

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
MAHMOUD ANZIEH

ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES DE TRIBOLOGIE ET
MODÉLISATION CAO POUR LA PRÉVISION DU COMPORTEMENT DES
ENGRENAGES EN PLASTIQUE

FÉVRIER 2005

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

À mes parents

« et ton Seigneur a décrété : “n'adorez que Lui; et (marquez) de la bonté envers les père et mère: si l'un d'eux ou tous deux doivent atteindre la vieillesse auprès de toi, alors ne leur dis point : “Fi ! ” et ne les brusque pas, mais adresse-leur des paroles respectueuses et par miséricorde, abaisse pour eux l'aile de l'humilité; et dis : "Ô mon Seigneur, fais-leur; à tous deux, miséricorde comme ils m'ont élevé tout petit” » Coran (17; 23-24)

REMERCIEMENTS

Ce mémoire a été développé comme exigence de la maîtrise en génie industriel, option productique, à l'Université du Québec à Trois-Rivières.

Tout mon premier remerciement s'adresse à Dieu, pour tout le courage, le bien et le malheur dans ma vie ainsi qu'à tous les membres de ma famille spécialement mon père et ma mère pour leurs supports et leurs prières.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous mes professeurs plus particulièrement au Dr Demagna Koffi, Professeur au département de génie mécanique, mon directeur de recherche, pour avoir guidé l'évolution de mon travail et m'avoir permis par ses conseils, suggestions et critiques constructives de la mener à bien.

Et je remercie, Dr Walid Ghie, chercheur stagiaire postdoctoral en génie mécanique à l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour ses conseils. Je tiens aussi à remercier les membres des départements de génie mécanique et de génie industriel à l'Université du Québec à Trois-Rivières qui ont aidé de loin ou de près à la réalisation de mes études à Trois-Rivières.

Il m'est également agréable de mentionner la compréhension et l'encouragement de mes amis tout au long de mes études, plus particulièrement Foued Cherichi.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
TABLE DES MATIÈRES.....	VI
RÉSUMÉ.....	IX
ABSTRACT.....	X
LISTES DES TABLEAUX.....	XI
LISTES DES FIGURES.....	XII
INTRODUCTION.....	1
1.1 HISTORIQUE DES ENGRÈNAGES.....	1
1.2 NOTIONS DE BASE.....	3
1.2.1 Définition	4
1.2.2 Paramètres	4
1.2.3 Matériaux	12
1.3 PROBLÉMATIQUE.....	14
1.4 BUT DE LA RECHERCHE.....	15
1.5 COMPOSITION DU MÉMOIRE.....	16

REVUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE.....17

2.1	PRÉAMBULE	17
2.2	RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE.....	18
2.3	SYNTHÈSE	26

PRINCIPE DE FROTTEMENT ET D'USURE.....29

3.1	THÉORIE DU FROTTEMENT.....	32
3.2	PROBLÈMES DE FROTTEMENT.....	33
3.2.1	Variables intervenant dans le frottement.....	34
3.2.1.1	Coefficient de frottement.....	34
3.2.1.2	La charge et son influence	37
3.2.2	Échauffement dû au frottement	38
3.2.2.1	Produit P x V	43
3.2.2.2	Influence de la vitesse relative.....	44
3.2.2.3	Influence de l'ambiance.....	45
3.3	USURE.....	46
3.3.1	Définition et position du problème d'usure	47
3.3.2	Phénomènes élémentaires d'endommagement des surfaces	48
3.3.3	Formes d'usure	50
3.3.3.1	Classification empirique	50
3.3.3.2	Classification technologique.....	50
3.3.3.3	Classification scientifique	51
3.3.4	Usures liées au frottement.....	52
3.3.4.1	Usure adhésive.....	52
3.3.4.2	Abrasive à deux ou trois corps.....	53
3.3.5	Usure corrosive ou tribochimique.....	54
3.3.6	Usure par fissuration.....	55

