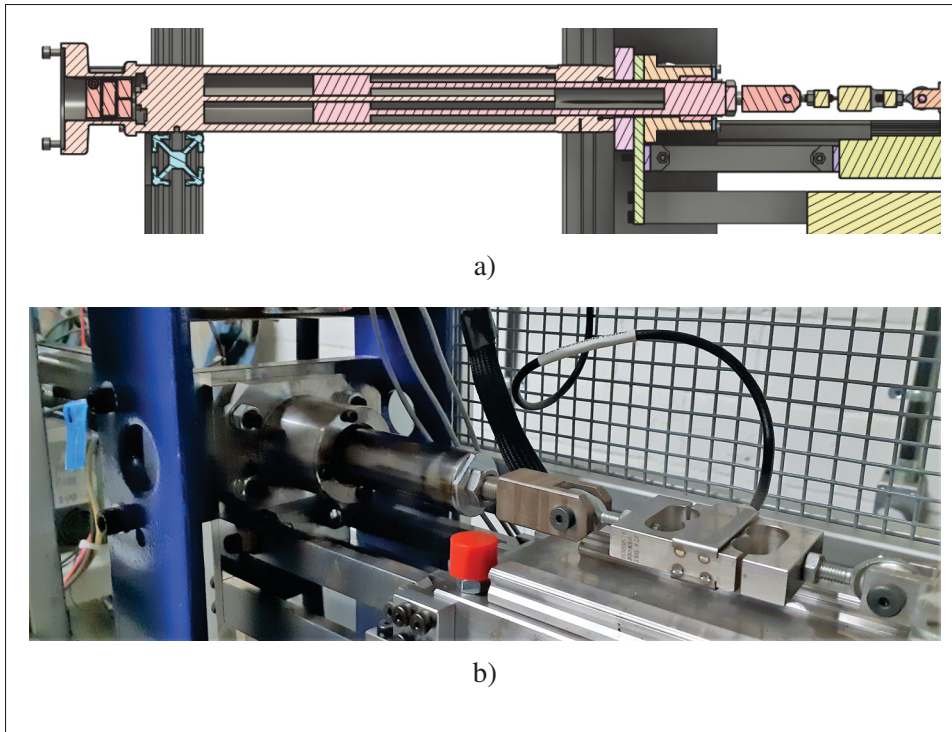


Figure 2.13 Comparaison entre : a) la modélisation 3D du vérin et b) une photo celui-ci installé sur le banc d'essai

2.3.4 Système de pression

Le dernier élément mécanique du banc qu'il reste à concevoir est le système de pression. Ce composant est complexe et doit remplir un certain nombre de fonctions, un extrait d'entre elles est listé ci-dessous :

- exercer un effort normal sur la surface du chariot jusqu'à 1500 N.
- assurer un contact plan entre la pastille et le chariot.
- rester fixe et rigide au cours d'un essai.
- l'effort doit pouvoir être ajusté entre les essais.
- l'effort doit rester constant au cours d'un essai.
- le système de pression doit pouvoir être déplacé pour laisser la place de retirer l'échantillon.
- le déplacement du système de pression doit pouvoir se faire rapidement et facilement.
- la pastille doit pouvoir être installée et retirée rapidement.

On peut scinder ces fonctions en deux groupes mécaniquement distincts : une partie dont le rôle est d'exercer l'effort de pression et de permettre le dégagement du chariot pour libérer l'espace pour le chargement d'échantillon, et une partie permettant d'adapter l'effort de manière à ce qu'il soit constant au cours de l'essai et d'assurer la planéité du contact. Nous allons dans un premier temps étudier cette première partie. De nombreuses solutions sont possibles, mais si on limite le choix aux solutions les plus simples, rapides à mettre en place et moins onéreuses on peut isoler 3 solutions :

1. Adapter le système de pression hydraulique de la presse.
2. Réutiliser une vis mécanique récupérée sur une ancienne machine de traction manuelle.
3. Concevoir un système basé sur l'ajout manuel de poids.

La dernière solution possède un certain nombre d'avantages, mais est aussi très peu pratique. Pour exercer une charge de 150 kg, l'utilisateur devrait placer cette masse manuellement sur le système, un processus long et potentiellement dangereux pour l'opérateur, d'autant plus que les poids devraient être positionnés au-dessus de la zone de chauffage, soit dans l'enceinte du banc (ce qui présente un danger lors des essais à haute température) soit au-dessus (dans ce cas l'opérateur devrait soulever les poids au-dessus de sa tête). Cette solution a donc rapidement été éliminée, mais les deux précédentes ont été approfondies et sont présentées dans les deux parties suivantes.

2.3.4.1 Piston hydraulique

Le piston hydraulique est montré à la figure 2.14. On peut lister un certain nombre d'avantages pour cette solution :

- système déjà en place sur la presse.
- facile à actionner, sans effort et peut être actionné à distance de la zone de haute température.
- l'effort disponible est largement supérieur à ce qui est requis.

Mais on peut aussi lister deux arguments à l'encontre de ce choix :



Figure 2.14 Photographie du piston hydraulique installé sur la presse servant de châssis au banc d'essai

- le piston n'est pas sécurisé contre la surcharge. Le banc pourrait facilement être endommagé par une erreur d'inattention, aucune sécurité n'empêche d'exercer les 40 tonnes que peut

fournir la presse. Il faudrait donc soit installer un limiteur de pression avec retour de l'huile au réservoir, soit changer la pompe pour une de capacité correspondant aux efforts nécessaires.

- il existe un certain risque de fuites, et le piston nécessitera de la maintenance de temps à autre.

2.3.4.2 Vis et volant

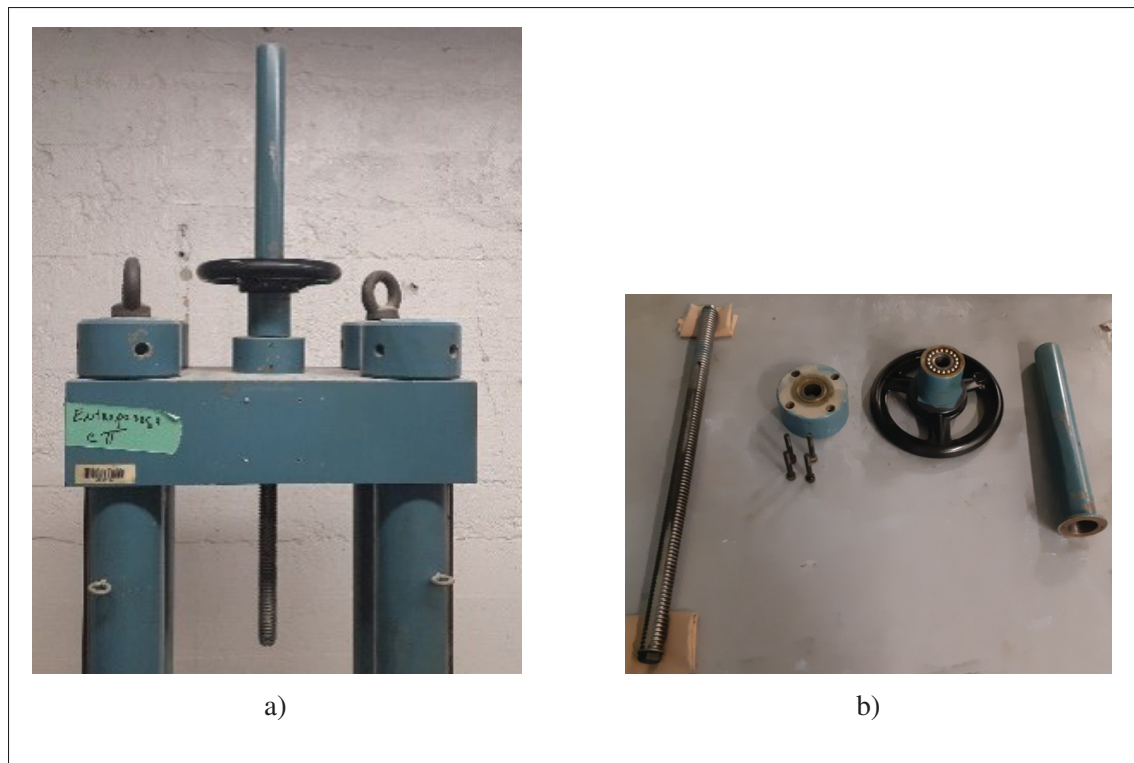


Figure 2.15 Photographies du système de pression d'une ancienne presse manuelle, a) encore installé sur l'ancienne presse et b) démonté

Pour la deuxième solution (la vis mécanique), les pièces provient d'une ancienne machine de traction manuelle. La photographie 2.15a montre ce mécanisme encore installé sur la machine, et la photographie 2.15b le système démonté. Ce mécanisme est conçu pour être utilisé en traction et non pas en compression. Il faut donc concevoir un assemblage permettant d'adapter ces pièces sur le banc d'essai. Pour transformer le mécanisme de traction en compression, une première réflexion consiste à retirer la butée à billes, et concevoir un nouvel écrou. Celui-ci est

relié au bâti par une liaison pivot constituée de 2 roulements à billes permettant de s'opposer aux charges radiales et axiales, comme montré sur la partie haute du schéma 2.16.

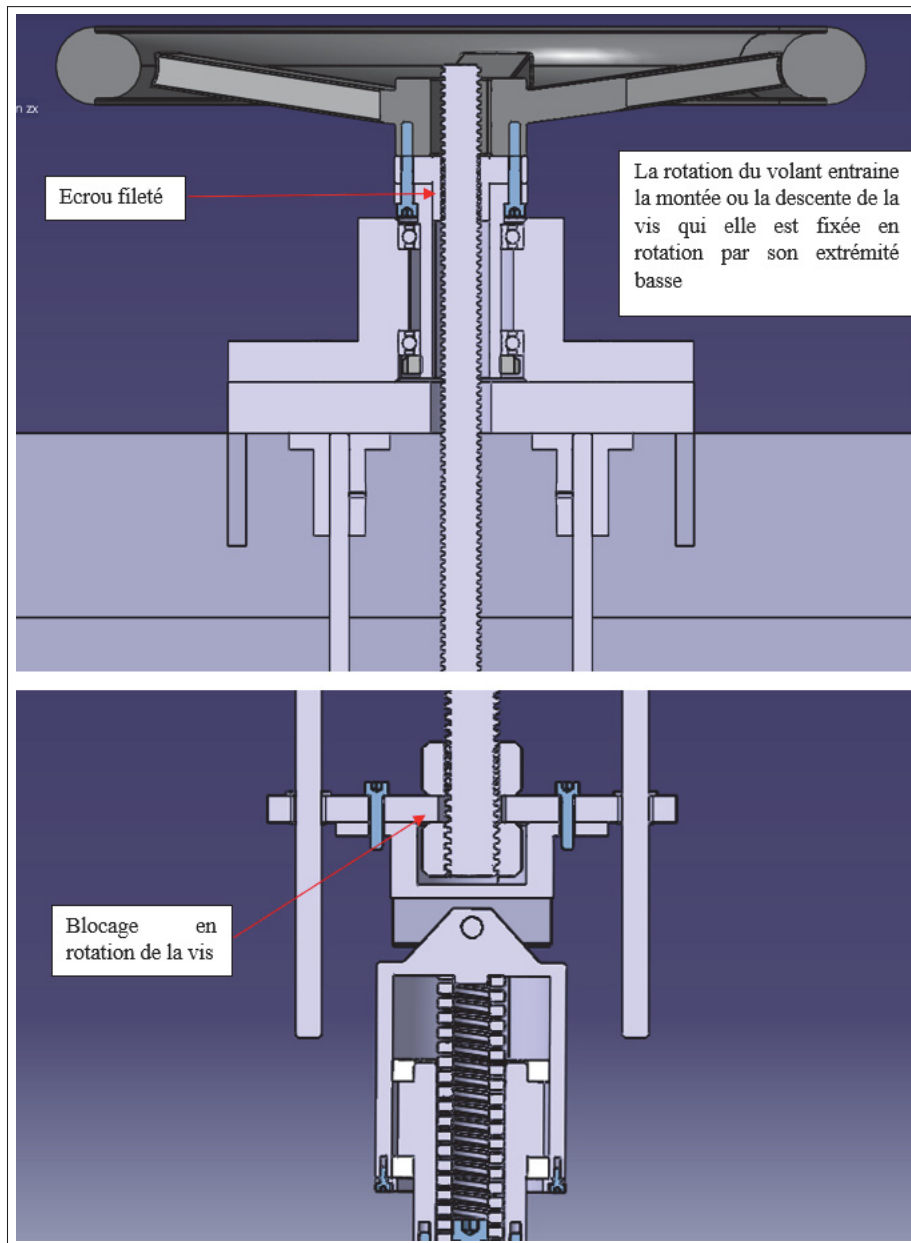


Figure 2.16 Première version du design du système de pression basé sur le mécanisme de vis

Le principe de fonctionnement de cette solution est qu'en tournant l'ensemble volant-écrou, la vis, bloquée en rotation par une clavette, est forcée à se déplacer verticalement. Pour assurer le

blocage en rotation de la vis deux arbres de guidages verticaux sont placés de part et d'autre, permettant de constituer une liaison glissière entre le bâti et la vis, tel que représenté sur la partie basse du schéma 2.16. Cette solution est fonctionnelle, mais nécessite un certain nombre de pièces à ajouter (roulements, arbres, etc. . .) en complément des pièces d'origine, ce qui en réduit considérablement l'intérêt. Une autre réflexion plus optimisée a donc été menée, faisant usage de la rainure de clavette présente sur la vis. Tout d'abord le volant a été retourné afin qu'il puisse fonctionner en compression comme on peut le voir sur le schéma 2.17. Un raccord a ensuite été ajouté afin de placer le volant à une hauteur accessible. Cette pièce doit être usinée, et elle a été découpée en deux parties afin de réduire les coûts d'usinage, un cylindre creux et une plaque qui sera soudée sur celui-ci.

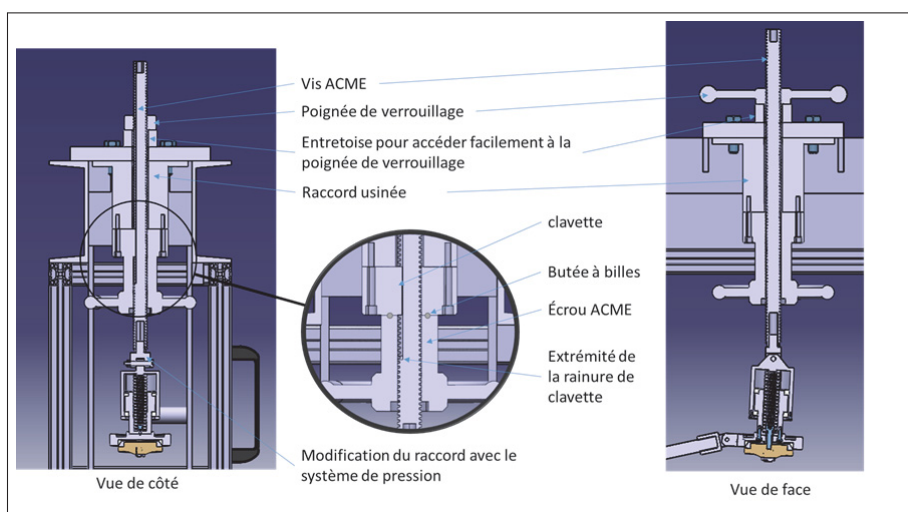


Figure 2.17 Schéma expliquant la première version de l'assemblage permettant d'adapter le mécanisme de vie et volant sur le banc d'essai

Pour éviter la rotation de la vis, au lieu des arbres de guidage verticaux imaginés précédemment, celle-ci est cette fois bloquée en rotation par la clavette qui était utilisée dans la machine de traction. La rainure ne parcourt pas toute la hauteur de la vis, mais sur la hauteur qui sera utilisée lors du fonctionnement du mécanisme elle est bien présente (vérifié sur CATIA en simulant le mouvement des pièces). Sur le dessus du système un écrou à poignées est ajouté, il permet de verrouiller le système une fois la pression exercée. Il empêche un éventuel desserrage

pendant les essais et sert aussi à relever le système de pression. En effet le volant n'étant relié à la pièce supérieure que par une butée à bille il tombe sous l'effet de la gravité. Ainsi pour remonter l'outil il faut d'abord desserrer le volant, puis visser l'écrou à poignées pour remonter l'ensemble. Des calculs ont été faits pour s'assurer que l'opérateur puisse tourner le volant sans exercer un effort trop important en se basant sur le pas de la vis, la force maximale du système de pression, le diamètre du volant et en multipliant le résultat par un facteur qui dépend du frottement estimé. À titre indicatif ce résultat a ensuite été comparé aux données d'un guide d'ergonomie (RENAULT, 2007) qui a permis de déterminer que dans la position de l'opérateur l'effort nécessaire est dans les limites recommandées.

Maintenant que le système est clairement défini il est possible de le comparer avec la solution hydraulique. Pour cela on liste tout d'abord les avantages et inconvénients de cette solution :

Avantages :

- le mécanisme est plus simple, les potentiels problèmes seraient beaucoup plus faciles à identifier et à régler que ceux d'un circuit hydraulique.
- aucune maintenance n'est nécessaire.
- l'utilisateur peut sentir la force qu'il applique, ce qui permet plus de contrôle dans la pression appliquée et limite le risque de dépasser accidentellement la pression maximale que peuvent supporter les capteurs.
- la force peut être appliquée beaucoup plus progressivement.
- possibilité de remonter l'outil plus haut de manière à avoir plus d'espace pour changer l'échantillon (60mm pour le système hydraulique, plus du double pour le système mécanique).

Inconvénients :

- plusieurs pièces doivent être usinées et commandées, ce qui nécessite plus de temps de fabrication.

- l'utilisateur doit se tenir proche de la zone de l'essai pour manipuler le volant, en particulier il doit ouvrir la porte de protection qui laisse l'accès à la zone de haute température (une tenue adaptée est donc nécessaire pour éviter tout contact avec la zone chaude).
- l'utilisateur doit exercer un effort physique sur le volant (mais qui reste faible, inférieur à 10 N).
- coût légèrement plus élevé, entre 250 et 450\$ CAD plus cher que l'hydraulique

Avec ces informations le système de vis et volant a été choisi, on peut l'observer sur la figure 2.18 usiné et monté sur le banc d'essai.



Figure 2.18 Photographie du système de pression installé sur le banc d'essai

Maintenant que la manière d'exercer l'effort est définie il faut encore concevoir les autres parties du système, à savoir le mécanisme permettant d'assurer un contact plan et celui permettant le contrôle de l'effort.

2.3.4.3 Mécanisme de contrôle de l'effort

Ce sous-ensemble du système de pression remplit deux fonctions, assurer le parallélisme des surfaces de contact du frottement et contrôler l'effort appliqué. Le parallélisme est traité dans la partie 2.4 et ne sera donc pas abordé ici. Le point qui va être étudié est le contrôle de l'effort. Plus précisément le rôle de ce composant est de permettre d'appliquer progressivement l'effort et de faire en sorte qu'il reste constant au cours du mouvement du chariot. Si l'on reliait la pastille directement au système de vis décrit dans la partie précédente une fois que la pastille entrerait en contact avec le chariot une rotation du volant infime augmenterait fortement la pression étant donné la rigidité du montage. En revanche en interposant un ressort au milieu, une fois la pastille en contact avec le chariot, la rotation du volant entraîne une compression progressive du ressort, permettant d'appliquer l'effort de manière beaucoup plus contrôlée. L'idée est donc de concevoir un assemblage permettant d'intégrer le ressort dans le mécanisme, et pour cela la première étape est de déterminer les caractéristiques de ce ressort.

Un ressort avec la rigidité la plus faible possible permet aussi de garder une pression aussi constante que possible durant l'essai. En effet les faibles variations de hauteur dues aux défauts géométriques de l'échantillon ou de planéité du système ne vont pas entraîner une grande variation de l'effort exercé par le ressort grâce à sa faible rigidité.

$$\Delta F = k \cdot \Delta h \text{ Tiré de Chevalier (2003)}$$

Plus k est petit, plus la variation de l'effort ΔF est faible pour un Δh donné.

Pour diminuer la rigidité il faut donc augmenter la longueur du ressort pour un effort maximal donné. L'encombrement ne permet pas un ressort de plus de 100 mm (en conservant un espace d'au moins 50 mm lorsque la pastille est en position haute entre la pastille et l'aluminium

de manière à pouvoir changer facilement l'échantillon). La course maximum que permet la géométrie du système est de 30 mm. Il faut donc optimiser la rigidité du ressort de manière à ce que lorsque le ressort est comprimé de 30 mm l'effort de compression soit l'effort maximal requis. Avec les conditions énumérées précédemment il y a plusieurs choix de ressorts disponibles sur le site McMaster. Celui choisi permet d'obtenir une pression maximale de 14,6 MPa sous la pastille pour une course de 30 mm. Cette pression est légèrement supérieure à celle requise, ce qui permet d'assurer une marge en cas de besoin. La rigidité de ce ressort est de 70 N/mm.

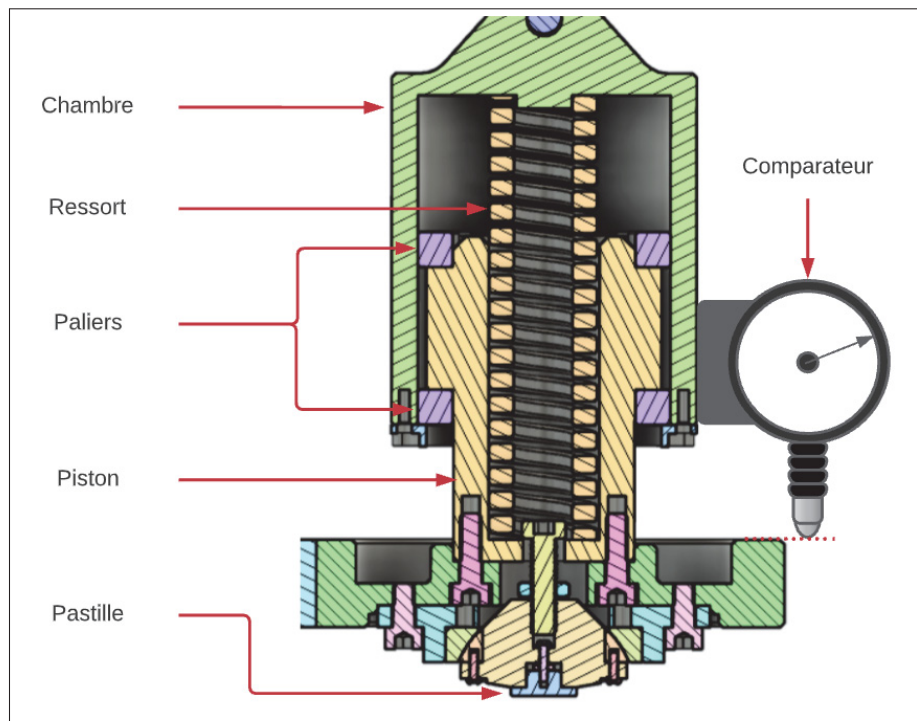


Figure 2.19 Schéma du système de pression dans la zone du ressort, vue en coupe

Une fois le ressort choisi il faut concevoir les pièces lui permettant de se compresser sous l'effort. L'assemblage est visible sur la figure 2.19, on peut observer la chambre et le piston qui coulisent l'un dans l'autre grâce aux paliers en plastique UHMW (pièces en violet sur le schéma). Ce matériau a été choisi pour sa facilité d'usinage, son faible coût et ses faibles frottements (il n'était pas possible d'utiliser des paliers du commerce du fait des dimensions spécifiques requises).

L'assemblage de ce sous-système est très complexe et compacté au maximum et nécessite un ordre de montage spécifique. Des tutoriels vidéos ont été réalisés afin de faciliter le démontage pour de futurs utilisateurs. Un autre atout majeur de cette conception est la facilité de démontage de la pastille (qui nécessite d'être changée régulièrement), qui peut être simplement montée et démontée depuis l'extérieur.

Malgré la compacité de ce système, le système de pression reste d'une longueur conséquente. Il n'est donc pas possible de le maintenir simplement par le dessus. La cinématique de l'ensemble a donc été étudiée de manière à permettre l'utilisation d'une barre de rigidification (ou barre de maintien) horizontale au plus proche de la pastille de manière à assurer une rigidité aussi élevée que possible (voir figure 2.22). Pour que le système puisse se relever pour manipuler l'échantillon cette barre est montée sur des liaisons pivots et pivots glissants, comme on peut le voir sur le schéma 2.20 et le schéma cinématique 2.21.

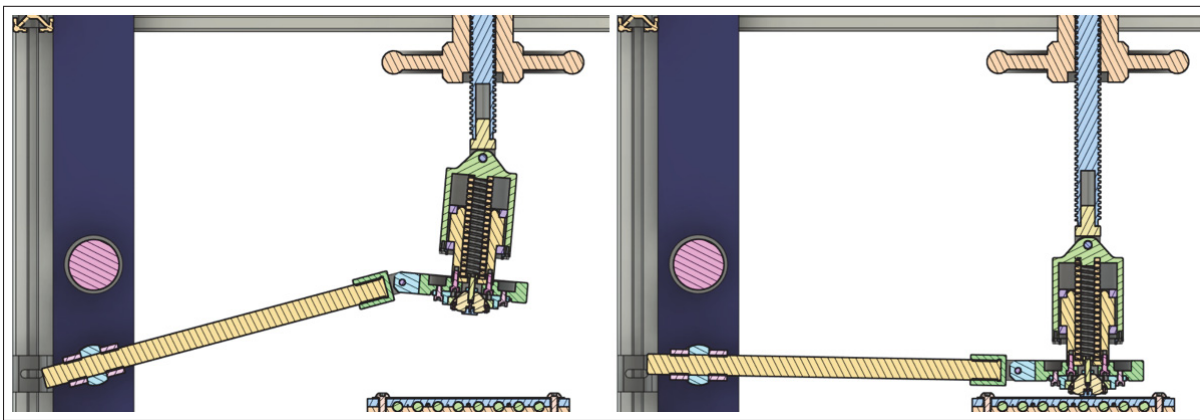


Figure 2.20 Comparaison entre le système de pression en position haute et en position basse

L'hyperstatisme de cet ensemble a été étudié de manière à maximiser la rigidité, tout en permettant le montage. La barre de maintien horizontale est une tige filetée maintenue à son extrémité gauche par deux écrous, ce qui permet d'ajuster sa longueur afin d'assurer la verticalité du mécanisme de pression.

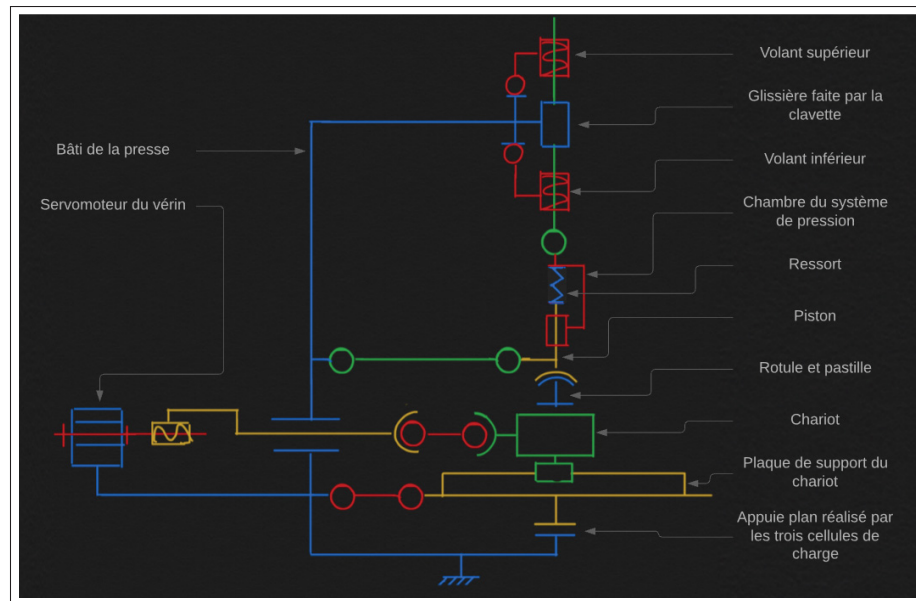


Figure 2.21 Schéma cinématique du banc d'essai au complet

Ainsi la partie mécanique du banc d'essai est complète. Le schéma cinématique 2.21 permet de visualiser les mouvements relatifs de tous ces composants, et le tableau 2.3 présente les caractéristiques techniques finales du banc.

Tableau 2.3 Résumé des caractéristiques techniques principales du banc d'essai

	Caractéristique	Valeur	Unité	Commentaire
Système de pression	Effort maximal	2100	N	La pression de contact maximale dépend de la surface de la pastille
	Course	30	mm	
	Température max bagues en plastique	80	°C	Essayer de relever le système de pression dès la fin de l'essai
	Hauteur de dégagement		mm	Le volant supérieur arrive en butée mais il est possible de le surélever avec des câles en cas de besoin pour gagner quelques centimètres
	COF max	1,5		Au dessus de ce COF la rotule sors de son logement et risque d'être endommagée
Chariot et vérin	Course	90	mm	La course pourrait être augmentée en déplaçant les limit switch sur le corps du vérin, mais elle a été définie ainsi pour limiter les risques de collision avec le système de pression en cas de vis trop haute par exemple
	Vitesse max	40	mm/s	le moteur peut aller plus vite mais cela risque d'endommager le vérin
	Vitesse min	0,5	mm/s	Un phénomène de stick slip pourrait se produire en dessous de cette vitesse, à vérifier
	Effort tangentiel max	1000	N	
Chauffage	Température max testée	550	°C	Le banc peut surement monter au dessus mais il faudra vérifier qu'aucun élément critique ne surchauffe (en particulier les patins et les bagues de guidage du système de pression)

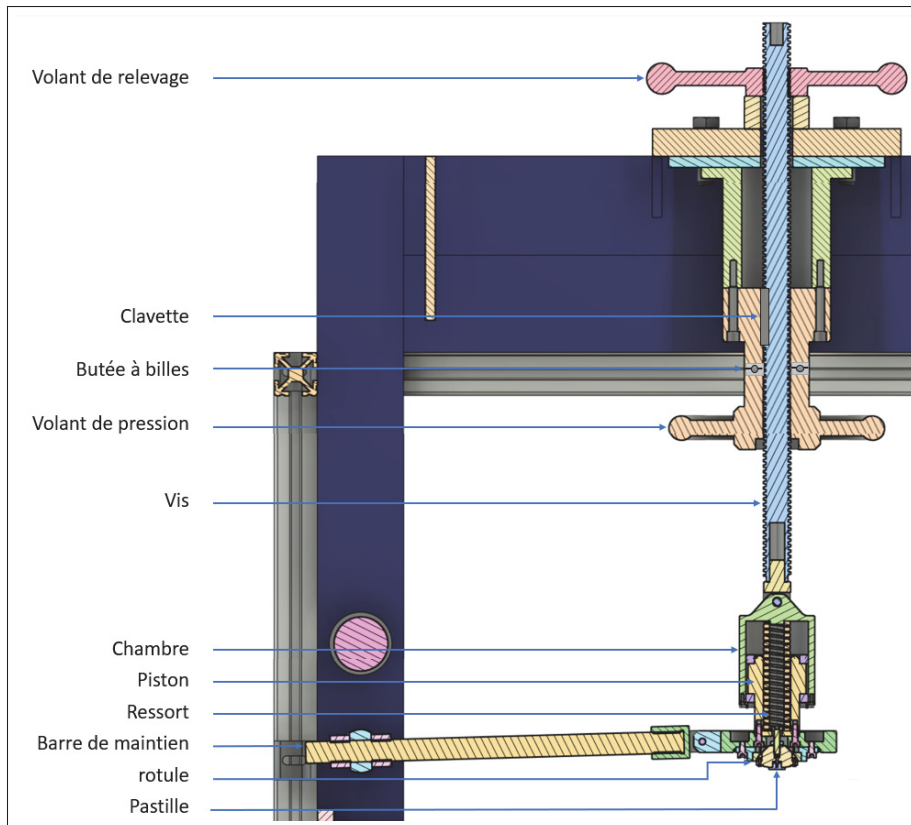


Figure 2.22 Schéma complet du système de pression vu en coupe

2.3.5 Acquisition des données

Le banc possède un certain nombre de capteurs pour mesurer les différentes grandeurs, on compte 4 cellules de charge et 6 thermocouples. Pour pouvoir enregistrer et traiter ces données, il faut chercher une méthode d'acquisition. Grâce à l'aide de Michel Drouin, ingénieur de l'ÉTS, une carte NI PCI 6014 de National Instruments a été sélectionnée pour remplir cette fonction. Des conditionneurs (ou amplificateur) sont ajoutés entre la carte et chaque capteur de manière adapter les signaux, parfois très faibles, entre les 0 et 10 V que peut mesurer la carte pour améliorer la précision. La carte est montée dans un ordinateur qui permet d'enregistrer les données et de faire fonctionner le logiciel de contrôle du banc d'essai, dont la programmation est détaillée partie 2.3.8. Cette carte permet de faire un très grand nombre d'acquisitions par secondes, le logiciel du banc utilise une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz. Afin de limiter

le volume de données enregistrées, ces mesures sont traitées et regroupées en 10 groupes de 1000 points par secondes, et seule la moyenne de ces 1000 points est enregistrée, ce qui permet d'améliorer la précision et d'atténuer le bruit de mesure. La carte d'acquisition permet aussi de contrôler des sorties, ce qui sera particulièrement utile pour centraliser le pilotage du banc d'essai depuis l'ordinateur et envoyer les commandes aux différents composants via la carte (le pilotage du chauffage, du vérin et des organes de sécurité est détaillé dans les parties suivantes).

2.3.6 Contrôle du banc d'essai

Le banc d'essai en plus d'acquérir les données permet de contrôler plusieurs éléments, en particulier le vérin et le chauffage. Ils pourraient être pilotés indépendamment, avec par exemple un contrôleur PID (Proportionnel, Intégral Dérivé) pour le chauffage et en utilisant des routines préprogrammées dans le servocontrôleur du vérin, mais le plus pratique est de pouvoir tout contrôler depuis une seule interface, ce qui limite aussi les erreurs de manipulation. Cela permet également l'ajout d'un certain nombre de fonctions de sécurité comme par exemple stopper le banc si le COF dépasse une valeur prédéfinie, ce qui n'aurait pas été possible avec un contrôle indépendant des composants.

Tout d'abord, pour le chauffage, les sorties de la carte d'acquisition sont reliées à des relais à semi-conducteurs ou SSR (Solid State Relay) qui permettent de bloquer ou laisser passer le courant selon le signal de commande qui leur est envoyé. En les plaçant dans le circuit des éléments chauffants, il est donc possible de les allumer ou les éteindre. Trois SSR ont été utilisés afin de faire trois zones de chauffages distinctes avec chacune leur boucle de contrôle pour assurer la température la plus homogène possible. Le calcul de la consigne envoyée à ces éléments est fait dans le programme de contrôle du banc d'essai grâce à un calcul de PID. Mais les SSR ne peuvent recevoir qu'un signal allumé - éteint alors que le PID renvoie une valeur continue. Le signal est donc ensuite traité par une modulation de la largeur d'impulsion (plus connu sous le nom anglais PWM, Pulse Width Modulation). Cela consiste à alterner un signal entre un cycle allumé et éteint avec une fréquence donnée, mais en variant la durée passée

allumé ou éteint par cycle selon la valeur du PID. Un exemple du signal que l'on obtient au final est visible sur la figure 2.23.

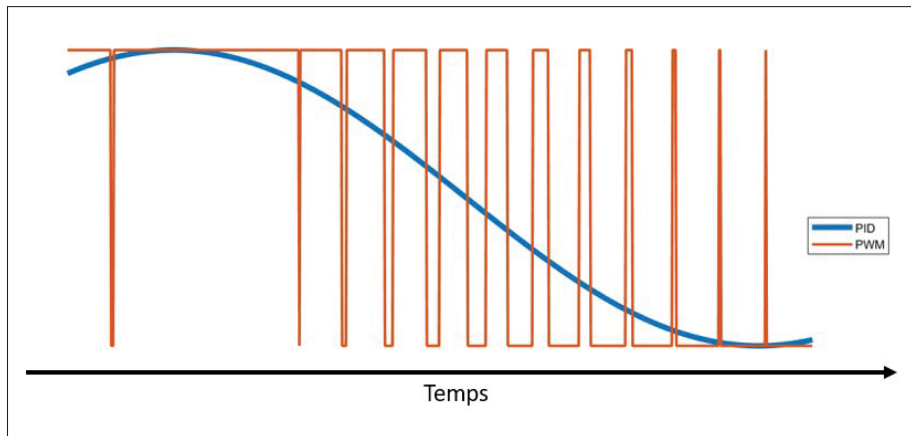


Figure 2.23 Schéma de la transformation du signal PID en un signal modulé en largeur d'impulsion (PWM)

Ensuite pour le pilotage du vérin il est possible de relier le servocontrôleur directement à l'ordinateur via un câble ethernet leur permettant de communiquer via le protocole TCP/IP. Il a donc fallu apprendre le langage machine du servocontrôleur et les communications TCP/IP afin de parvenir à contrôler le vérin depuis le logiciel du banc programmé en LabVIEW. Cette partie a été très complexe et a demandé beaucoup de temps, mais a permis d'accéder à toutes les fonctionnalités du vérin. Il est possible depuis le programme, entre autres, de lui imposer une consigne en vitesse, en position, ou de faire des aller-retour continus, et de lire en continu sa position.

2.3.7 Branchements électriques et sécurisation

Avec tous les capteurs et éléments à contrôler, le câblage doit être planifié minutieusement. Des éléments de sécurisation sont aussi nécessaires : un verrou commandé par le programme pour contrôler l'ouverture de la porte donnant accès à la zone de chauffage, un voyant lumineux pour signaler le chauffage, un afficheur externe pour indiquer la température même lorsque l'ordinateur est éteint (le chariot peut mettre plusieurs heures à refroidir après un essai) et un

bouton d'arrêt d'urgence. Ces composants ne sont de plus pas tous alimentés avec la même tension, ce qui a nécessité d'utiliser plusieurs transformateurs. Le schéma électrique est présenté à titre indicatif dans une version simplifiée sur la figure 2.24, avec le composant "DAQ" sur le schéma représentant la carte d'acquisition à laquelle sont reliés les fils verts pour l'acquisition et jaune pour les sorties. Un panneau de branchements a été conçu pour réaliser les connexions, présenté sur la photo 2.25.

2.3.8 Logiciel de contrôle du banc d'essai

Le logiciel pour contrôler le banc d'essai a été programmé sur la plateforme LabVIEW développée par National Instruments (LabVIEW 2017), qui est optimisée pour réaliser des interfaces de mesure et de contrôle via une programmation graphique. Le développement de ce programme a demandé une période d'apprentissage du langage suivi d'une longue période de codage, et à l'heure actuelle de nouvelles fonctionnalités sont toujours ajoutées régulièrement. Les fonctions principales sont la visualisation des données des capteurs, le contrôle de vérin et des organes de sécurité comme la porte frontale et la commande du chauffage. Les données peuvent être enregistrées en continu et exportées dans un format *.tdms* propriétaire de National Instruments, qui permet d'enregistrer rapidement une grande quantité de données. On peut voir trois captures d'écran sur les figures 2.26, 2.27, 2.28 les trois menus principaux du logiciel.

2.3.9 Post-traitement des données

Les données exportées au format *.tdms* doivent être traitées pour en extraire les informations utiles. Ces fichiers peuvent facilement être transformés en tableur Excel, mais les données restent sous forme de longues colonnes de valeurs, et avec 10 points par secondes les fichiers contiennent souvent plusieurs milliers de lignes. La première étape pour analyser les données est d'isoler les moments où le chariot se déplace et qui correspondent aux essais. Une application Matlab a donc été codée, permettant d'automatiser tout le traitement des résultats.