3.3.7	Usure en fretting	56
3.3.8	Autres formes d'usure.....	57
3.3.9	Étude et quantification de l'usure	58
3.4	ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	58
3.4.1	Principe de fonctionnement	59
3.4.2	Types d'essai réalisables	61
3.4.3	Plan d'expérience.....	62
3.4.4	Formulation de la méthode calcul.....	63
3.4.5	Explications – Relevés de données.....	65
3.4.6	Acquisition des données :	66
<i>MODELISATION EN CAO.....</i>		<i>68</i>
4.1	INTRODUCTION.....	68
4.2	GÉOMÉTRIE DES DENTS	68
4.3	MODÉLISATION PAR CONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE.....	77
4.3.1	Introduction	77
4.3.2	Principe de fonctionnement	78
4.3.3	Développement d'une application	79
4.3.4	Exemple d'application.....	80
4.3.4	Conclusion	81

ANALYSE DES RÉSULTATS.....	82
 5.1 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	82
 5.2 INTERPRÉTATION	90
5.2.1 Coefficient de frottement	90
5.2.1.1 Influence du matériau mené.....	90
5.2.1.2 Influence du matériau menant.....	93
5.2.1.3 Conclusion	96
5.2.2 Perte de masse.....	97
5.2.2.1 Influence du matériau mené.....	97
5.2.2.2 Influence du matériau menant.....	99
5.2.2.3 Conclusion	100
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	101
 6.1 RÉCAPITULATION.....	101
 6.2 DISCUSSION	103
 6.3 RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES DE LA RECHERCHE.....	104
BIBLIOGRAPHIE.....	105
ANNEXE A Calculs des contraintes pour certains types de contact.....	108
ANNEXE B Évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement et de la différence de poids de chaque type d'essai	118
ANNEXE C Exemple d'application spécifique de la modélisation d'une roue dentée en utilisant SolidWorks.....	127

RÉSUMÉ

Si la dynamique est la science du mouvement, la tribologie quant à elle est la science des facteurs qui permettent le mouvement : elle étudie la lubrification, le frottement et l'usure. Cependant, son objectif premier est d'atténuer l'usure et le frottement dans le but d'améliorer le rendement des machines.

Le but de cette recherche est d'étudier les caractéristiques d'usure et de frottement de matériaux plastiques et composites en général et en particulier des engrenages en plastique en tenant compte du frottement de glissement/roulement, des comportements thermodynamiques et thermomécaniques de ces derniers, ainsi que la modélisation en CAO (Conception Assistée par Ordinateur) de la géométrie des engrenages en plastique.

Des expériences ont été réalisées afin d'illustrer les résultats sous forme graphique et de les comparer aux expériences antérieures. Cela permettra de montrer l'évolution du coefficient de frottement entre polymères/polymères et polymère/acier en fonction de certains paramètres. La modélisation d'une roue dentée a été effectuée grâce à l'utilisation du logiciel SolidWorks avec l'intégration de Visual Basic (VB).

ABSTRACT

If dynamics is the science of the motion, tribology is the science of the factors which allows the motion: it studies the lubrication, friction and wear. However, its first objective is to reduce the friction and the wear with the aim of improving the efficiency of machines.

The aim of this research is to study the characteristics of plastic and composite materials wear and friction in general and in particular the plastic gears by taking account of friction of the slip / rolling, the thermodynamics and thermo mechanics behaviour of the latter, as well as modelling in CAD (computer-aided design) of the geometry of the plastic gears.

Many experiences were realized to illustrate the results graphics and compare them with results of previous experiences. It will allow showing the evolution of the coefficient of friction between polymers / polymers and polymer / steel according to certain parameters. The modelling of a gear's tooth was made by using the software SolidWorks with Visual Basic (VB') integration.

LISTES DES TABLEAUX

Tableau	Titre	page
1.1	Structure et usage de quelques matériaux composites.....	12
2.1	Comportement de combinaison des engrenages.....	21
3.1	Influence de l'accroissement de la température sur les propriétés tribologiques.....	42
3.2	Principaux paramètres caractérisant l'environnement.....	46
3.3	Condition de conduite des expériences.....	62
3.4	Combinaisons de matériaux.....	63
5.1	Tableau de différence de poids.....	84
5.2	Valeurs de comparaison.....	85
5.3	Valeurs de coefficient de frottement.....	88

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
1.1	Type d'engrenage en bois.....	2
1.2	Engrenages droits.....	6
1.3	Double et simple engrenages hélicoïdaux.....	6
1.4	Engrenages internes.....	7
1.5	Engrenages supports.....	8
1.6	Engrenages coniques en spirale.....	9
1.7	Engrenages coniques à dentures « Zerol ».....	9
1.8	Engrenages à vis sans fin.....	10
1.9	Engrenages hélicoïdaux d'axes croisés.....	11
1.10	Engrenages hypoïdes.....	11
2.1	Influence de la température sur le coefficient de frottement.....	19
2.2	Évaluation de coefficient de frottement en fonction de la température....	24
3.1	Variation de μ_k avec la force de contact pour le frottement de divers plastiques sur de l'acier.....	35
3.2	Variation de μ_k et θ avec la durée de frottement pour un polyamide.....	36
3.3	Représentation schématique de l'influence de la charge.....	38
3.4	Vue schématique macroscopique en coupe des surfaces de glissement en contact.....	44
3.5	Tribomètre Susuki.....	44
3.6	Endommagement d'un corps frottant.....	49
3.7	Phénomène élémentaire de l'usure adhésive, formation de transfert.....	52
3.8	Usure par fissuration dans le cas des matériaux fragiles.....	56
3.9	Tribomètre TE 53 « PLINT PARTNER ».....	59
3.10	Représentation graphique du coefficient de frottement.....	60
4.1	Vitesse angulaire inversement proportionnelle.....	69
4.2	Corde tournant autour d'un cylindre fixe.....	70

Figure	Titre	Page
4.3	Montage pour générer des profils de développante de cercle.....	71
4.4	Génération d'une développante de cercle relative au disque.....	71
4.5	Génération d'une développante de cercle relative au disque 2.....	72
4.6	Définition des termes.....	73
4.7	Définition des termes relatifs à un engrenage (a) et une crémaillère (b)	75
4.8	Profil d'une dent.....	75
4.9	Définition de la trochoïde.....	77
4.10	Représentation des formes d'équations.....	79
4.11	Représentation de l'application ENGPLAS_CAO.....	80
4.12	Exemple de simulation pour un pignon normalisé : 5-5-20.....	81
5.1	Évolution de coefficient de frottement.....	88
5.2	Évolution de coefficient de frottement des essais sur un disque.....	89
5.3	Évolution du coefficient de frottement (Nylon menant).....	91
5.4	Évolution du coefficient de frottement (Acétal menant).....	92
5.5	Évolution du coefficient de frottement (Polyéthylène menant).....	92
5.6	Évolution du coefficient de frottement (Acier menant).....	93
5.7	Évolution du coefficient de frottement (Nylon mené).....	94
5.8	Évolution du coefficient de frottement (Acétal mené).....	95
5.9	Évolution du coefficient de frottement (Polyéthylène mené).....	95
5.10	Évolution du coefficient de frottement (Acier mené).....	96
5.11	Évolution de la perte de masse (Nylon menant).....	97
5.12	Évolution de la perte de masse (Acétal menant).....	98
5.13	Évolution de la perte de masse (Polyéthylène menant).....	98
5.14	Évolution de la perte de masse (Nylon mené).....	99
5.15	Évolution de la perte de masse (Acétal mené).....	99
5.16	Évolution de la perte de masse (Polyéthylène mené).....	100

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 HISTORIQUE DES ENGRENAGES

Les engrenages ont été utilisés par l'humanité depuis 3000 ans. Jusqu'à ce jour, la date et le lieu où les premiers engrenages ont été utilisés restent inconnus. Les engrenages sont sortis des brouillards de l'antiquité avec d'autres dispositifs mécaniques tels que la roue de potier, les poulies, le levier et beaucoup d'autres.

Les premiers engrenages ont probablement été réalisés avec du bois. Les Grecs ont fabriqué de petits trains pour les dispositifs astronomiques à partir du métal. Les Romains ont utilisé les engrenages en bois pour le transport d'énergie, ainsi que les engrenages en fer et en bronze dans des dispositifs pour contrôler le mouvement où une charge très faible était nécessaire [Ewert 1997].

Au moyen âge, les engrenages ont été utilisés dans des moulins à eau ; l'horloge mécanique inventée au XIII siècle a permis l'utilisation de petits engrenages en métal. Les horloges à pendules et plus précisément celles des églises étaient bien grandes et ont nécessité le développement de systèmes d'engrenages.