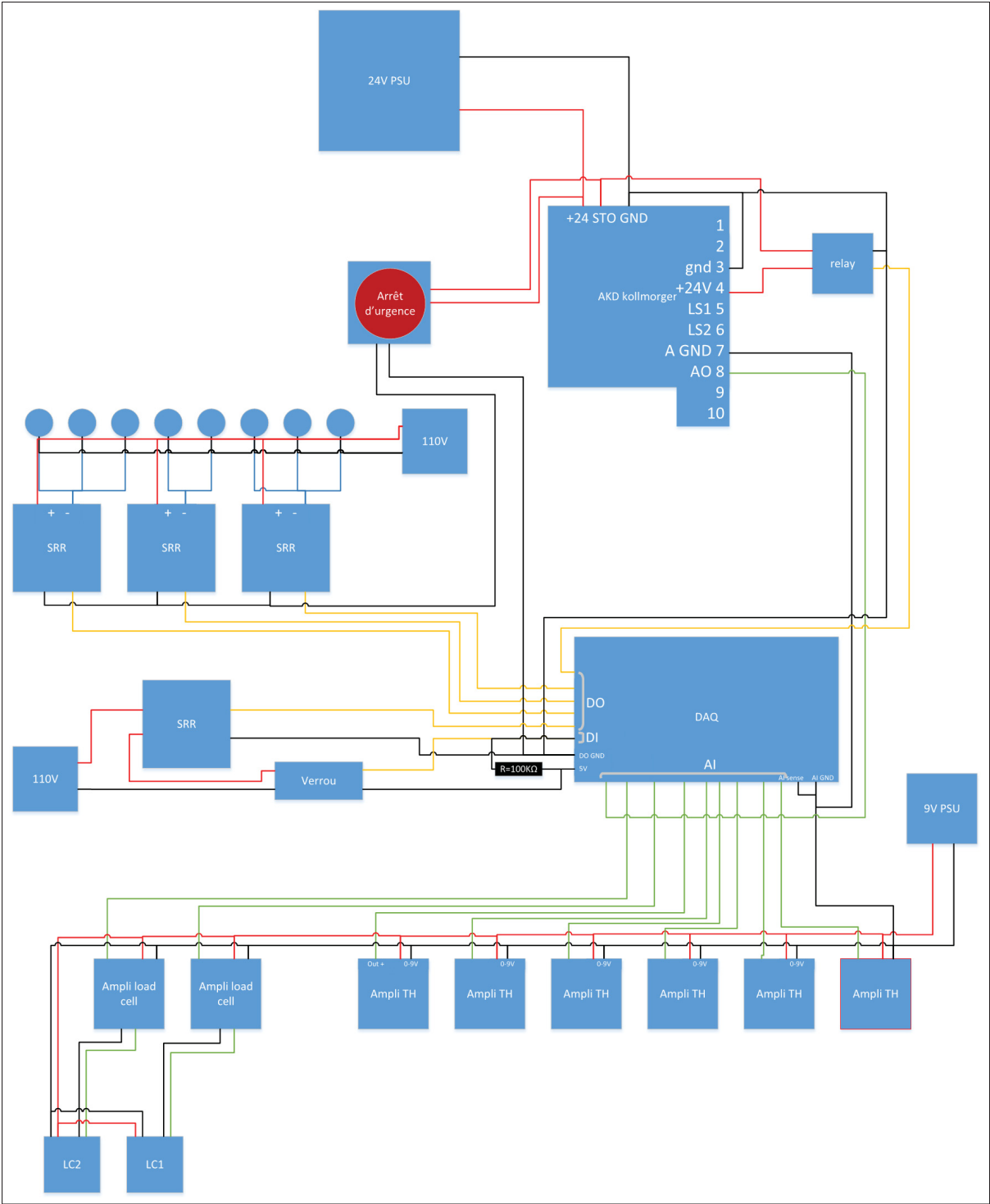


Figure 2.24 Schéma électrique du banc d’essai

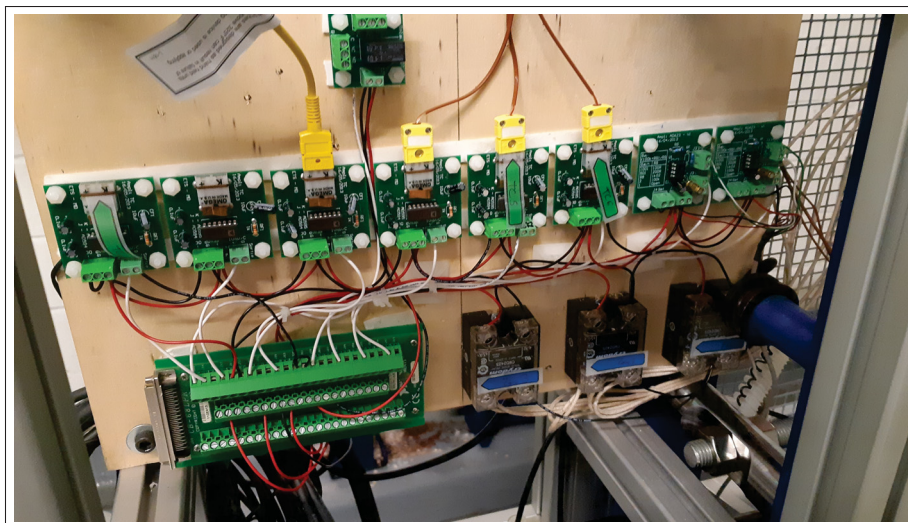


Figure 2.25 Photo du panneau électrique du banc d'essai

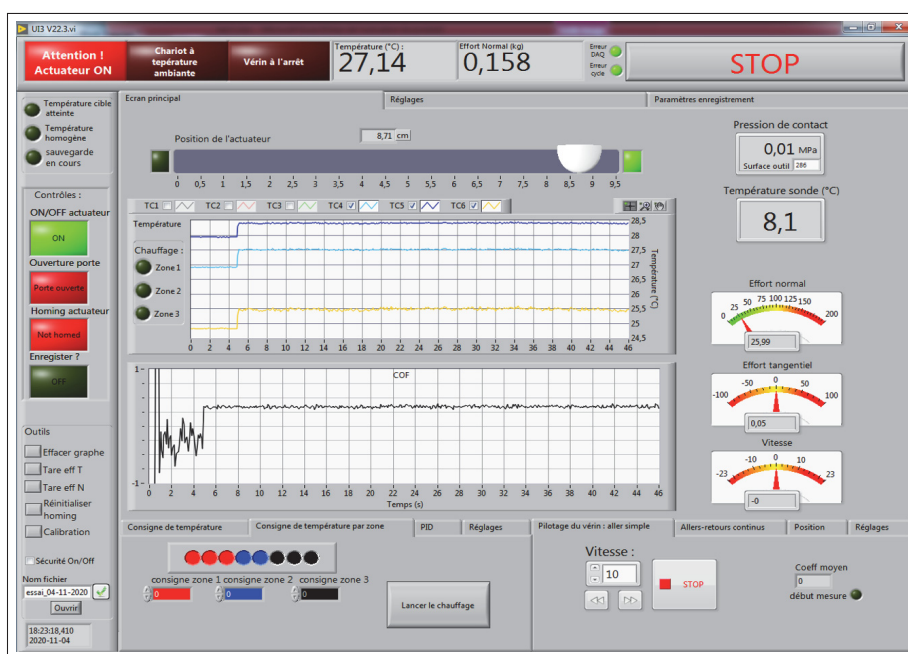


Figure 2.26 Panneau principal de l'interface

L'utilisateur doit, pour la première fois où il ouvre l'application, entrer les fichiers de calibration normale, tangentielle et les informations sur la pastille utilisée (Figure 2.29).

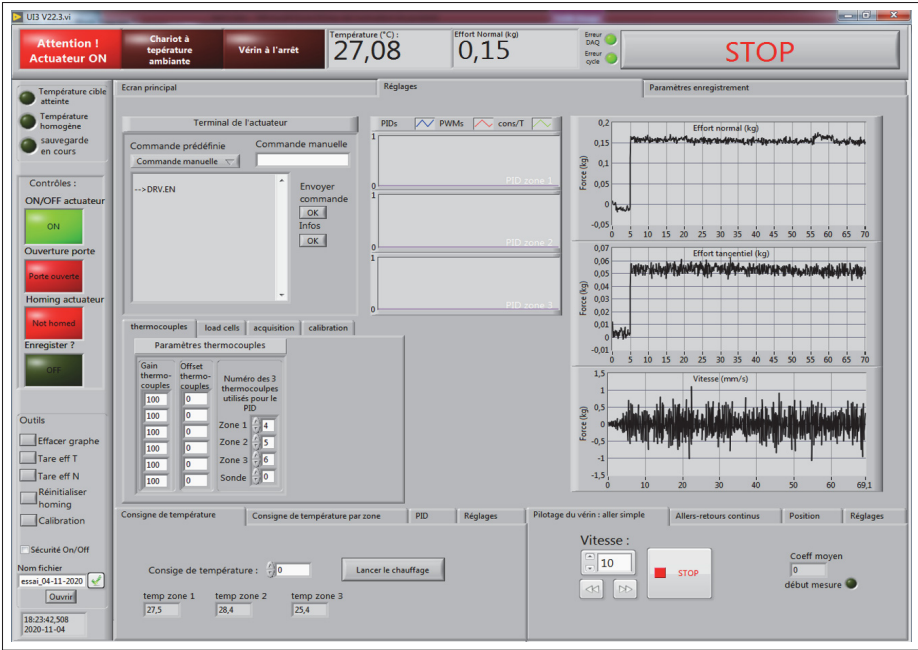


Figure 2.27 Panneau de réglage



Figure 2.28 Panneau de paramétrage de l'enregistrement des données

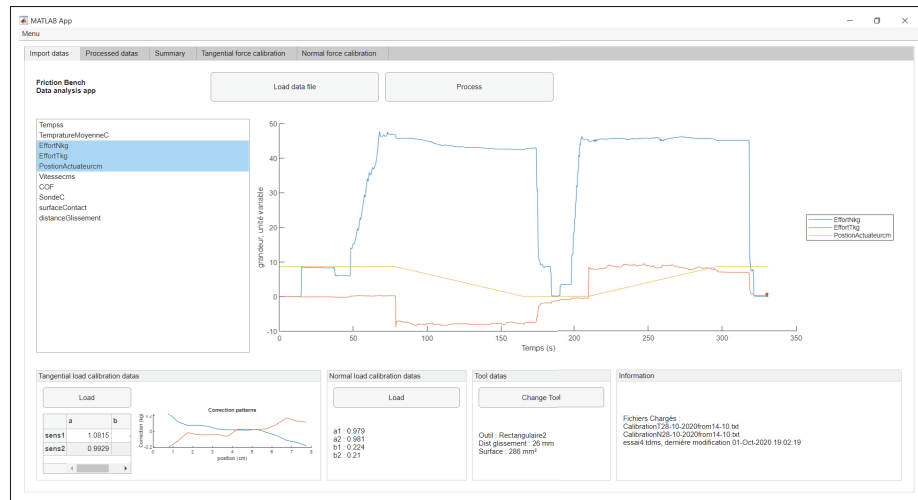


Figure 2.29 Panneau principal de l'application Matlab de post-traitement des données

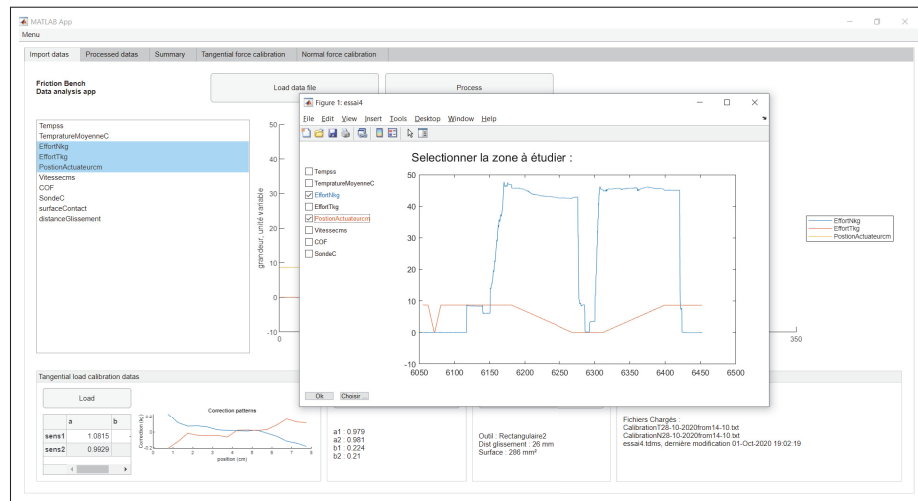
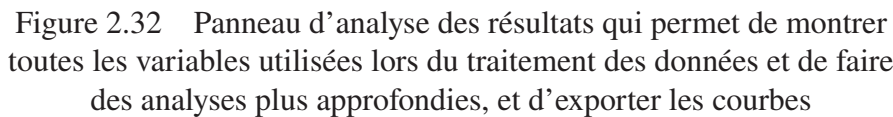


Figure 2.30 Fenêtre de sélection des données

Il peut ensuite charger le fichier d'un essai qu'il souhaite analyser en cliquant sur *Load file*. Une fenêtre de l'explorateur va lui permettre de le sélectionner, puis une seconde fenêtre va s'ouvrir, proposant d'analyser seulement une portion de l'essai (voir figure 2.30). L'utilisateur peut ensuite cliquer sur le bouton *Process* pour analyser les données. L'application affiche alors le panneau *Summary*, montré sur la figure 2.31, qui présente les courbes de COF ainsi que les efforts et les paramètres de l'essai. À partir de ce panneau, les données peuvent être exportées



stable ou non au cours de l'essai et ainsi de donner une indication sur le niveau de confiance que l'on peut avoir dans la mesure.

Un certain nombre de fonctions ont été ajoutées afin de faire des analyses plus approfondies, des contrôles des données, le tout de manière ergonomique et le plus accessible possible pour l'utilisateur.

Le processus suivi par le programme pour analyser les données consiste à tout d'abord d'isoler les moments où le chariot se déplace, puis à découper les données par zones le long du déplacement du chariot de manière à pouvoir comparer la valeur moyenne dans ces zones entre les essais (processus détaillé dans le chapitre sur la calibration de l'effort tangentiel, partie 3.1). Des corrections sont ensuite appliquées sur les efforts d'après les données de calibration (chapitre 3), puis le COF est calculé.

Tableau 2.4 Tableur Excel des résultats, automatiquement exportés depuis l'application de post-traitement des essais

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Température (°C)	Pression (MPa)	vitesse (mm/s)	distance de glissement (mm)	COF moyen	écart type COF	écart type effort N (kg)	fichier	path	outil	date de l'essai
26	472	0,91	5	26	0,1820	0,02	5,13	test4.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	rectangulaire1	17/09/2020
27	31	0,81	1	26	0,1533	0,02	2,59	essai1.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
28	31	0,79	10	26	0,1526	0,01	1,67	essai2.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
29	31	0,81	1	52	0,1693	0,01	0,27	essai1.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
30	31	0,79	10	52	0,1693	0,01	0,27	essai2.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
31	31	1,98	10	26	0,1687	0,02	1,04	essai3.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
32	31	1,98	10	52	0,1894	0,03	0,31	essai3.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
33	31	1,56	1	26	0,1403	0,01	1,14	essai4.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
34	31	1,56	1	52	0,1649	0,01	0,21	essai4.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
35	31	1,60	10	26	0,1499	0,01	1,48	essai5.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
36	31	1,60	10	52	0,1631	0,01	0,11	essai5.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
37	222	1,60	10	26	0,2427	0,05	2,49	essai7.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
38	222	1,60	10	52	0,4071	0,03	1,72	essai7.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire1	01/10/2020
39	47	0,84	10	26	0,1641	0,02	0,52	Essai1.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020
40	47	0,84	10	52	0,1531	0,02	0,38	Essai1.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020
41	510	0,80	1	26	0,2417	0,04	4,19	Essai5.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020
42	529	0,82	10	52	0,5600	0,05	3,98	Essai2.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020
43	529	0,79	1	26	0,1979	0,01	3,80	Essai3.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020
44	529	0,79	1	52	0,3054	0,03	4,71	Essai3.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020
45	509	1,08	10	26	0,4617	0,03	3,61	Essai4.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020
46	509	1,08	10	52	0,7317	0,11	4,30	Essai4.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020
47	529	0,82	10	26	0,3295	0,03	4,59	Essai2.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020
48	510	0,80	1	52	0,3658	0,03	3,50	Essai5.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020
49	509	1,27	1	26	0,2387	0,01	3,39	Essai6.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020
50	509	1,27	1	52	0,2719	0,02	2,87	Essai6.tdms	C:\Users\Guillaume\Documents	Rectangulaire2	15/10/2020

2.4 Étude approfondie de solutions techniques clés

L'objectif de cette partie est de s'attarder sur la conception des éléments du banc d'essai qui ont constitué de réels challenges techniques : assurer le parallélisme entre la pastille et l'échantillon et mesurer l'effort normal.

2.4.1 Solution technique permettant d'assurer le parallélisme entre la pastille et l'échantillon

Il est crucial de maintenir un parallélisme parfait entre la pastille et l'échantillon au cours d'un essai afin que la pression sous la pastille soit homogène. En effet lorsque la pression est homogène il est facile de la calculer avec la relation suivante :

$$P = \frac{F}{S} \quad (2.4)$$

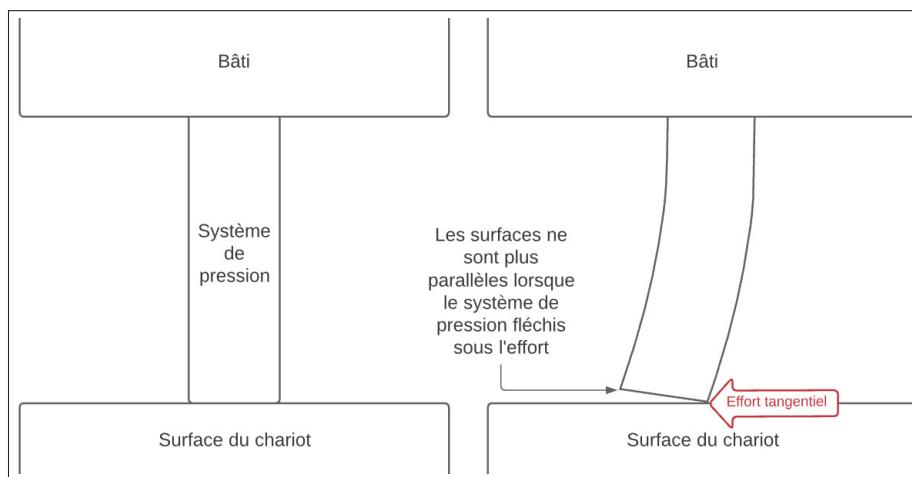


Figure 2.33 Schéma permettant de visualiser le problème de parallélisme lorsqu'un effort tangentiel est appliqué sur le système de pression lors du frottement

P représente la pression, F la force exercée sur la pastille, et S la surface de contact entre la pastille et l'échantillon. La pastille doit donc être maintenue parallèle à l'échantillon au cours de l'essai, quels que soient les efforts de frottement. Or, sous l'effet de ces efforts, le système de

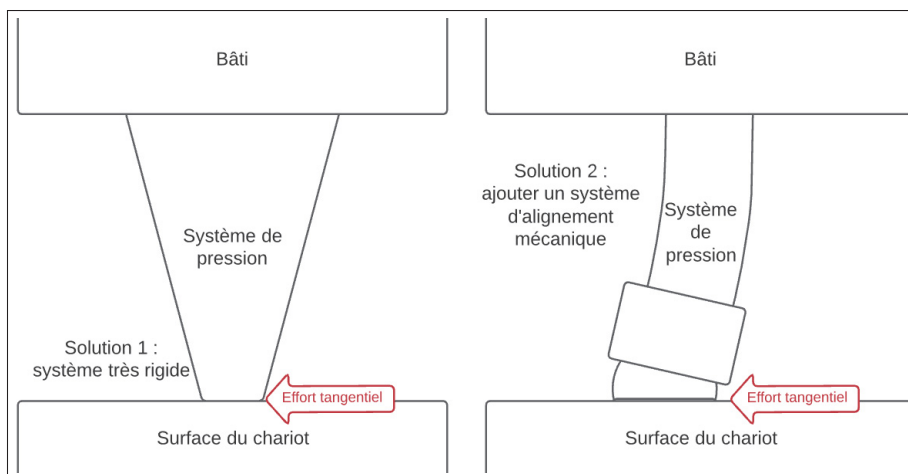


Figure 2.34 Solutions possibles pour remédier au problème de perte du parallélisme entre la pastille et l'échantillon

pression, n'étant pas parfaitement rigide, risque de se déformer, ce qui pourrait entraîner la perte du parallélisme (voir schéma 2.33). Il faut donc que le système de pression soit extrêmement rigide et s'assurer que sa flexion soit négligeable, ou alors trouver un moyen de garantir le parallélisme malgré la déformation des pièces (voir schéma 2.34). De plus si l'on ne compte que sur la rigidité il faudrait s'assurer soit que le parallélisme, une fois établi, l'est pour toute la durée de vie de la machine, soit qu'il soit vérifié et calibré régulièrement. Cette proposition semblant très complexe, un système adaptatif qui permet d'aligner automatiquement la pastille et l'échantillon de manière mécanique a été étudié. L'idée à la base de cette solution est de monter la pastille sur une rotule, aussi appelée liaison sphérique, qui laisse libre la rotation de la pastille et lui permette de s'aligner lors du contact avec l'échantillon.

Cependant cette solution présente aussi ses propres défis :

- il faut que la rotule présente suffisamment peu de frottements pour qu'elle autorise la rotation de la pastille lors du contact.
- la pastille étant à haute température, il faut soit que la rotule soit isolée de la température soit qu'elle puisse y résister.
- elle doit être suffisamment compacte pour être intégrée au système, mais suffisamment résistante pour pouvoir transmettre l'effort exercé par le système de pression à la pastille.

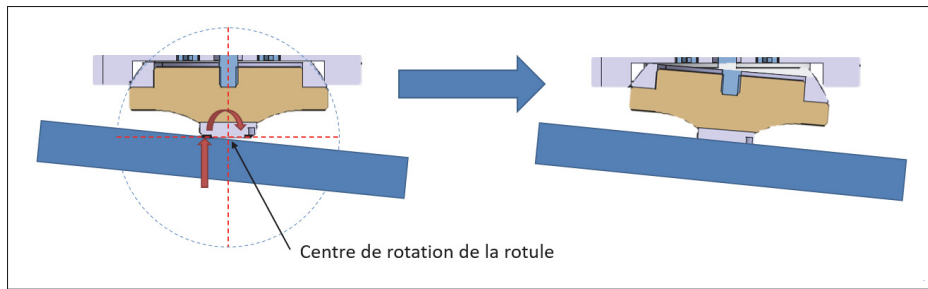


Figure 2.35 Schéma du principe de fonctionnement de la rotule permettant de garantir le parallélisme entre la pastille et l'échantillon

Le processus de design pour obtenir un système fonctionnel s'est fait en plusieurs étapes, que l'on peut voir résumées sur les figures 2.36.

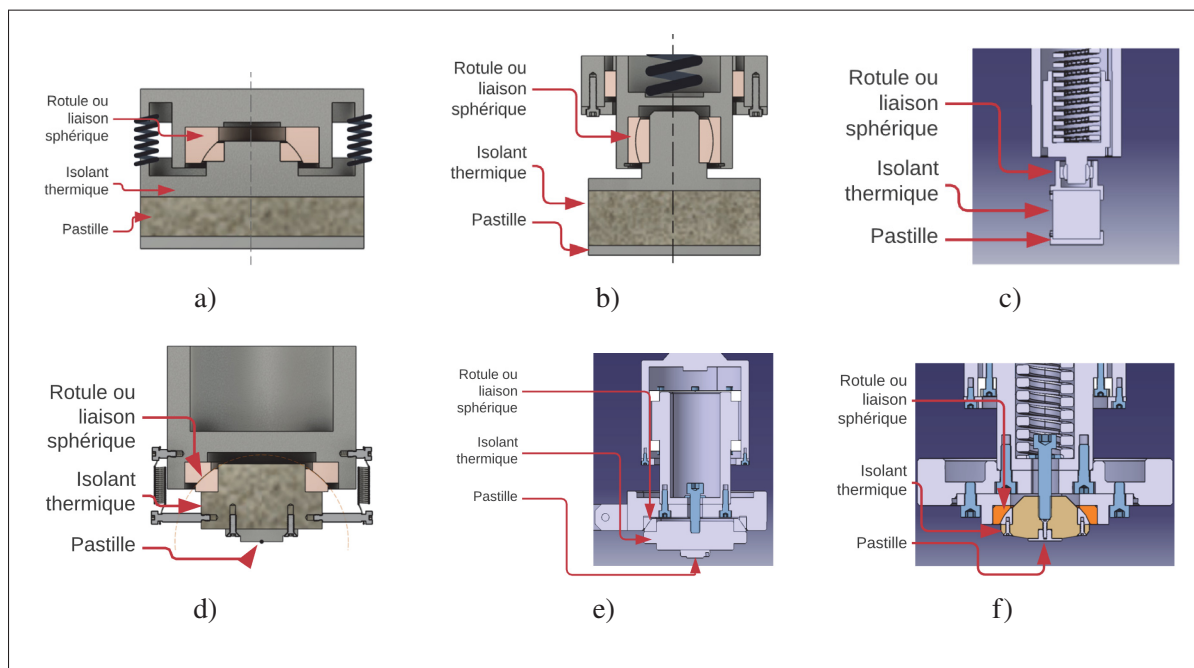


Figure 2.36 Différentes étapes de conception de la rotule

2.4.1.1 Début de la conception et maintien de la rotule

Sur la première figure (2.36a) on peut observer le premier croquis imaginé pour répondre au problème : la couche la plus basse est celle qui va réaliser le frottement, elle est donc en acier,

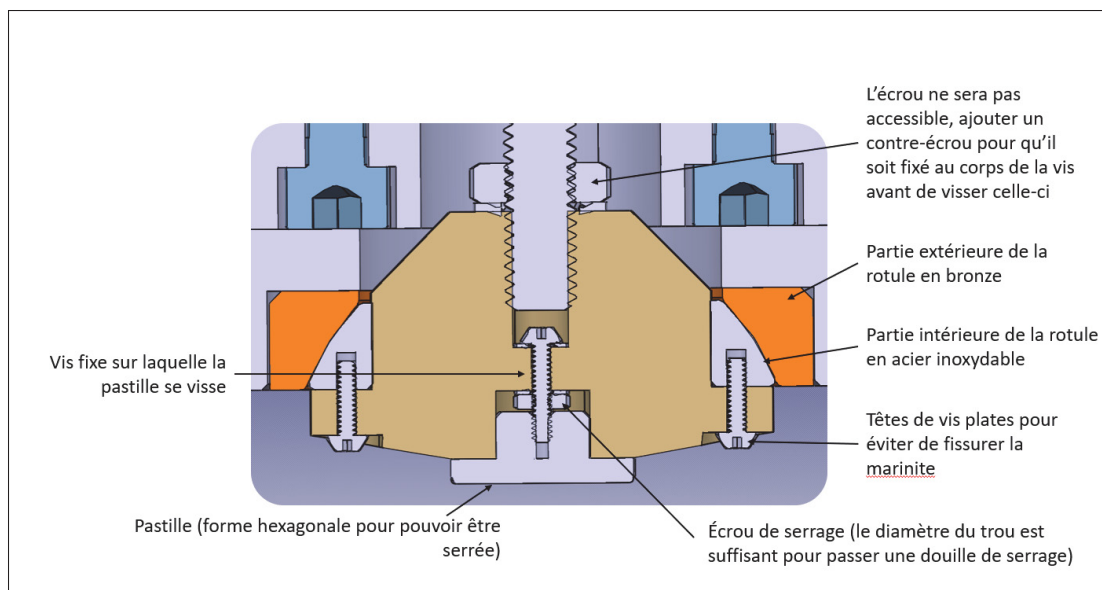


Figure 2.37 Schéma version finale de la rotule

surmontée d'une couche de matériau isolant pour protéger le reste du système de la chaleur. Ensuite au-dessus on observe l'assemblage de la rotule. On peut aussi noter la présence de ressorts qui permettent de maintenir l'assemblage. Ceux-ci, peu pratiques et encombrants, ont été remplacés sur le second schéma (2.36b) par une rotule disponible dans le commerce, de type rotule radiale, qui peut reprendre des efforts axiaux dans les deux sens.

2.4.1.2 Modélisation 3D et dimensions de la pastille

Une fois que le mécanisme semblait correct, une modélisation sous le logiciel de modélisation 3D CATIA a donc été faite afin d'ajouter des dimensions réelles au système qui pour l'instant avait été fait avec des dimensions indicatives. Une fois la rotule sélectionnée parmi les rotules du commerce pour pouvoir résister à un effort correspondant au cahier des charges du banc d'essai et après avoir ajouté une épaisseur d'isolant identique à celle utilisée sur le chariot (des simulations avaient été réalisées pour choisir la bonne épaisseur d'isolant pour le chariot), la modélisation a permis de mettre en évidence plusieurs contraintes. Tout d'abord la pastille a une taille très grande sur le dessin, pour que le système puisse exercer la pression requise par le cahier des charges de 10 MPa une force importante serait nécessaire. Or plus la force est grande,

plus la cellule de charge qui va la mesurer doit pouvoir accepter des charges importantes, et de manière générale tous les composants doivent pouvoir résister à des efforts supérieurs. En outre, plus les efforts sont importants plus les risques pour l'opérateur de la machine sont élevés. L'étude préliminaire menée par Le Royer (2017a) avait donc déterminé un compromis à 1500N. Cette valeur a été conservée pour notre étude car elle permet d'utiliser une surface de pastille suffisamment grande devant la taille des gouttelettes de lubrifiant (plus d'un ordre de grandeur de différence), tout en limitant l'encombrement nécessaire et le prix des composants. La surface de contact acier aluminium doit donc être de 150 mm^2 pour atteindre la pression requise.

2.4.1.3 Contraintes liées au basculement de la pastille

Une fois cette contrainte définie, on peut l'incorporer à la conception 3D. La surface sur la figure 2.36c est beaucoup plus grande que 150 mm^2 , il faut donc la réduire grandement. Or si l'on réduit cette surface (figure 2.36d) un nouveau problème se pose : l'ensemble accroché à la rotule ne va pas s'aligner à la surface, mais basculer lors du mouvement (ce défaut a pu être identifié grâce à des prototypes imprimés par fabrication additive). En observant cela, on peut mettre en évidence les conditions qui permettent à la rotule de remplir sa fonction, c'est-à-dire de permettre l'alignement des deux surfaces en contact malgré les potentiels défauts de parallélisme : il faut que le centre de rotation de la rotule soit au centre de la pastille. Ainsi lorsque les surfaces ne sont pas parallèles, au point de contact un effort va se créer qui va faire pivoter la pastille jusqu'à ce qu'elle soit plaquée entièrement sur la surface de l'échantillon et que l'effort sous elle soit homogène, comme le montre le schéma 2.35.

2.4.1.4 Liaison rotule

Un autre point à noter pour le schéma 2.36d : la rotule de type radiale n'est plus utilisable ici, car son centre de rotation ne serait pas assez bas, c'est donc une rotule axiale qui est utilisée (on peut voir sur le schéma 2.38 la différence entre les deux types de rotules), et l'on retrouve le même problème que dans le dessin 2.36a de maintien de l'assemblage lorsque le système de

pression est relevé, d'où la présence de ressorts (au nombre de 3, ce qui explique que seulement un seul soit visible sur le dessin en coupe).

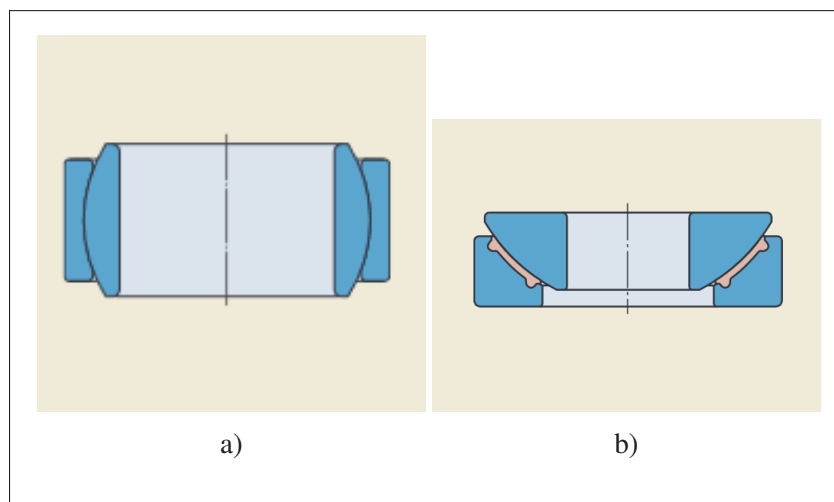


Figure 2.38 a) Rotule radiale. b) Rotule axiale
Tiré de SKF, <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/spherical-plain-bearings-rod-ends>
(Consulté le 23 octobre 2020)

Mais lors du passage à la modélisation 3D pour la figure 2.36f la recherche d'une rotule disponible dans le commerce avec des caractéristiques répondant au besoin a été infructueuse : la localisation du centre de rotation et le diamètre important (nécessaire pour avoir une distance d'isolant entre la pastille et la rotule suffisante pour garantir une température de fonctionnement de la rotule dans les spécifications des constructeurs) nécessitent que celle-ci soit fabriquée sur mesure. Cependant sur la figure 2.36f on peut observer qu'un autre système de maintien de la rotule a été trouvé, permettant d'éviter l'utilisation de ressorts, qui aurait apporté de nombreuses contraintes de conception et difficultés au montage. En revanche l'assemblage a été quelque peu complexifié afin que les différents éléments puissent être assemblés. Cette version de la rotule a été imprimée en 3D afin de vérifier son bon fonctionnement, ce qui a permis de mettre en évidence un autre problème : les frottements dans la rotule peuvent être trop importants pour qu'elle tourne et permette l'alignement des surfaces. Les paramètres et dimensions de la rotule ont donc été étudiés pour voir quelle était leur influence sur son fonctionnement. Une

première approche a été chercher une relation entre la valeur du coefficient de frottement et le rapport entre les diamètres de la pastille et de la rotule pour que celle-ci puisse pivoter. Les calculs ne seront pas développés en détail, car une autre approche est expliquée après avec une modélisation plus rigoureuse.

2.4.1.5 Première approche pour le dimensionnement de la rotule

Pour permettre le mouvement de la rotule la force appliquée sur la rotule doit être en dehors du cône de frottement afin que la rotule puisse pivoter. Le postulat de cette méthode est que cela signifie que le point d'application de la force doit être en dehors du cône. Pour calculer la limite on place le point d'application de la force sur le cône de frottement. La figure 2.39 présente les différentes variables nécessaires pour ce calcul. L'objectif est de déterminer les différents paramètres présentés sur la figure pour que l'effort F permette de faire pivoter la rotule. R est appelé le rayon de la rotule, et r le rayon de la pastille. L'angle ϕ correspond au coefficient de frottement. La relation suivante (2.5) correspond à la zone limite à partir de laquelle la pastille est entièrement dans le cône de frottement de la rotule et ne remplit plus sa fonction.

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{\pi}{2} - \alpha - \phi \\ a &= R \cdot \cos(\pi/2 - \alpha) \\ &= R \cdot \sin \alpha \\ b &= R \cdot \cos(\alpha) \\ \tan(\beta) &= \frac{b}{r + a} \\ r &= \frac{b}{\tan(\beta)} - \alpha\end{aligned}$$

$$\boxed{r = \frac{R \cdot \cos \alpha}{\tan(\frac{\pi}{2} - \alpha - \phi)} - R \cdot \sin(\alpha)} \quad (2.5)$$

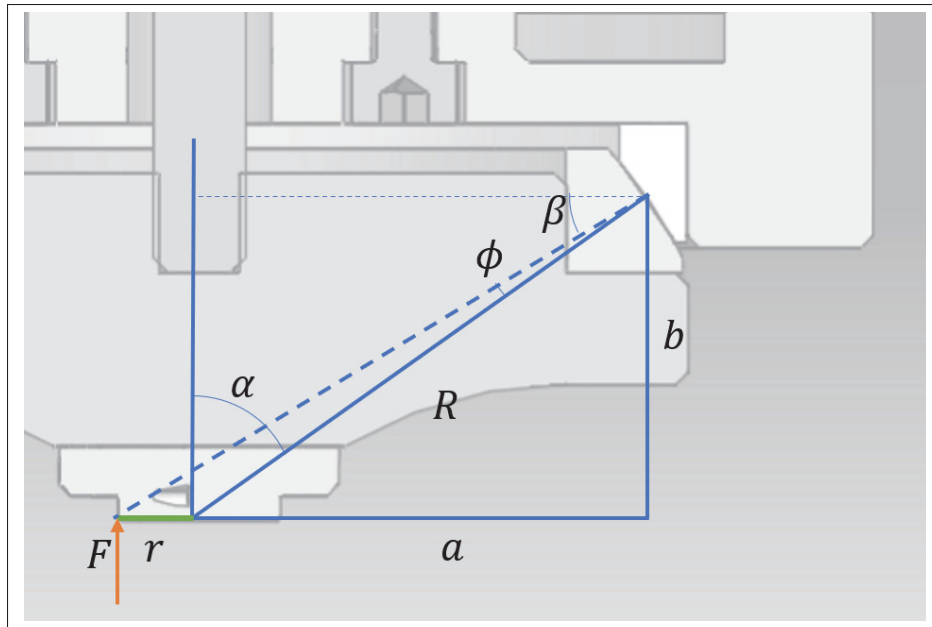


Figure 2.39 Schéma du principe de fonctionnement de la rotule permettant de garantir le parallélisme entre la pastille et l'échantillon

D'après cette relation il faudrait que la pastille soit la plus grande possible pour être le plus éloigné du cône de frottement et assurer qu'elle pivote. Cependant, plus la pastille est grande, moins la pression de contact avec l'échantillon est grande, étant donné que, comme vu précédemment, l'effort maximal est fixé à 1500 N. On peut donc isoler 3 variables que l'on cherche à définir :

- R doit être le plus grand possible pour limiter au maximum les transferts de chaleur entre la pastille et la rotule.
- r doit être au maximum de 6.8mm (rayon permettant d'obtenir une surface de 150 mm² et ainsi une pression de 10MPa).

On peut ainsi modifier la relation précédente sous la forme suivante :

$$\frac{r}{R} = \cos \alpha (\tan(\alpha + \phi) - \tan \alpha) \quad (2.6)$$

D'après les critères établis précédemment on sait que l'on cherche à obtenir un rapport $\frac{r}{R}$ le plus petit possible. Les deux variables sont ϕ et α , on peut rapidement identifier que ϕ doit être le plus faible possible, ce qui d'un point de vue physique est logique, le coefficient de frottement de la rotule doit être le plus petit possible pour qu'elle puisse pivoter librement. On fabriquera donc une rotule en bronze avec un COF de 0.15. Le second paramètre α est plus complexe à visualiser, la valeur du rapport $\frac{r}{R}$ a donc été tracée en fonction de α (figure 2.40).

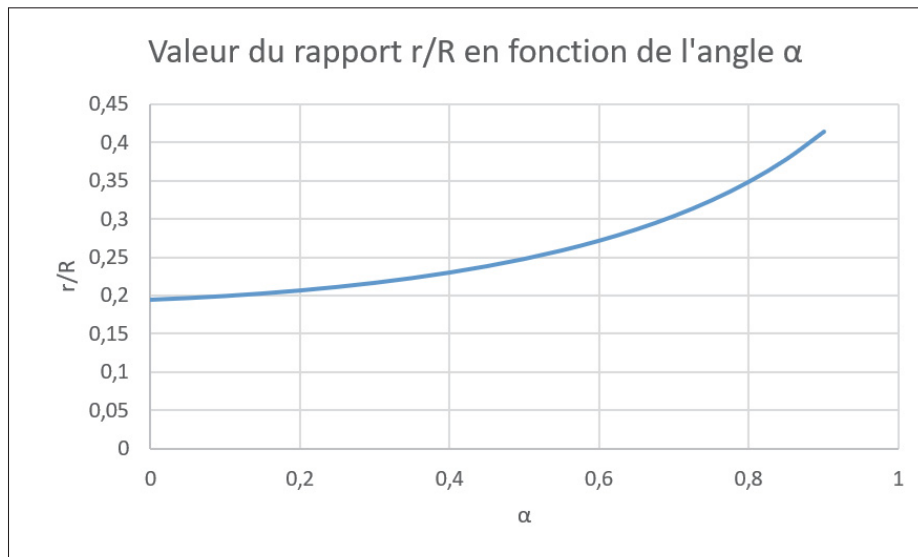


Figure 2.40 Tracé de $\frac{r}{R}$ en fonction de α , en radians

On observe grâce à ce tracé que la valeur de alpha doit être la plus petite possible. Cependant dans la pratique une valeur de α très faible rendrait la rotule non fonctionnelle, ce qui met en évidence qu'il manque une contrainte : la valeur de α ne peut pas être trop faible sinon lors du frottement la partie inférieure de la rotule pourrait être sortie de son logement sous l'effet de la composante tangentielle des efforts. On peut ainsi définir un angle minimal en fonction du type de coefficient de frottement que l'on veut mesurer. En effet, si le coefficient de frottement mesuré est très faible l'angle α peut être bien plus faible sans que la rotule soit délogée, et à l'opposé si le COF est grand α doit être grand aussi. D'après Ghiotti *et al.* (2017) la littérature le COF devrait être proche de 0,3 - 0,4, mais afin d'assurer une certaine marge de sécurité et de laisser la possibilité de mesurer d'autres matériaux, le COF max a été choisi à 1,5. On peut ainsi en déduire un angle α minimum de $\arctan(1,5) = 0,98$ radians ou 56 degrés. On a

désormais les valeurs de toutes les variables, on peut donc calculer R :

$$R = \frac{r}{\cos(\alpha) * (\tan(\alpha + \phi) - \tan(\alpha))}$$

$$R = 19,5mm \quad (2.7)$$

C'est cette approche qui a été utilisée pour dimensionner la rotule, cependant le point de départ du calcul, disant que l'effort doit être en dehors du cône de frottement, peut être critiqué. Une autre approche, plus rigoureuse, a donc été étudiée (après la fabrication de la rotule), elle est décrite dans la section suivante.