La première utilisation réellement considérable des engrenages s'est produite en Hollande où des milliers de moulins à vent ont pompé l'eau de mer hors du cordon. Ces moulins à

vent géants ont utilisé les engrenages en bois pour prendre la charge d'un rotor rapide de vent au-dessus de la fraise et pour la transmettre à un rotor lent au fond de la fraise. La révolution industrielle a commencé dans les années 1700 et à cette époque il y avait un besoin de toutes sortes de systèmes d'engrenages. Des engrenages plutôt efficaces ont été réalisés en fer de moulage en utilisant les potiers fabriqués avec des dents, une raie et un moyeu en bois (hub).

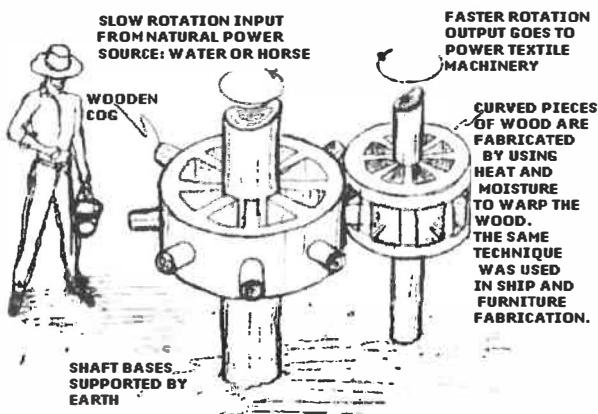


Figure 1.1 : Type d'engrenage en bois [Smith 1983]

Au début du vingtième siècle, l'automobile et l'avion ont été inventés. Mais déjà vers la fin du dix-neuvième siècle, les bateaux à vapeur, les véhicules électriques de chariot et les machines-outils adaptées étaient d'une utilisation très répandue [Smith 1983]. Le développement de la technologie des engrenages a été de pair assorti à l'utilisation très répandue des engrenages.

Ce dont on avait besoin était un modèle d'engrenages qui puisse rendre les machines fiables, de petite taille et d'une qualité assez bonne. Une fois ce résultat obtenu, les

mécanismes qui seront réalisés avec ces engrenages seront moins coûteux plus légers et moins grands.

L'art des engrenages a maintenant progressé à une immense complexité de capacité étonnante et de tendance ahurissante à développer les machines et à concevoir des règles. La technologie des engrenages maintenant très avancée a permis le développement des engins spatiaux, du télécopieur, du plastique, des lasers et de beaucoup d'autres choses.

Cela invite à décortiquer la notion d'engrenage ; ainsi, il sera présenté au niveau du paragraphe suivant les notions de base des engrenages.

1.2 NOTIONS DE BASE

Au fil du temps, l'homme a toujours mis au point des appareils et mécanismes plus ou moins sophistiqués. Très souvent ces derniers utilisaient des transmissions par engrenage.

Une transmission par engrenage consiste en deux roues dentées qui s'engrènent de manière à transmettre le mouvement d'un arbre en rotation à un autre. La forme des dents est conçue de façon à assurer un mouvement de rotation uniforme de la roue menée par les dents en prise. On fabrique des roues dentées possédant un fini de précision ou simplement un fini brut de fonderie.

1.2.1 Définition

L'engrenage est un mécanisme élémentaire constitué de deux roues dentées, la petite roue se nomme le **pignon**, la grande roue à denture externe s'appelle la **roue** et la grande roue à denture interne s'appelle la **couronne**. L'une des roues peut avoir un rayon infini, elle s'appelle alors une **crémaillère**. Les deux roues sont mobiles autour d'une position relativement invariable, et donc l'une entraîne l'autre par l'action des dents venant successivement en contact. Un engrenage peut changer la vitesse de rotation d'un axe de machine comme il peut également changer la direction de l'axe de la rotation et le mouvement rotatoire en mouvement linéaire [Institut de l'engrenage et des transmissions 1998]. Le but de l'engrenage est de transmettre le mouvement et la puissance de son arbre, à l'aide des dents d'engrenage. Les dents peuvent avoir n'importe quelle partie d'une variété presque infinie de profil.

1.2.2 Paramètre

En général, les engrenages peuvent être répartis dans plusieurs classifications basées sur l'arrangement des axes de la paire des engrenages. Le type le plus général d'engrenage se compose d'une paire dont les axes ne sont ni perpendiculaires ni parallèles et ne se rencontrent pas [www.gmc.ulaval.ca Mars 2004]. Tous les autres types sont des cas spéciaux de cette forme de base. Les divers types d'engrenages courants peuvent être classés par catégorie comme suit :

- a. *Axes parallèles* ;
- b. *Axes concourants* ;

c. **Axes non concourants non parallèles** et certains autres types d'axes spéciaux d'engrenages (elliptique, triangulaire, carrée, multiple secteur, rouleau).

Les pages suivantes montrent les détails de chaque type défini précédemment.

a. Les engrenages à axes parallèles :

Les types les plus simples d'engrenages sont ceux qui relient des axes parallèles. Ils sont en général relativement faciles à fabriquer et sont capables de transmettre de grandes quantités de puissance avec un rendement élevé.

La puissance est transmise avec une plus grande efficacité que n'importe quel autre type ou forme d'engrenage.

Citons quelques formes comme :

Engrenages droits : les engrenages droits servent à relier les arbres parallèles. Un engrenage droit peut se comparer à deux surfaces cylindriques, appuyées l'une contre l'autre ; les jantes forment les cercles primitifs qu'on modifie par la suite en y ajoutant des dents. Les dents s'engrènent les unes dans les autres ; la transmission se fait par glissement et on obtient un rapport de vitesse égal à 1 entre la roue motrice et la roue menée.

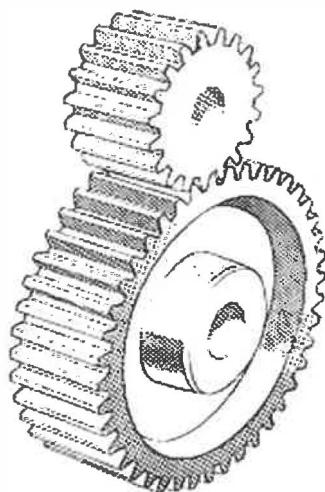


Figure 1.2 : Engrenages droits

Engrenages hélicoïdaux : autre sorte d'engrenages droits ; ils possèdent des dents en spirale plutôt que cylindrique. Une roue dentée à chevrons consiste en une roue sur laquelle on a taillé deux rangées de dents inclinées en direction opposée [Jensen et al. 1972].

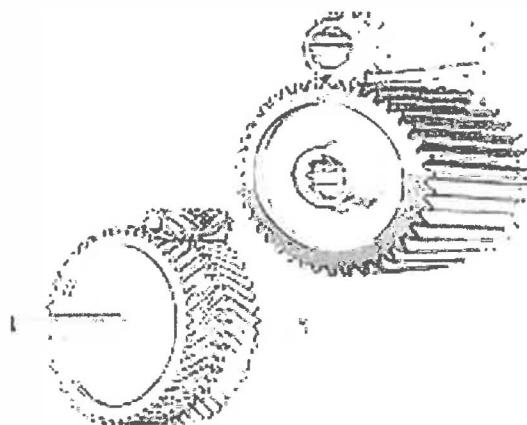


Figure 1.3 : Double et simple engrenages hélicoïdaux

Engrenages internes : les engrenages droits et hélicoïdaux peuvent être faits en tant qu'engrenages internes. Les côtés d'une dent interne de forme spirale sont concaves plutôt que convexes, de même que la caisse d'engrenage externe. L'engrenage interne à plusieurs avantages : elle fonctionne à une distance centrale plus étroite avec son pignon joignant que les engrenages externes de la même taille, et elle permet souvent une conception plus compacte ; la force de dent d'un engrenage interne est plus grande que celle d'un engrenage externe équivalent.