2.4.1.6 Seconde approche pour le dimensionnement de la rotule

La première étape est de modéliser le système. Pour cela on considère une étude plane, car la rotule est axisymétrique. On considère le cas où elle n'est pas alignée avec la surface avec laquelle elle est en contact, il va donc y avoir un effort \vec{P} à ce point de contact, et l'objectif est de regarder si cet effort permet de faire pivoter la rotule ou non. On modélise le système par une liaison rotule avec le bâti. Mais pour connaître l'effort tangentiel qui est exercé au niveau de la surface de contact réelle de la liaison rotule, on rajoute une liaison ponctuelle dont la normale est tangentielle au contact, comme on peut le voir sur l'image 2.41. Ce schéma cinématique est ensuite tourné dans un repère qui permet d'exprimer plus facilement les efforts (figure 2.42). On isole le solide 1 du schéma, puis on fait le bilan des actions mécaniques extérieures :

$$\left\{ \mathcal{T}_P \right\}_{B,R_1} = \begin{pmatrix} P \cdot \cos(\theta) & - \\ P \cdot \sin(\theta) & - \\ - & 0 \end{pmatrix}_{B,R_1}$$

$$\left\{ \mathcal{T}_{1 \rightarrow 2} \right\}_{C,R_1} = \begin{pmatrix} F_{C,x} & - \\ F_{C,y} & - \\ - & 0 \end{pmatrix}_{C,R_1}$$

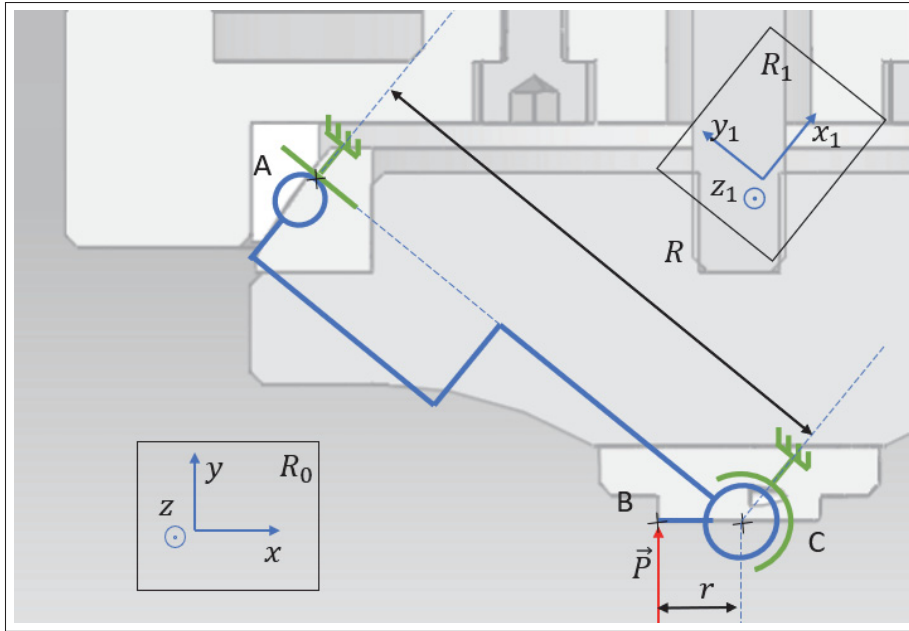


Figure 2.41 Schéma cinématique superposé à une image de la rotule, permettant de montrer comment le mécanisme a été modélisé pour l'étude

$$\left\{ \mathcal{T}_{1 \rightarrow 2} \right\}_{A, R_1} = \begin{pmatrix} F_{P,x} & - \\ 0 & - \\ - & 0 \end{pmatrix}_{A, R_1}$$

Maintenant d'après le principe fondamental de la statique :

$$\text{Théorème de la résultante statique : } \begin{cases} P \cdot \cos(\theta) + F_{C,x} + F_{p,x} = 0 & (2.8) \\ P \cdot \sin(\theta) + F_{C,y} = 0 & (2.9) \end{cases}$$

Pour appliquer le théorème du moment statique il faut déplacer tous les moments au même point. On les déplace donc en C grâce à la relation de Varignon :

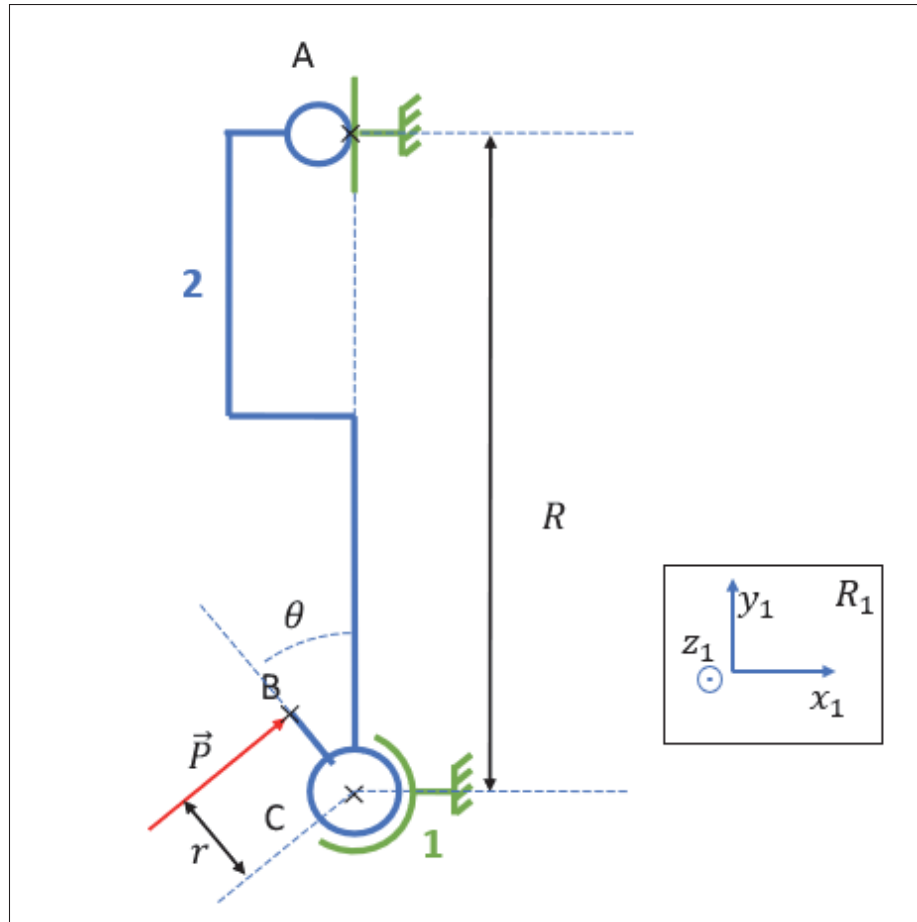


Figure 2.42 Schéma cinématique utilisé pour l'étude de mécanique statique sur la rotule

$$\begin{aligned}
 \vec{M}_{\vec{P},C,R_1} &= \vec{M}_{\vec{P},B,R_1} + \vec{CB} \wedge \vec{P} \\
 &= \vec{0} + \begin{pmatrix} -r \cdot \sin(\theta) \\ r \cdot \cos(\theta) \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} P \cdot \cos(\theta) \\ P \cdot \sin(\theta) \\ 0 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -r \cdot P \cdot \sin^2(\theta) - r \cdot P \cdot \cos^2(\theta) \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -r \cdot P \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\vec{M}_{1 \rightarrow 2, C, R_1} &= \vec{M}_{\vec{F}_p, B, R_1} + \vec{C}A \wedge \vec{F}_p \\
&= \vec{0} + \begin{pmatrix} 0 \\ R \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} F_{p,x} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -R \cdot F_{p,x} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

On peut maintenant écrire le théorème du moment statique :

$$\text{Théorème du moment statique : } \begin{cases} -r \cdot P - R \cdot F_{p,x} = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

On peut alors résoudre le système composé des équations 2.8, 2.9 et 2.10. On obtient le résultat suivant :

$$\begin{cases} F_{p,c} = \frac{r \cdot P}{R} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} F_{c,y} = -P \cdot (\cos(\theta) + \frac{r}{R}) \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} F_{c,y} = -P \cdot \sin(\theta) \end{cases} \quad (2.13)$$

Maintenant que les efforts sont déterminés, on peut vérifier dans quelles conditions il y a adhérence ou glissement de la rotule. Pour cela il faut exprimer la condition de frottement. D'après le théorème des frottements de Coulombs (Dante, 2015) on peut écrire la condition pour qu'il y ait glissement :

$$F_T > \mu \cdot F_N$$

Avec F_T l'effort tangentiel au contact et F_N l'effort normal. D'après notre modélisation l'effort tangentiel au contact est l'effort exercé par la liaison ponctuelle $F_{p,x}$ et l'effort normal $F_{c,y}$. En remplaçant, on obtient l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \frac{r \cdot P}{R} &> -\mu \cdot P \cdot \sin(\theta) \\ \Leftrightarrow r &> -R \cdot \mu \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Cette relation donne le critère de dimensionnement. Par cette méthode on obtient une formule différente de celle obtenue avec la méthode précédente. Elle est moins contraignante, c'est-à-dire que si une dimension est valide avec la première méthode elle l'est avec la seconde. Mais cette seconde méthode a été développée après la fabrication de la rotule, la suite du dimensionnement présenté ci-dessous se base donc sur les résultats de la première, qui indiqué précédemment donne tout de même une rotule fonctionnelle.

2.4.1.7 Finalisation du design

Le résultat 2.7 est donc repris pour la suite du dimensionnement de la rotule. Avec R de 20 mm, l'épaisseur d'isolant (en brun sur la figure 2.37) sera donc assez faible. Pour éviter que la rotule ne chauffe trop et soit endommagée (le bronze a une résistance limitée à haute température) il faudra limiter son temps passé à haute température, par exemple en faisant chauffer la pastille en la posant sur l'échantillon au dernier moment une fois que tout le reste du banc est à la bonne température. C'est donc le processus qui a été suivi pour obtenir la géométrie de la rotule. Avant d'obtenir la pièce finale il faut encore déterminer les géométries des pièces, la manière dont elles vont s'assembler, comment et dans quel ordre elles vont être montées, comment faire pour que les pastilles soient interchangeables facilement, quels matériaux choisir, le design de la pièce de la rotule en elle-même (en particulier le dimensionnement de la surface de contact en fonction de la force et de la température), mais cela relève plus du domaine de l'ingénierie que de la recherche et ce ne sera donc pas développé dans ce mémoire. Le montage final est

détaillé sur la figure 2.37, le matériau isolant choisi (en jaune sur le schéma) est de la céramique verre-mica, qui permet d'usiner facilement la forme complexe de la pièce tout en permettant une grande résistance à la température et une bonne isolation thermique.

2.4.2 Système de mesure de l'effort normal

Le système de mesure de l'effort normal a nécessité deux itérations avant de donner de bons résultats, comme décrit dans la partie 3. C'est à la version finale que l'on s'intéresse dans cette section, mais avant d'évoquer les détails techniques, il faut revenir à l'origine du problème afin d'expliquer pourquoi la mesure de l'effort normal est faite de cette manière. En effet il y a de nombreux moyens de mesurer cet effort, chaque solution ayant ses avantages et inconvénients.

On peut diviser les possibilités en deux catégories : les systèmes de mesure avec une cellule de charge au-dessus du point de frottement (c'est-à-dire dans le système de pression), et avec une cellule de charge en dessous. Le premier choix possède un avantage, la cellule de charge est proche de la zone de frottement et peut être placée entre le système d'application de l'effort et la pastille. De plus pendant un essai de frottement le chariot se déplace alors que le système de pression est immobile, il semble donc plus simple de la placer à cet endroit plutôt que dans ou sous le chariot. Cependant cette position possède un certain nombre inconvénients :

- le système de pression est soumis à un effort tangentiel dû aux forces de frottement. Or une cellule de charge est généralement conçue pour ne subir que des efforts selon un seul axe. Il aurait donc fallu concevoir un système qui permette de reprendre ces efforts tangentiels tout en laissant libre l'effort normal, par exemple avec un système de piston positionné verticalement, qui pourrait librement se déployer verticalement, mais résisterait à des efforts tangentiels (voir figure 2.43). Mais un tel système posséderait nécessairement des frottements qui s'ajouteraient à la mesure de l'effort.
- si la cellule de charge était au-dessus de la zone de frottement, il risquerait d'y avoir une zone morte dans laquelle elle ne permettrait pas de mesurer la charge, correspondant au poids du système sous la cellule de charge. Le schéma 2.44 a été conçu pour illustrer ce principe, l'effort F_p représente le poids de la cellule de charge (en bleu) et de la pièce verte.

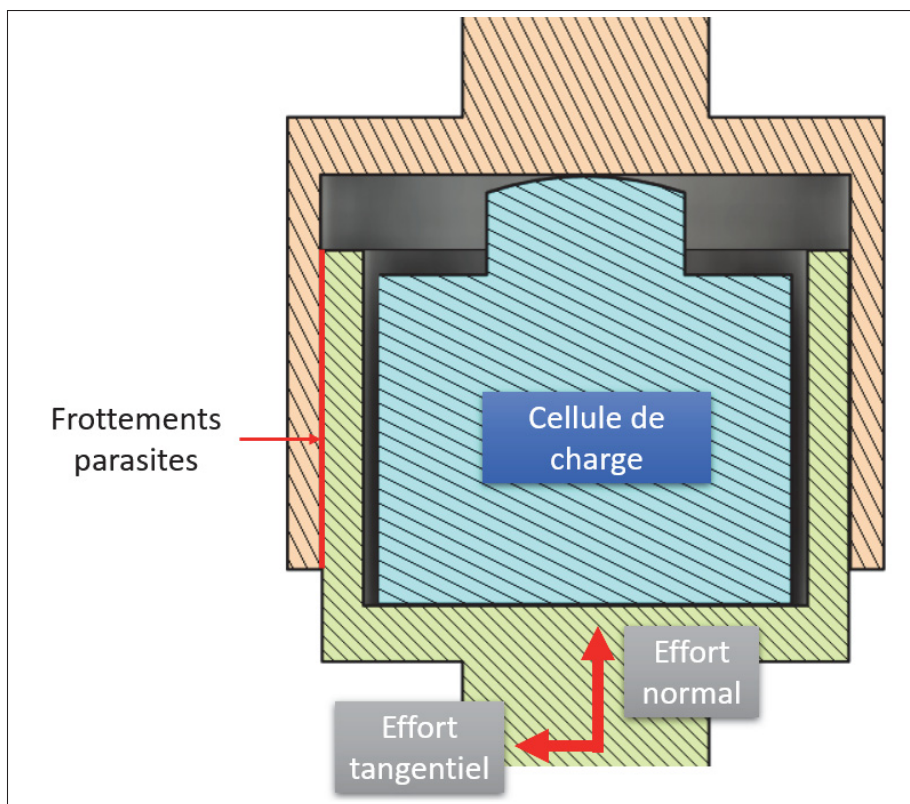


Figure 2.43 Schéma permettant de visualiser les frottements parasites qui perturberaient la mesure si la cellule de charge était située dans le système de pression

Ce poids est retenu par la pièce orange, modélisé par les efforts F_1 . On peut donc calculer ces efforts facilement : $F_1 = F_p/2$. Sur la seconde figure, le système de pression est entré en contact avec la surface du chariot. Le poids F_p est alors supporté par la surface du chariot, c'est-à-dire qu'un poids F_p est appliqué sur le chariot. Cependant on peut observer que la cellule de charge ne mesure aucun poids. C'est seulement à la troisième figure que la cellule de charge commence à mesurer un poids F_2 que l'on peut exprimer par la relation suivante : $F_2 = F_3 - F_p$. Il y a donc un décalage entre ce que la cellule de charge mesure et la charge réelle. Il est possible de le corriger en connaissant F_p , mais par contre il n'est pas possible de connaître l'effort quand on est dans le cas du dessin du milieu, tant que l'effort exercé sur le chariot est inférieur à F_p il n'est pas mesurable, ce qui pourrait poser problème dans certains cas.

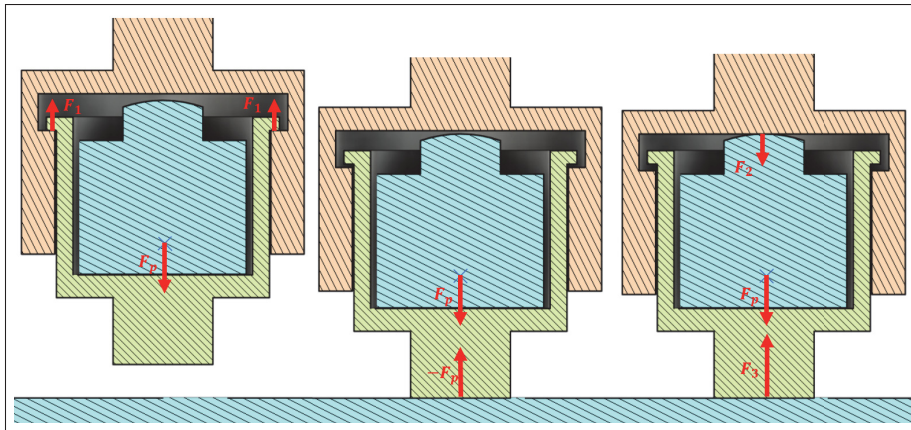


Figure 2.44 Schéma pour mettre en évidence la zone morte dans la mesure lorsque la cellule de charge est au-dessus de la zone de frottements

- le système de pression est déjà une zone très complexe comme nous avons pu le voir lors de l'étude de la rotule dans la sous partie précédente, et gestion l'espace était un point critique lors de sa conception. Ajouter une cellule de charge aurait donc été particulièrement difficile.

Cette solution avec la cellule de charge dans le système de pression a donc été éliminée, il reste donc la solution de la placer sous la zone de frottement. Il serait possible de la positionner dans le chariot, mais étant donné qu'il se déplace et qu'il chauffe c'est assez complexe. Le plus simple est donc de la mettre sous la plaque de support du chariot. Afin qu'il n'y ait pas de frottements parasites comme expliqués pour la figure 2.43 (c'est de plus le problème rencontré avec la première version du système de mesure de l'effort normal, voir le chapitre 3 sur la calibration) trois cellules de charge ont été utilisées. De cette manière les 3 appuis ponctuels forment un appui plan sur lequel la plaque de support peut reposer. Ce montage permet de reprendre l'effort normal, mais ne permet pas de résister aux efforts tangentiels ni de localiser la plaque. Il faut donc ajouter une liaison supplémentaire. Celle-ci a été conçue de manière à diminuer au maximum tout frottement en utilisant deux liaisons pivots au lieu d'une liaison glissière comme le faisait la version précédente du système, tel que montré sur le schéma 2.45. Ce montage permet de bloquer toutes les rotations et translations sauf la translation selon l'axe z . Les deux liaisons sont réalisées par des paliers en bronze, ils possèdent un léger jeu selon

la rotation en x permettant de compenser l'hyperstatisme du montage de manière à ce que les 3 cellules de charges soient en contact avec la plaque de support du chariot. Le frottement est calculable de la manière suivante :

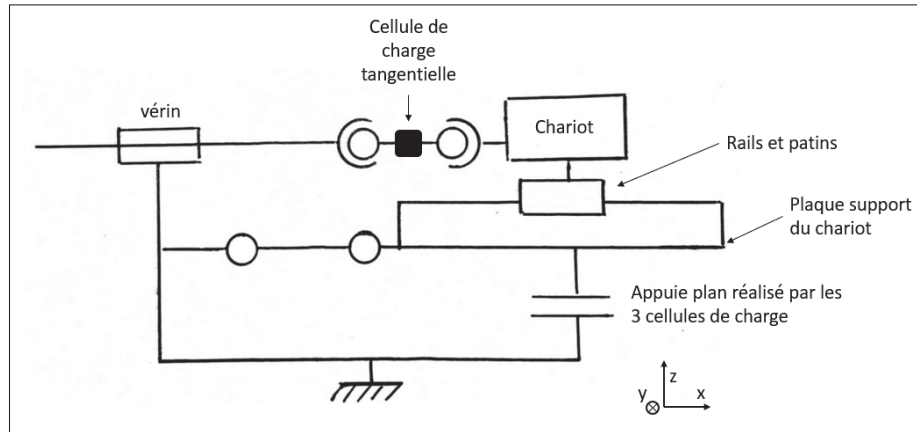


Figure 2.45 Schéma cinématique de l'ensemble système de mesure de l'effort normal, chariot et vérin

On commence par calculer l'effort de frottement qui résiste la rotation F_{Rp} dans le palier lisse. Il dépend, d'après la loi de frottement de Coulomb, du COF du palier μ_p et de l'effort normal au niveau du contact F_{Np} . Celui-ci est égal à l'effort tangentiel du frottement F_T . On peut observer un schéma cinématique du montage adapté pour ce calcul sur la figure 2.46.

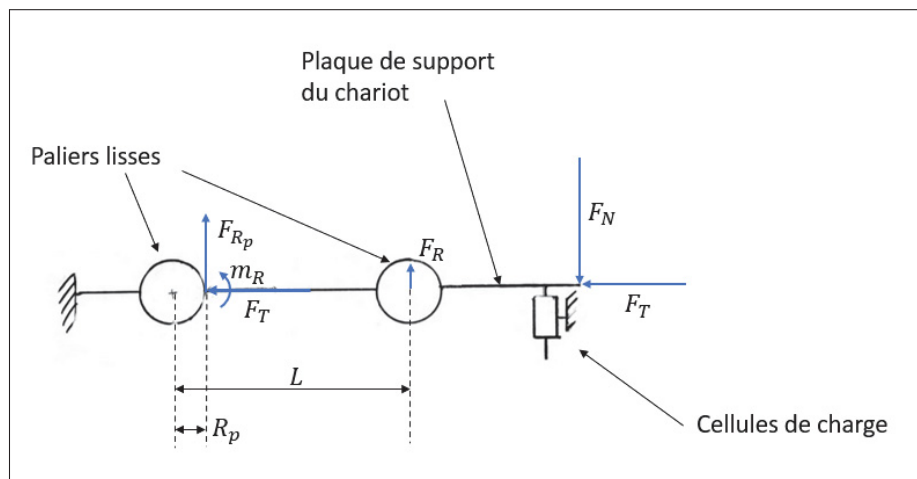


Figure 2.46 Schéma pour le calcul des efforts de frottement parasites dans le système de mesure de l'effort normal

$$F_{R_p} = F_{N_p} \cdot \mu_p \quad (2.15)$$

On peut ensuite calculer le moment résistant m_R de la façon suivante :

$$m_R = R_p * F_{R_p} \quad (2.16)$$

Avec R_p correspondant au rayon du palier. On peut maintenant déduire l'effort résistant exercé sur la plaque de support du chariot par les frottements dans le palier d'une des liaisons en utilisant la distance entre les deux pivots L :

$$F_R = \frac{m_R}{L} \quad (2.17)$$

Étant donné qu'il y a deux liaisons pivots, on peut multiplier ce résultat par deux pour obtenir l'effort résistant total F_{R_t} . Puis en remplaçant l'effort tangentiel par l'effort normal du frottement via la relation $F_T = F_N * \mu_f$ (μ_f est le COF de l'essai de frottement), et enfin on divise ce résultat par l'effort normal du frottement de l'essai de manière à obtenir une erreur relative à celui-ci :

$$\frac{F_{R_t}}{F_N} = 2 \cdot \frac{\mu_p * \mu_f * R_p}{L} \quad (2.18)$$

On remarque que pour diminuer ce rapport il faut un faible COF du palier μ_p , que son rayon soit faible et que L soit la plus grande possible. Après optimisation des paramètres de manière à avoir les meilleures valeurs possible tout en résistant aux contraintes mécaniques et en utilisant l'espace disponible on obtient $L = 115mm$, $R_p = 3mm$, $\mu_p = 0,15$ (donnée constructeur : <https://www.bearing.co.il/OILITE.pdf>). Ces données permettent d'obtenir une erreur de 0,4% pour $\mu_f = 0,5$ et 0,2% pour μ_f de 0,25 (valeur moyenne lors d'un essai classique sans galing). Cette erreur est donc très raisonnable. C'est donc suivant ce montage qu'a été conçu le système de mesure, avec en plus une autre fonctionnalité, une extension permet de le relier à la plaque de maintien du vérin. Relier les deux permet d'assurer qu'ils soient correctement positionnés l'un par rapport à l'autre, et en particulier que les axes du chariot et du vérin sont parallèles et alignés. Le montage final est présenté sur la figure 2.47.

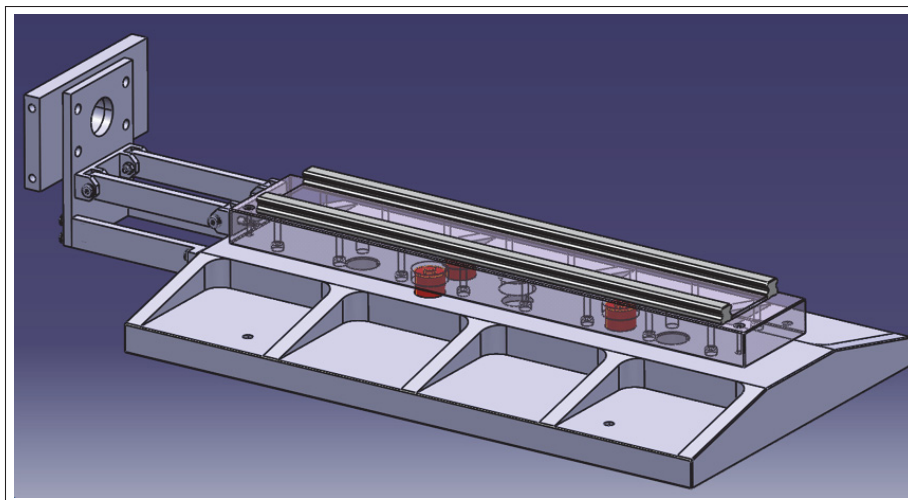


Figure 2.47 Nouveau système de mesure de l'effort normal, avec en rouge les cellules de charge

L'assemblage des pièces est basé sur l'utilisation de vis épaulées pour assurer une mise en position précise, en particulier pour l'extension qui rattache le vérin. La figure 2.48 présente une photo du système usiné et prêt à être installé sur le banc d'essai.

Cette dernière partie conclut le chapitre sur la conception et la fabrication du banc d'essai. Un certain nombre de difficultés ont été rencontrées au cours du processus ; toutes n'ont pas pu être présentées dans de ce chapitre, mais finalement après une année de travail le banc a été terminé et est fonctionnel. Les assemblages, même les plus complexes comme celui de la rotule, remplissent leur rôle. Maintenant que cette étape est terminée, avant de pouvoir générer des données il faut procéder à la calibration du banc d'essai et à la validation des mesures.

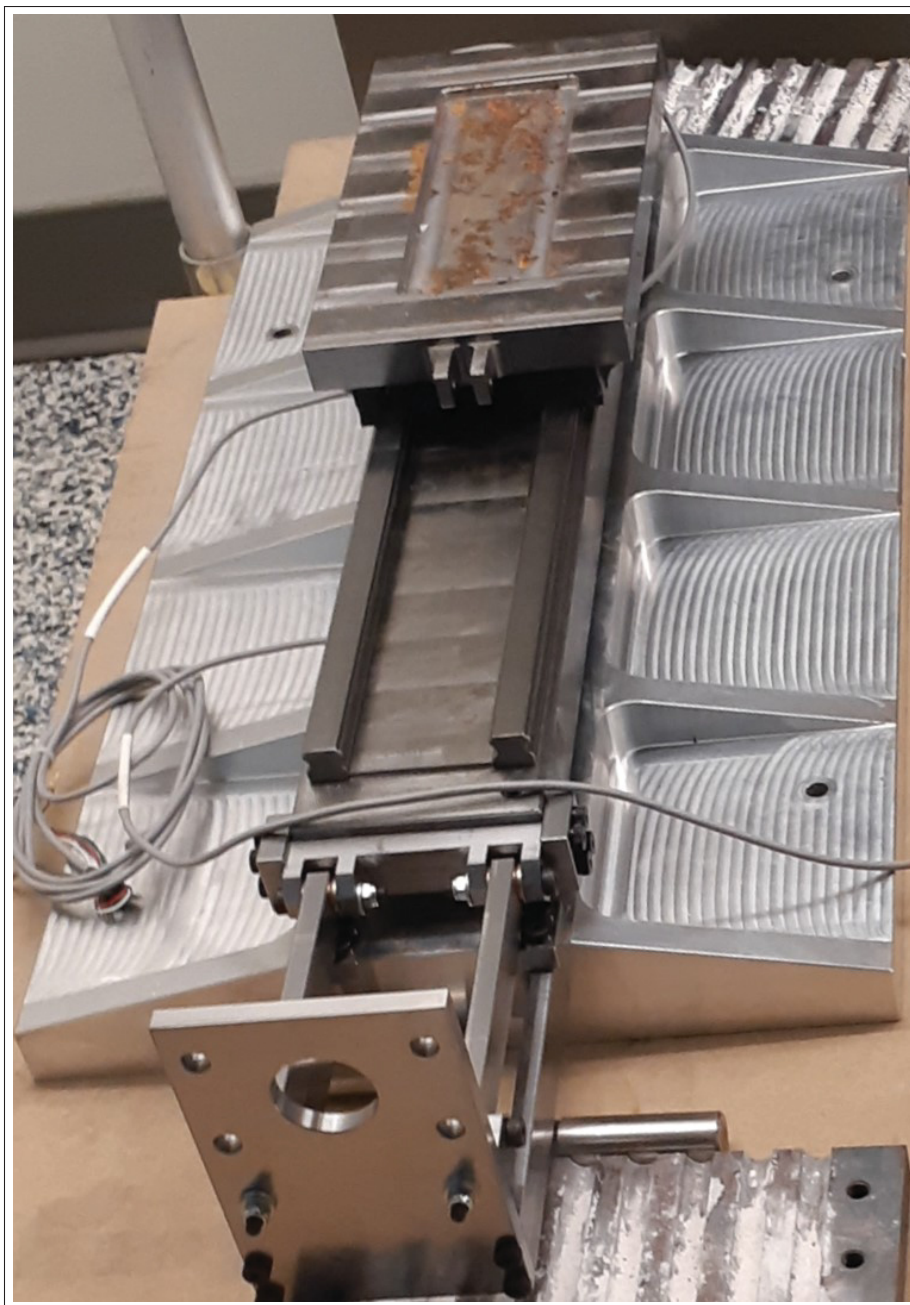


Figure 2.48 Photo du système de mesure de l'effort normal prêt à être installé sur le banc d'essai

CHAPITRE 3

CALIBRATION DU BANC D'ESSAI

Avant de pouvoir générer des données il faut aussi s'assurer de la justesse de la mesure du COF de tous les paramètres d'un essai (par exemple pour la vitesse, la distance de glissement ou la température). Et de manière générale toutes les variables et perturbations qui peuvent influencer la mesure doivent être identifiées, répertoriées et contrôlées. Cette démarche a été réalisée au cours d'un long processus de calibration du banc, et a entraîné un grand nombre de modifications de l'appareil afin d'assurer la précision et la fiabilité des mesures. La figure 3.1 présente un organigramme du raisonnement suivi pour la calibration.

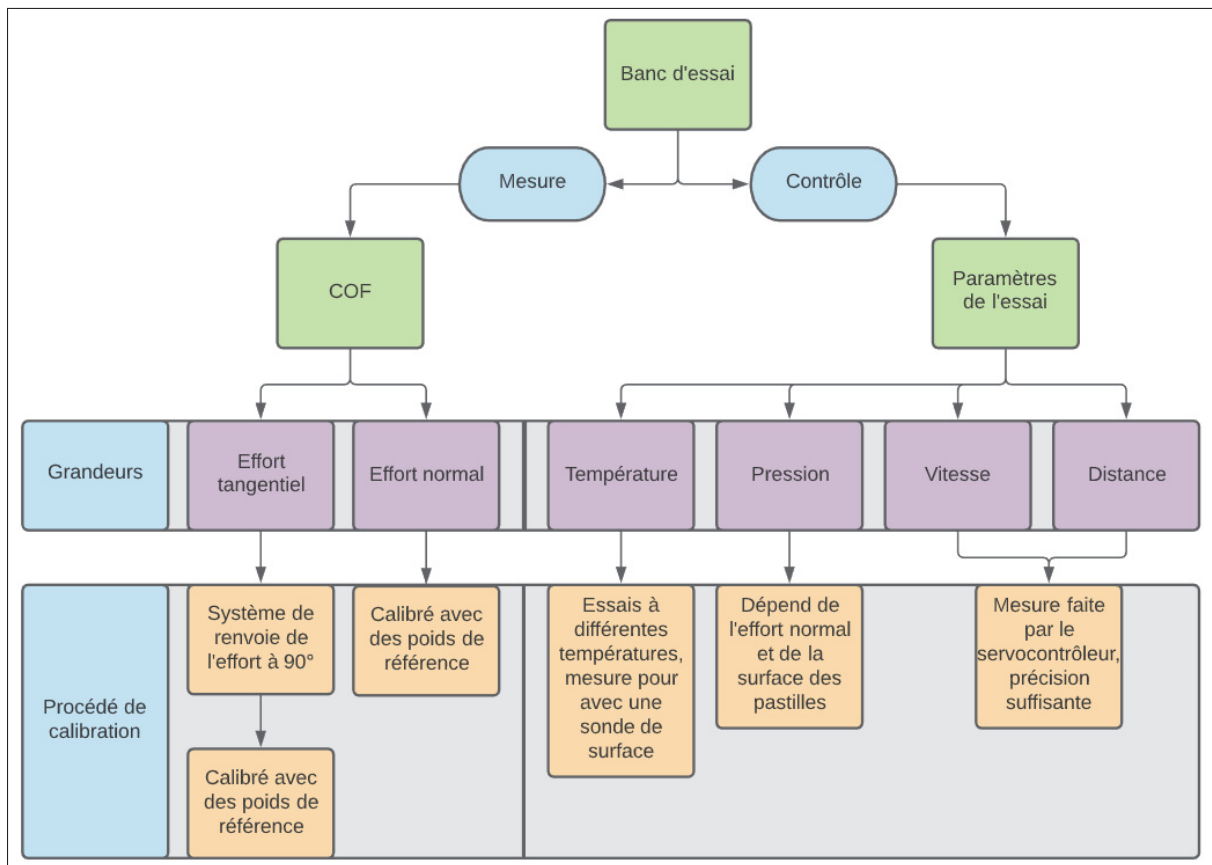


Figure 3.1 Organigramme général de la calibration

3.1 Calibration de l'effort tangentiel

3.1.1 Calibration par comparaison avec les mesures de la littérature

Pour calibrer le COF une méthode serait de le comparer à des données existantes. Cependant, sa valeur est souvent fluctuante et très sensibles aux conditions expérimentales. Pour comparer nos mesures avec celles de la littérature il faut donc connaître précisément toutes ces conditions. Or les données disponibles dans la littérature en fournissent en général une partie, mais pas leur totalité, et ces conditions peuvent être différentes de ce que le banc permet de réaliser. Par exemple un des essais les plus courants est le pin-on-a-disk, mais pour cet essai le contact est ponctuel (Dohda, Boher, Rezai-Aria & Mahayotsanun, 2015), alors que dans notre cas le contact est surfacique. Ainsi comparer le COF à la littérature peut seulement permettre de vérifier que l'ordre de grandeur est correct, mais pour calibrer réellement le COF il faut revenir à la manière de la calculer, c'est-à-dire aux efforts tangentiel et normal (Wagoner & Chenot, 1997). Si l'on peut s'assurer que les efforts mesurés sont justes, on sera alors certain que le COF est juste. C'est pourquoi la première étape pour calibrer le COF a été de calibrer chacun des deux efforts. Sur le banc d'essai, ils sont mesurés chacun par leur propre système de mesure, l'effort tangentiel (c'est-à-dire l'effort tangentiel à la surface de frottement dans le sens opposé au déplacement) est mesuré grâce à la cellule de charge située entre le vérin et le chariot, et l'effort normal (c'est-à-dire l'effort vertical perpendiculaire à la surface supérieure du chariot) par une cellule de charge située sous la plaque de support du chariot. L'objectif étant à la fois de valider la précision des mesures et si nécessaire de l'améliorer. Un organigramme visible sur la figure 3.2 permet de visualiser le lien logique entre les différentes étapes suivies.

Le processus de calibration de l'effort consiste à vérifier que la mesure correspond bien à l'effort réel. Pour cela il faut un autre moyen de connaître l'effort exercé, et que la fiabilité de ce second moyen de mesure soit la meilleure possible. Étant donné que notre machine est unique, il a fallu trouver la solution technique pour réaliser cette tâche. Celle qui a été déterminée comme étant à la fois la plus simple et la plus fiable pour cette application est l'utilisation de poids dont la masse est précisément connue. Ainsi pour exercer un effort normal connu il suffit de déposer les

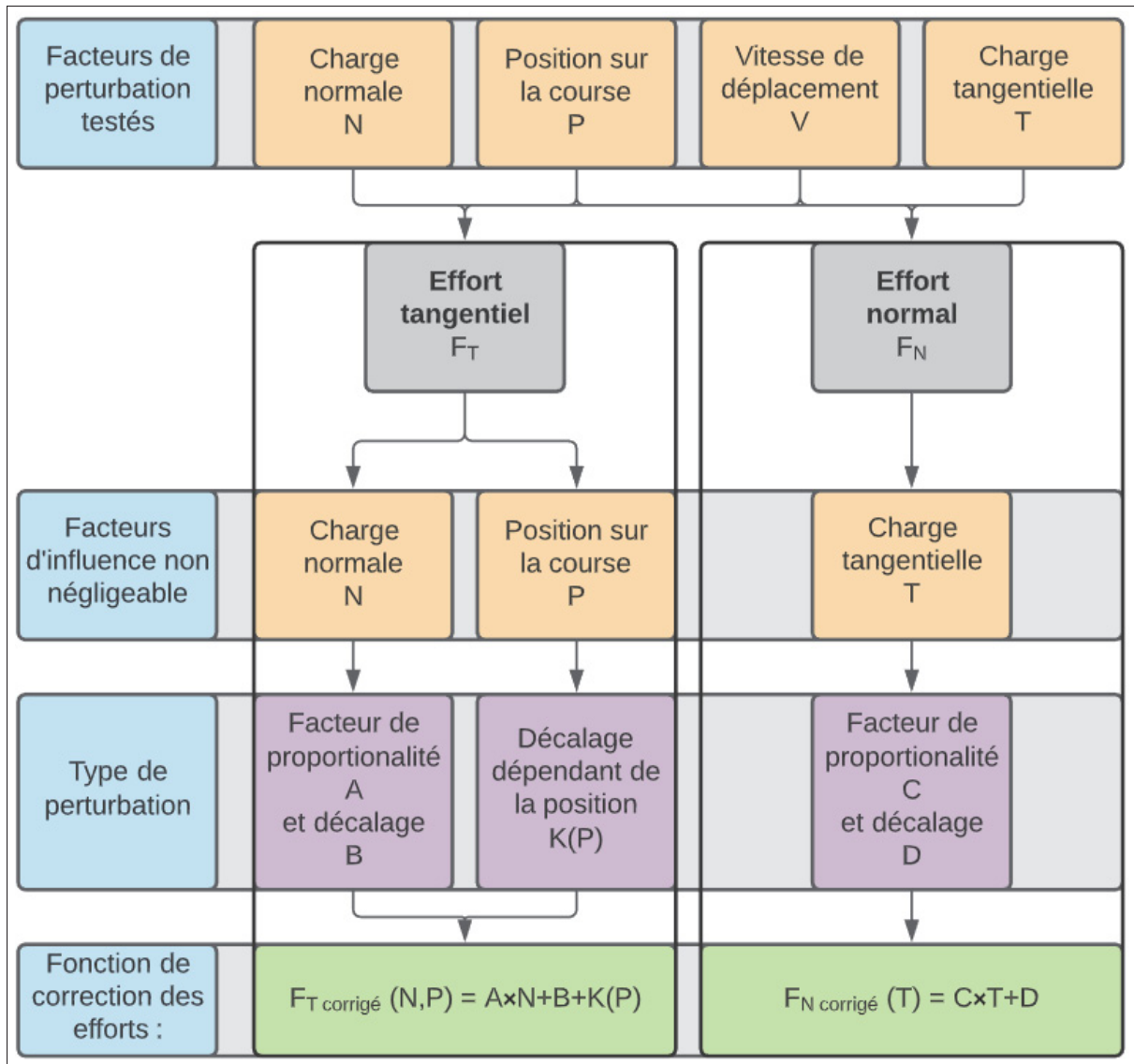


Figure 3.2 Organigramme de la calibration des efforts

poids sur le chariot. En revanche pour exercer un effort tangentiel il faut trouver un système qui permette de transformer l'effort vertical du poids des masses calibrées en un effort tangentiel. C'est ce système qui est décrit dans la partie suivante.

3.1.2 Montage d'application d'une charge tangentielle connue

Afin de transformer l'effort vertical exercé par le poids des masses calibrées en un effort horizontal ou tangentiel au frottement, un système de poulie a été employé. Le montage a été modélisé sur le logiciel CATIA (CATIA V5 R21, développé par Dassault Systèmes) puis imprimé par fabrication additive (impression 3D), il est constitué d'une roue et d'un bras qui peuvent s'emboîter facilement sur le châssis et qui permettent de placer cette roue sur le côté du banc d'essai, à l'horizontale du chariot. La roue est montée sur des roulements à billes qui assurent que le frottement est minimal (voir figure 3.3).

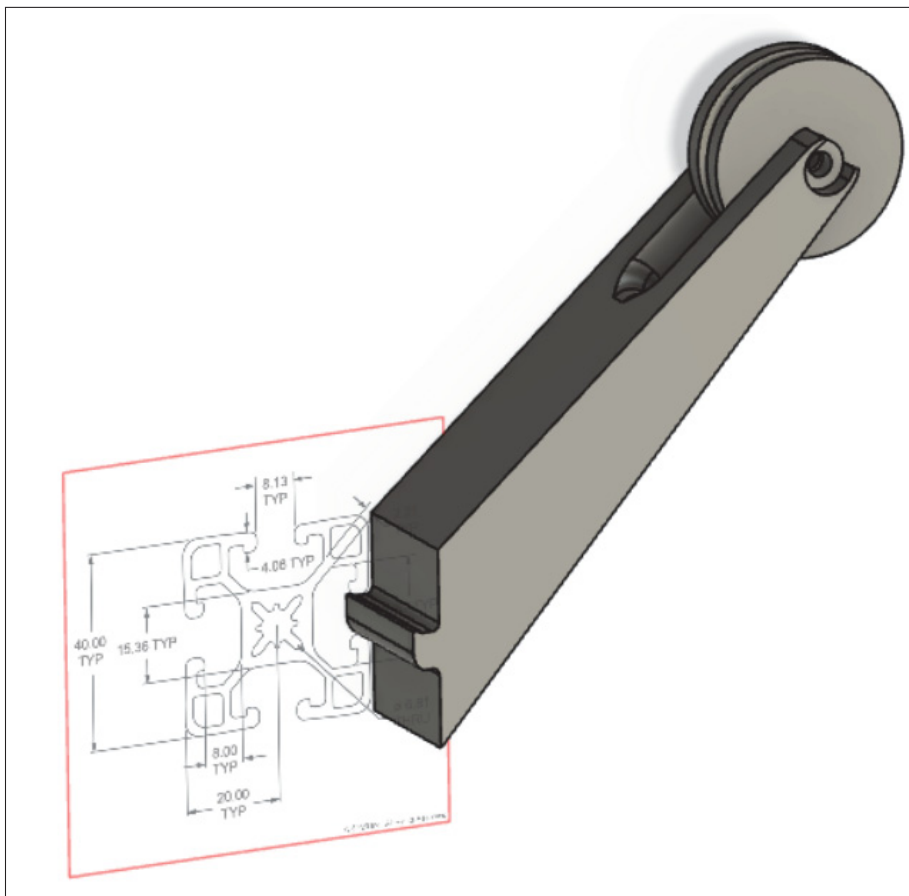


Figure 3.3 Modélisation de la poulie et du bras de fixation conçu pour s'emboîter facilement dans l'extrusion du châssis du banc d'essai

Une corde est ensuite attachée au chariot, puis passe par la poulie. De l'autre côté de la corde, sous la poulie sont suspendus des poids dont la masse est connue, comme le montre la photo 3.4. Une attention particulière est accordée à l'angle de la corde entre le chariot et la poulie de manière à ce qu'elle soit alignée avec le vérin de déplacement du chariot. De cette façon la charge qu'elle exerce sur ce dernier est strictement tangentielle.

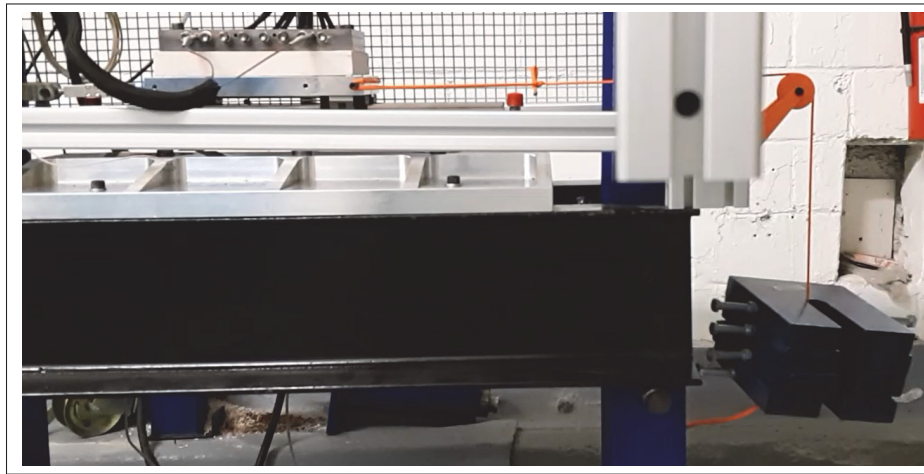


Figure 3.4 Photo du montage permettant la calibration de l'effort tangentiel

Ainsi grâce à ce montage il est possible d'appliquer un effort tangentiel connu, que le chariot soit fixe ou en mouvement.