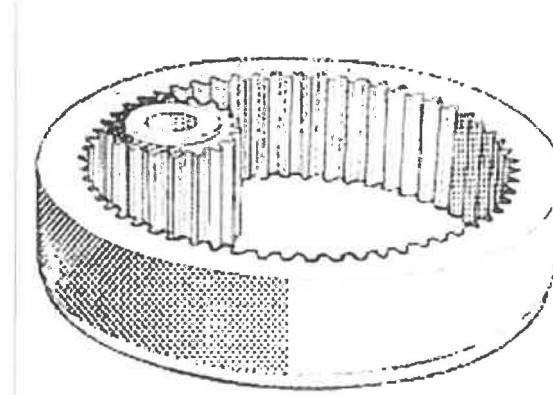


Figure 1.4 : Engrenages internes

Engrenages à crémaillère : un mécanisme de crémaillère et de pignon est employé pour transformer le mouvement rotatoire en mouvement linéaire et vice versa. Un pignon droit rond (le pignon) s'engrène avec un pignon droit qui a des dents réglées suivant une ligne droite (la crémaillère). La crémaillère et le pignon peuvent transformer le mouvement rotatoire en mouvement linéaire et vice versa de trois manières :

- a. La rotation du pignon autour d'un centre fixe fait déplacer la crémaillère sur une ligne droite.

b. Le mouvement de la crémaillère suivant une ligne droite fait tourner le pignon autour d'un point fixe.

c. Si le support est fixe et que le pignon tourne, alors le centre du pignon se déplace sur une ligne droite prenant le pignon avec lui.

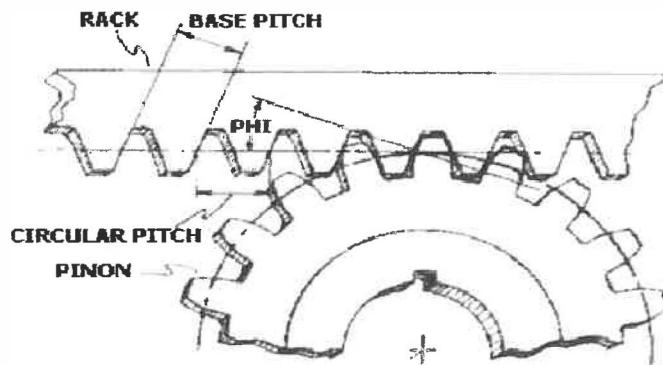


Figure 1.5 : Engrenages supports [www.gmc.ulaval.ca Mars 2004]

b. Les engrenages à axes concourants :

Les engrenages coniques droits : Les engrenages coniques droits sont généralement utilisés pour des applications à basse vitesse, quand le bruit et les vibrations ne sont pas des facteurs importants dans le fonctionnement. Les flancs des dents sont droits et pointent vers le centre géométrique de la roue. On utilise les engrenages coniques droits dans des applications où la vitesse linéaire se situe aux alentours de 5 m/s. Dans des situations où l'environnement de fonctionnement est très favorable, la vitesse linéaire peut monter jusqu'aux alentours de 75 m/s.

Les engrenages coniques en spirale : quand il est nécessaire d'augmenter la vitesse d'un mouvement sans développer un grand couple, des pignons coniques en

spirale sont utilisés. Les pignons coniques en spirale ont des dents coupées dans une forme de spirale sur la surface d'un cône. Ils ont un fonctionnement plus silencieux que les pignons coniques droits et ont une plus longue durée de vie. Des pignons coniques en spirale sont utilisés dans des boîtes de vitesse d'essieu arrière d'automobile.

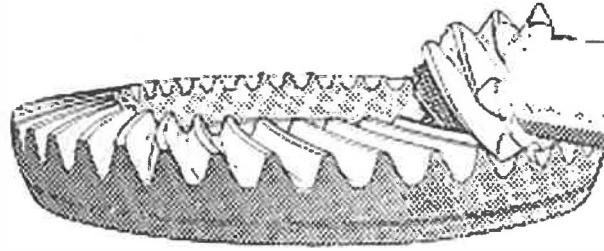


Figure 1.6 : Engrenages coniques en spirale [www.gmc.ulaval.ca Mars 2004]

Les engrenages coniques à dentures « Zerol » : ce sont des engrenages coniques en spirale avec un angle de spirale de 0 degré. L'avantage possible de ces engrenages est que chaque dent a une surface convexe et une concave, alors qu'une dent de Conflux (engrenages coniques droits) a deux surfaces convexes. La section de roulement initial de dent des engrenages coniques en Zerol peut donc être plus grande que celle des engrenages "Conflux".