Afin de s'assurer que ce système fonctionne correctement et applique bien l'effort équivalent aux poids appliqués un test a été effectué avec le chariot démonté, en n'utilisant que la cellule de charge. La cellule ayant été vérifiée les seules erreurs mesurées ne peuvent provenir que du système de poulie. Les résultats de cet essai ont été concluants et le montage a été validé pour la suite de la calibration.

3.1.3 Essais à vide

Une fois qu'il est possible de comparer l'effort mesuré à l'effort réel appliqué, des essais sont réalisés. Ils consistent à faire se déplacer le chariot avec différentes masses appliquées, et

l'objectif est de trouver une relation entre l'effort mesuré et l'effort réel appliqué afin de corriger la mesure.

Dans un premier en déplaçant le chariot seul, sans poids appliqué. L'effort mesuré est observable sur la figure 3.5.

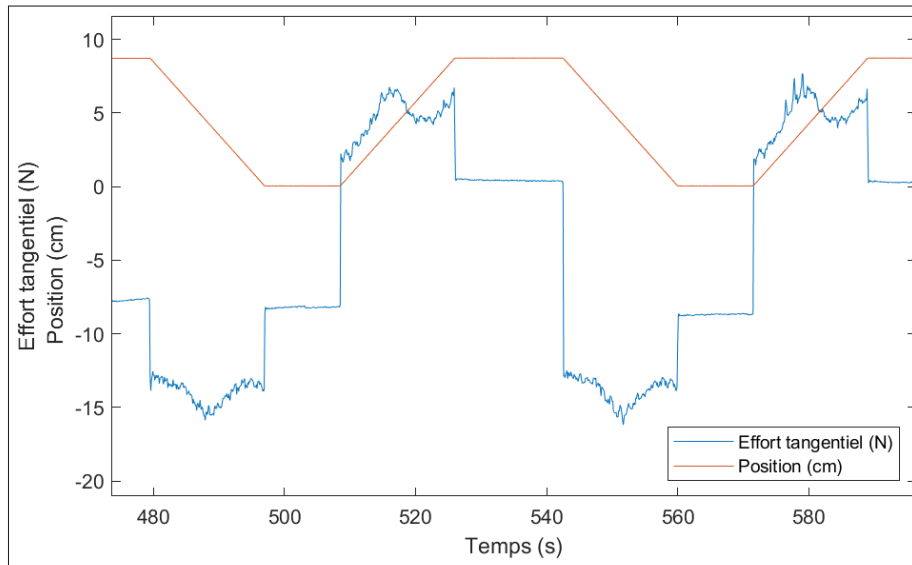


Figure 3.5 Mesure de l'effort tangentiel lors d'allers-retours du chariot à vide

On peut observer une variation de l'effort tangentiel au cours du déplacement du chariot de 20N, alors qu'aucun effort n'est appliqué dessus, la mesure aurait donc dû rester à 0 N. Les variations que l'on observe sont principalement dues aux frottements dans le guidage du chariot. On peut observer sur le graphe 3.5 que ces frottements sont assez répétables entre les trajets. On peut donc voir que même à vide les mesures subissent déjà une erreur de mesure conséquente. Cependant cette erreur était attendue du fait des frottements dans le guidage du chariot. La section suivante se consacre à étudier si cette perturbation est variable selon les conditions de l'essai où si elle reste toujours la même, ce qui faciliterait la correction.

3.1.4 Essais sous charge

Afin de déterminer si l'erreur de mesure dépend des paramètres de l'essai un certain nombre des tests préliminaires sont effectués, en faisant varier la vitesse, la charge normale et la charge tangentielle. On peut noter pour la charge normale qu'elle est appliquée par les mêmes poids calibrés posés sur le chariot. Ces essais mettent en évidence une grande corrélation entre l'erreur de mesure de l'effort tangentiel et la charge appliquée tangentiellement via le système de poulie. Plus précisément l'erreur semble augmenter proportionnellement lorsque la charge tangentielle augmente (les autres variables, effort normal et vitesse ont une influence négligeable sur l'erreur de mesure pour l'effort tangentiel, elles ont donc été exclues de la calibration). L'étude approfondie de cette erreur permet de mettre en évidence que l'on peut distinguer une erreur proportionnelle à la charge tangentielle et un motif régulier qui reste identique dans toutes les conditions et qui ne dépend que du sens de déplacement. Afin de préciser ces informations et de déterminer précisément la relation qui lie la valeur mesurée à la charge réelle, un protocole précis est constitué dans la partie suivante.

3.1.5 Protocole

Grâce à l'expérience acquise au cours des essais cités dans la partie précédente un protocole expérimental a pu être établi, qui permet d'identifier le facteur proportionnel et le motif de correction tout en assurant une répétabilité et fiabilité des résultats aussi élevée que possible :

1. Placer le chariot en bout de course à gauche.
2. Faire un aller-retour avec le chariot à une vitesse de 10 mm/s (cette vitesse sera aussi celle de tous les déplacements suivants), puis une fois terminé faire une mise à zéro de l'effort tangentiel et de l'effort normal.
3. Faire un aller-retour avec le chariot.
4. Ajouter une masse avec le système de poulie pour exercer une charge tangentielle sur le chariot.
5. Pause de 10 secondes.
6. Faire un aller-retour avec le chariot.

7. Ajouter une autre masse.
8. Pause de 10 secondes.
9. Réitérer les trois étapes précédentes jusqu'à avoir ajouté 3 masses.
10. Réitérer les étapes précédentes en retirant progressivement les masses.
11. Faire un dernier aller-retour sans charge.

Les masses ajoutées sont des de 4,2 kg. Elles présentent l'avantage d'être compactes, empilables et d'un poids suffisamment faible pour être ajouté facilement par l'opérateur de la machine. L'idéal aurait été d'utiliser des poids allant jusqu'à la capacité maximale de la machine, mais ce n'est pas faisable pour des raisons de praticité et de sécurité (en cas de chute des poids). Il est possible d'ajouter jusqu'à 6 poids, mais les essais ont montré que l'erreur est linéaire, et 3 poids représente un bon compromis entre facilité d'utilisation, sécurité et précision. Une calibration avec plus de poids pourra cependant être effectuée de manière exceptionnelle pour valider la linéarité de l'erreur de mesure.

Ce protocole présenté ci-dessus présente les avantages suivants :

- la calibration se fait lors du mouvement du chariot pour qu'elle soit représentative de l'erreur de mesure lors d'un essai. Initialement une calibration statique avait été envisagée (chariot fixe avec ajout puis retrait progressif de poids), mais elle n'était pas du tout représentative de l'erreur en mouvement, car elle ne permettait pas de prendre en compte les frottements dans le guidage du chariot.
- la mise à zéro (MAZ) est répétable. En effet au cours des essais il a été mis en évidence que les mouvements précédant la mise à zéro avaient une influence sur cette dernière, l'effort tangentiel mesuré garde en mémoire une erreur dépendante du dernier trajet. Une explication plausible est que lors du déplacement les frottements dans le guidage du chariot résistent au mouvement, et lorsque le chariot s'arrête cet effort ne disparaît pas, mais une charge reste présente par phénomène d'hystérésis (ce phénomène sera étudié plus en détail par la suite). Plusieurs solutions ont été considérées pour résoudre ce problème comme générer des vibrations dans le chariot avant la MAZ afin que les micro déplacements du chariot générés par les vibrations permettent d'éliminer cet hystérésis. Une seconde solution

étudiée est une modification du guidage du chariot, actuellement des patins à billes avec une légère précontrainte pour augmenter la rigidité du montage, par un système de *air bearings* ou guidage sur coussins d'air grâce à des patins en graphite poreux à travers lesquels est envoyé de l'air sous pression. Cette dernière solution bien qu'elle permettrait d'annuler complètement tout frottement parasite a été évaluée comme trop coûteuse et complexe à mettre en place dans le cadre de cette maîtrise. La solution qui a donc au finale été choisie, qui permet tout de même une grande précision tout en étant plus économique, est de réaliser un aller-retour avant de faire la MAZ afin que l'hystérésis soit toujours la même et puisse être mesurée et annulée en post-traitement. Cet aller-retour doit être fait à une vitesse arbitraire de 10 mm/s et doit être fait avant chaque MAZ même pour l'utilisation courante du banc (c'est-à-dire même hors phase de calibration).

- ce protocole permet détecter la présence d'une hystérésis dans la mesure, en vérifiant qu'en retirant les poids la mesure revient à la même valeur, et qu'après avoir enlevé tous les poids on retrouve bien une charge nulle comme après la MAZ.
- l'ajout des poids progressivement permet de vérifier la linéarité de la mesure pour s'assurer que l'erreur n'augmente pas par exemple avec le carré de la charge.
- au total avec les ajouts puis retraits de poids 7 allers-retours sont effectués, ce qui permet de distinguer l'erreur aléatoire d'un trajet avec l'erreur moyenne, que l'on peut estimer grâce au nombre de trajets effectués.
- entre chaque trajet, un temps de pause de 10 secondes est marqué. Cela permet de regarder si la charge évolue dans le temps, par exemple si l'hystérésis due aux frottements du guidage du chariot se résorbe d'elle-même progressivement.

Un protocole est donc maintenant défini pour procéder aux essais. Grâce aux informations obtenues dans les parties précédentes on sait qu'il existe une erreur de mesure dans l'effort tangentiel, et que cette erreur possède un motif répétable suivant le déplacement du chariot et un facteur de proportionnalité avec l'a charge tangentielle. Dans la partie suivante des essais vont donc être réalisés pour identifier ces deux composantes.

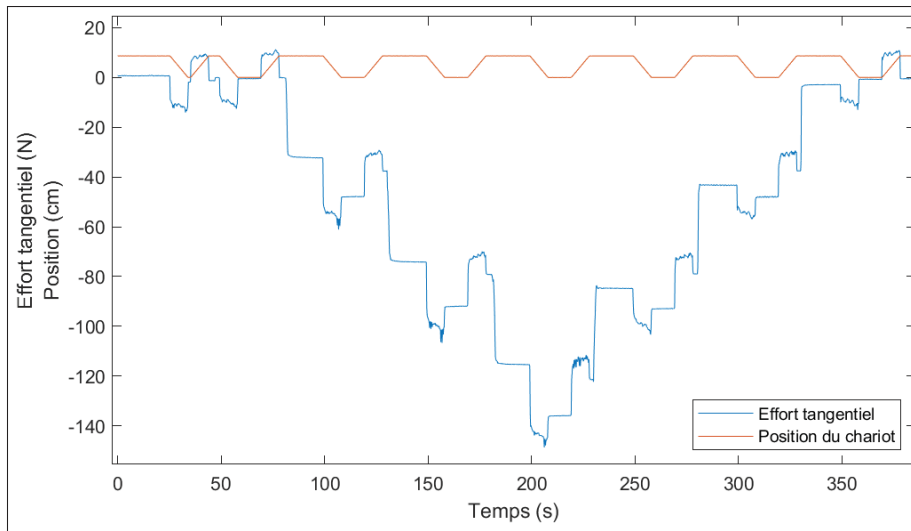


Figure 3.6 Mesure de l'effort tangentiel en fonction du temps lors du protocole de calibration de l'effort tangentiel

3.1.6 Analyse et traitement des résultats

Les résultats d'un essai de calibration sont visibles sur la figure 3.6, le graphe montre l'effort tangentiel mesuré au cours de l'essai et la position du chariot pour pouvoir identifier les moments de la mesure où le chariot se déplace. La courbe idéale que l'on devrait obtenir devrait ressembler à un escalier, avec une marche à l'ajout d'un poids et constant le reste du temps (la charge appliquée est constante, que le chariot soit fixe ou se déplace). Cependant la courbe que l'on observe est assez éloignée de ce résultat, on peut remarquer que lorsque le chariot se déplace l'effort tangentiel varie grandement. Mais le motif que l'on observait lors du déplacement à vide (figure 3.5) se retrouve aussi lorsque les poids exercent une charge tangentielle. Afin de vérifier à quel point ces motifs se ressemblent, ils ont été superposés. Pour ce faire les portions où le chariot est en mouvement ont été isolées, puis pour chacune de ces portions l'erreur a été calculée en soustrayant à la mesure la charge réelle appliquée avec le système de poulie. Puis les erreurs pour chacun de ces trajets ont été affichées sur un même graphe, la figure 3.7 pour les trajets dans la direction droite et 3.8 dans la direction gauche.

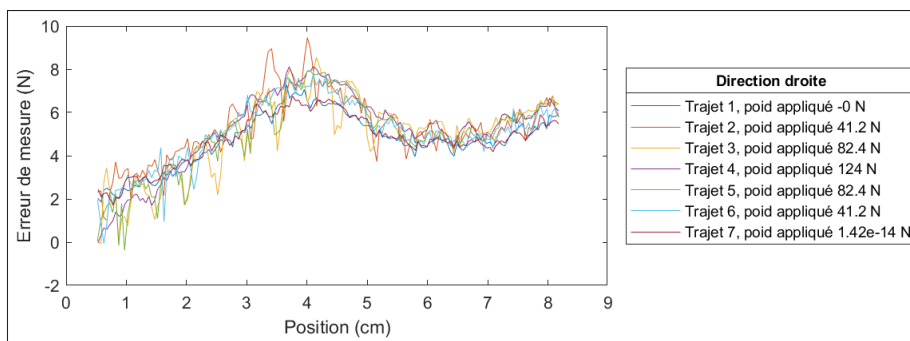


Figure 3.7 Erreur pour chacun des trajets dans la direction droite lors d'un essai de calibration en fonction de la position du chariot

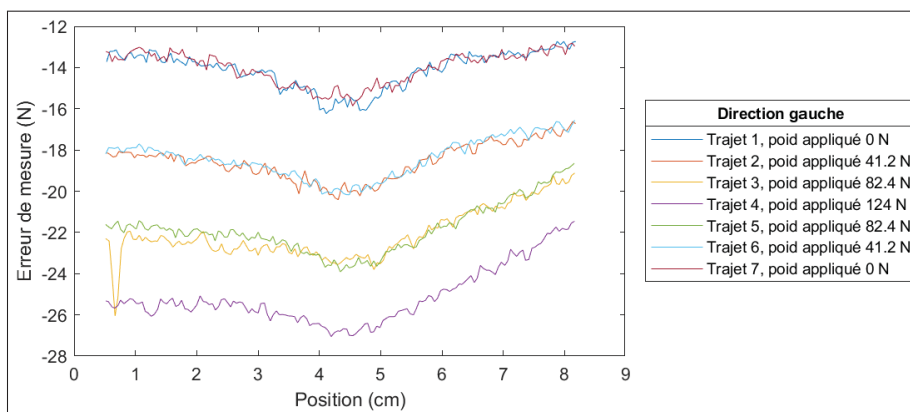


Figure 3.8 Erreur pour chaque trajet dans la direction gauche lors d'un essai de calibration en fonction de la position du chariot

On peut observer sur ces figures que dans le cas d'un déplacement vers la droite les motifs d'erreur se superposent, quelle que soit la charge tangentielle appliquée, à l'inverse de la direction gauche où les erreurs ne se superposent que lorsque la charge tangentielle appliquée est la même. Cela signifie que dans une des directions, pour une raison qui n'a pas été identifiée, l'erreur de mesure de l'effort tangentiel est dépendante de la charge tangentielle appliquée. Afin de vérifier si cette dépendance est linéaire, la valeur moyenne de l'erreur a été calculée pour chaque trajet, puis affichée sur la figure 3.9.

Une régression linéaire entre les deux grandeurs est affichée sur le graphe, le coefficient de corrélation des mesures est de 0,993 ce qui permet de mettre en évidence le fait que ces grandeurs

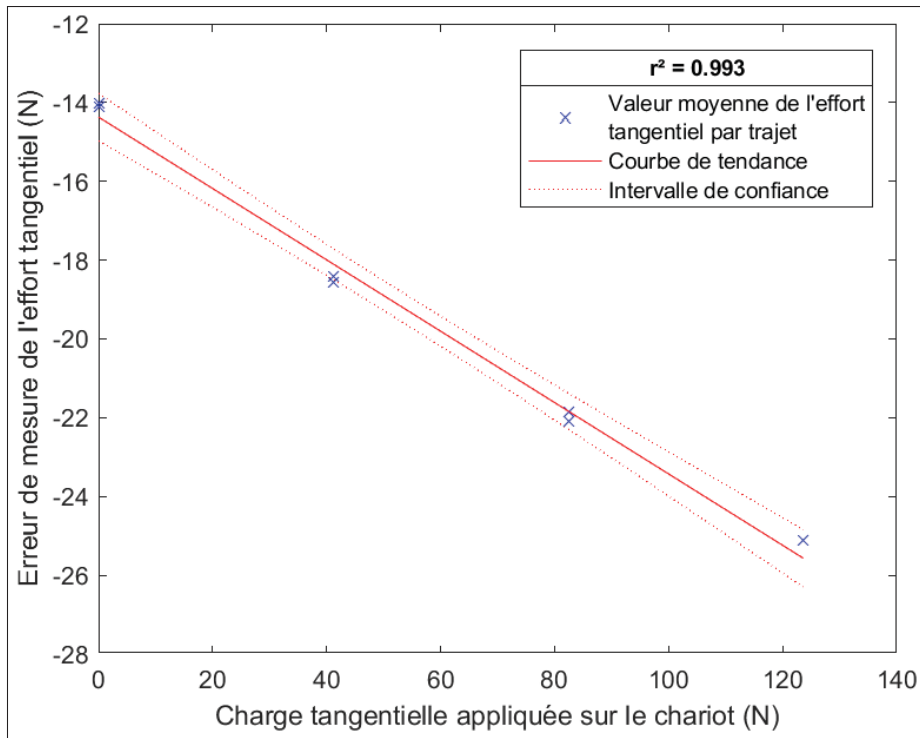


Figure 3.9 Corrélation entre la charge tangentielle appliquée sur le chariot et l'erreur de mesure de l'effort tangentiel

sont corrélées. La suite du processus a été de récupérer les coefficients de la régression afin de pouvoir les appliquer à l'erreur afin d'obtenir une erreur de mesure $y_{\text{erreur corrigée}}$ décorrélée de la charge tangentielle :

$$y_{\text{erreur corrigée}}(T) = T - (y_{\text{erreur}} \cdot a + b)$$

avec a et b les coefficients de la régression, T la charge tangentielle appliquée, et y_{erreur} l'erreur avant correction. On obtient alors les données montrées dans le graphe. 3.10

On peut observer que par rapport à la figure 3.8 les erreurs sont beaucoup plus faibles et leur valeur moyenne par essai est proche de zéro. Le même procédé est appliqué à l'erreur dans la direction droite afin que dans ce cas aussi la valeur moyenne de l'erreur par trajet soit proche de zéro. Nous avons ainsi les erreurs corrigées pour les deux directions, et leur valeur a été grandement réduite. Cependant on peut observer que l'erreur restante n'est pas composée d'un

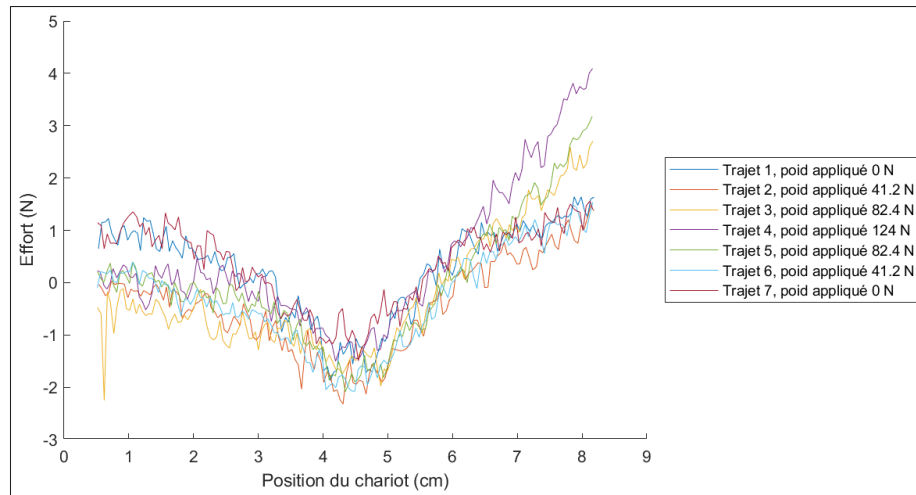


Figure 3.10 Erreur de mesure lors d'un essai de calibration après application de la correction dans la direction gauche

bruit aléatoire de mesure, on peut identifier un motif particulier qui se répète pour chaque trajet. Afin d'éliminer cette perturbation systématique, il faudrait pouvoir identifier le motif moyen et le soustraire aux mesures. Cependant il n'est pas possible de trouver ce motif moyen avec les données en l'état, car les prises de mesure lors des déplacements ne sont pas faites à des positions précises, mais à des intervalles de temps réguliers. Les prises de mesures ayant été faites à des positions différentes pour chaque trajet il n'est pas possible de comparer directement entre elles la valeur de l'erreur par rapport à la position, comme on peut le voir sur la figure 3.11 qui met en évidence ce problème de manière schématique. La solution qui a été trouvée pour contourner ce problème est de découper un trajet en plusieurs zones de taille prédéfinies. La valeur moyenne de l'erreur est alors calculée pour chacune de ces zones pour chaque trajet. On obtient ainsi pour chaque trajet une valeur par zone, ce qui nous permet de comparer directement les trajets entre eux. La taille de ces zones est choisie de manière à faire un compromis entre le nombre de points par zone (plus leur nombre est grand plus la valeur moyenne calculée pour la zone sera juste) et le nombre de zones (moins il y a de zones, moins la définition du résultat est grande, par exemple avec deux zones seulement le résultat ne permettrait pas de voir l'évolution du COF au cours du déplacement). La taille de zone qui a été choisie est donc de 0,5mm, ce qui permet d'avoir environ 5 points de mesure par zone.

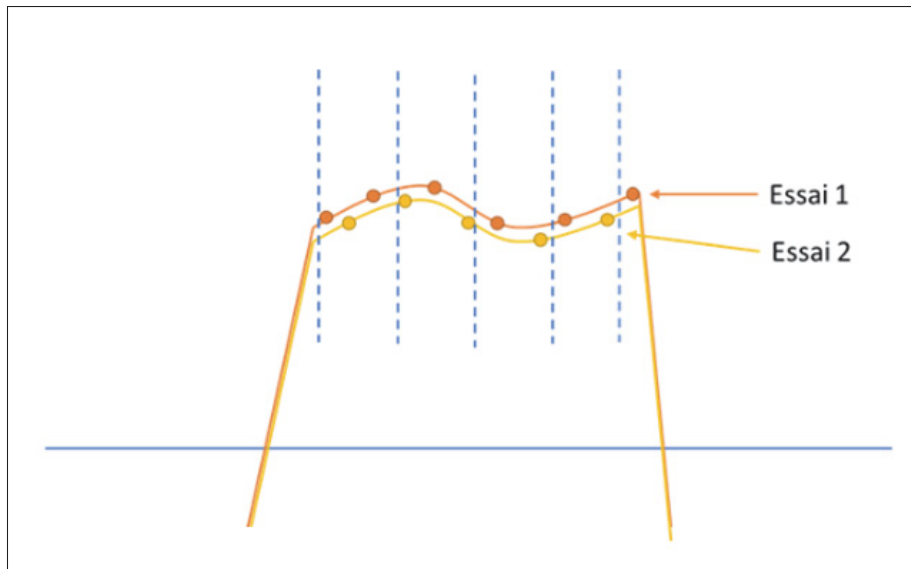


Figure 3.11 Schéma montrant que deux essais ne peuvent pas être comparés directement, mais doivent au préalable être découpés en zones pour que les valeurs moyennes dans ces zones puissent être comparées entre elles

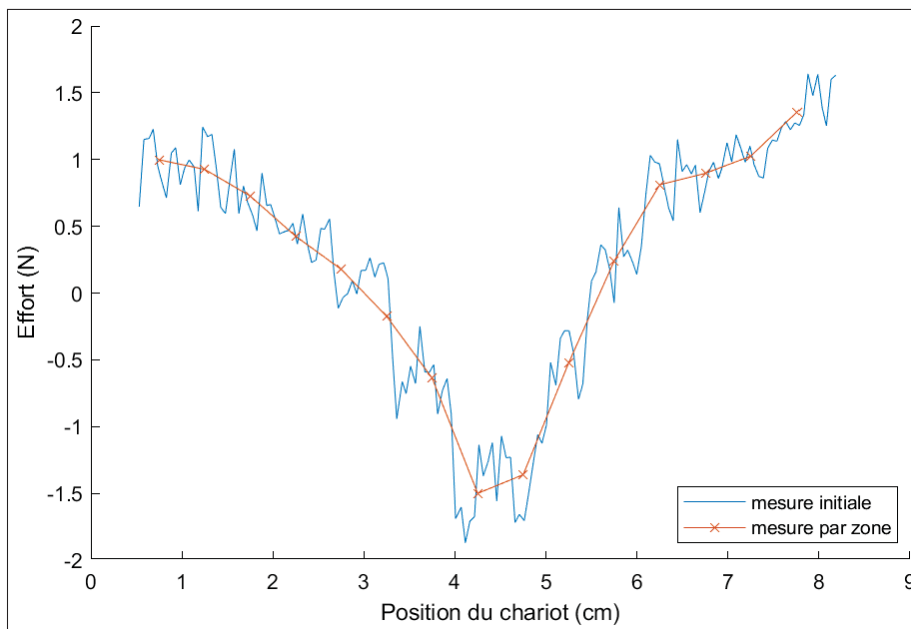


Figure 3.12 Comparaison entre l'erreur initiale et l'erreur par zone

On peut observer sur la figure 3.12 la comparaison entre la mesure initiale et la mesure par zone pour un des trajets. Il est alors maintenant possible de calculer la valeur moyenne par zone de l'erreur afin de calculer le motif moyen de l'erreur. Celui-ci est visible sur les figures 3.13 et 3.14 pour chacune des deux directions.

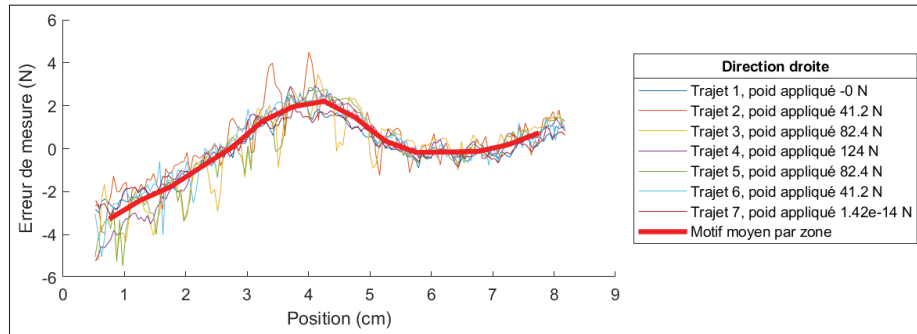


Figure 3.13 Comparaison entre l'erreur de mesure lors d'un essai de calibration dans la direction droite après décorrélation avec la charge tangentielle et le motif moyen d'erreur par zone

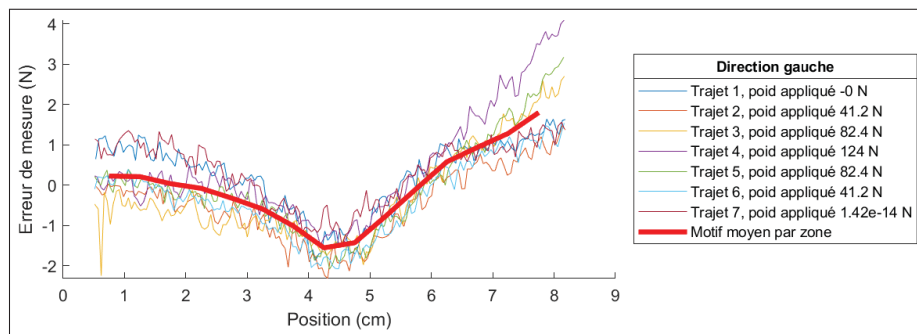


Figure 3.14 Comparaison entre l'erreur de mesure lors d'un essai de calibration dans la direction gauche après décorrélation avec la charge tangentielle et le motif moyen d'erreur par zone

Une fois ce motif obtenu il ne reste plus qu'à le soustraire aux données par zones pour avoir le résultat final présenté dans les figures 3.15 et 3.16. On peut voir sur ces graphes que l'erreur finale obtenue est seulement composé de bruit de mesure centrée sur zéro, et que plus aucun motif distinct n'est observable. On peut aussi observer que pour chaque trajet la valeur moyenne

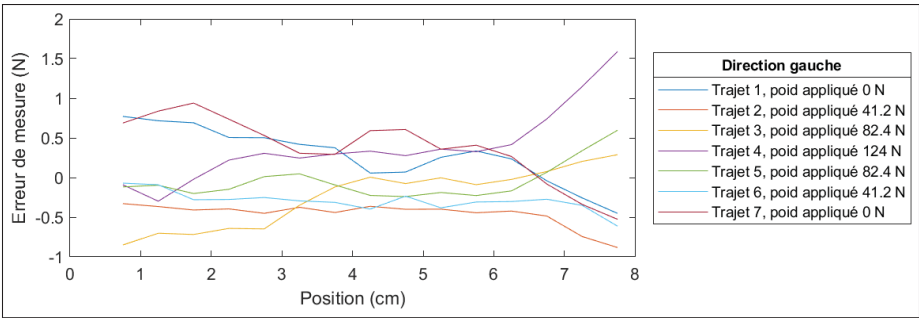


Figure 3.15 Erreur de mesure lors d’un essai de calibration après avoir appliqué les corrections de décorrélation et de soustraction du motif d’erreur, dans la direction gauche

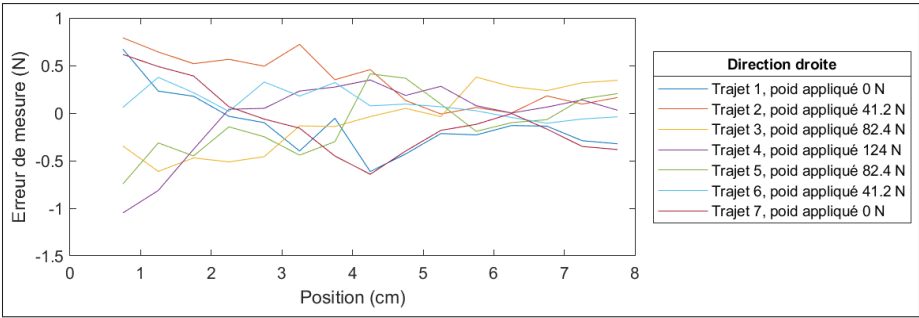


Figure 3.16 Erreur de mesure lors d’un essai de calibration après avoir appliqué les corrections de décorrélation et de soustraction du motif d’erreur, dans la direction droite

et l’écart type ont fortement diminué, le tableau 3.1 donne les valeurs entre les étapes initiales et finales.

Nous avons ainsi dans cette partie identifié l’erreur de mesure tangentielle et déterminé une relation qui permette de la corriger. Cette fonction de correction dépend de la position du chariot et de la charge tangentielle. Mais cette fonction est calculée à partir d’un essai à un moment donné, la partie suivante a donc pour objectif de s’assurer que cette calibration reste valable dans le temps.

Tableau 3.1 Tableau de statistiques permettant de comparer les résultats d'un essai de calibration avant et après correction des mesures

	Sens droite, avant correction	Sens gauche, après correction	Sens droite, avant correction	Sens gauche, après correction
Écart type (N)	1,62	0,35	4,00	0,45
Erreur moyenne (N)	5,01	0	19,16	0

3.1.7 Répétabilité et validation des paramètre de calibration

D'autres essais de calibration ont été effectués pour vérifier que les paramètres de la calibration restaient identiques, et les résultats ont été concluants. Mais afin d'assurer la plus grande fiabilité possible, des essais de calibration doivent être réalisés régulièrement, surtout au début de l'exploitation du banc. Une fois que plus d'expérience aura été accumulée sur le fonctionnement du banc d'essai et si les tests de calibration donnent des résultats qui restent constants il sera possible de diminuer leur fréquence. Tous ces tests de calibrations sont aussi consignés dans une base de donnée qui permet de les comparer entre eux et de suivre leur évolution au cours du temps.

Ces tests de calibration permettent d'observer l'écart entre la valeur mesurée lors d'un essai et la charge réelle appliquée. En connaissant la valeur exacte que l'on devrait obtenir, il a été possible de corriger les mesures pour qu'elles soient le plus proche possible du résultat attendu, en éliminant toute erreur systématique. On peut constater sur les figures 3.15 et 3.16 que l'erreur restante est du bruit de mesure, qui a un écart type de moyen entre les deux directions de 0,4 N. Cette variation est très faible devant les efforts mesurés, qui se situent entre 40 N et 1500 N. Nous avons donc maintenant une solution pour s'assurer que la calibration reste valable dans le temps. Étant donné qu'il va être nécessaire de faire ce processus régulièrement, il faut

qu'il puis être facilement effectué par un utilisateur non expérimenté. La procédure a donc été automatisée dans la partie suivante.

3.1.8 Programme Matlab : routine de calibration et correction des essais

Afin de faciliter la démarche de calibration et d'assurer sa fiabilité, plusieurs outils ont été mis en place. Tout d'abord, pour faciliter l'essai de calibration et assurer qu'il soit correctement effectué, une routine a été intégrée à l'interface homme-machine (IHM) du banc d'essai, c'est-à-dire le logiciel qui fit fonctionner le banc. Cette routine reproduit le protocole expérimental qui a été décrit plus haut, comprenant la mise à zéro et les ajouts progressifs de poids. Un signal sonore est émis pour indiquer chaque ajout ou retrait de poids, les temps entre chaque déplacement sont ainsi réguliers et identiques pour tous les essais de calibration, ce qui permet de réduire grandement le risque d'erreur de l'opérateur. Ensuite la fonctionnalité de traiter automatiquement les essais de calibration a été ajoutée à l'application d'analyse des résultats du banc d'essai afin de reproduire de manière automatique la démarche de calibration décrite plus haute et de la rendre facile à effectuer même pour un utilisateur novice. Le panneau principal de ce module est présenté sur la figure 3.17. Le détail de l'interface est décrit en annexe 1. La calibration étant complexe, il a semblé crucial que le programme soit le plus intuitif, automatisé, et simple d'utilisation possible, pour que lors de prochains projets avec ce banc d'essai tout ce travail ne soit perdu mais puisse être facilement repris par un utilisateur non expérimenté.

Ces graphes permettent de contrôler chaque étape du processus et de localiser rapidement une quelconque erreur dans les données.

Nous avons maintenant une méthode de calibration fiable automatisée et d'utilisation ergonomique, qui permet de déterminer la fonction de l'erreur de mesure. Il faut donc ensuite réaliser une procédure similaire pour appliquer cette correction sur les essais réels.

Pour cela un nouvel onglet est ajouté à l'interface Matlab. Le principe pour corriger un essai est très similaire à celui pour corriger un essai de calibration. Le programme permet d'importer le fichier de l'essai directement au format généré par LabVIEW, puis de sélectionner la portion

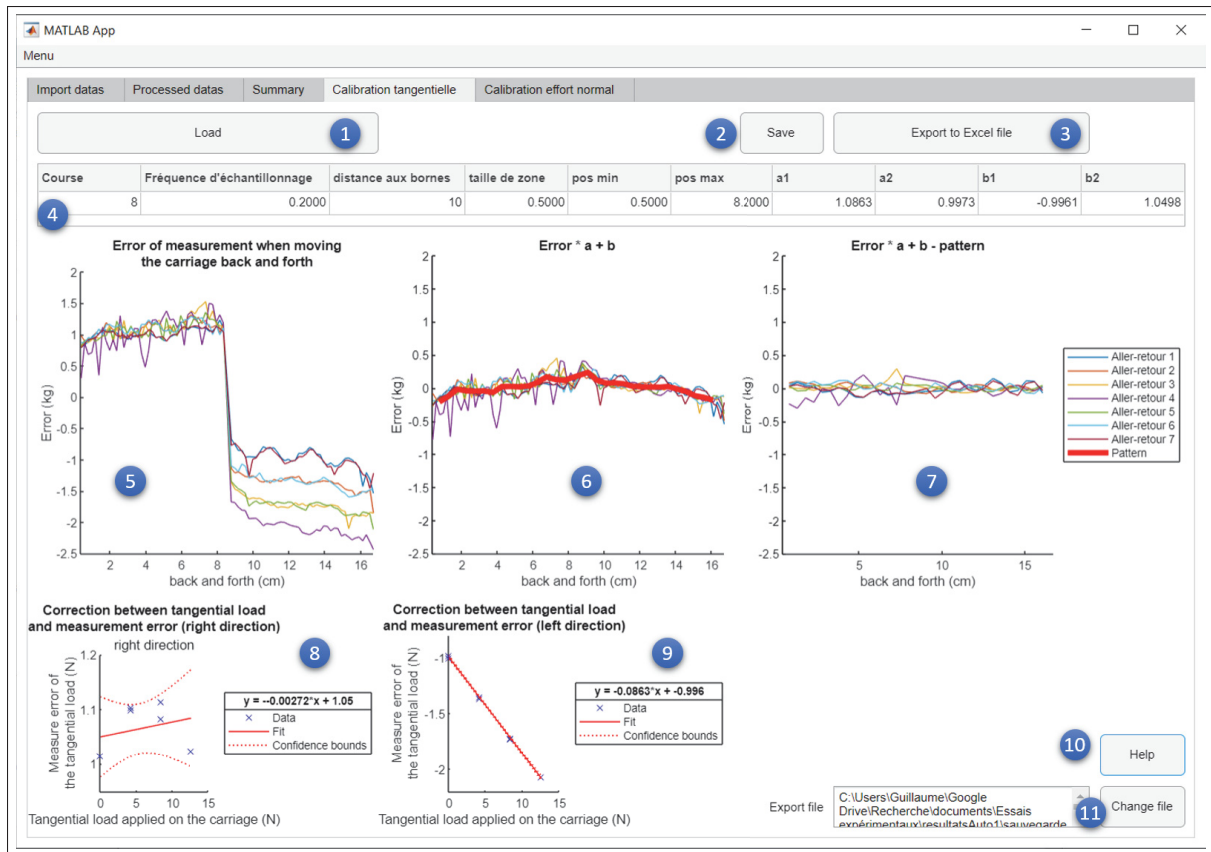


Figure 3.17 Panneau principal du module de traitement des essais de calibration de l'application Matlab d'analyse des résultats du banc d'essai

à analyser. Il sélectionne ensuite automatiquement les moments où le chariot se déplace, puis applique les corrections en se basant sur les résultats de l'essai de calibration sélectionné au préalable par l'utilisateur. Et enfin les données sont affichées dans une fenêtre accompagnées de statistiques sur les résultats (voir la figure 3.18)

En conclusion de cette section sur la calibration de l'effort tangential, nous avons calibré l'effort tangential par traitement des données. Les essais et la procédure de calibration permettent en le comparant à des efforts connus (ceux des poids) de confirmer que l'effort tangential que l'on mesure est bien celui exercé lors du frottement.

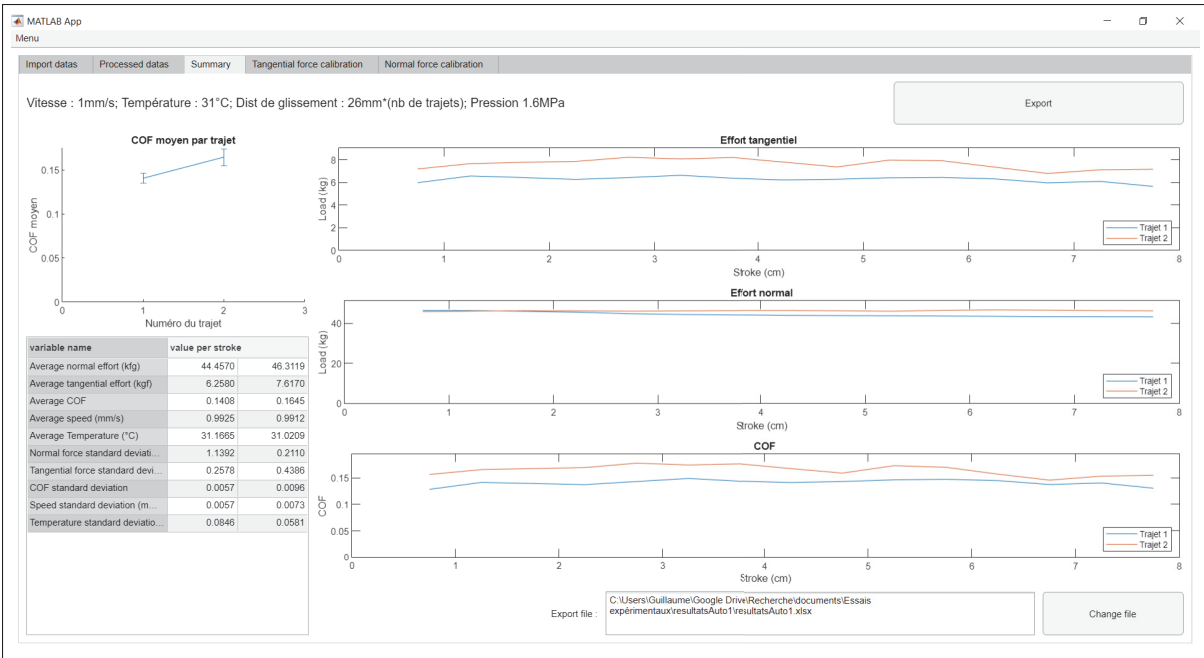


Figure 3.18 Panneau de présentation des résultats d’un essai après avoir appliqué les résultats de calibration

3.2 Calibration de l’effort normal

L’effort normal doit lui aussi être calibré de la même manière que l’effort tangentiel, en appliquant un effort normal connu et en le comparant à la mesure.

Cependant un certain nombre de difficultés ont été rencontrées au cours de ce processus. Cette partie présente le cheminement suivi pour y remédier. La première section se consacre aux essais préliminaires (effectués avec une première conception du système de mesure), qui ont mis en évidence une erreur de mesure importante. Puis elle traite des ajustements effectués, et de la recherche d’une méthode pour corriger l’erreur. Cela a mis en évidence, que en l’état, le système ne permettait pas de réaliser des mesures de précision suffisante. La seconde section s’intéresse donc à la conception d’un nouveau système de mesure de l’effort normal. Il a tout d’abord fallu diagnostiquer précisément le problème, en émettant une série d’hypothèses sur l’origine des erreurs, puis en établissant un protocole expérimental permettant de toutes les tester. Une fois le problème identifié, le nouveau système a été fabriqué, puis calibré.

3.2.1 Calibration avec la conception initiale

Cette partie retrace l'évolution de la calibration de l'effort normal. La première étape pour prendre en main le système de mesure a été de placer des poids sur le chariot et d'observer les données de la cellule de charge. La section montre comment ces essais ont permis de mettre en évidence une importante variabilité dans les mesures. Afin d'obtenir plus d'informations sur les erreurs observées et sur comment les corriger dans la seconde section une série d'essais a été menée. Elle a permis de mener à une série de corrections sur le banc, qui sont présentées dans la dernière section de cette partie, qui amènent à la conclusion que l'erreur n'est pas possible à corriger numériquement après la mesure comme pour l'effort tangentiel et ne provient pas de défauts dans le système qu'il serait possible de régler : le problème provient de la conception du système en elle même. Dans cette partie c'est donc la première conception du système de mesure de l'effort normal qui est en place sur le banc, celle qui a permis d'obtenir l'expérience et la connaissance pour concevoir la version finale présentée en partie 2.4.2 afin que la démarche suivie pour mettre en évidence le problème puisse être présentée.

Cette première conception ne possédait qu'une seule cellule de charge, et étant donné que la plaque de support du chariot ne peut pas être maintenue en équilibre sur un simple appui ponctuel, deux arbres de guidage verticaux sont disposés de part et d'autre de la cellule de charge. Ceux-ci permettaient de bloquer toutes les translations et rotations de la plaque, sauf la translation verticale, qui doit être laissée libre pour permettre le transfert de l'effort de la plaque à la cellule de charge. Ce montage est visible sur le schéma 3.19.

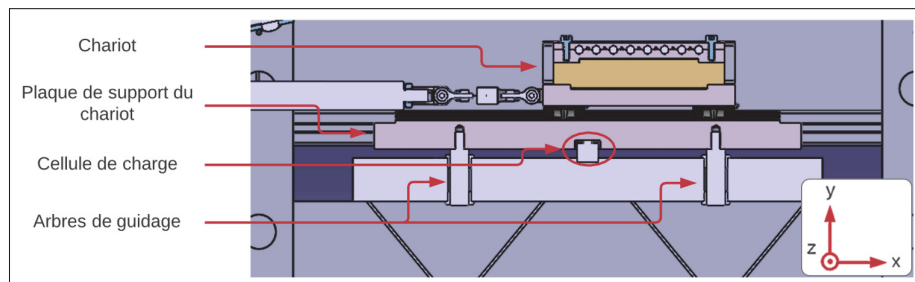


Figure 3.19 Schéma de l'ancien système de mesure de l'effort normal

3.2.1.1 Essais avec chariot immobile

La première étape de l'étude a été d'ajouter des poids sur le chariot, avec celui-ci placé à différentes positions. Lors du chargement et déchargement des poids on observe un écart entre la charge appliquée et la charge mesurée qui dépend de la charge ainsi que de la position. Six cas ont été testés, le chargement et le déchargement pour 3 positions du chariot, gauche, centre, et droite.

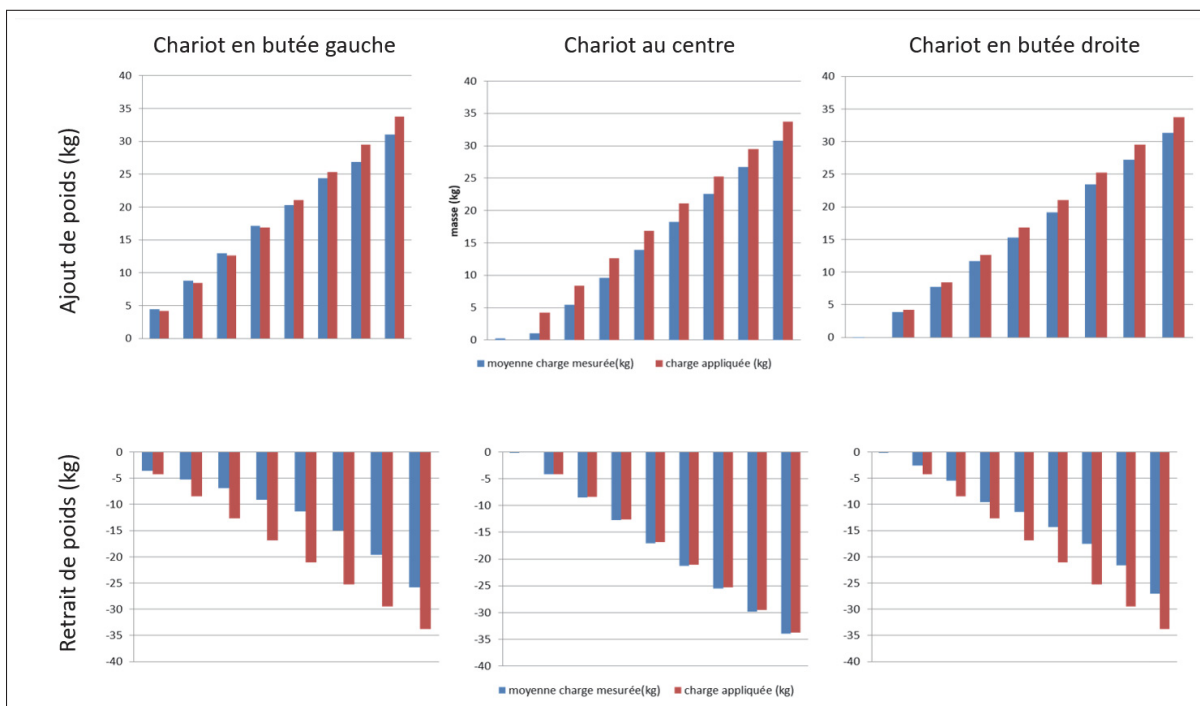


Figure 3.20 Histogramme représentant la différence entre les poids ajoutés sur le chariot et l'effort mesuré

Les histogrammes 3.20 représentent la comparaison entre la charge réelle (en rouge) et la charge mesurée (en bleu). Les trois histogrammes du haut montrent l'ajout de poids, les trois du dessous le retrait des poids. L'axe des abscisses représente les différents essais, avec une augmentation progressive de la charge. On observe que pour chaque cas l'écart entre la charge appliquée et l'effort mesuré diffère : l'erreur varie entre 1,5% et 30%. Une première hypothèse pour expliquer la cause des écarts est le design du guidage vertical de la plaque de support du

chariot posé sur la cellule de charge qui présente des frottements, comme montré sur la figure 3.21.

Plus précisément on peut distinguer deux analyses du problème d'après les premières mesures :

- la différence de coefficient directeur entre les charges réelles et mesurées pourrait s'expliquer par le frottement dans le guidage, ce qui semble cohérent puisque le frottement est proportionnel à l'effort appliqué.
- la différence à l'origine n'est pas causée par une absence de mise à zéro, celle-ci a été faite avant chaque essai. On peut donc supposer que le système de guidage reste « coincé » dans la position qu'il avait sous la charge précédente et conserve donc une hystérésis.

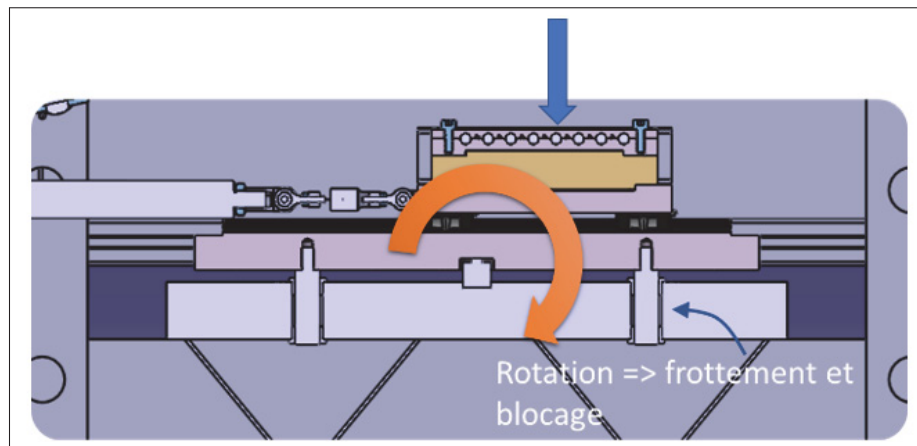


Figure 3.21 Image montrant l'arc-boutement dans le chariot lorsque l'effort qui s'exerce dessus n'est pas centré sur la cellule de charge

Ce dernier phénomène peut être visualisé en simulant un bloc qui serait poussé sur une surface plane et derrière lequel serait placée une cellule de charge, comme le présente le schéma 3.22. On peut visualiser que tant que la force appliquée ne dépasse pas l'effort résistant généré par le frottement le cube restera immobile et aucun effort ne sera transmis à la cellule de charge. Ainsi toute variation de l'effort, tant qu'elle est inférieure aux forces de frottement, n'est pas mesurable.

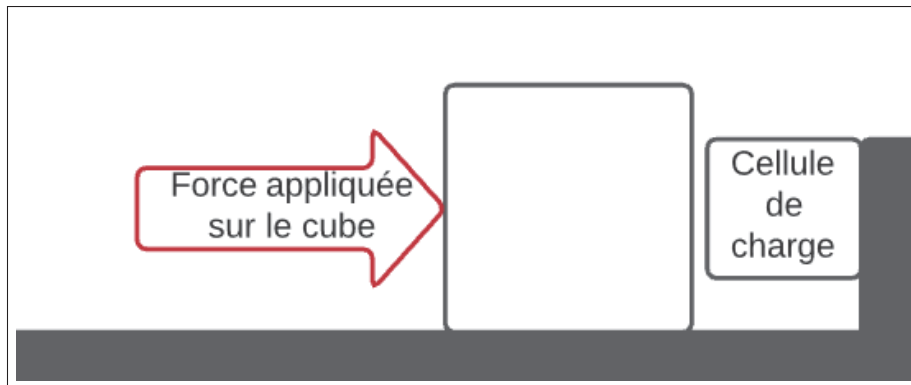


Figure 3.22 Schéma permettant d'expliquer le phénomène d'hystérésis observé dans le mécanisme de mesure de l'effort normal

La lecture de l'effort normal est donc dépendante de la position du chariot et de la charge précédemment appliquée, avec une différence entre la charge réelle et mesurée pouvant atteindre 30%. Cependant il pourrait être possible d'appliquer un coefficient correcteur en fonction de la situation qui permettrait de corriger les courbes, de même qu'il a été fait pour l'effort tangentiel. Mais avant cela il faut tout d'abord s'assurer de la répétabilité des erreurs de mesure. Au lieu de refaire les mêmes essais une démarche simplifiée a été suivie, consistant à ajouter puis retirer un poids, toujours le même, sur le chariot et à vérifier que la mesure reste constante. Le résultat de cet essai est visible sur la figure 3.23 : on peut constater que la mesure est assez variable, à chaque ajout de poids la mesure est différente alors qu'elle devrait rester identique.

Pour les 5 premiers ajouts et retraits du poids, il a été déposé délicatement, toujours à la même position, et on observe pourtant un écart de 8% entre les deux mesures les plus éloignées. Pour le dernier ajout de poids de la mesure, le poids a été déposé plus brusquement que précédemment (on peut d'ailleurs observer un dépassement lors de son ajout) et la conséquence est que la valeur est grandement affectée. Le poids qui est mesuré est 50% plus important que la moyenne des mesures précédentes. On peut aussi remarquer que lorsque le poids est retiré l'effort mesuré ne retourne pas à zéro, mais reste à environ 16 N. La suite de la mesure n'est pas visible sur le graphe, mais la valeur reste stable, elle ne retourne pas progressivement à zéro, l'hystérésis dans le système de mesure reste présente.

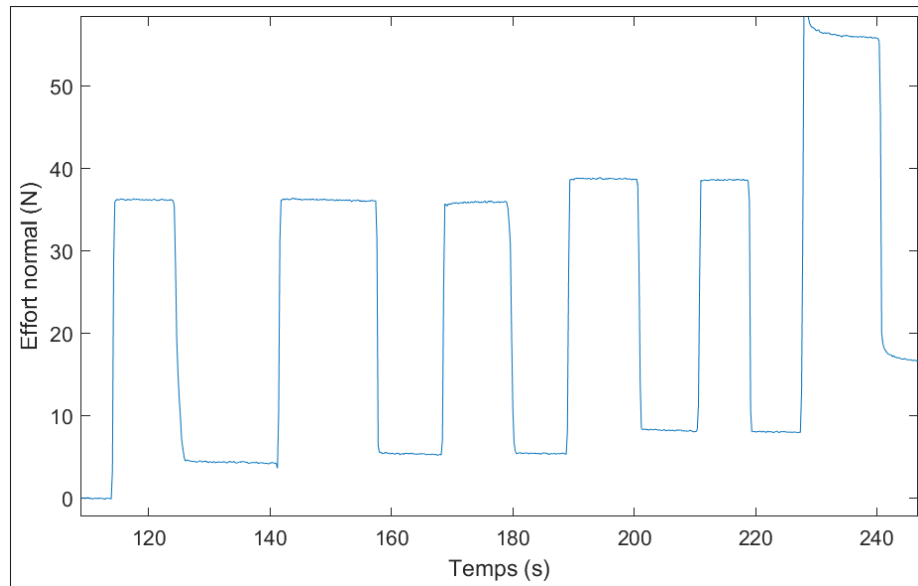


Figure 3.23 Mesure de l'effort normal lors de l'ajout et du retrait répétés d'un poids sur le chariot afin d'observer la répétabilité des mesures du système de calibration normal en fonction du temps

En conclusion, le phénomène observé dans cette partie rend le système de mesure très peu prédictible et pourrait grandement porter atteinte à la précision des mesures. Il faudrait trouver un moyen de s'assurer que l'erreur observée lors de l'ajout brusque du poids ne s'applique pas dans le cas d'une mesure de COF (l'erreur lorsque le poids est ajouté lentement est raisonnable et les mesures resteraient exploitables) ou trouver un moyen d'éliminer complètement ce phénomène.

3.2.1.2 Essai avec chariot en mouvement

Les mesures précédentes ont été réalisées avec le chariot immobile, cela permet de fournir un certain nombre de connaissances sur le comportement du système de mesure de l'effort normal. Des essais en mouvement ont ensuite été réalisés, avec deux objectifs notables :

- vérifier qu'il n'y a pas d'autres problèmes, que les essais fixes ne permettent pas d'identifier, avant de faire d'importantes modifications du système de mesure de l'effort normal.

- les essais fixes ont permis de supposer que la source des problèmes provient du système de mesure de l'effort normal. Cependant ils ne permettent pas de s'en assurer, ce qui est nécessaire avant d'effectuer des modifications importantes et coûteuses.

On peut observer un essai sur la figure 3.24. Il correspond à la mesure de l'effort normal lors du déplacement du chariot avec à chaque trajet un nombre supplémentaire de poids déposés sur le chariot.

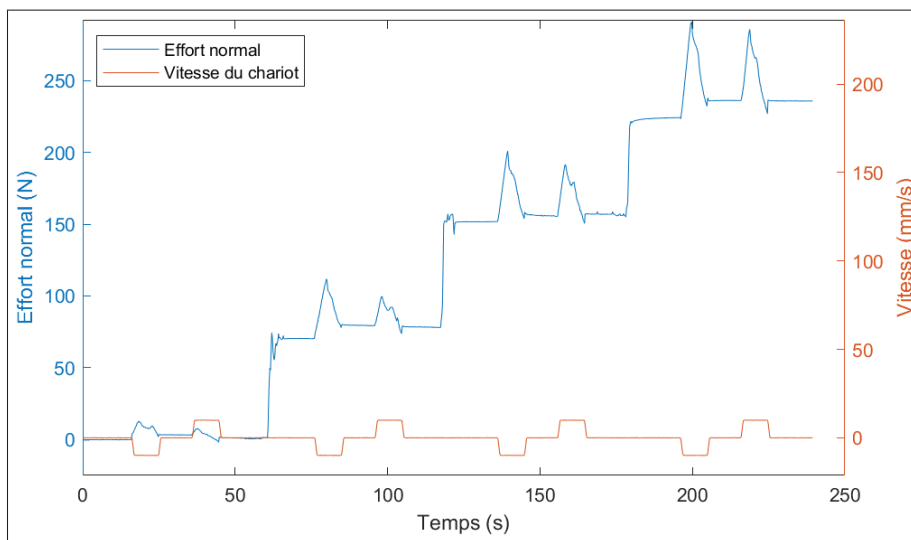


Figure 3.24 Mesure de l'effort normal au cours du temps et position du chariot lors de l'ajout progressif de poids et déplacement du chariot après l'ajout de chaque poids

On peut facilement visualiser les moments où le chariot se déplace grâce à la courbe rouge qui représente sa position. Au cours du déplacement les poids disposés sur ce dernier ne sont pas modifiés, l'effort normal devrait donc rester constant. Cependant on peut observer un pic dans la mesure de l'effort sur la courbe que lorsque le chariot se déplace. Ces pics sont de plus loin d'être négligeable, dépassant pour la plupart 20 N. Le motif semble être répétable, cependant en agrandissant les moments où le chariot se déplace (figure 3.25) on peut remarquer que ce n'est pas toujours le cas entre les trajets. On observe sur la figure que le pic violet est décalé par rapports aux pics jaunes et rouges. Tous les autres essais du même types ont présentés des résultats similaires, avec à chaque fois une grande variation dans les motifs d'erreur.

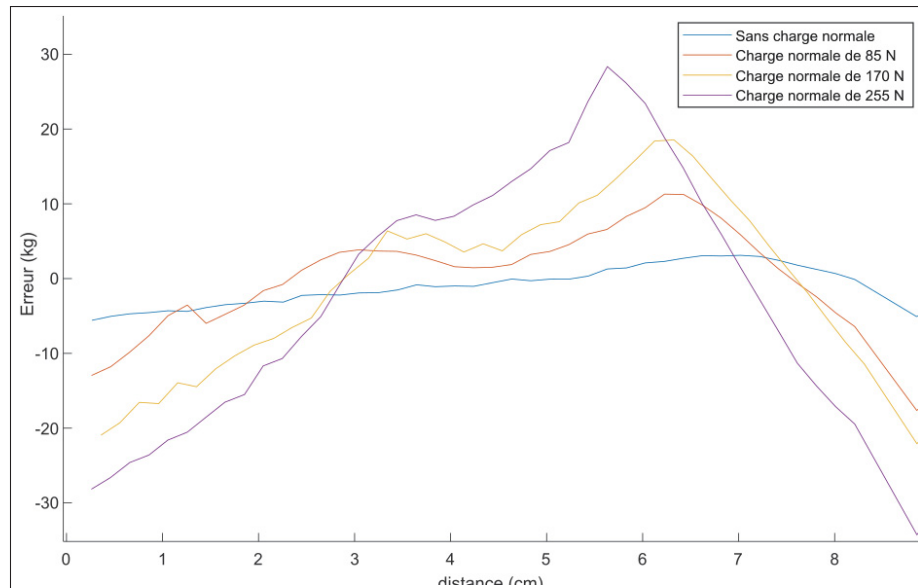


Figure 3.25 Affichage de l'erreur par rapport aux poids ajoutés pour l'essai de la figure 3.24 après que les portions où le chariot se déplace aient été isolées

En l'état il n'est donc pas possible de calibrer la mesure de l'effort normal comme nous l'avons fait pour la mesure de l'effort tangentiel. L'erreur de mesure n'est pas possible à modéliser par une fonction, il faut donc trouver une manière de diminuer ce facteur aléatoire. Pour cela plusieurs méthodes ont été testées, différents protocoles expérimentaux mais aussi différents réglages et améliorations, comme nous allons le voir dans la partie suivante.

3.2.1.3 Amélioration de la conception initiale

L'objectif de cette partie est de synthétiser les différentes itérations (d'essais et modifications) qui ont été menées pour tenter de rendre le système de mesure fiable et répétable. Cette section représente travail de recherche de plusieurs mois, qui a progressivement permis de prendre en main le banc d'essai et de mieux interpréter les mesures obtenues. Il est impossible de consigner toutes les tentatives qui n'ont pas abouti, mais de nombreux essais de frottement et de calibration, ainsi que des démontages et remontages des pièces du banc, ont été effectués. Les points les plus significatives de cette phase sont résumées ci-dessous :

1. Choix de nouveaux guidages pour le système de mesure de l'effort normal : la liaison entre les deux arbres de guidage et la plaque de support du chariot était réalisée par des paliers en bronze. Le frottement et le jeu dans ces paliers étaient trop importants et permettaient à la plaque quelques degrés de rotation selon l'axe z de la figure 3.19, ils ont donc été remplacés par des paliers en matériau plastique possédant un COF plus faible et des tolérances plus étroites permettant de réduire le jeu, puis par des paliers à bille possédant d'encore meilleures performances. Cependant malgré ces améliorations un léger jeu inhérent au design était encore présent, de même que les phénomènes d'hystérésis. Bien qu'ils aient diminué, ces derniers n'ont pas été éliminés.
2. Vérification de l'alignement et du serrage des différents éléments mécanique : la presse qui a servi de base au montage des composants possède des défauts géométriques et un certain travail d'ajustement a été nécessaire pour les compenser. Cela a permis de réduire l'erreur proportionnelle, mais n'a pas permis de résoudre les inconsistances et hystérésis.
3. Augmentation de la rigidité du piston du vérin : un phénomène d'oscillation de la vitesse de déplacement du chariot autour de sa consigne est observé. Celui-ci se répercute sur la mesure des efforts tangentiels mais aussi normal. L'asservissement du moteur semblant être la cause la plus probable, il a donc été reconfiguré, sans que cela améliore le résultat. Après analyse le problème provient finalement d'un léger jeu dans le piston. Une nouvelle pièce a été installée : un palier lisse en bronze a été ajouté sur la tige du piston. Il augmente grandement la longueur du guidage et ainsi lui donne une grande rigidité, ce qui a éliminé le phénomène d'oscillation et permet de réduire quelques peu les erreurs de mesure.

Au global, malgré une amélioration, l'ensemble de ces corrections n'ont pas suffi à éliminer en totalité les erreurs et hystérésis. Il apparaît donc qu'il est nécessaire de revoir la conception elle-même du système de mesure de l'effort normal, ce qui est le sujet de la section suivante.

3.2.2 Refonte du système de mesure

Dans cette partie le système de mesure est révisé. Cependant toutes les informations précédentes ne sont pas perdues et sont mises à profit dans cette partie pour apporter les corrections nécessaires. En particulier dans un premier temps elles permettent de caractériser le problème. Ensuite une méthode est développée afin d'apporter un point de comparaison avec les mesures de la cellule de charge. Une série d'hypothèse sur l'origine du problème est énoncée et un plan d'expérience est constitué grâce à ce nouvel outil. Les essais sont effectués et analysés dans la troisième sous-partie de cette section. Ils permettent d'identifier le problème et de faire une nouvelle conception qui assure que la mesure sera corrigée. Une fois le nouveau montage fabriquée la dernière partie de cette section se consacre à calibrer la mesure de l'effort normal, ce qui cette fois-ci se fait de manière trivial, en utilisant les bases du processus de calibration tangentielle.

3.2.2.1 Diagnostic

La première étape est d'identifier et de caractériser précisément les défauts du système :

- la mesure de l'effort normal présente des fluctuations en grande partie aléatoires. En particulier la charge mesurée semble influencée par l'historique de l'effort, c'est-à-dire que le chariot va garder en mémoire les efforts précédents (hystérésis).
- des essais préliminaires de frottement réalisés en parallèle de la calibration de la partie précédente ont permis de mettre en évidence que l'effort normal n'est pas constant au cours d'un essai : on peut observer des variations de l'effort allant du simple au double, ce qui dépasse l'erreur due aux phénomènes présentés au point précédent. Cela signifierait donc que non seulement la mesure n'est pas précise, mais en plus l'effort normal réel n'est pas constant. Or c'est un problème, car en plus de rendre la calibration des mesures beaucoup plus complexe, pour les essais il est nécessaire d'exercer une pression constante, et donc un effort normal constant. Il faut donc quantifier cette variation de l'effort puis la corriger.

Ces deux phénomènes couplés complexifient l'identification et la correction l'erreur : si l'effort normal était constant au cours du temps il serait possible de le mesurer dans des conditions pour lesquelles la mesure est fiable et conserver cette valeur pour l'essai. Mais dans notre cas il faut réussir à distinguer variation réelle de l'effort et erreur de mesure. Et aucune des observations faites jusqu'à ce point n'a permis de trouver de cause indiscutable pour expliquer cet effort non constant. Pour répondre à ce problème, plusieurs solutions ont été étudiées, la difficulté étant qu'il faut réussir à appliquer une charge connue de la manière la plus similaire possible à un essai de frottement.

3.2.2.2 Solution pour comparer la mesure de l'effort normal à une valeur connue

La solution technique retenue est l'utilisation d'un comparateur à cadran positionné de manière à ce qu'il mesure la compression du système de pression, comme on peut le voir sur la photo 3.26 et le schéma 3.27 qui est une vue en coupe de ce même montage.

Le principe de fonctionnement pour obtenir un effort en mesurant une distance est que la compression du ressort du système de pression est ce qui permet d'exercer l'effort (voir schéma 3.27), ainsi en mesurant la compression du ressort on peut estimer la force exercée, aux frottements du mécanisme près. Plus précisément la raideur du ressort est connue, ce qui permet en mesurant la compression de déduire l'effort qu'il exerce via l'équation suivante :

$$\Delta F = k \cdot \Delta d \quad (3.1)$$

Avec F l'effort de compression du ressort, k sa raideur et Δd sa longueur de compression par rapport à sa position d'équilibre. Cet effort est exercé entre la chambre et le piston, il ne correspond donc pas exactement à celui exercé au final par la pastille sur l'échantillon à cause des frottements dans la liaison pivot glissant entre la chambre et le piston. Ce système de mesure n'est donc pas parfait et ne permettra pas de connaître la valeur précise de l'effort, mais il reste une très bonne solution pour identifier à la fois l'effort exercé et la planéité de l'échantillon.



Figure 3.26 Photo du montage du comparateur pour la calibration du système de mesure de l'effort normal

En comparaison avec les poids utilisés initialement ce système présente deux avantages majeurs :

- il permet de mesurer l'effort au cours d'un essai de frottement, permettant de simuler les efforts d'un essai de manière beaucoup plus réaliste, en particulier car les poids exercent un effort centré sur le chariot (ils sont posés sur ce dernier) alors que le système de pression lui reste fixe et exerce l'effort toujours au même endroit. Le chariot se déplaçant, le point d'application de l'effort se déplace par rapport au chariot.

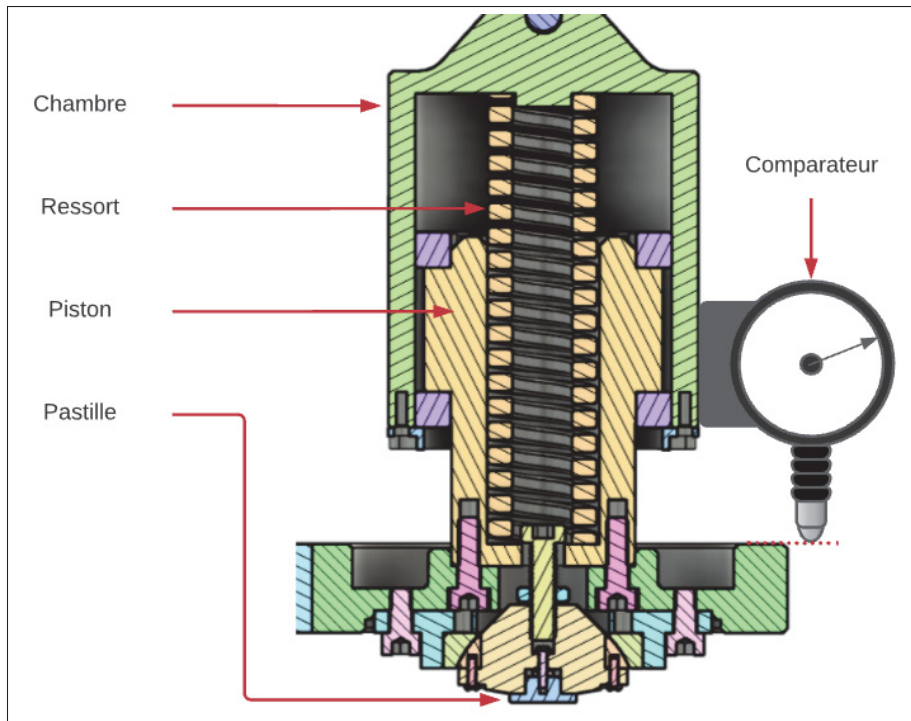


Figure 3.27 Schéma du système de pression

- le second avantage est qu'étant donné que la chambre peut être considérée comme fixe par rapport à la base du chariot au cours d'un essai, la mesure faite avec le comparateur est directement reliée à la planéité de la plaque, c'est-à-dire que les variations mesurées par le comparateur sont en théorie les variations de hauteur de la surface de l'échantillon.

Pour réaliser des mesures avec ce système le processus consiste à mettre le comparateur sur zéro, puis appliquer la pression et réaliser l'essai tout en reportant les valeurs mesurées par le comparateur. Cette opération ne pouvant se faire manuellement en direct pendant l'essai, une solution est de filmer le cadran et de reporter ensuite manuellement la valeur affichée à intervalles réguliers. Cette méthode étant tout de même fastidieuse et peu précise, un programme a été conçu sous Matlab pour analyser la vidéo du comparateur et transformer la position de l'aiguille au cours du temps en une courbe d'effort. Celui-ci est détaillé en annexe 2. Le programme permet ensuite de comparer ces données à celles enregistrées via la cellule de charge.

Il est donc maintenant possible d'avoir une approximation beaucoup plus précise de l'erreur de mesure, directement au cours d'un essai, et de connaître la constance de l'effort normal. Grâce à cet outil il est possible de réaliser une série d'hypothèses sur la cause des erreurs puis de les vérifier individuellement, comme nous allons le voir dans la partie suivante.

3.2.2.3 Méthodologie

Grâce à ce montage nous possédons une méthode pour vérifier et analyser les mesures, il est ainsi possible d'établir un plan d'expérience pour trouver l'origine des défauts du système. Le processus suivi est le suivant : une liste d'hypothèses qui pourraient expliquer les problèmes observés a été constituée, puis un plan d'expérience a été établi pour tester au mieux chacune de ces hypothèses. Ensuite tous les résultats ont été analysés, permettant de valider ou réfuter chaque hypothèse, puis si nécessaire d'apporter les corrections appropriées. Les hypothèses ont été formulées en se basant sur l'expérience acquise par l'utilisation du banc d'essai. Leur objectif est d'identifier et de tester de manière exhaustive les éléments qui pourraient avoir une influence sur les mesures. Les principales sont énumérées ci-dessous :

1. La cellule de charge ne fonctionne pas correctement.
2. Les tolérances d'usinage ont été mal sélectionnées et les défauts géométriques, même dans les tolérances, sont trop importants, ce qui comme expliqué précédemment fait varier la compression du ressort et change l'effort normal exercé.
3. La plaque de surface du chariot a des défauts géométriques hors des tolérances d'usinage.
4. La plaque de surface du chariot se déforme avec la température.
5. Le système de pression n'est pas assez rigide et sa déformation au cours du trajet cause les erreurs observées.
6. Le montage du chariot n'est pas assez rigide.
7. Les perturbations des mesures proviennent des frottements dans les guidages verticaux du système de mesure de l'effort normal.

Suite aux essais et aux analyses, les résultats, pour chaque hypothèse, sont les suivants :

1. **Dysfonctionnement de la cellule de charge :** pour vérifier la cellule de charge, l'ensemble du chariot a été démonté et la cellule de charge a été testée individuellement en déposant dessus des poids calibrés. Cela avait déjà été fait avant le montage du banc, mais le refaire a permis d'éliminer la possibilité qu'elle ait pu être endommagée au cours du montage ou des essais. Les résultats ont montré un fonctionnement normal de la cellule, avec une erreur dans les spécifications constructeur, négligeable devant les erreurs mesurées lors des essais.
2. **Tolérances d'usinage erronées :** le système de pression, bien qu'il ait été conçu pour être le moins sensible possible aux variations de hauteur de l'échantillon, y reste tout de même très sensible. C'est pourquoi l'on peut se demander si des écarts de planéité de la surface supérieure ou d'épaisseur de l'échantillon, même compris dans les tolérances d'usinage, pourraient avoir une influence sur les mesures. Pour cela les tolérances des ateliers d'usinage de l'ÉTS et des échantillons de Verbom ont été analysées. En utilisant la loi de Hooke appliquée au ressort (équation 3.1) afin de relier les variations de hauteur aux variations d'effort, il a été montré que ces perturbations étaient négligeables devant les mesures effectuées.
3. **Défauts de la plaque du chariot hors des tolérances d'usinage :** la planéité de la plaque a été mesurée avec le comparateur en fixant sa base à différents endroits (le bâti de la machine, la plaque de support du chariot, le système de pression), l'objectif étant de pouvoir différencier un défaut de planéité de la plaque d'un défaut dans la linéarité du guidage. Les résultats montrent que la plaque n'est pas parfaitement plate, on peut mesurer un écart supérieur à 0.1mm entre les points haut et bas. En reprenant l'équation citée au point précédent (3.1) on calcule que cela correspond à une variation de l'effort de 7N . Cela pose la question de comment ce défaut géométrique est apparu, mais après une mesure de la plaque séparément sur un marbre il s'est avéré que la plaque respectait les tolérances d'usinage. Suite à une analyse plus approfondie, le défaut a finalement été identifié, la plaque d'isolant situé entre la plaque chauffante et le bas du chariot est légèrement arquée, ce qui fait tanguer la plaque chauffante lors des essais. Des cales ont été ajoutées pour compenser le défaut de l'isolant et assurer qu'il n'y ait aucun jeu dans le chariot. Après

cette correction quasiment aucune variation de hauteur n'était mesurable. Des recherches ont été effectuées pour identifier la raison de la déformation de l'isolant afin de s'assurer qu'il ne risquait pas de continuer à se déformer. Il est constitué de matériau céramique, de la marinite du fabricant Industries 3R (référence donnée en annexe I-1), qui possède une consistance proche d'une brique de plâtre. Il a été précisément choisi pour ses propriétés de résistance mécanique élevées par rapport à la moyenne des isolants haute température. La documentation mentionne une contraction du matériau lorsqu'il est maintenu pendant une longue durée à haute température. Après une étude géométrique qui a permis de valider que la valeur de la contraction indiquée correspond bien à la déformation observée (voir annexe I-3) le fabricant a été contacté, qui a confirmé que l'humidité contenue dans le matériau à température ambiante s'évapore avec la chaleur entraînant la contraction du matériau. Or comme dans notre cas la plaque est chauffée que d'un côté, seul un côté subit cette contraction, ce qui entraîne la flexion plastique de l'isolant. Le matériau peut donc continuer à se déformer à chaque cycle de chauffage étant donné qu'il reprend de l'humidité à température ambiante, la solution des cales ne pourra donc pas définitive. Il existe plusieurs solutions comme faire évaporer l'humidité en chauffant la marinite puis la recouvrir d'un vernis haute température étanche, chercher un autre matériau, ou trouver une manière d'assurer la planéité de la surface supérieure du chariot malgré la flexion de l'isolant, mais pour des raisons de temps ces modifications ont été laissées pour de futurs projets sur le banc d'essai, les cales apportant une solution fonctionnelle à court terme.

4. **Déformation de la plaque sous l'effet de la température :** pour vérifier ce point des simulations numériques ont été réalisées. En effet lors du chauffage il y a un gradient de température dans la plaque chauffante, le bas de la plaque est contre un isolant thermique qui conserve la chaleur alors que l'autre côté est à l'air libre. Or étant donné que l'acier se dilate avec l'augmentation de température, une différence de température peut entraîner une différence de dilatation ce qui résulte par la présence de contraintes dans la plaque. Ces contraintes peuvent alors déformer élastiquement la plaque (la plaque retrouverait alors sa forme à température ambiante) voir la déformer plastiquement si les contraintes sont trop importantes (la plaque garderait alors une déformation à température ambiante). Cependant

les simulations par éléments finis qui ont été réalisées pour répondre à ce questionnaire n'ont pas permis de mettre en évidence de déformation significative, seule une dilatation homogène peut être observée, le gradient ne semble pas être suffisant pour engendrer de réelle déformation. Cette hypothèse est donc éliminée des sources potentielles d'erreur.

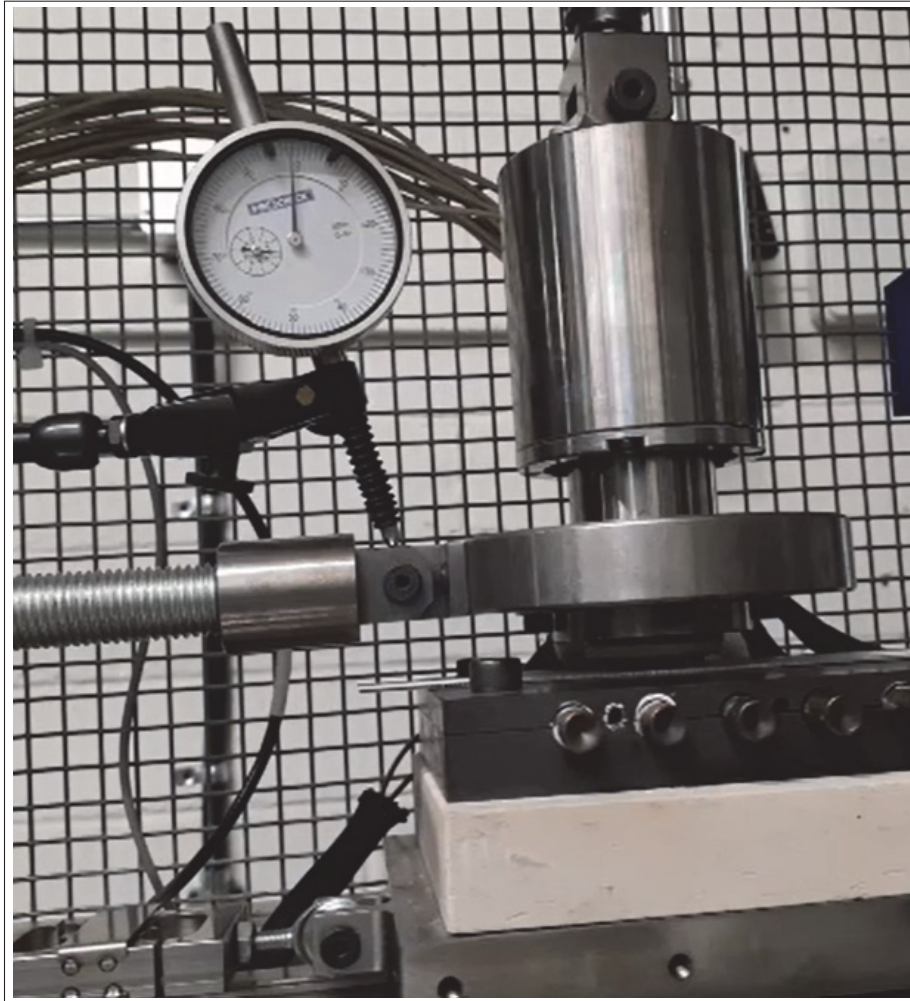


Figure 3.28 Montage de test pour mesurer la déformation du système de pression lors d'un essai

5. **Manque de rigidité du système de pression :** cette hypothèse suppose que le système de pression pourrait ne pas être assez rigide et se déformer légèrement pendant un essai. Sa déformation a donc été mesurée en plusieurs points au cours d'un essai, ce qui a permis de montrer que effectivement un léger déplacement été mesurable à l'initiation du mouvement

(mais très peu au cours du trajet du chariot). Une modélisation géométrique a été faite pour calculer l'influence de ce déplacement sur la position de l'outil, ce qui a permis de montrer que ce déplacement est négligeable, de l'ordre de 0.005 mm.

6. **Manque de rigidité du chariot :** cette hypothèse a déjà été confirmée lors des essais pour valider l'hypothèse 3, mais une fois le problème de l'isolant résolu d'autres points de potentiels manque de rigidité ont été testés. En particulier le basculement de la plaque de support du chariot sur laquelle sont montés les rails, car comme expliqué précédemment il y a un léger jeu dans les guidages verticaux. Un comparateur a été placé comme sur la photographie 3.29 et a mesuré une variation de hauteur de 0.9mm. Une étude géométrique a cependant permis de montrer qu'une telle variation avait une répercussion de seulement 0.001mm sur la hauteur de l'échantillon, ce qui n'entraîne pas d'erreur significative sur les mesures. Le montage a aussi été testé de manière plus générale en positionnant le comparateur à l'endroit où la pastille est normalement posée puis en exerçant un effort vertical sur le chariot avec ce dernier à différentes positions. Après les corrections apportées sur l'isolant une légère déformation était observable pour les charges appliquées, soit 15 kg (la charge maximale applicable était limitée par le dispositif de test). Cela provient probablement des cales utilisées pour stabiliser l'isolant, c'est donc un point qu'il faudra améliorer lors des futurs travaux.

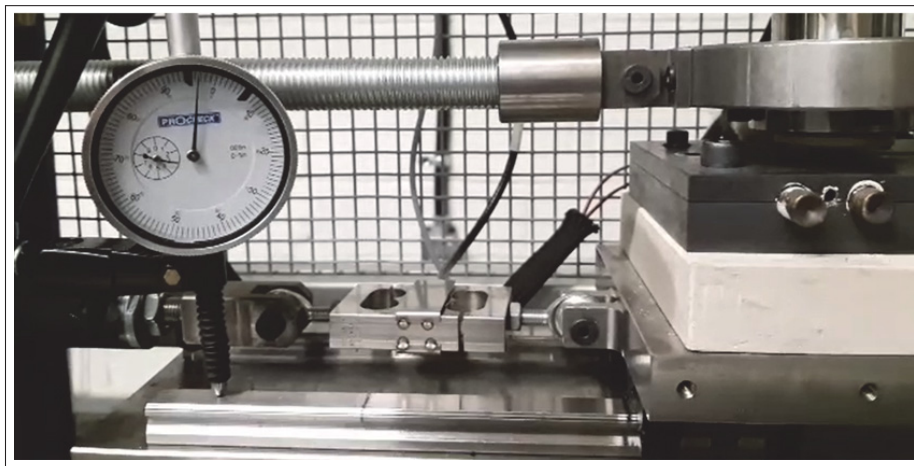


Figure 3.29 Montage du comparateur pour évaluer le mouvement de la plaque de support du chariot lors d'un essai de frottement

7. **Frottement dans les guidage du système de mesure de l'effort normal** : ce dernier point testé est celui qui été initialement soupçonné de causer les erreurs de mesures. De plus parmi toutes les hypothèses testées précédemment aucune n'a permis de corriger les erreurs de mesure, par élimination il serait donc fort probable que ce soit de ce dernier composant que provienne l'erreur. Afin de mettre cela en évidence et de s'assurer que la source de l'erreur a bien été identifiée, un certain nombre d'essais ont été réalisés. Le plus significatif est présenté sur la figure 3.30 : il représente la comparaison entre la mesure faite par la cellule de charge et la mesure interprétée à partir de la mesure du comparateur au cours du déplacement. On peut observer une différence importante entre les résultats des

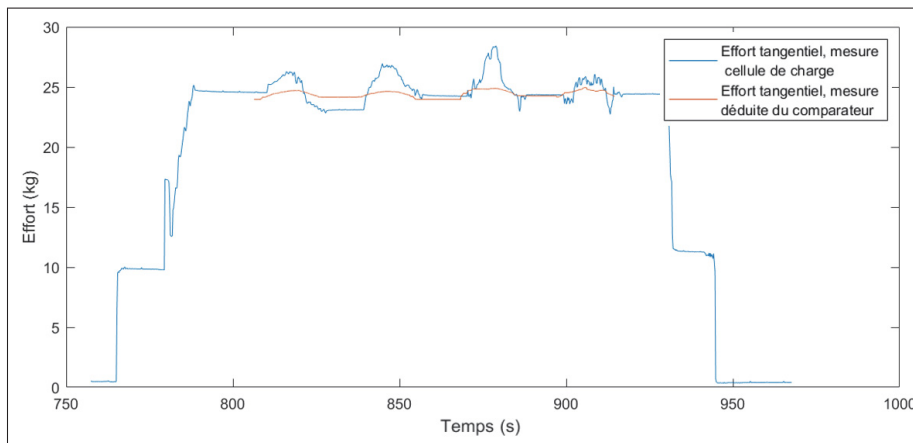


Figure 3.30 Comparaison entre la mesure faite par la cellule de charge et la mesure déduite des données du comparateur

deux méthodes, les mesures du comparateur sont beaucoup plus stables. En compilant tous les résultats précédents avec celui-ci, il n'a été trouvé qu'une seule manière d'expliquer ces observations : l'effort qui est appliqué sur le chariot est en partie transmis à la cellule de charge, mais une petite partie de cet effort est aussi repris par les frottements dans les guidages verticaux du système de mesure. Lorsque le chariot n'est pas positionné au milieu de sa course, son centre de gravité n'est pas centré sur la cellule de charge, ce qui crée un moment repris par les guidages verticaux. Cet effort croît donc lorsque le chariot s'éloigne du centre, ce qui fait que plus le chariot s'éloigne du centre plus la portion de l'effort qui n'est pas transmis à la cellule de charge est grand. Cela correspond bien à ce qui est observé,

avec un accroissement de l'effort jusqu'au centre de la course puis une diminution. Les guidages des arbres verticaux ont pourtant été changés pour des guidages à bille avec un frottement très faible, mais cela n'est à priori pas suffisant.

3.2.2.4 Conclusion et modification du système de mesure

Ces essais ont donc permis d'identifier la cause la plus probable des erreurs de mesure. Il n'est pas possible de faire de correction après les mesures comme il a été fait pour l'effort tangentiel, car les frottements dans les guidages ont une grande variabilité aléatoire et car ils créent un phénomène d'hystérésis.

Le système de mesure de l'effort normal a donc été en partie modifié, en supprimant les deux guidages verticaux et en utilisant trois cellules de charge, comme expliqué dans la partie 2.4.2.

Comme on peut le voir dans cette dernière un travail d'ingénierie conséquent a été nécessaire pour développer ce système, nécessitant d'importantes modifications sur le banc, d'un point de vue de la conception mécanique, mais aussi pour l'intégration des nouvelles cellules de charge dans le système d'acquisition. Le nouveau mécanisme est visible sur la figure 3.31.

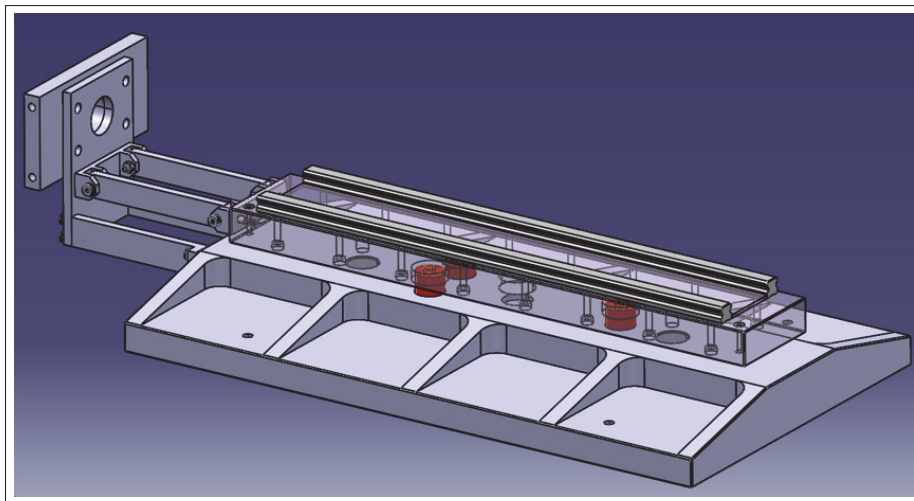


Figure 3.31 Modélisation 3D du nouveau système de mesure de l'effort tangentiel. En rouge on observe les 3 cellules de charge

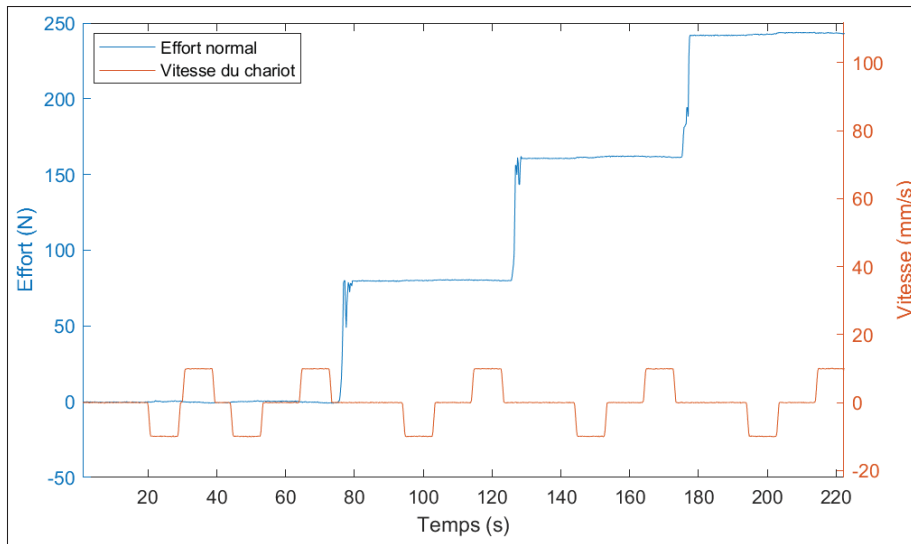


Figure 3.32 Essai de calibration du nouveau système de mesure de l'effort normal : des poids sont ajoutés et le chariot réalise un aller-retour entre chaque ajout

Ce nouveau système a lui aussi été soumis plusieurs tests pour valider son bon fonctionnement. On peut en particulier noter le test 3.32 identique à celui réalisé sur la figure 3.24, qui consiste à ajouter progressivement des poids sur le chariot, en réalisant un aller-retour entre chaque ajout de manière à vérifier si la mesure de l'effort normal reste effectivement constante au cours du déplacement. On peut constater que ce graphique est très différent du premier, et que la mesure de l'effort normal n'est plus influencé par le déplacement du chariot. Afin d'assurer la justesse des mesures le même processus de calibration que celui de l'effort tangentiel a été utilisé, avec la seule différence que les poids sont déposés sur le chariot et non sur le système de poulie. Le même post-traitement a été appliqué afin d'identifier un potentiel motif d'erreur systématique et la corrélation entre l'erreur et la charge normale appliquée. Aucun motif d'erreur significatif n'a pu être identifié, seule la correction de décorrélation a été appliquée. Un onglet a été ajouté à l'application Matlab d'analyse des résultats afin de permettre de traiter un essai de calibration de l'effort normal pour en extraire les coefficients de correction a et b , qui dans l'onglet principal du programme seront utilisés pour corriger les mesures des essais de frottement.

L'effort normal a donc été calibré, et on sait maintenant que les mesures lues sont bien représentatives de la charge normale réelle.

3.3 Calibration des paramètres expérimentaux

La mesure du COF a été calibrée dans la section précédente, mais lors d'un essai, la valeur d'autres paramètres que le COF doit aussi être contrôlée. C'est ce à quoi est consacrée cette section, comme le montre la partie droite de l'organigramme 3.1. Les paramètres expérimentaux que l'utilisateur de l'appareil sélectionne avant l'essai doivent être calibrés afin de s'assurer qu'ils correspondent bien à leur valeur attendue. Ces paramètres sont la vitesse de déplacement du chariot, la distance de glissement, la température et la pression. Cette dernière a déjà été évoquée dans la partie précédente, elle ne sera donc pas évaluée ici.

La vitesse de déplacement est une grandeur lue par le programme depuis les données envoyées par le servocontrôleur du vérin. La précision des capteurs de cet appareil est très grande et dépasse de loin les besoins de nos expériences. On peut donc considérer que la vitesse lue correspond à la vitesse réelle. La distance de glissement est directement déduite de la position du vérin, récupérée à partir des mêmes capteurs, on peut donc aussi considérer que l'erreur de mesure sur ce paramètre est négligeable. La température en revanche nécessite une plus grande attention. Des simulations thermiques par éléments finis ont été réalisées lors d'une étude préalable sur le projet (Le Royer, 2017a) afin de déterminer l'arrangement d'éléments chauffants permettant la meilleure homogénéité de température sur la surface du chariot. Le chauffage a aussi été séparé en 3 zones distinctes le long de la plaque possédant chacune leur propre PID de manière à pouvoir contrôler la température indépendamment dans chacune de ces zones (voir figure 3.33).

Ces précautions ont permis de faciliter la calibration de la température, mais les thermocouples du PID n'étant pas sur la surface de la plaque un écart est tout de même existant entre la consigne et la température de surface. Des essais de chauffages ont donc été réalisés, ils ont consisté à entrer des températures de consigne entre 25 et 500°C puis une fois la température stabilisée à

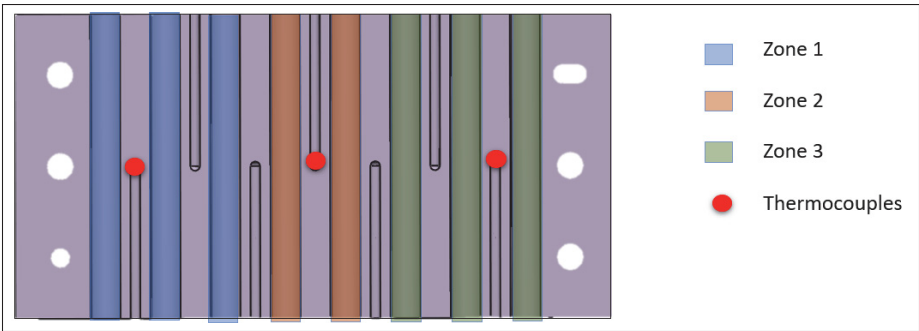


Figure 3.33 Schéma vu du dessus de la plaque chauffante du chariot, présentant les trois zones de chauffages contrôlées indépendamment

mesurer la température de surface grâce à un thermocouple de surface (provenant du vendeur OMEGA, référence 88014K). Ces mesures ont permis de déterminer un facteur de correction à appliquer à la température de consigne pour la faire correspondre à la température de surface du chariot (figure 3.34) à 4 degrés près. Le paramètres du PID peuvent facilement être modifiés, ce qui laisse la possibilité d’améliorer la précision avec un meilleur réglage.

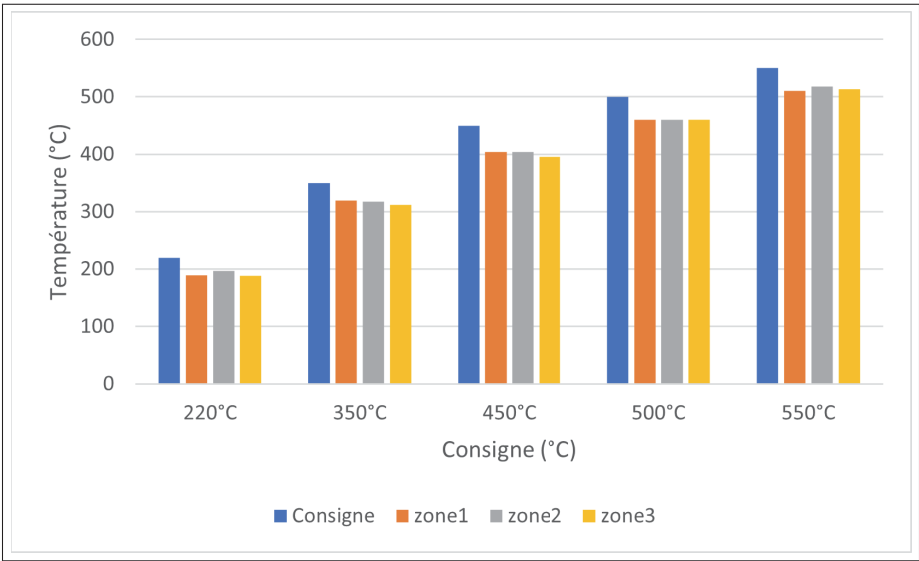


Figure 3.34 Histogramme des essais de calibration de la température

CHAPITRE 4

DÉTERMINATION DU COF POUR LE PROCÉDÉ HSBF

Les parties précédentes ont présenté la conception du banc d'essai et sa calibration. L'objectif de ce chapitre est donc maintenant de réaliser des essais, afin de vérifier que la machine est capable de générer des données, qu'elle permet effectivement de mesurer le frottement à haute température dans des conditions proches du procédé SPF, et qu'elle permet de répondre à la problématique formulée en introduction du mémoire. Pour cela le chapitre est découpé en plusieurs sections, en commençant par le plan d'expérience avec les matériaux utilisés et les conditions expérimentales. Puis, dans la section suivante, les données des essais sur le COF sont présentées, suivies des analyses, sur l'influence des variables sur le COF, mais aussi sur les autres paramètres qui influencent les résultats et les enseignements que ces essais fournissent sur le protocole expérimental et la réalisation des essais. En dernier point, seront présentées les sources d'erreur et les limites des expériences, les recommandations et conclusions pour valider si le banc répond aux attentes.

4.1 Méthodologie

L'objectif principal de ces essais est le remplissage d'une table de valeurs que l'entreprise Verbom pourra intégrer à sa simulation par éléments finis du procédé de mise en forme superplastique HSBF, afin de remplacer le COF constant utilisé actuellement par cette table de valeurs, ce qui devrait permettre d'améliorer grandement la précision des simulations. Mais les essais permettront aussi d'acquérir de l'expérience sur l'utilisation du banc et d'apporter de nouvelles informations sur les frottements dans le cadre du SPF qui n'existent pas encore dans la littérature. Le plan d'expérience doit donc être établi en prenant tous ces critères en compte.

Le cadre de l'étude est limité aux conditions de frottement correspondant au bon fonctionnement du HSBF. L'apparition de défauts comme le détachement de lubrifiant ou le galing n'est pas le sujet direct de cette étude. L'intérêt de ce concentrer sur ce cas est que une meilleure compréhension du COF dans ces conditions de bon fonctionnement permettra à Verbom de mieux

pouvoir faire fonctionner le HSBF dans ces conditions. Les différents défauts et phénomènes d'usure et d'endommagement seront étudiés lors de prochaines études.

Cette section va donc dans un premier temps être consacrée au plan d'expérience, en commençant par les matériaux utilisés, c'est-à-dire les éléments qui représentent la pièce et la matrice du HSBF, qui sont des données expérimentales qui resteront constantes au cours des essais. Puis les autres conditions expérimentales seront abordées pour les présenter puis décrire le raisonnement qui a amené au plan d'expérience présenté à la fin de la partie. Ensuite, la conception du protocole suivi pour mener les essais sera détaillée.

4.1.1 Conditions expérimentales

4.1.1.1 Matériaux

Les matériaux utilisés pour les essais ont été fournis par Verbom et proviennent directement du procédé HSBF. Les échantillons d'aluminium ont été découpés à partir d'une plaque lubrifiée sur la ligne de production du HSBF de manière à s'assurer que la lubrification est identique entre nos échantillons et les pièces formées. La photographie d'un échantillon est visible sur la figure 4.1.

Les pastilles ont été réalisées en acier P20, le même acier que celui qui est utilisé pour les matrices de formage. Plusieurs géométries de pastilles ont été étudiées, elles étaient initialement circulaires avec un diamètre de 12mm. Le congé d'attaque avait été défini à 0,2 mm de manière à avoir une pastille aussi fine que possible, ce qui permet à la fois qu'elle chauffe rapidement et surtout que son centre de rotation soit au centre de la surface de contact de la pastille et de l'échantillon. En effet à ce moment de la conception la version finale de la rotule était conçue, mais pas encore usinée et au vu de la complexité du système sa fiabilité n'était pas garantie. Une pastille fine permettait de maximiser ses chances de remplir son rôle en positionnant au mieux la surface de contact par rapport au centre de rotation de la rotule, mais il s'est avéré après les tests que la rotule remplit parfaitement son rôle et que des pastilles plus épaisses peuvent être

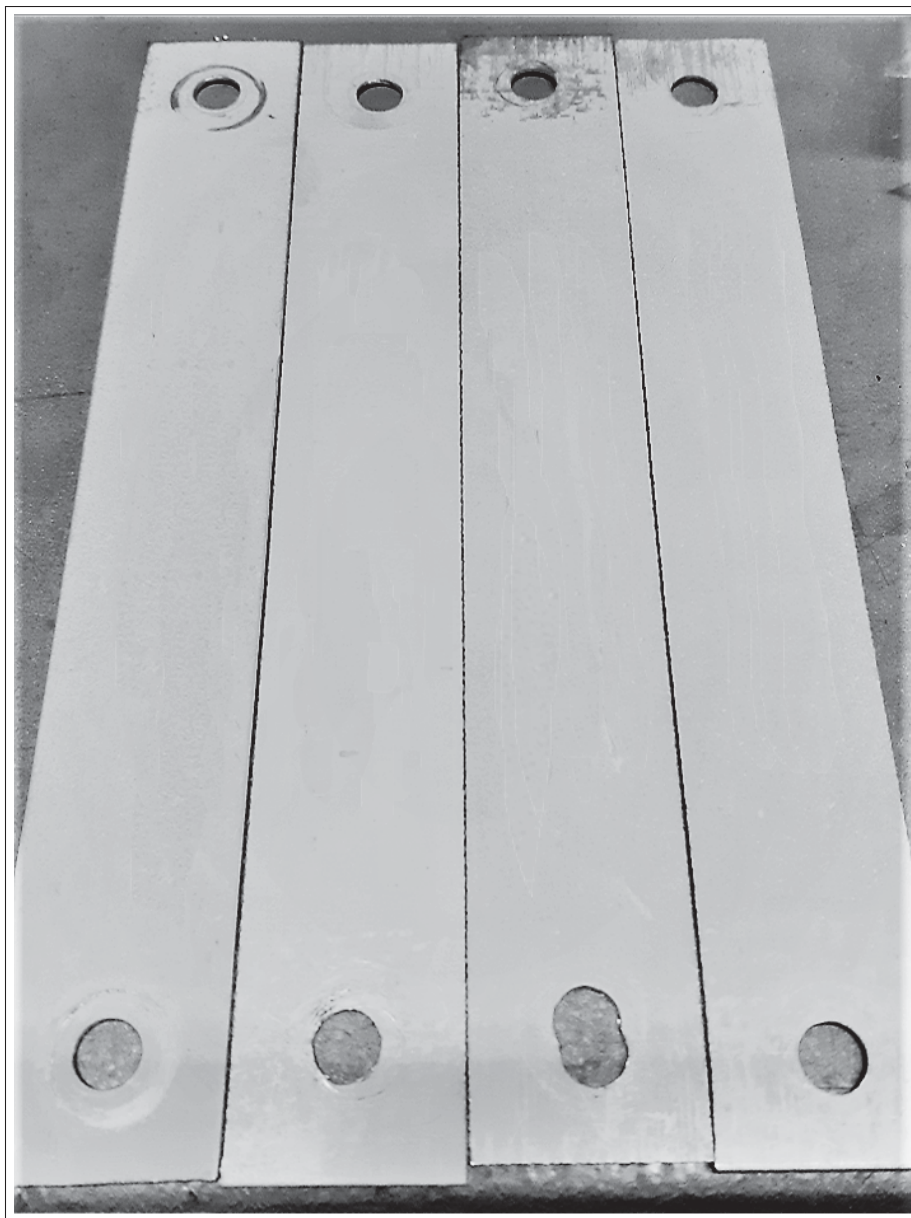


Figure 4.1 Photographie d'échantillons

utilisées. Les pastilles sont, après usinage, polies à la main de la même manière que le sont les matrices, selon une direction précise et avec la même taille de grain de polissage.

Ce premier design présentait une variabilité assez importante lors des premiers essais, qui a été reliée au congé d'attaque (voir schéma 4.2) de 0,2 mm. Un rayon aussi faible est très difficile à usiner avec précision, d'autant plus que le polissage fait après l'usinage peut l'enlever en

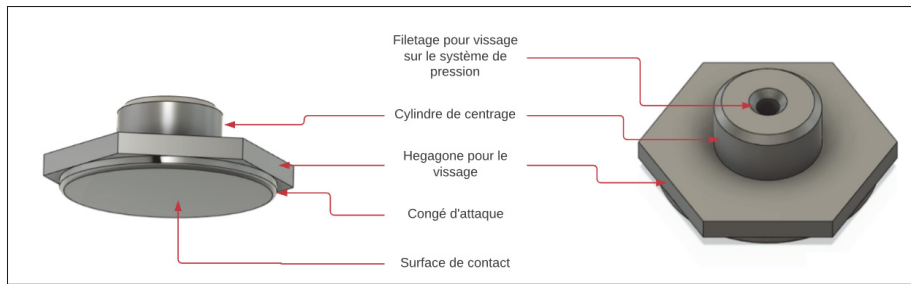


Figure 4.2 Schéma d'une pastille circulaire, premier design non fonctionnel

partie. Ainsi il pouvait arriver que la pastille cisaille le BN de l'échantillon, causant une grande variabilité dans les résultats. Un second design de pastille a été fait en se basant sur le même modèle, mais avec un congé plus important, cette fois-ci de 2mm. Une deuxième version de forme rectangulaire a aussi été réalisée, ce qui permet, contrairement aux pastilles circulaires, d'avoir une distance de glissement homogène sur toute la largeur de l'échantillon. Ce design n'avait initialement pas été retenu, car la pastille n'est pas bloquée en rotation, c'est-à-dire qu'elle est libre de tourner selon l'axe normal à la surface de contact, le rectangle pourrait donc tourner au cours d'un essai. Mais cette géométrie a tout de même été testée, et aucun problème de rotation de l'échantillon n'a été constaté. C'est donc elle qui a été sélectionnée pour être utilisée pour les essais finaux.

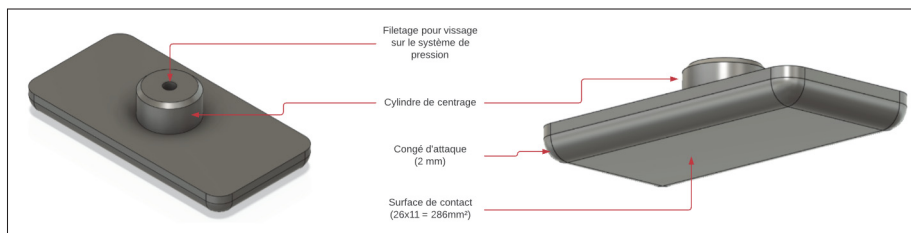


Figure 4.3 Schéma d'une pastille rectangulaire, celle utilisée pour la majorité des essais

La surface de la pastille a été augmentée à 286 mm^2 pour la pastille rectangulaire, ce qui avec l'effort normal maximal que peut exercer le banc limite la pression de contact maximale à 5 MPa. En cas de besoin les pastilles circulaires, leur surface étant plus faible (154 mm^2),

permettront d'atteindre 9,6 MPa. Néanmoins les essais préliminaires ont montré que même dans les conditions les plus favorables du galing apparaissait au-dessus de pressions de l'ordre de 2MPa, une pression maximale à 5MPa ne devrait donc pas limiter l'étude (l'objectif n'est pas d'étudier le frottement en cas de galing).



Figure 4.4 Photographie des pastilles utilisées pour les essais, telles que reçues

Les pastilles ont été fabriquées au nombre de 3, visibles sur la photo 4.4. On peut aussi voir sur la photo des pastilles circulaires qui ont été utilisées pour certains essais.

4.1.1.2 Plan d'expérience

Tout d'abord, il est important de rappeler les variables du protocole : la température, la vitesse, la pression et la distance de glissement. L'objectif principal est de constituer une table de valeurs de COF pour le HSBF, mais aussi d'analyser l'influence des 4 variables dans la zone proche des conditions expérimentales du procédé et d'exploiter ces analyses pour améliorer la connaissance du COF dans ces conditions et pouvoir apporter de nouvelles données à la littérature.

Une fois les objectifs déterminés, le plan d'expérience a pu être constitué. Il est soumis à plusieurs contraintes, la principale étant le nombre d'essais. En effet, le nombre d'échantillons d'aluminium est limité à 30 pour des raisons de temps et de quantité disponible (quantité restante

une fois les tests préliminaires de calibration et les essais de prise en main de la machine faits). Cependant un échantillon peut être utilisé pour plusieurs essais : chaque trajet correspond à un essai, la distance de glissement n'est donc pas une variable qui est limitée par le nombre d'échantillons disponible. En revanche elle l'est par le nombre de pastilles, comme indiqué dans la partie précédente 4.1.1.1 nous disposons de 3 pastilles rectangulaires et 3 circulaires, mais sauf conditions particulières uniquement les rectangulaires sont utilisées, car leur distance de glissement est la même sur toute la largeur de la pastille. Or lorsque du galing est observé au cours d'un essai la pastille a de fortes chances d'être endommagée par des dépôts d'aluminium ou marquage de l'acier, ce qui pourrait influencer les mesures suivantes. Le nombre de trajets a donc été limité à deux pour la grande majorité des essais afin d'éviter au maximum l'apparition de galing et l'usure des pastilles.

Le nombre de niveaux par variable a donc été limité au maximum et ciblé uniquement sur les zones critiques. Pour la température 3 niveaux ont été choisis, 25°C, 470°C et 500°C. Les essais à 25 degrés, bien qu'ils ne soient pas représentatifs des conditions du HSBF, présentent l'avantage d'être beaucoup plus simples à réaliser et de moins endommager les pastilles tout en fournissant un certain nombre d'informations intéressantes. En particulier cela permet d'avoir un point de comparaison avec la littérature : de nombreuses études parmi celles qui sont les plus proches de notre sujet mesurent aussi le COF à température ambiante, nous aurons donc un point de comparaison avec ces études, souvent le seul, car très peu montent à des températures aussi élevées que 470°C (la majorité s'arrête à 400°C, comme Ghiotti *et al.* (2017); Podgornik *et al.* (2017); Shi *et al.* (2017) et 450°C pour Ghiotti *et al.* (2019); Hanna (2009)). Ensuite les essais à 470 et 500°C permettent d'étudier l'intervalle dans lequel se situe le HSBF, en se plaçant aux deux bornes il sera possible d'estimer une évolution linéaire entre ces points et de déduire l'impact des variations de température au cœur de la mise en forme.

Pour la pression le nombre de niveaux a été limité à 2, car elle influence grandement l'apparition du galing (ce que l'on souhaite éviter), et l'intervalle sûr est trop petit pour justifier plus de 2 niveaux. Ce phénomène ainsi que les conséquences sur les résultats seront abordés dans la partie analyse des résultats. La pression maximale a été définie à 2 MPa, au-delà la pastille est

trop vite endommagée, même à température ambiante. Les niveaux ont donc été déterminés à partir de cette expérience acquise lors des essais préliminaires et non pas avec les pressions indiquées par simulations du HSBF (qui prédisent environ 10 MPa de pression maximale, voir la figure 2.4). Ils ont donc été établis à 0,8 et 1,6 MPa. À température plus élevée, le galling apparaît dès 0,8 MPa et est fortement aggravé quand la pression augmente, les essais à 1,6 MPa ont donc été réduits au maximum.

La vitesse de glissement est le paramètre qui a été étudié le plus en détail. La première raison est qu'aucune littérature n'a été trouvée sur les vitesses de glissement pour un contact surfacique avec lubrification solide à des vitesses inférieures à 10mm/s. 4 niveaux ont donc été explorés, de 0,5mm/s à 10mm/s pour avoir un point de comparaison avec la littérature.

Les variables et leurs niveaux sont récapitulés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Tableau des variables et de leurs niveaux

Variable	Nombre de niveaux	Niveaux
Température (°C)	3	25 ; 470 ; 500
Pression (MPa)	2	0,8 ; 1,6
Vitesse (mm/s)	4	0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 10
Distance de glissement (mm)	2	26 ; 52 (14 et 28 pour certains essais avec les pastilles circulaires)

Une fois les variables et les niveaux définis un plan d'expérience simple a été établi. Un plan de criblage avait initialement été défini, mais il a dû être légèrement modifié au cours des essais pour faire face aux différents aléas comme une usure accélérée des pastilles. Les essais ont aussi été adaptés au fur et à mesure en fonction des premiers résultats pour cibler les points clés, là où les données étaient les plus intéressantes à observer, par exemple pour la vitesse des

niveaux ont été ajoutés au cours de la phase d'essais. Le plan d'expérience réalisé au final est présenté sur le tableau 4.2 dans leur ordre d'exécution et les photographies des échantillons sont montrées en annexes I-4 et I-5.

Tableau 4.2 Tableau présentant tous les essais réalisés

<i>Température (°C)</i>	<i>Pression (MPa)</i>	<i>Vitesse (mm/s)</i>	<i>Distance de glissement (mm)</i>	<i>Outil</i>	<i>Température (°C)</i>	<i>Pression (MPa)</i>	<i>Vitesse (mm/s)</i>	<i>Distance de glissement (mm)</i>	<i>Outil</i>
25	0,8	5	26	Rectangulaire1	...	...	...	...	...
25	0,8	5	52	Rectangulaire1	500	0,8	10	26	Rectangulaire2
450	0,8	5	52	Rectangulaire1	500	0,8	10	52	Rectangulaire2
450	0,8	5	26	Rectangulaire1	500	0,8	1	26	Rectangulaire2
25	1,6	5	14	Circulaire1	500	0,8	1	52	Rectangulaire2
25	1,6	5	28	Circulaire1	470	0,8	10	26	Rectangulaire2
25	1,6	5	42	Circulaire1	470	0,8	10	52	Rectangulaire2
25	1,6	5	56	Circulaire1	470	0,8	1	26	Rectangulaire2
25	1,6	5	28	Circulaire1	470	0,8	1	52	Rectangulaire2
25	1,6	5	42	Circulaire1	470	1,3	1	26	Rectangulaire2
25	1,6	5	14	Circulaire1	470	1,3	1	52	Rectangulaire2
25	1,6	5	28	Circulaire1	500	0,8	0,5	26	Rectangulaire3
25	1,6	5	42	Circulaire1	500	0,8	0,5	52	Rectangulaire3
25	1,6	5	14	Circulaire1	25	0,8	0,5	26	Rectangulaire3
25	1,6	5	28	Circulaire1	25	0,8	0,5	52	Rectangulaire3
25	1,6	5	14	Circulaire1	25	0,8	3	52	Rectangulaire3
25	3,5	19	14	Circulaire1	25	0,8	3	26	Rectangulaire3
25	3,5	19	28	Circulaire1	25	1,6	1	14	Circulaire2
25	0,8	5	26	Rectangulaire1	25	1,6	1	28	Circulaire2
25	0,8	5	52	Rectangulaire1	470	1,6	1	14	Circulaire2
25	0,8	5	78	Rectangulaire1	470	1,6	1	28	Circulaire2
25	0,8	1	26	Rectangulaire1	470	0,8	0,5	26	Rectangulaire3
25	0,8	1	52	Rectangulaire1	470	0,8	0,5	52	Rectangulaire3
25	0,8	10	26	Rectangulaire1	500	0,8	3	26	Rectangulaire3
25	0,8	10	52	Rectangulaire1	500	0,8	3	52	Rectangulaire3
25	2	10	26	Rectangulaire1	470	0,8	3	26	Rectangulaire3
25	2	10	52	Rectangulaire1	470	0,8	3	52	Rectangulaire3
25	1,6	1	26	Rectangulaire1	470	0,8	1	14	Circulaire3
25	1,6	1	52	Rectangulaire1	470	0,8	1	28	Circulaire3
25	1,6	10	26	Rectangulaire1	25	0,8	3	26	Rectangulaire2
25	1,6	10	52	Rectangulaire1	25	0,8	3	52	Rectangulaire2
200	1,6	10	26	Rectangulaire1	25	0,8	3	26	Rectangulaire2
200	1,6	10	52	Rectangulaire1	470	0,8	10	26	Rectangulaire2
25	0,8	10	52	Rectangulaire2	470	0,8	10	52	Rectangulaire2
25	0,8	10	26	Rectangulaire2	...	...	...	...	...

On peut remarquer dans le tableau plusieurs points qui seront analysés par la suite, par exemple les répétitions d'essais dans des conditions identiques avec la pastille circulaire 1 dont le but était de valider la répétabilité des essais et d'observer l'influence de l'usure de la pastille.

4.1.2 Protocole expérimental

L'objectif du protocole expérimental est de la diminuer au maximum en définissant un processus pour réaliser un essai qui limite au maximum la variabilité des mesures. Pour notre banc il a été défini et précisé au fur et à mesure des essais, en y ajoutant des ajustements en se basant sur l'expérience acquise. L'objectif de cette partie est de présenter le protocole final en détaillant l'intérêt des étapes clés. Le but est aussi de donner les informations pour que la démarche suivie puisse être reproduite, et de montrer qu'elle permet d'obtenir des résultats fiables et exploitables. Et un dernier point crucial du protocole est qu'il doit permettre de reproduire aussi fidèlement que possible les conditions du HSBF.

La première étape du protocole est de procéder aux essais de calibration (calibration de l'effort tangentiel et de l'effort normal, selon les routines définies dans le chapitre 3 sur la calibration). Ceux-ci doivent être faits au début de chaque journée d'essais au moins pour les premiers mois d'utilisation du banc, et lorsque plus d'expérience aura été accumulée avec le banc d'essai leur fréquence pourra être réétudiée.

Une fois la température stabilisée la pastille peut être abaissée sur le chariot pendant quelques minutes afin de l'amener à température. Il faut être prudent à juste déposer la pastille sur la surface, mais sans exercer de pression comme présenté sur le schéma 4.5 de manière à limiter la transmission de chaleur vers le reste du système de pression. Cinq minutes suffisent pour le chauffage de la pastille, mais pour plus de sécurité sa température peut être contrôlée avec la sonde manuelle. La porte peut être rouverte (pour ce faire il faut entrer un mot de passe sur le logiciel, communiqué uniquement aux opérateurs formés à l'utilisation de la machine) afin de mettre en place l'échantillon. Celui-ci n'est introduit qu'à ce moment du protocole, car le lubrifiant peut se dégrader rapidement à haute température. De plus cela permet de se

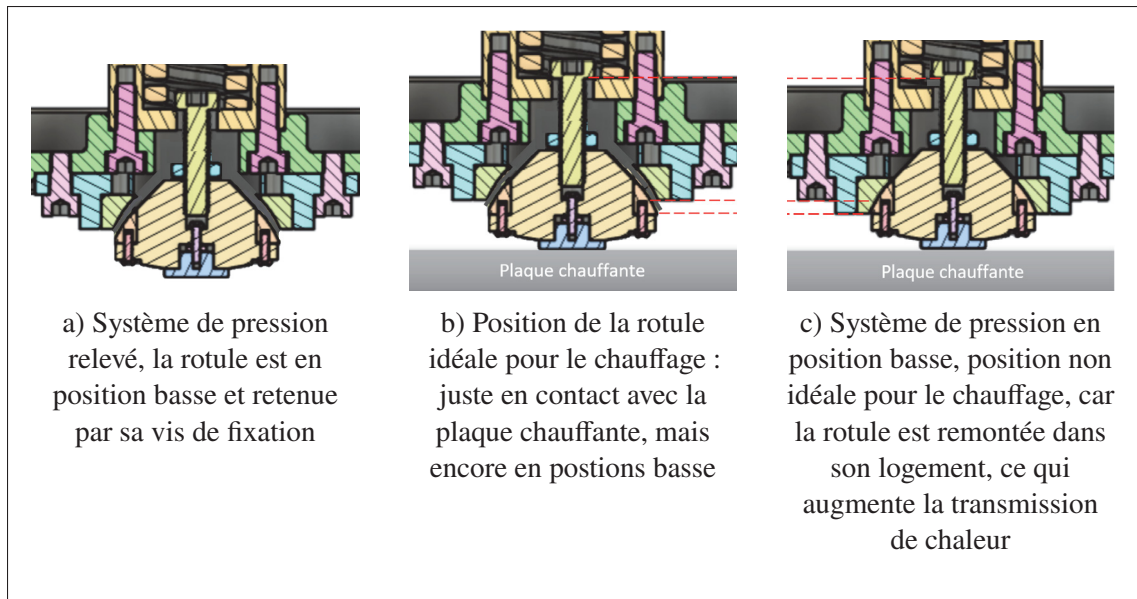


Figure 4.5 Guide pour le positionnement de la rotule pour le chauffage

rapprocher des conditions du HSBF où le temps de chauffage d'une pièce est de l'ordre de quelques minutes. Il faut donc être particulièrement prudent pour cette étape qui est réalisée en forte proximité d'éléments à haute température. Les équipements de protection individuelle et en particulier les gants sont primordiaux. Les étapes à suivre sont les suivantes :

1. Démarrer l'enregistrement en s'assurant d'avoir sélectionné la sauvegarde de tous les paramètres importants.
2. S'assurer que le système de pression est relevé au maximum pour laisser le passage aux outils.
3. Placer le chariot au centre en utilisant l'onglet *position* du logiciel de la machine.
4. Placer les vis et rondelles dans les trous aux extrémités de l'échantillon. S'assurer que les vis choisies sont du M8 d'au moins 10 mm de longueur et à tête hexagonale (les autres types de vis comme têtes cylindriques hexagonales creuses (CHC) ont une tête trop haute qui risquerait de percuter le système de pression lors du déplacement du chariot).
5. Le déposer à l'aide de pinces sur la plaque chauffante en positionnant les deux vis dans les trous de fixation de la plaque.

6. Attendre quelques secondes que l'échantillon monte en température de manière à ce qu'il se dilate avant d'être vissé.
7. Utiliser une clé à cliquet, la positionner sur les têtes de vis en la tenant avec la main droite pour le côté droit et inversement. De l'autre main, utiliser la pince pour tenir la douille. L'objectif de la manipulation est de retenir la douille quand la clé est tournée en sens inverse du vissage, sans quoi la douille tournerait librement dans les deux sens. La clé peut donc être tournée, en la faisant pivoter dans la zone à droite du chariot pour la vis droite. Avant de terminer le serrage, changer de côté afin que les deux vis soient engagées dans le filetage pour le serrage final. La clé à cliquet et la pince doivent ensuite être déposées dans un endroit sécuritaire, car elles peuvent être chaudes.
8. Abaisser le système de pression de manière à légèrement déposer la pastille sur l'échantillon pour le faire chauffer de la même manière que décrit précédemment (la pastille s'est refroidi pendant le montage de l'échantillon), puis attendre quelques minutes.
9. Relever légèrement le système de pression, puis déplacer le chariot en butée gauche puis droite à 10 mm/s. À la fin du déplacement, faire la MAZ des deux efforts tangentiel et normal.
10. Abaisser le système de pression proche de la surface. Si la pastille n'est pas de révolution cylindrique, la tourner dans la bonne direction. Elle pivote librement, une légère poussée à l'aide d'une longue tige permet facilement de la mettre en position.
11. Abaisser totalement le système de pression puis exercer la pression à l'aide du second volant. Celle-ci peut être suivie grâce à l'afficheur sur le panneau principal du logiciel.
12. Refermer la porte.
13. Enclencher le déplacement du chariot à la vitesse choisie.
14. Réaliser le nombre de trajets nécessaires en surveillant l'apparition du galing et l'augmentation du COF. Si ce dernier devient supérieur à 1,5 stopper l'essai (une sécurité devrait dans ce cas déjà avoir stoppé le déplacement).
15. Une fois l'essai terminé, ouvrir la porte, puis relever au maximum le système de pression de manière à limiter son échauffement.

16. Si d'autres essais doivent être réalisés, l'échantillon peut être retiré en suivant la même procédure que pour son montage.

Ce protocole a permis d'obtenir des résultats répétables et d'éliminer un maximum de sources d'erreur en comparaison aux essais qui étaient faits avant sans suivre ce protocole.

Le plan d'expérience et le protocole sont donc maintenant définis, l'étape suivante est de réaliser les essais.

4.2 Résultats des essais

La table de valeur contenant les résultats du plan d'expérience est visible en annexe I-2. Elle pourra être utilisée par Verbom, notre objectif n'est pas de voir comment elle est concrètement intégrée aux simulations et utilisée par Verbom, mais simplement de la constituer, d'autres projets pourront par la suite se consacrer à son intégration. Nous allons dans un premier temps observer les variations du COF en fonction des variables du plan d'expérience, puis dans un second temps les autres aspects comme le galing, l'arrachement du lubrifiant et l'influence de paramètres comme la géométrie de la pastille.

4.2.1 Influence des variables étudiées sur le COF

Le COF est mesuré grâce à l'application Matlab présentée dans la partie 2.3.9. On peut observer sur la figure 4.6 les courbes d'effort et de COF au cours du déplacement du chariot qu'affiche le programme. Mais ces données sont difficilement utilisables en l'état, pour pouvoir comparer les essais entre eux le COF moyen au cours de l'essai est calculé, et c'est cette valeur qui est utilisée pour analyser les données. De plus, comme on peut le voir sur le graphe pour certains essais le COF reste quasiment constant et sa valeur moyenne est représentative de sa valeur tout au long du déplacement. En revanche sur un essai comme celui de la figure 4.7 on peut observer que le COF varie grandement au cours du déplacement. Afin de pouvoir visualiser cette variabilité dans les données analysées, l'écart type de la mesure est calculé pour chaque trajet et est affiché sur les graphes en tant que barre d'erreur. Ainsi en plus de connaître la valeur moyenne du COF

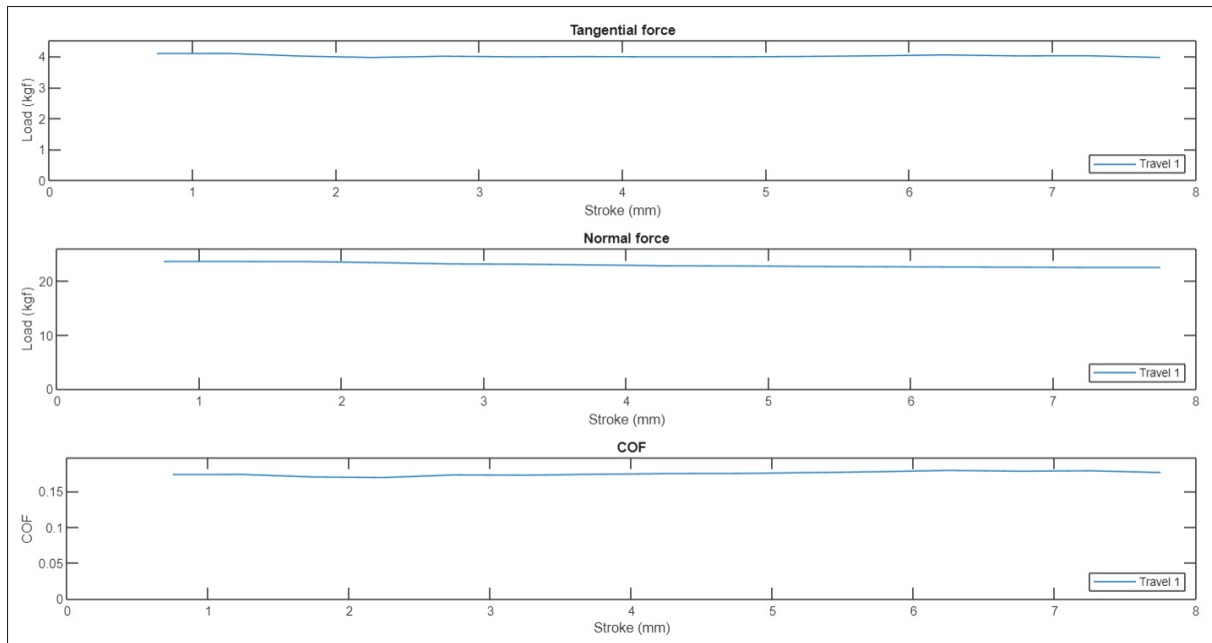


Figure 4.6 COF affiché par l'application Matlab, cas d'un essai où le COF reste stable au cours du déplacement

cela indique s'il a fluctué au cours du déplacement, ce qui permet en seulement deux valeurs d'avoir une bonne représentation de l'essai.

Afin de présenter l'influence des paramètres sur le COF de la manière la plus claire possible, les résultats ont été affichés par variable. Dans chacune des sous-sections suivantes, l'influence d'une variable est analysée.

4.2.1.1 Influence de la pression

Comme expliqué précédemment dans la partie 4.1.1.2 l'influence de la pression a surtout pu être étudiée à température ambiante. Le graphe 4.8 présente la mesure de la pression pour différents essais réalisés à 25°C à différentes vitesses. On peut observer que les mesures sont assez proches, lorsque la pression augmente le COF varie de moins de 0,015, ce qui est contenu dans l'intervalle des barres d'erreur. La pression ne semble donc pas avoir d'impact mesurable

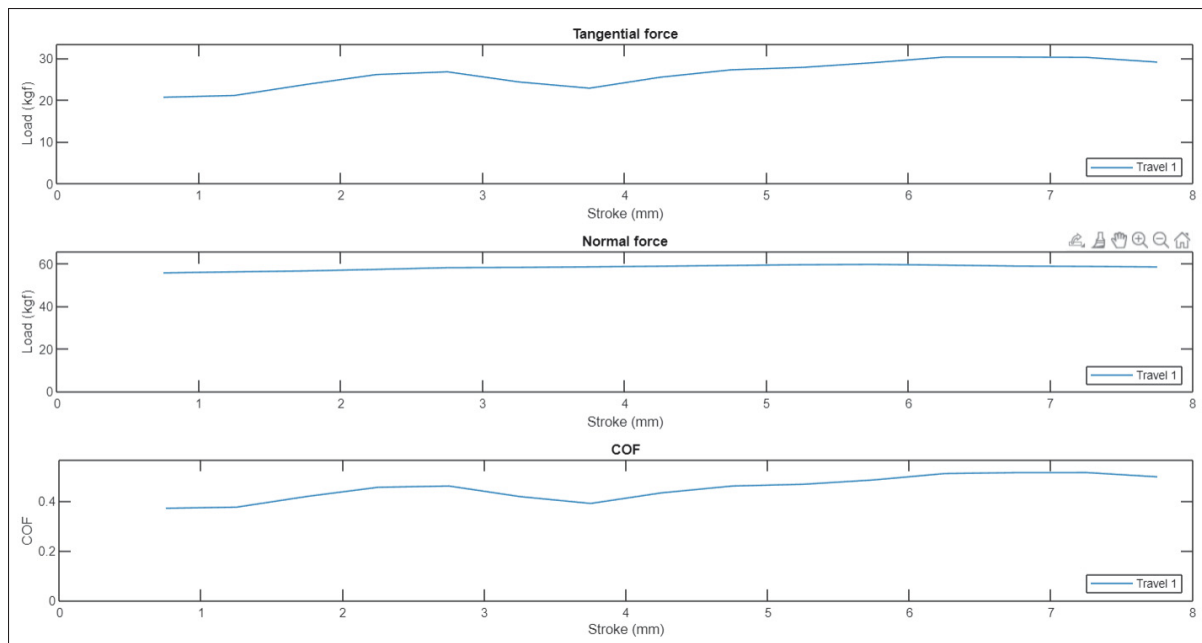


Figure 4.7 COF affiché par l'application Matlab, cas d'un essai où le COF fluctue beaucoup au cours du déplacement

sur le COF à 25°C tant que l'on reste à des pressions suffisamment faibles pour ne pas générer de galling.

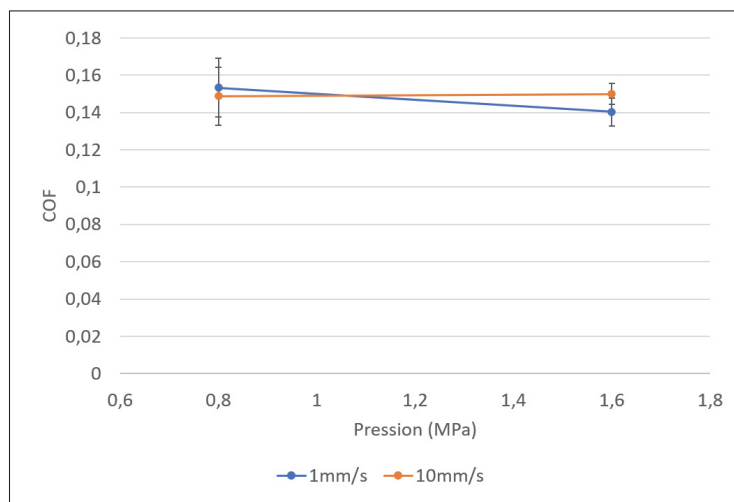


Figure 4.8 COF en fonction de la pression et de la vitesse à 25°C. Distance de glissement : 26mm ; pastille : rectangulaire

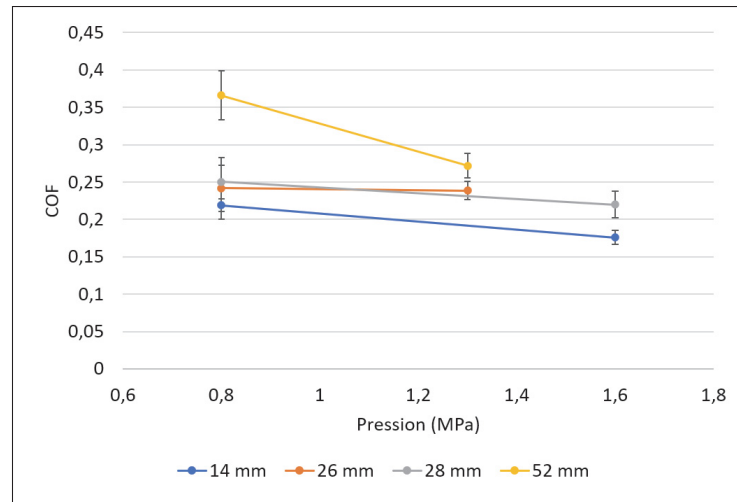


Figure 4.9 COF en fonction de la pression et de la distance de glissement à 470°C. Vitesse : 1mm/s ; pastille rectangulaire (pour les distances de glissement de 26 et 52 mm) et circulaire (pour les distances de glissement de 14 et 52 mm)

En revanche à plus haute température on peut observer sur la figure 4.9 que le COF diminue lorsque la pression augmente, et ce pour toutes les distances de glissement, ce qui tend donc à rendre ce résultat plus significatif. En revanche il n'y a pas de corrélation visible entre la distance de glissement et la diminution du COF avec la pression, la diminution est d'environ 0,05 pour 14 mm et 28 mm, quasi nulle pour 26 mm et de presque 0,1 pour 52 mm.

4.2.1.2 Influence de la distance de glissement

La distance de glissement semble avoir un impact beaucoup plus significatif sur le COF. On peut observer sur la figure 4.10 un essai de frottement avec une pastille circulaire. Ce type d'outil a été utilisé au lieu d'une pastille rectangulaire afin de pouvoir faire un grand nombre de trajets tout en ne prenant pas le risque que le galing endommage une pastille rectangulaire. Ainsi 4 trajets ont été effectués, pour une distance de glissement allant de 14 à 56 mm. On observe au cours de ces trajets une nette augmentation du COF, et en particulier pour le dernier

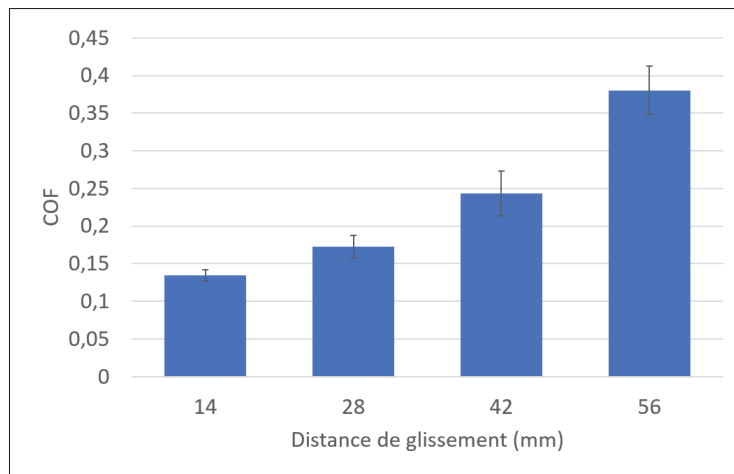


Figure 4.10 COF en fonction de la distance de glissement. Pastille : circulaire ; vitesse : 5mm/s ; pression : 1,6 MPa ; température : 25°C

trajet où l'augmentation est plus importante qu'entre les trajets précédents. Cela est lié avec l'observation de galing, léger au 3^e trajet et beaucoup plus prononcé au 4^e.

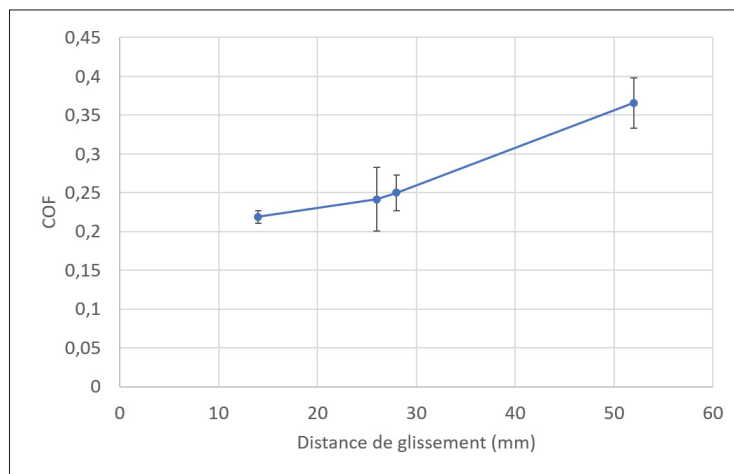


Figure 4.11 COF en fonction de la distance de glissement à 470 °C. Pastille : rectangulaire et circulaire ; vitesse : 1 mm/s ; pression : 0,8 MPa

Le même phénomène est observable à plus haute température sur les figures 4.11 et 4.12, on observe une forte augmentation du COF avec la distance de glissement. On peut aussi observer à toutes les températures que l'écart type d'une mesure, représentée par les barres d'erreur sur

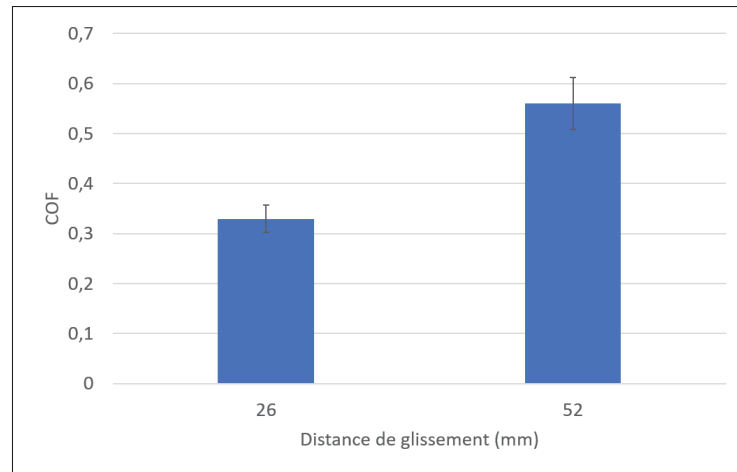


Figure 4.12 COF en fonction de la distance de glissement à 500°C. Pastille : rectangulaire ; vitesse : 10 mm/s ; pression : 0,8 MPa

les figures, augmente avec la distance de glissement. Cela signifie que lorsque la distance de glissement augmente le COF fluctue plus au cours d'un essai, que ce soient des fluctuations alternatives ou une augmentation progressive au cours de l'essai. En général on remarque que les deux sont liés, quand des fluctuations de COF apparaissent il a tendance à augmenter progressivement au cours du trajet. Cela est particulièrement visible sur la comparaison entre deux trajets de la figure 4.13. Cet essai n'est pas compté parmi ceux des analyses, car il a été réalisé avec une pastille endommagée, ce qui a entraîné une forte apparition de galing dès le deuxième trajet. Mais cela permet de montrer le lien entre galing et fluctuation du COF.

Les observations montrent donc que quand la distance de glissement augmente le COF augmente et la probabilité d'apparition du galing est plus élevée.

4.2.1.3 Influence de la vitesse de glissement sur le COF

La figure 4.14 présente la mesure du COF à différentes vitesses de glissement à température ambiante et à une pression de 0,8 MPa. On peut observer que le COF reste à une valeur proche de 0,15 quelle que soit la vitesse de glissement testée. On ne peut donc pas remarquer d'influence significative de la vitesse sur le COF à 25°C.

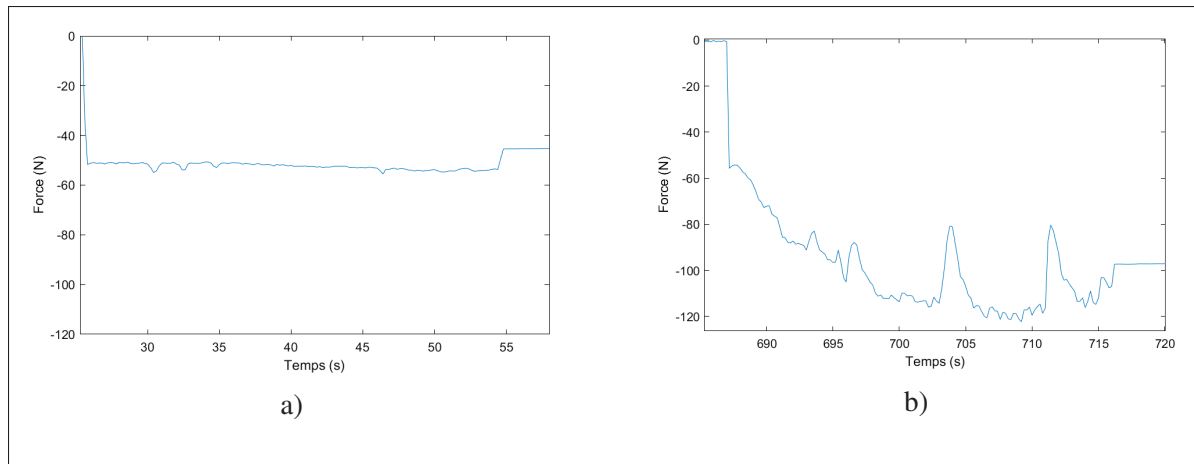


Figure 4.13 Comparaison entre deux trajets d'un même essai (Pastille : rectangulaire endommagé ; vitesse : 3 mm/s ; température : 25°C ; pression : 0,8 MPa) avec pour a) une distance de glissement de 26 mm et pour b) une distance de glissement de 52 mm

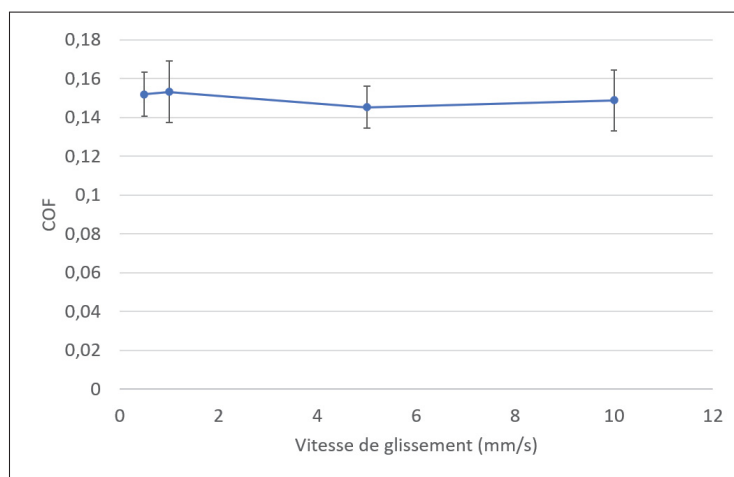


Figure 4.14 COF en fonction de la vitesse de glissement à 25°C. Pastille : rectangulaire ; distance de glissement : 26 mm ; pression : 0,8 MPa

En revanche, à des températures plus élevées comme sur les figures 4.15 et 4.16 on observe que la vitesse a un impact significatif sur le COF : plus la vitesse augmente plus le COF augmente. Dans le cas à 500°C plusieurs vitesses de glissement ont été affichées, car pour celle de 26 mm on observe que le COF diminue d'abord puis augmente de nouveau. La seconde distance

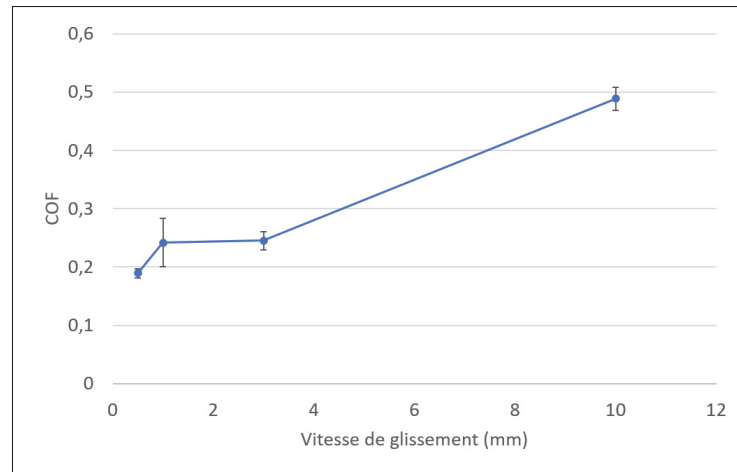


Figure 4.15 COF en fonction de la vitesse de glissement à 470°C. Pastille : rectangulaire ; distance de glissement : 26 mm ; pression : 0,8 MPa

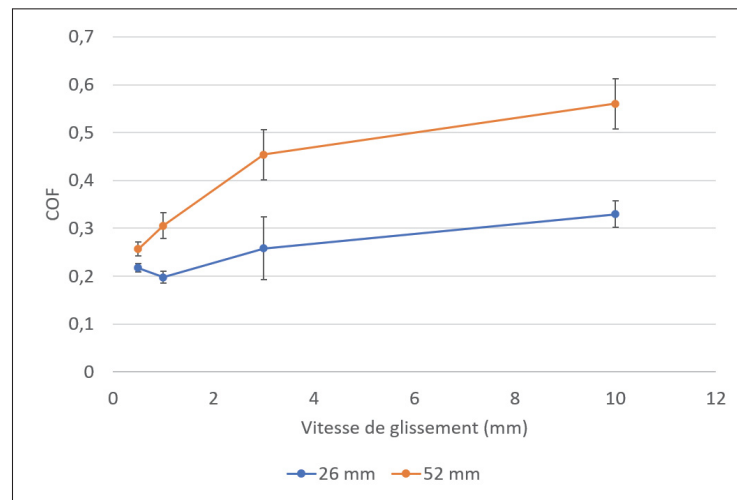


Figure 4.16 COF en fonction de la vitesse de glissement à 500°C et de la distance de glissement. Pastille : rectangulaire ; pression : 0,8 MPa

permet donc de voir que le COF augmente bien avec la vitesse, et que dans le cas de 26 mm il s'agit probablement d'une erreur de mesure causée par une usure trop importante de la pastille lors de la mesure à 0,5 mm/s, rendant cette dernière plus élevée qu'elle ne devrait l'être (les incertitudes de mesures et sources d'erreur seront détaillées dans la partie 4.4).

4.2.1.4 Influence de la température

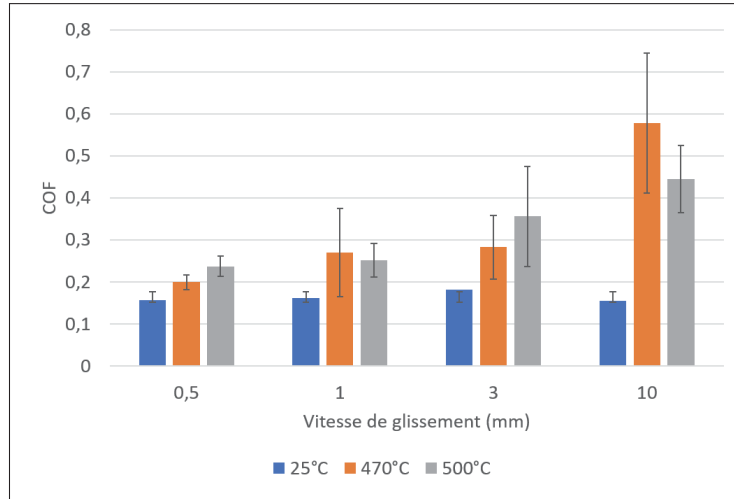


Figure 4.17 COF en fonction de la vitesse et de la température. Pastille : rectangulaire ; distance de glissement : 26 mm ; pression : 0,8 MPa

La température est un critère plus complexe à évaluer. Entre 25°C et 470°C on peut observer une corrélation claire entre l'augmentation de la température et l'augmentation du COF (figure 4.17), mais entre 470°C et 500°C il n'y a pas de corrélation apparente. Selon les essais il semble soit qu'il augmente, soit qu'il diminue entre ces deux valeurs, comme on peut le voir sur la figure 4.17. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer un tel comportement, la plus simple étant que ces variations sont dues à des erreurs de mesure. En effet les essais à haute température endommagent très rapidement les pastilles, et une pastille endommagée favorise grandement l'apparition du galling qui entraîne une augmentation du COF. Pour un résultat valide et répétable la pastille ne doit pas être endommagée au début de l'essai. Il peut donc y avoir des cas où le COF est plus élevé qu'il ne devrait l'être à cause de ce phénomène. Une seconde hypothèse est que dans ces conditions le COF ne varie pas de manière linéaire avec la vitesse et de la température. Il faudrait donc, pour pouvoir conclure sur ces résultats, réaliser dans une future étude de nouveaux essais avec des pastilles neuves afin de vérifier si l'on obtient des résultats similaires, et si c'est le cas il serait intéressant d'ajouter des vitesses et des températures intermédiaires pour observer plus finement les corrélations entre le COF et ces deux paramètres.

4.2.2 Influence des conditions et du protocole sur les essais

Nous avons maintenant observé les variations du COF selon chacune des variables mesurées par la machine. Mais les variations du COF ne sont pas les seules observations que l'on peut faire sur ces essais. On peut tout d'abord remarquer que le galing est influencé par plusieurs paramètres. En premier la température, qui favorise grandement l'apparition du galing, comme on peut le voir sur les figures en annexes, I-4 et I-5 pour la grande majorité des essais réalisés à haute température le lubrifiant a été arraché. Mais la pression est aussi un facteur important pour l'apparition du galing, elle accélère grandement son apparition comme on peut le voir sur ces mêmes figures en annexes, on observe que lorsque la pression est plus élevée on remarque en général des traces d'arrachement du lubrifiant plus importantes.

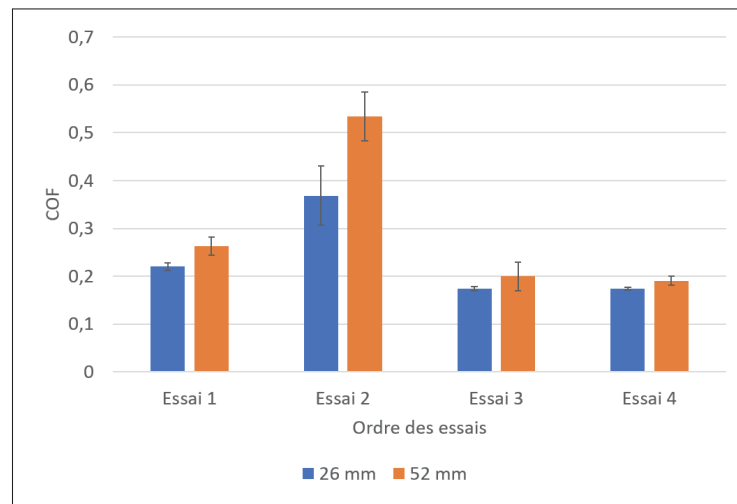


Figure 4.18 Influence de l'usure de la pastille sur le COF

Un autre phénomène qui facilite l'apparition de galing est l'usure de la pastille. Afin d'avoir une idée de l'influence de l'usure, une pastille très endommagée a été utilisée pour des essais dans des conditions où le galing ne devrait pas apparaître. Or un galing important a tout de même été noté. La pastille a ensuite été polie manuellement (pas selon le procédé de Verbom, cela a donc été réalisé sur une pastille endommagée et donc qui ne pouvait plus servir, car une fois repolie elle modifie les conditions expérimentales et ne peut pas être utilisée pour les essais

de Verbom) puis de nouveaux essais ont été réalisés. Les résultats sont montrés sur la figure 4.18. L'essai 1 a été fait avec une pastille modérément usée, l'essai 2 avec une pastille très usée. Celle-ci a ensuite été polie, puis les essais 3 et 4 ont été réalisés, on remarque que pour ces deux derniers les résultats sont très proches. La raison d'une telle différence avec l'usure de la pastille est que les défauts géométriques entraînent à la fois une augmentation locale de la pression et une géométrie potentiellement plus agressive pour le lubrifiant, c'est-à-dire que 2mm l'aspérité pourrait présenter un angle vif qui arrache facilement le BN. Ce phénomène est probablement augmenté par le fait que dans le banc d'essai l'échantillon est plaqué contre la pastille, qui représente la matrice du HSBF, par la surface rigide du chariot. Alors que dans le procédé l'aluminium est plaqué contre la matrice par une pression qui exerce une force homogène sur la pièce, quelle que soit la géométrie du moule. Pour s'assurer d'avoir des conditions d'essais qui reproduisent le HSBF, il faut donc que la pastille et la surface du banc soient exemptes de tout défaut géométrique qui pourrait engendrer une augmentation locale de la pression.

4.3 Conclusion et récapitulatif des résultats

On peut déduire de tous les résultats plusieurs éléments :

- l'usure de la matrice dans le procédé est à surveiller, car un mauvais état de surface augmente fortement le galing et le COF.
- l'augmentation de la pression à haute température semble faire diminuer le COF, à l'opposé de ce qui se produit à 25°C où le COF semble indépendant de la pression. Cela peut être dû au fait que la résistance au cisaillement du BN est peu liée à l'effort normal, ainsi l'effort tangentiel resterait constant lorsque l'effort normal augmente, résultant en un COF plus faible. Mais cette hypothèse n'est qu'une théorie qu'il faudrait vérifier.
- entre 25 et 470°C la température augmente le COF. La littérature tire les mêmes conclusions, certaines études ont montré que le lubrifiant à haute température se dégrade et perd de ses propriétés de lubrification (Ghiotti *et al.*, 2019). Cependant dans l'intervalle de 470°C à 500 °C il est difficile d'interpréter les variations du COF le plus instinctif serait que le COF continue d'augmenter avec la température, ce qui pousserait à penser que les essais où le

COF a diminué avec la température sont des erreurs de mesure, mais de nouveaux essais devraient être menés pour pouvoir conclure définitivement.

- la vitesse de glissement ne semble pas avoir d'influence sur le COF à température ambiante. En revanche à haute température le COF semble augmenter avec la vitesse. Ainsi il serait préférable de limiter au maximum les vitesses de glissement pour les procédés de SPF.
- la distance de glissement a un fort impact sur le COF, plus elle est grande, plus le COF augmente, quelle que soit la température. Il apparaît donc judicieux de limiter au maximum la distance de glissement pour la mise en forme superplastique.

4.4 Incertitudes et sources d'erreur

Comme évoqué dans les sections précédentes le facteur principal d'incertitude dans les résultats est l'usure de la pastille. Lors des essais l'endommagement de la pastille se faisait rapidement, après seulement deux ou trois allers-retours avec galing léger. On peut observer sur la figure 4.19 une photographie des pastilles à la fin des essais qui montre leur usure, que l'on peut comparer à la figure 4.4 qui montre les pastilles telles que reçues. Il apparaît donc qu'un plus grand nombre de pastilles est nécessaire, ou alors il faut établir un procédé de polissage des pastilles ayant subi du galing.

Une autre source potentielle d'erreur par rapport aux pastilles est leur planéité. En effet les pastilles ont été polies à la main, et il serait donc possible que cela ait induit des défauts. Or si par exemple elles sont bombées en leur centre la surface de contact va être réduite, et la pression réelle va être supérieure à celle que l'on pense appliquer. C'est un point qu'il serait intéressant de contrôler pour de futures études, par exemple en observant la surface au microscope confocal. S'il s'avère que c'est bien le cas la solution serait de trouver une méthode de polissage qui assure la planéité de la surface en plus de la faible rugosité, par exemple en utilisant une rectifieuse.

L'effort normal est aussi une source d'imprécision dans les mesures. Comme expliquée dans le chapitre sur la calibration il n'est pas parfaitement constant, et en particulier lors des mesures



Figure 4.19 Photographie des pastilles
après les essais

à haute température. Il peut fluctuer jusqu'à 50% de sa valeur cible dans certains cas , et étant donné que la pression peut avoir un impact significatif cela joue sur les résultats. Pour les analyses seule la valeur moyenne de la pression au cours de l'essai a été considérée, mais dans la réalité celle-ci peut avoir varié. C'est donc un point à améliorer pour la suite des essais sur le banc, il faudra trouver la source de ces variations et l'éliminer.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Rappel du contexte

La réduction du poids des véhicules automobiles pousse au développement de nouvelles techniques de mise en forme, permettant de fabriquer des pièces toujours plus légères et aux géométries plus complexes. C'est dans ce cadre qu'a été créé le HSBF, un procédé de mise en forme à chaud de l'aluminium combinant la déformation superplastique et le matriçage qui permet d'obtenir de grands taux de déformation, bien supérieurs au matriçage, tout en ayant une vitesse de formage élevée, meilleure que celle du SPF classique. Cependant ce procédé est encore récent et n'est pas encore totalement optimisé, lors de la mise en forme des pièces des défauts peuvent apparaître. Pourtant l'entreprise qui développe le procédé, Verbom, utilise des simulations par éléments finis qui devraient permettre d'anticiper l'apparition de ces défauts, mais ce n'est pas le cas et un décalage est observé entre la simulation et le réel. Ces simulations utilisent pour modéliser le frottement au cours du procédé un COF constant, et c'est un point qui a été identifié comme étant une source d'erreur. En effet des études ont été réalisées sur ces conditions de frottement et toutes montrent que le COF n'est pas constant, mais dépend de plusieurs variables (Ghiotti *et al.* (2019); Shi *et al.* (2017); Tomala *et al.* (2014) entre autres). Quatre variables en particulier ont été isolées, la température, la pression de contact, la distance de glissement et la vitesse de glissement. L'objectif de cette étude a donc été de mesurer le COF en fonction de chacune de ces variables de manière à fournir à Verbom une table de valeurs du COF en fonction de chacune de ces variables, qui pourra ensuite être intégrée aux simulations par éléments finis du procédé et améliorer leur précision. La première étape pour réaliser ces mesures a donc été de chercher un instrument capable de les faire, et il s'est avéré qu'un tel appareil n'existe pas, ni dans le commerce ni dans la littérature. En effet nos mesures possèdent une spécificité, le lubrifiant est appliqué en gouttelettes réparties sur la surface et non pas en une couche homogène. Il faut donc utiliser une surface de contact qui soit suffisamment grande

pour homogénéiser le contact sur ces gouttelettes comme c'est le cas dans le HSBF. Un banc d'essai a donc été conçu afin de pouvoir réaliser les mesures, ce qui a représenté une grosse portion de ce projet. L'appareil a été conçu, calibré et testé, et est ainsi une des seules machines capables de mesurer qualitativement le COF à haute température pour un contact surfacique, et de réaliser des essais en fonction des 4 variables citées précédemment. Une fois la fabrication terminée, des essais ont pu être réalisés, et ont permis, en plus de remplir la table de valeurs pour Verbom, d'apporter des données à un certain nombre de lacunes de la littérature. En particulier cette dernière ne traite pas des vitesses en dessous de 10mm/s ni des températures au-dessus de 450°C, nos mesures sont donc les premières à apporter des informations sur le COF dans ces conditions pour un contact acier aluminium avec lubrification solide. La distance de glissement est aussi un point peu exploré, plusieurs études étudient uniquement l'influence de la course. Ces points, plus d'autres, ont été analysés à partir des essais, et ont permis de tirer plusieurs conclusions, qui sont résumées dans la section suivante.

Analyse des résultats

Les mesures ont permis de tirer plusieurs conclusions sur le COF et les phénomènes tribologiques que l'on observe dans le HSBF :

- à 25°C la pression et la température n'ont pas d'influence significative mesurable sur le COF.
- à haute température, le COF semble augmenter quand la vitesse de glissement augmente pour les vitesses testées, entre 0,5 et 10 mm/s.
- la distance de glissement a un fort impact sur le COF, quelle que soit la température, plus elle augmente et plus le COF augmente. Elle a aussi un impact sur le galling, une distance de glissement élevée augmente fortement sa probabilité d'apparition.
- le COF semble diminuer lorsque la pression augmente à haute température, ce qui se retrouve dans d'autres études (Ghiotti *et al.* (2017); Medea, Ghiotti, S. & M. (2016) par exemple).

C'est tout de même un point qui reste à valider, car les valeurs de pression mesurées lors des essais sont sujettes à une certaine incertitude du fait du manque de planéité des pastilles.

- la planéité des pastilles semble être un élément qui a une grande importance pour que la pression soit homogène au niveau du contact, les pastilles ne peuvent donc pas être polies à la main.

Recommandations

Ces essais sont les premiers réalisés sur la machine, et bien qu'ils permettent déjà d'apporter de nombreuses connaissances sur le COF il y a tout de même plusieurs points qui peuvent être améliorés. En particulier le contrôle de l'usure pastilles, et pour cela une solution serait de n'utiliser une pastille que pour un essai, ou au minimum de changer de pastille dès que du galling est observé. Cela demanderait un grand nombre de pastilles, il pourrait donc être utile de chercher une méthode pour polir de nouveau leur surface sans modifier le congé d'attaque. Un second point par rapport aux pastilles est qu'elles ont été polies à la main, et il serait possible que cela ait induit des défauts de planéité. Il serait intéressant de mesurer cela pour de futures études, par exemple en observant la surface au microscope confocal. S'il s'avère qu'il y a effectivement un défaut la solution serait de trouver une méthode de polissage qui assure la planéité de la surface en plus de la faible rugosité, par exemple en utilisant une rectifieuse (machine qui permet d'obtenir des surfaces d'une grande qualité en termes de planéité et de rugosité LIÉTARD (1975)). Le procédé de polissage ne serait alors plus identique à celui de la matrice du HSBF, l'impact de cette différence serait donc à caractériser.

Un autre élément qu'il pourrait être intéressant de contrôler est le vieillissement du lubrifiant au cours du temps, à la fois à température ambiante et à haute température, pour voir si ses propriétés pourraient varier et ajouter de l'imprécision aux essais. À température ambiante il serait possible que le lubrifiant absorbe l'humidité ou se dégrade naturellement au cours du temps (l'article Chen *et al.* (2018) montre que l'humidité peut jouer un rôle important dans les

performances des lubrifiants), des essais pourraient être faits pour vérifier avec des échantillons datés différemment pour vérifier ce point. Et à haute température, il est possible que le lubrifiant se dégrade rapidement, par exemple avec l'évaporation de l'humidité qu'il contient (Chen *et al.*, 2018). Or pour le HSBF le chauffage de l'aluminium se fait en 2 à 3 minutes, alors que pour les essais sur le banc la méthode choisie était de laisser l'échantillon chauffer une dizaine de minutes, afin de s'assurer de l'homogénéité des températures. Chronométrer le temps de chauffe de l'échantillon et mesurer l'impact de ses variations pourraient donc être deux études intéressantes pour s'assurer de la précision des résultats pour de prochains essais tout en fournissant de précieuses informations à Verbom sur l'impact de la durée de chauffage sur les performances du lubrifiant. Pour un temps de chauffe rapide de l'échantillon, il faut que le chauffage soit capable de s'adapter rapidement à la baisse de température engendrée par l'ajout de l'échantillon sur la plaque chauffante. Or actuellement le réglage du système de contrôle du chauffage génère des oscillations de température lorsqu'il rencontre des perturbations (comme l'ajout de l'échantillon) qui pourraient peut-être être diminuées par une optimisation des paramètres du PID (le réglage du PID est un des points qui ont causé de grandes difficultés lors du réglage de la machine et il a nécessité de nombreuses heures de travail, il est maintenant fonctionnel mais doit probablement pouvoir être encore optimisé). Un second aspect du chauffage qui pourrait permettre un gain de précision est la méthode de mesure de la température en surface de l'échantillon : le signal du thermocouple sonde qui sert à mesurer directement la température en surface est bruité à cause d'interférences électromagnétiques, ce qui peut nuire à l'incertitude de la mesure. Une meilleure précision de cette grandeur permettrait de caractériser plus finement l'impact de la température sur le COF à haute température.

Poursuite du projet

Les essais ont permis d'apporter de nombreuses connaissances sur les frottements à haute température dans le cadre du SPF grâce à ce nouveau banc. Sa capacité à mesurer une grandeur

qui n'était pas mesurable dans ces conditions au préalable permet d'ouvrir de nombreuses pistes de recherches. La suite de cette partie présente celles qui sont les plus pertinentes pour la poursuite du projet, mais de nombreuses autres études pourraient être envisagées dans des domaines beaucoup plus variées, avec d'autres matériaux et pour traiter d'autres procédés.

Une première piste serait d'étudier l'influence d'autres paramètres que les quatre variables de notre étude, comme les paramètres de lubrification : la recette de lubrifiant, l'impact de sa méthode d'application ou du taux et épaisseur de recouvrement par exemple. Le rôle de la pastille pourrait aussi être examiné plus en détail, afin de vérifier si sa géométrie a un impact sur les essais, en faisant varier le congé d'attaque, la direction de polissage, le procédé utilisé (manuel, rectifieuse ...), ou le matériau.

La direction de laminage des pièces d'aluminium est aussi un paramètre qui pourrait avoir un impact et qui n'a pas du tout été étudié pour le SPF.

Des essais pourraient être menés pour compléter les mesures faites à 470°C et 500°C afin de vérifier qu'il n'y a pas de mesure faussée (en particulier pour l'impact de la température en fonction de la vitesse de glissement, où un comportement peu intuitif a été observé 4.2.1.4). Un second point intéressant sur ce propos serait d'affiner les mesures en ajoutant plus de niveaux, ce qui pourrait permettre de trouver une température idéale pour le HSBF où le COF est minimal entre 470 et 500°C.

Un autre aspect de l'étude du frottement qui serait à approfondir est le galing, en caractérisant précisément les conditions qui le génèrent pour pouvoir les éviter dans le procédé en menant une étude ciblée sur ce point plutôt que sur le COF. Pour mesurer précisément s'il y a du galing ou non il serait possible d'ajouter un système de mesure de la résistance du courant au niveau du contact entre la pastille et l'échantillon qui indiquerait directement l'apparition du galing de la même manière que cela était fait dans l'étude de Hanna (2009).

L'intégration de la table de valeur dans une simulation est aussi un élément du projet qui peut être poursuivie. Il faut faire pour cela en sorte que le logiciel soit capable d'appliquer un COF en fonction de plusieurs paramètres, puis vérifier que ces résultats permettent effectivement d'améliorer la précision de la simulation. Si c'est bien le cas, les données pourraient alors être complétées avec d'autres couples de matériaux et lubrifiants, et permettre d'accélérer grandement le développement de nouvelles lignes de procédés de SPF.

ANNEXE I

DONNÉES COMPLÉMENTAIRES

1. Interface Matlab pour la calibration de l'effort tangentiel

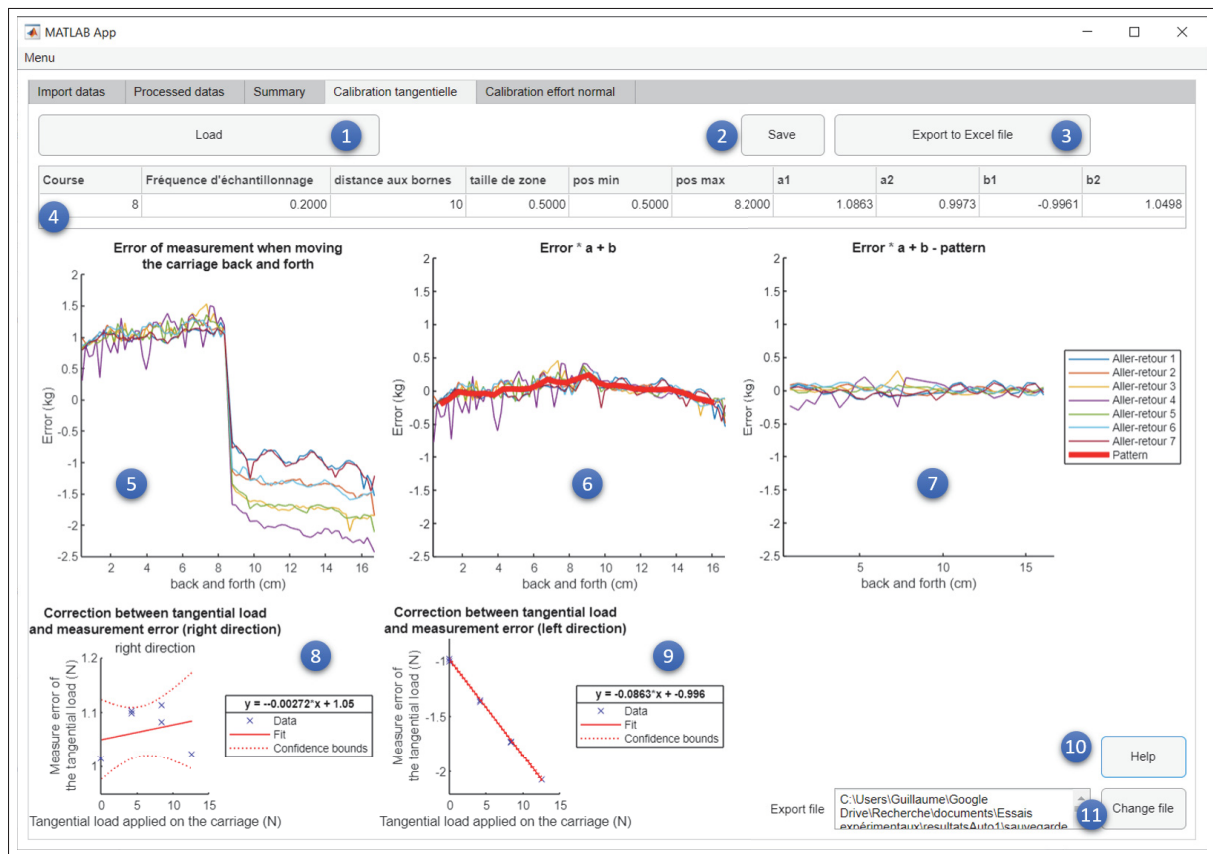


Figure-A I-1 Panneau principal du module de traitement des essais de calibration de l'application Matlab d'analyse des résultats du banc d'essai

Le panneau (figure I-1) est divisé en plusieurs sections, en haut sous les onglets de sélection des modules sont localisés les boutons des contrôles principaux. Ils permettent de charger le fichier d'un essai de calibration (n°1), de sauvegarder les données traitées dans un fichier texte (n°2) qui est chargé dans le module de traitement des meures, et enfin d'un bouton d'exportation vers un fichier Excel (n°3) qui permet de consigner tous les essais de calibration et de suivre l'évolution des paramètres de correction au cours du temps. Ensuite en dessous un tableau

présente les paramètres de la calibration (n°4), puis au centre du panneau on peut observer les 3 graphes principaux qui permettent de retracer le processus suivi lors de la calibration :

- le premier graphe sur la gauche (n°5) présente les erreurs brutes pour chaque déplacement du chariot, dans une direction (vers la gauche) pour les abscisses allant de 0 à 8 cm, puis dans l'autre sens (vers la droite) pour les abscisses de 8 à 16 cm.
- le second graphe au centre (n°6) représente l'erreur après que le premier traitement de décorrélation lui ait été appliqué. On peut aussi observer le motif de l'erreur moyenne tracé en trait rouge épais. Ce motif est celui qui sera sauvegardé et qui est retiré des mesures pour le graphe suivant.
- le dernier graphe sur la droite (n°7) montre le résultat final, c'est-à-dire l'erreur de mesure lors de l'essai de calibration tangentielle chargé une fois les traitements des données appliqués.

Ces graphes permettent de contrôler chaque étape du processus et de localiser rapidement une quelconque erreur dans les données. De plus les échelles entre les graphes sont identiques ce qui permet de comparer facilement les données et de constater de manière intuitive la réduction de l'erreur initiale et la suppression des motifs d'erreur systématique. Sous ces graphes deux plus petits graphes (n°8 et n°9) permettent de montrer la corrélation entre l'erreur de mesure et la charge tangentielle appliquée. On peut d'ailleurs constater que comme décrit plus haut seul une des directions est corrélée avec la charge tangentielle. L'équation avec les coefficients de corrections appliqués est aussi indiquée. Et enfin dans le coin inférieur droit un bouton permet d'afficher un panneau d'aide (n°10) expliquant la démarche à suivre, et au-dessous il est indiqué le fichier Excel vers lequel sont exportées les données, avec un bouton permettant de changer ce fichier (n°11).

2. Outil d'aide à la calibration

Il est décrit dans cette section le fonctionnement du programme qui permet d'analyser la vidéo du comparateur utiliser pour aider à la calibration de l'effort tangentiel. Le principe de fonctionnement du programme, de manière condensée, est qu'il mesure pour chaque pixel sa

valeur moyenne tout au long de la vidéo. Celle-ci est ensuite comparée à sa valeur pour chacune des images de manière à repérer les pixels qui à un moment donné s'éloignent de leur valeur moyenne. Ce sont les pixels dans lesquelles il y a du mouvement, et en particulier le mouvement de l'aiguille (figure c). Cette méthode permet de les isoler, pour qu'ensuite par un simple seuil de couleur (l'aiguille étant noir sur fond blanc) l'aiguille soit identifiée (figure d). Puis après plusieurs traitements d'élimination des valeurs isolées et aberrantes, une régression linéaire est effectuée pour obtenir une droite passant par les pixels sélectionnés. On peut observer sur la figure e que l'interface affiche le graphe du coefficient de détermination tout au long de la vidéo, ce qui permet de repérer directement les endroits où il y a des erreurs (si d'autres pixels que ceux de l'aiguille ont été conservés, le coefficient de détermination diminue). L'angle de cette droite est ensuite calculé, ce qui permet de déduire la valeur affichée sur le comparateur. Le processus au complet est visible sur les figures I-2, l'interface n'est pas encore terminée au moment des captures, mais elle permet de traiter chacune des étapes automatiquement, allant de l'importation des fichiers à l'affichage des courbes (figure 3.30), tout en permettant au cours du processus d'ajuster différents paramètres de traitement de manière à ajuster le programme aux conditions d'éclairage de la vidéo. Les courbes affichées permettent de comparer les mesures réalisées par la cellule de charge et l'effort calculé à partir du déplacement mesuré par le comparateur. Ce programme peut être utilisé pour le cas présenté plus haut, mais aussi pour d'autres mesures comme des essais de compression avec le chariot fixe ou des mesures de flexion de différents composants au cours du mouvement, il a donc été particulièrement utile pour la suite du processus de calibration.

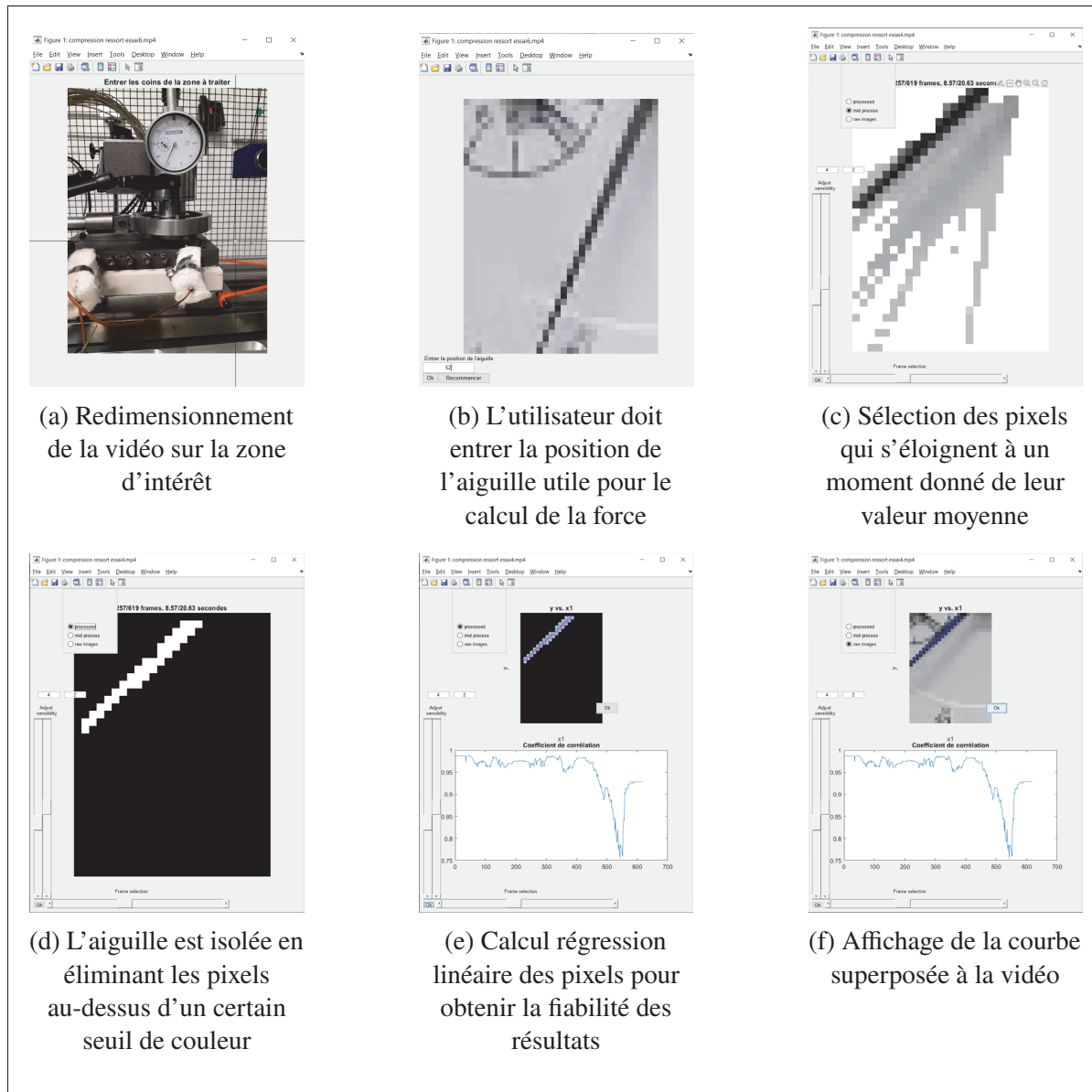


Figure-A I-2 Programme de lecture des données vidéo du comparateur

3. Figures

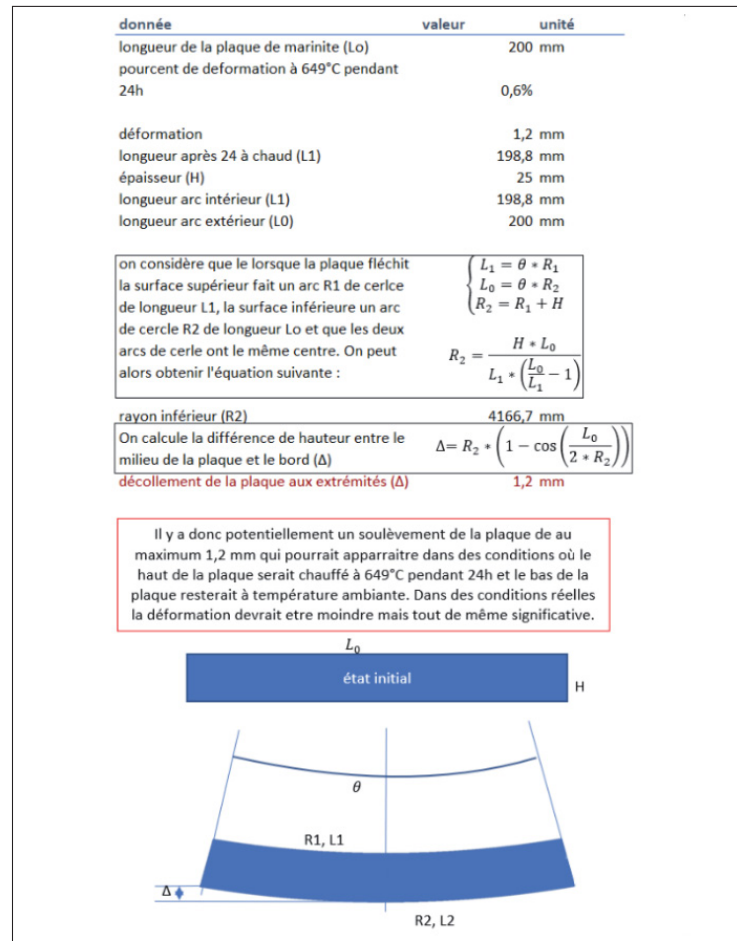


Figure-A I-3 Étude géométrique pour vérifier que la flexion de la plaque de marinite est due à la contraction de sa face supérieure lorsqu'elle est maintenue à haute température pendant une longue durée

Tableau-A I-1 Tableau de référence des composants du banc d'essai

Catégorie	pièce	référence	marque	caractéristiques	prix/ unité	lien
Chariot	patins	LLTHC 15SA T1 TW0360P	SKF		463,541	
Chariot	rails	LLTHS 15 SA 2 T1 450 P3 – D4E0	SKF			
Chariot	cartouches chauffantes	CTREV-80083	Volton	Cartouches chauffante 3/8 dia x 4 1/2 long 240V 300W 36" fils fibre de verre	72	
Chariot	plaque isolante en marinite	3R4060 Marinite P	Industries 3R (fourni par Verbom)			http://www.industries3r.com/en/insulation/marinite/563-3r4060
Chariot	Thermocouples	TJ36-CAIN-116U-2	Omega	type K	33	https://www.omega.ca/en/sensors-and-sensing-equipment/temperature/sensors/thermocouple-probes/tj36-icin/p/TJ36-CAIN-116U-2/quickView
Chariot	load cell effort normal	LCM304-2KN	Omega	1 inch Diameter Stainless Steel Compression Load Cell, 2KN	485	https://www.omega.ca/en/sensors-and-sensing-equipment/load-and-force/load-cells/lc304/p/LC304-500
Chariot	load cell effort tangential	LCM101-100	Omega	S-Beam Load Cell	510	https://www.omega.ca/en/sensors-and-sensing-equipment/load-and-force/load-cells/lc101/p/LC101-250
Chariot	guidage plaque support chariot	60605K95	McMaster	Fixed Alignment, for 20 mm Shaft Diameter	72,36	https://www.mcmaster.com/60605K95
Système de pression	Ressort	9588K56	McMaster	70N/mm; course 38.1mm	9,55	https://www.mcmaster.com/9588K56
Système de pression	céramique	8489K34	McMaster	Glass-Mica 8489K34 1.5" x 3"	212,004	https://www.mcmaster.com/8489k34
Système de pression	bronze rotule	8931K371	McMaster	oil embedded	63,609	https://www.mcmaster.com/8931k371
Système de pression	tige fileté	99067A135	McMaster	M20*500, à couper, zingué	35,243	https://www.mcmaster.com/99067A135
Système de pression	volant supérieur	6033K72	McMaster	Zinc Unthreaded Hole Spoked Hand Wheel ID 5/8"	31,421	https://www.mcmaster.com/92428A130
Système de pression	vis ACME	récupéré	-	diam 1", 5threads/inch	récupéré	
Système de pression	Volant inférieur	récupéré	-	-	récupéré	
Acquisition	carte d'acquisition	NI PCI 6014	National Instruments		récupéré e	
Acquisition	Amplificateurs	Faits par Michel Drouin			25	
Contrôle chauffage	SRR	CC1541-ND	digikey	25A	67,69	https://www.digikey.ca/product-detail/en/sensata-crydom/CWD2425/CC1541-ND/750307
Fusibles	Fusibles					
Actuateur	Vérin	RSA24 BNL05 SK9.000 LMI ST1 YM117008 FFG CLV PY2	Electromate		2351	
Actuateur	Moteur	VLM32H-ALNR-30	Kollmorgen	VLM series brushless servomotor, metric mount, 14 mm shaft w/ 5 mm key, shielded cables w/ flying leads, resolver, 3 m leads	439	
Actuateur	Servo-contrôleur	AKD-P00606-NBAN- 0000	Kollmorgen	Position indexer (motion tasking) AKD series brushless servo drive, rated 6.0 A continuous output, 120/240 Vac 1 phase or 3 phase input, with analog command.	966	
Accessoires	sonde manuelle	88014K	Omega	Surface probe	180	https://www.omega.ca/fr/sensors-and-sensing-equipment/temperature/sensors/thermocouple-probes/88000-insert-surf/p/88014K/quickView
Accessoires	fil thermocouple	HH-K-24	Omega	high temp glass; 704°C max; 1.4*2.3mm; 25ft	38,5	https://www.omega.ca/en/wire-and-cable/thermocouple-and-rtd-wire-and-cable/xc-k-tc-wire/p/HH-K-24-25/quickView

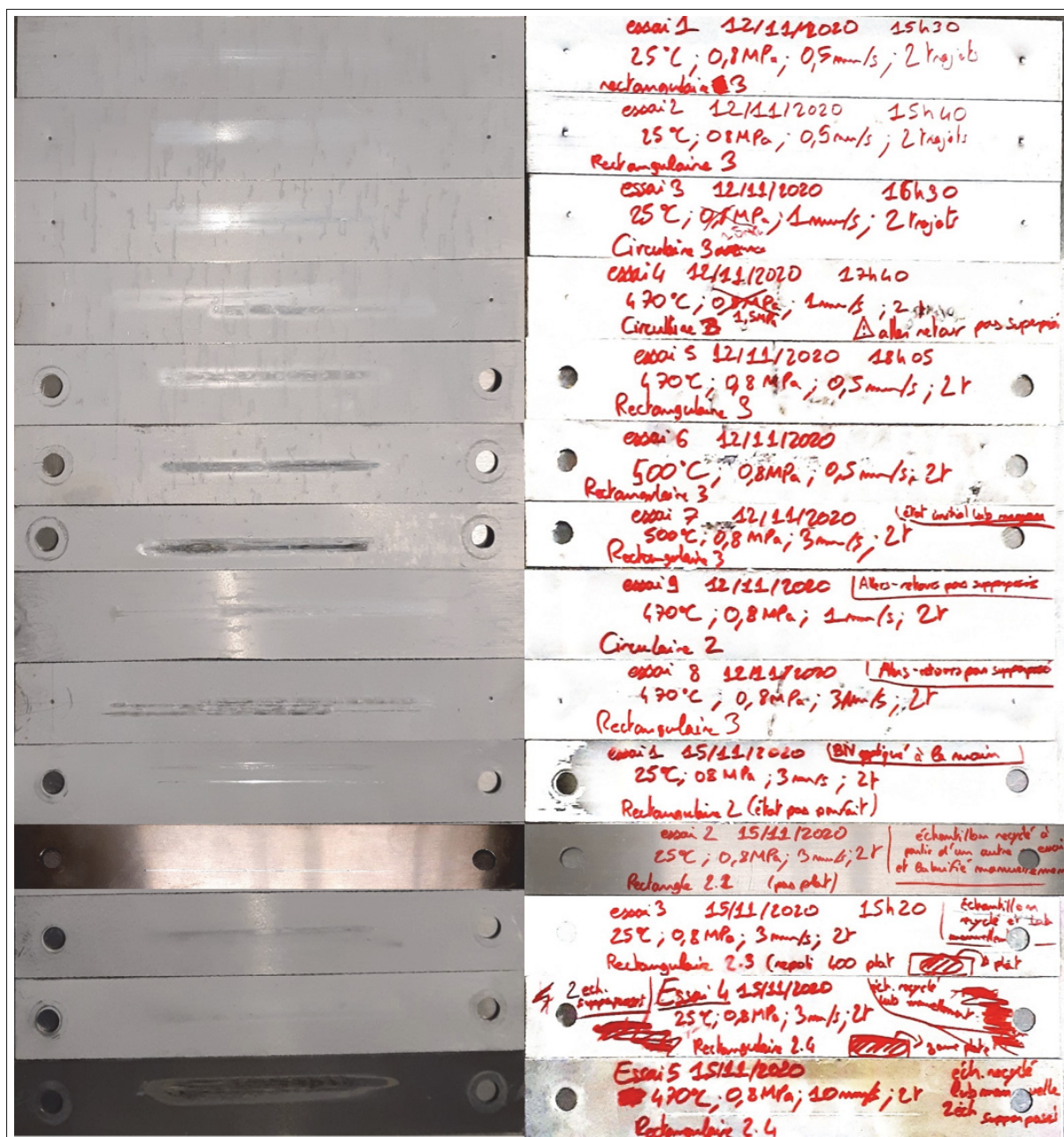


Figure-A I-4 Face et dos des échantillons après essais
(conditions expérimentales indiquées au dos des échantillons)

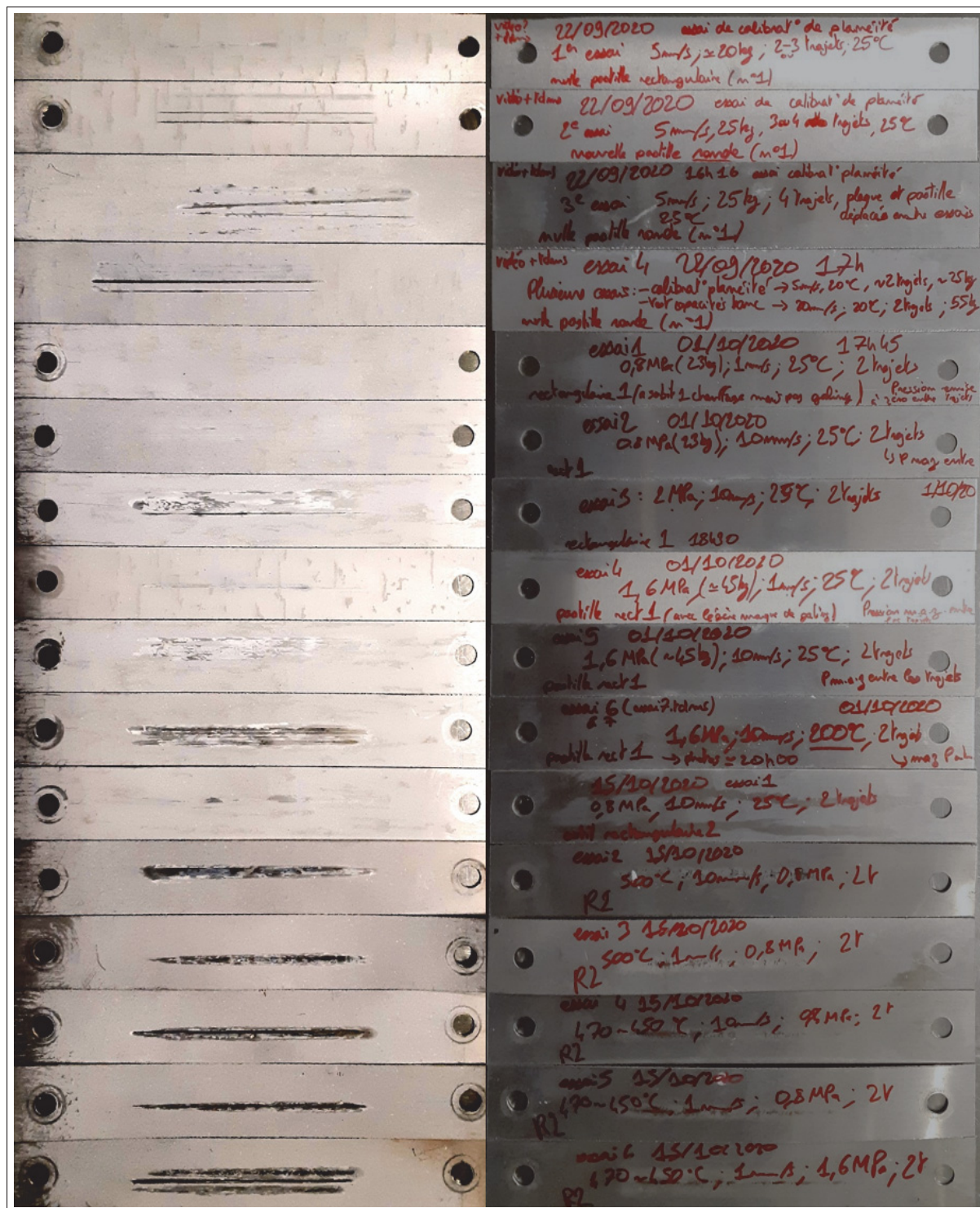


Figure-A I-5 Suite des échantillons après les essais

Tableau-A I-2 Table de valeur du COF en fonction des variables

Température (°C)	Pression (MPa)	Vitesse (mm/s)	Distance de glissement (mm)	COF moyen	Écart type COF	Écart type effort N (kg)	Outil
25	0,8	5	26	0,15	0,011	1,97	Rectangulaire1
25	0,8	5	52	0,15	0,007	0,92	Rectangulaire1
450	0,8	5	52	0,26	0,062	5,00	Rectangulaire1
450	0,8	5	26	0,18	0,021	4,72	Rectangulaire1
25	1,6	5	14	0,13	0,007	2,53	Circulaire1
25	1,6	5	28	0,17	0,015	1,39	Circulaire1
25	1,6	5	42	0,38	0,032	1,12	Circulaire1
25	1,6	5	56	0,24	0,030	2,05	Circulaire1
25	1,6	5	28	0,15	0,005	1,24	Circulaire1
25	1,6	5	42	0,17	0,021	0,73	Circulaire1
25	1,6	5	14	0,13	0,004	0,42	Circulaire1
25	1,6	5	28	0,18	0,036	1,87	Circulaire1
25	1,6	5	42	0,24	0,035	0,98	Circulaire1
25	1,6	5	14	0,16	0,011	0,73	Circulaire1
25	1,6	5	28	0,17	0,016	1,06	Circulaire1
25	1,6	5	14	0,14	0,007	1,78	Circulaire1
25	3,5	19	14	0,30	0,052	1,98	Circulaire1
25	3,5	19	28	0,44	0,057	1,26	Circulaire1
25	0,8	5	26	0,13	0,005	1,13	Rectangulaire1
25	0,8	5	52	0,16	0,004	0,75	Rectangulaire1
25	0,8	5	78	0,16	0,003	1,33	Rectangulaire1
25	0,8	1	26	0,15	0,016	2,59	Rectangulaire1
25	0,8	1	52	0,17	0,007	0,27	Rectangulaire1
25	0,8	10	26	0,15	0,009	1,67	Rectangulaire1
25	0,8	10	52	0,17	0,006	0,27	Rectangulaire1
25	2	10	26	0,17	0,022	1,04	Rectangulaire1
25	2	10	52	0,19	0,032	0,31	Rectangulaire1
25	1,6	1	26	0,14	0,008	1,14	Rectangulaire1
25	1,6	1	52	0,16	0,010	0,21	Rectangulaire1
25	1,6	10	26	0,15	0,006	1,48	Rectangulaire1
25	1,6	10	52	0,16	0,009	0,11	Rectangulaire1
200	1,6	10	26	0,24	0,045	2,49	Rectangulaire1
200	1,6	10	52	0,41	0,035	1,72	Rectangulaire1
25	0,8	10	52	0,15	0,016	0,38	Rectangulaire2
25	0,8	10	26	0,15	0,022	0,52	Rectangulaire2
...

Température (°C)	Pression (MPa)	Vitesse (mm/s)	Distance de glissement (mm)	COF moyen	Écart type COF	Écart type effort N (kg)	Outil
...
500	0,8	10	26	0,33	0,028	4,59	Rectangulaire2
500	0,8	10	52	0,56	0,052	3,98	Rectangulaire2
500	0,8	1	26	0,20	0,013	3,80	Rectangulaire2
500	0,8	1	52	0,31	0,027	4,71	Rectangulaire2
470	0,8	10	26	0,46	0,034	3,61	Rectangulaire2
470	0,8	10	52	0,73	0,113	4,30	Rectangulaire2
470	0,8	1	26	0,24	0,041	4,19	Rectangulaire2
470	0,8	1	52	0,37	0,033	3,50	Rectangulaire2
470	1,3	1	26	0,24	0,012	3,39	Rectangulaire2
470	1,3	1	52	0,27	0,016	2,87	Rectangulaire2
500	0,8	0,5	26	0,22	0,009	1,84	Rectangulaire3
500	0,8	0,5	52	0,26	0,015	1,03	Rectangulaire3
25	0,8	0,5	26	0,15	0,011	0,25	Rectangulaire3
25	0,8	0,5	52	0,16	0,008	0,12	Rectangulaire3
25	0,8	3	52	0,17	0,020	0,18	Rectangulaire3
25	0,8	3	26	0,18	0,023	0,22	Rectangulaire3
25	1,6	1	14	0,15	0,005	0,23	Circulaire2
25	1,6	1	28	0,16	0,006	0,15	Circulaire2
470	1,6	1	14	0,18	0,009	0,68	Circulaire2
470	1,6	1	28	0,22	0,018	0,56	Circulaire2
470	0,8	0,5	26	0,19	0,008	3,38	Rectangulaire3
470	0,8	0,5	52	0,21	0,009	2,46	Rectangulaire3
500	0,8	3	26	0,26	0,066	0,89	Rectangulaire3
500	0,8	3	52	0,45	0,053	3,52	Rectangulaire3
470	0,8	3	26	0,25	0,016	0,83	Rectangulaire3
470	0,8	3	52	0,32	0,060	1,84	Rectangulaire3
470	0,8	1	14	0,22	0,008	0,94	Circulaire3
470	0,8	1	28	0,25	0,023	0,32	Circulaire3
25	0,8	3	26	0,17	0,004	0,28	Rectangulaire2
25	0,8	3	52	0,20	0,030	0,20	Rectangulaire2
25	0,8	3	26	0,17	0,003	0,42	Rectangulaire2
25	0,8	3	52	0,19	0,009	0,25	Rectangulaire2
470	0,8	10	26	0,51	0,006	0,81	Rectangulaire2
470	0,8	10	52	0,60	0,014	0,31	Rectangulaire2

BIBLIOGRAPHIE

- Abu-Farha, F. & Khraisheh, M. (2008). An integrated approach to the Superplastic Forming of lightweight alloys : Towards sustainable manufacturing. *Int. J. of Sustainable Manufacturing*, 1, 18-40. doi : 10.1504/IJSM.2008.019225.
- Aleyari, A., Majidi, O., Bombardier, N., Pham, X.-T. & Jahazi, M. (2020). Finite Element and Experimental Analysis of the preheating stage of High Speed Blow Forming (HSBF) process. *Journal of Manufacturing Processes*, 49, 10-17. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.10.009>.
- Black, S. C., Chiles, V., Lissaman, A. J. & Martin, S. J. (1996). 6 - Mechanics of Machine Tools. Dans Black, S. C., Chiles, V., Lissaman, A. J. & Martin, S. J. (Éds.), *Principles of Engineering Manufacture (Third Edition)* (pp. 143-184). Oxford : Butterworth-Heinemann. doi : <https://doi.org/10.1016/B978-034063195-9/50037-7>.
- Chen, Z., He, X., Xiao, C. & Kim, S. (2018). Effect of Humidity on Friction and Wear A Critical Review. *Lubricants*, 6, 74. doi : 10.3390/lubricants6030074.
- Chevalier, A. (2003). *Guide du dessinateur industriel : pour maîtriser la communication technique*. Hachette. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=HRKEMwEACAAJ>.
- Cui, Z. (2016). *Effect of Plastic Deformation on Friction Behaviour of Aluminum Sheets at Elevated Temperatures*. (Thesis). Repéré à Copyright - Database copyright ProQuest LLC; ProQuest does not claim copyright in the individual underlying works. Last updated - 2016-08-03.
- Dante, R. (2015). *Handbook of Friction Materials and their Applications*. Elsevier Science. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=pFjXCQAAQBAJ>.
- Das, S., Riahi, A. R., Meng-Burany, X., Morales, A. T. & Alpas, A. T. (2012). High temperature deformation and fracture of tribo-layers on the surface of AA5083 sheet aluminum-magnesium alloy. *Materials Science and Engineering : A*, 531, 76-83. doi : <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.033>.
- Dohda, K., Boher, C., Rezai-Aria, F. & Mahayotsanun, N. (2015). Tribology in metal forming at elevated temperatures. *Friction*, 3(1), 1-27. doi : 10.1007/s40544-015-0077-3.
- Farrell, M., Drabek, M. & Qarni, M. (2017). A method for the systematic assessment of lubricant performance during superplastic sheet forming. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 48(10), 976-982. doi : 10.1002/mawe.201700041.

- Friedman, P. A., Copple, W. B., Allor, R. & Luckey, S. G. (2005). *High temperature lubricant test for superplastic forming*. Conference Proceedings présentée à North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 33, May 24, 2005 - May 27, 2005 (pp. 25-31).
- Gali, O. A., Riahi, A. R. & Alpas, A. T. (2013). The tribological behaviour of AA5083 alloy plastically deformed at warm forming temperatures. *Wear*, 302(1), 1257-1267. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.048>.
- Gali, O. A., Riahi, A. R. & Alpas, A. T. (2015). The effect of surface conditions on the elevated temperature sliding contact deformation of AA5083 alloy. *Wear*, 330-331, 309-319. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.027>.
- Gali, O. A. (2017). *Micro-mechanisms of Surface Defects Induced on Aluminum Alloys during Plastic Deformation at Elevated Temperatures*. (Thesis, University of Windsor (Canada)). Repéré à Copyright - Database copyright ProQuest LLC; ProQuest does not claim copyright in the individual underlying works. Last updated - 2017-04-25.
- Ghiotti, A., Sgarabotto, F. & Bruschi, S. (2013). A novel approach to wear testing in hot stamping of high strength boron steel sheets. *Wear*, 302(1), 1319-1326. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.051>.
- Ghiotti, A., Bruschi, S. & Medea, F. (2017). Wear onset in hot stamping of aluminium alloys sheets. *Wear*, 376-377, 484-495. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.108>.
- Ghiotti, A., Simonetto, E. & Bruschi, S. (2019). Influence of process parameters on tribological behaviour of AA7075 in hot stamping. *Wear*, 426-427, 348-356. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.031>.
- Ghiotti, A., Bruschi, S., Sgarabotto, F. & Medea, F. (2014). Novel Wear Testing Apparatus to Investigate the Reciprocating Sliding Wear in Sheet Metal Forming at Elevated Temperatures. *Key Engineering Materials*, 622-623, 1158-1165. doi : [10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.1158](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.1158).
- Hanna, M. D. (2009). Tribological evaluation of aluminum and magnesium sheet forming at high temperatures. *Wear*, 267(5), 1046-1050. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.007>.
- Hanna, M. D., Krajewski, P. E. & Schroth, J. G. (2007). *Tribological Testing of Graphite and Boron Nitride Lubricant Formulations for High Temperature Aluminum Sheet Forming Processes*. Conference Proceedings présentée à ASME/STLE 2007 International Joint Tribology Conference (pp. 705-707). doi : [10.1115/ijtc2007-44043](https://doi.org/10.1115/ijtc2007-44043).

- Heinrichs, J. & Jacobson, S. (2011). The influence from shape and size of tool surface defects on the occurrence of galling in cold forming of aluminium. *Wear*, 271(9), 2517-2524. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.077>.
- Hu, Y., Wang, L., Politis, D. J. & Masen, M. A. (2017). Development of an interactive friction model for the prediction of lubricant breakdown behaviour during sliding wear. *Tribology International*, 110, 370-377. doi : <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.005>.
- Huttunen-Saarivirta, E., Kilpi, L., Hakala, T. J., Metsäjoki, J. & Ronkainen, H. (2018). Insights into the behaviour of tool steel-aluminium alloy tribopair at different temperatures. *Tribology International*, 119, 567-584. doi : <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.11.041>.
- Jarrar, F. S. M. (2009). *Simulation and optimization of Superplastic Forming (SPF) and Quick Plastic Forming (QPF) of lightweight alloys*. (Thesis). Repéré à Copyright - Database copyright ProQuest LLC ; ProQuest does not claim copyright in the individual underlying works. Last updated - 2020-04-22.
- Jean-Jacques, B. & Michel, S. (1996). Superplasticité. *Techniques de l'ingénieur Mise en forme des métaux : aspects rhéologiques et métallurgiques*, base documentaire : TIB476DUO(ref. article : m613), ? Repéré à <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/mise-en-forme-des-metaux-aspects-rheologiques-et-metallurgiques-42476210/superplasticite-m613/>.
- Jerina, J. & Kalin, M. (2014). Initiation and evolution of the aluminium-alloy transfer on hot-work tool steel at temperatures from 20°C to 500°C. *Wear*, 319(1), 234-244. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.07.021>.
- Le Royer, M. (2017a). *Dimensionnement d'un tribomètre*. (Rapport présenté comme exigence partielle à l'obtention de la thèse). Montréal, École de technologie supérieure (ÉTS).
- Le Royer, M. (2017b). *Étude expérimentale et modélisation de l'influence de la friction lors de la mise en forme superplastique des alliages d'aluminium*. (Rapport présenté comme exigence partielle à l'obtention de la thèse). Montréal, École de technologie supérieure (ÉTS).
- Li, Y., Zhang, W., Guo, B. & Datta, D. (2017). Interlayer shear of nanomaterials : Graphenegrphene, boron nitrideboron nitride and grapheneboron nitride. *Acta Mechanica Sinica*, 30(3), 234-240. doi : <https://doi.org/10.1016/j.camss.2017.05.002>.
- LIÉTARD, A. (1975). Rectification [Electronic Article]. Repéré à <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-travail-des-metaux-assemblage-tiabt/archive-1/rectification-b1698/>.

- Majidi, O., Jahazi, M. & Bombardier, N. (2018). Characterization of mechanical properties and formability of a superplastic Al-Mg alloy. *Journal of Physics : Conference Series*, 1063, 012165. doi : 10.1088/1742-6596/1063/1/012165.
- Majidi, O., Jahazi, M. & Bombardier, N. (2019). A viscoplastic model based on a variable strain rate sensitivity index for superplastic sheet metals. *International Journal of Material Forming*, 12(4), 693-702. doi : 10.1007/s12289-018-1443-2.
- Medea, F., Ghiotti, A., S., B. & M., B. (2016). Novel spraying apparatus to investigate the lubricant deposition on metal sheets at high temperature. *AIP Conference Proceedings*, 1769(1), 200017. doi : 10.1063/1.4963635.
- Medea, F., Ghiotti, A. & Bruschi, S. (2015). *Tribological behaviour of lubricants in hot stamping of AA6016*. Conference Proceedings présentée à 16th International Conference on Sheet Metal, SheMet 2015, March 16, 2015 - March 18, 2015 (pp. 221-226). doi : 10.4028/www.scientific.net/KEM.639.221.
- Nakazima, K., Kikuma, T. & Hasuka, K. (1968). *Study on the formability of steel sheets*. Yawata, Japan : Technical Research Institute, Yawata Works.
- Pelcastre, L., Hardell, J. & Prakash, B. (2011). Investigations into the occurrence of galling during hot forming of Al-Si-coated high-strength steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology*, 225(6), 487. Repéré à https://search.proquest.com/docview/1323227449?accountid=27231http://openurl.quebec.ca:9003/ets?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:journal&genre=article&sid=ProQ:ProQ%3Asolidstateabstracts&atitle=Investigations+into+the+occurrence+of+galling+during+hot+forming+of+Al-Si-coated+high-strength+steel&title=Proceedings+of+the+Institution+of+Mechanical+Engineers%2C+Part+J%3A+Journal+of+Engineering+Tribology&issn=13506501&date=2011-06-01&volume=225&issue=6&spage=487&au=Pelcastre%2C+L%3BHardell%2C+J%3BPrakash%2C+B&isbn=&jtitle=Proceedings+of+the+Institution+of+Mechanical+Engineers%2C+Part+J%3A+Journal+of+Engineering+Tribology&bttitle=&rft_id=info:eric/17730173&rft_id=info:doi/. Date revised - 2013-04-01.
- Podgornik, B., Kosec, T., Kocijan, A. & Donik, . C. (2015). Tribological behaviour and lubrication performance of hexagonal boron nitride (h-BN) as a replacement for graphite in aluminium forming. *Tribology International*, 81, 267-275. doi : <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.09.011>.
- Podgornik, B., Kafexhiu, F., Kosec, T., Jerina, J. & Kalin, M. (2017). Friction and anti-galling properties of hexagonal boron nitride (h-BN) in aluminium forming. *Wear*, 388-389, 2-8. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.026>.

- Pujante, J., Pelcastre, L., Vilaseca, M., Casellas, D. & Prakash, B. (2013). Investigations into wear and galling mechanism of aluminium alloy-tool steel tribopair at different temperatures. *Wear*, 308(1), 193-198. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.06.015>.
- RENAULT. (2007). *Ergonomie en production*. Repéré à http://industrialisation.pagesperso-orange.fr/Ressources/Ge75026r_B_fr_renaud.pdf.
- Shi, Z., Wang, L., Mohamed, M., Balint, D. S., Lin, J., Stanton, M., Watson, D. & Dean, T. A. (2017). A new design of friction test rig and determination of friction coefficient when warm forming an aluminium alloy. *Procedia Engineering*, 207, 2274-2279. doi : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.994>.
- Tomala, A., Ripoll, M. R. & Badisch, E. (2013). Tool Solid Lubricant Workpiece Interactions in High Temperatures Applications. *Procedia Engineering*, 68, 626-633. doi : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.231>.
- Tomala, A., Hernandez, S., Rodriguez Ripoll, M., Badisch, E. & Prakash, B. (2014). Tribological performance of some solid lubricants for hot forming through laboratory simulative tests. *Tribology International*, 74, 164-173. doi : <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.02.008>.
- Uda, K., Azushima, A. & Yanagida, A. (2016). Development of new lubricants for hot stamping of Al-coated 22MnB5 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 228, 112-116. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.10.033>.
- Vilaseca, M., Molas, S. & Casellas, D. (2011). High temperature tribological behaviour of tool steels during sliding against aluminium. *Wear*, 272(1), 105-109. doi : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.07.007>.
- Wagoner, R. H. & Chenot, J.-L. (1997). *Fundamentals of metal forming*. New York;: John Wiley & Sons.
- Wang, H., Xu, B. & Liu, J. (2012). Solid Lubrication Materials. Dans Wang, H., Xu, B. & Liu, J. (Éds.), *Micro and Nano Sulfide Solid Lubrication* (pp. 1-60). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. doi : 10.1007/978-3-642-23102-5_1.
- Yanagida, A., Kurihara, T. & Azushima, A. (2010). Development of tribo-simulator for hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(3), 456-460. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.10.007>.