Figure 1.7 : Engrenages coniques à dentures « Zerol » [www.gmc.ulaval.ca Mars 2004]

c. Les engrenages à axes non concourants non parallèles :

Les engrenages de cette catégorie sont généralement les plus complexes en termes de géométrie et fabrication. Les types plus simples, discutés d'abord ci-dessous, sont, cependant, tout à fait faciles à fabriquer et sont raisonnablement peu coûteux, mais ils ne supportent pas de grandes charges.

Les engrenages à vis sans fin : Cet engrenage comprend une roue et une vis. La roue de la vis s'engrène avec la vis. La roue de la vis est un engrenage hélicoïdal avec des dents inclinées de sorte qu'elles puissent s'engager dans le fil et de la vis. Comme les engrenages hélicoïdaux concourants, la vis et la roue de la vis transmettent le couple et le mouvement de rotation pour un angle droit. La vis conduit toujours la roue de la vis et jamais le contraire. Le mécanisme se verrouille si la roue de la vis essaye de conduire la vis. Les mécanismes de la vis ont un fonctionnement très silencieux.

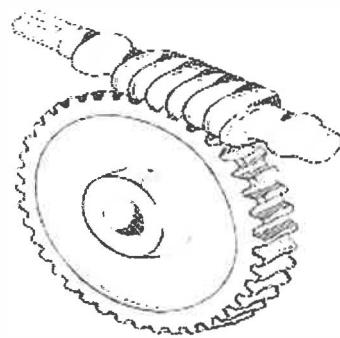


Figure 1.8 : Engrenages à vis sans fin [www.gmc.ulaval.ca Mars 2004]

Les engrenages hélicoïdaux d'axes croisés : ils sont semblables en l'apparence aux engrenages hélicoïdaux et sont souvent classés comme hélicoïdaux. Des engrenages hélicoïdaux croisés sont utilisés pour transmettre le mouvement d'un axe à l'autre quand

ces axes ne sont pas parallèles et ne se croisent pas. La puissance est transmise par une action coulissante. Et parce qu'ils sont relativement peu coûteux, ces engrenages sont souvent employés pour transmettre un peu de puissance par les axes non-concourants placés selon n'importe quel angle.



Figure 1.9 : Engrenages hélicoïdaux d'axes croisés [www.gmc.ulaval.ca Mars 2004]

Les engrenages hypoïdes : les engrenages hypoïdes ressemblent aux engrenages coniques en spirale sauf que les dents sont asymétriques ; c'est-à-dire, l'angle de pression de chaque côté de la dent est différent. Plusieurs des mêmes machines utilisées pour fabriquer les engrenages coniques en spirale peuvent également être utilisés pour fabriquer des hypoïdes.



Figure 1.10 : Engrenages hypoïdes [www.gmc.ulaval.ca Mars 2004]

1.2.3 Matériaux

Comme il a été mentionné précédemment, les engrenages sont utilisés pour transmettre la puissance entre les arbres. Quoique généralement les engrenages soient fabriqués en métal, on peut, dans les cas où la puissance transmise est faible, choisir des matériaux plastiques [www.psrc.usm.edu Mars 2004].

Les plastiques sont des matériaux formés par de longues chaînes moléculaires. Ces matériaux se différencient des métaux par un relativement faible module d'élasticité, une plus faible résistance à la rupture, un comportement viscoélastique et une conductivité thermique plus basse. Par contre, ils ont l'avantage, par rapport aux métaux, d'être plus légers, d'avoir un faible coût de production par la possibilité de moulage par injection et une bonne lubrification [Georges Jean-Marie 2000].

Plus précisément, quelques matériaux plastiques et leurs caractéristiques seront énumérés comme le Nylon, l'Acétal et le polyéthylène UHMW.

Tableau 1.1 : Types d'utilisation de quelques matériaux composites [Clifford 1986]

Structural/mécanique	Usage courant (non structural)
Acétal	Acétal
Nylon	Nylon
Polyester (thermoplastique)	Polyester (thermoplastiques)
Polyamide	Polyamide
Polycarbonate	Polyuréthane
Sulfure de Polyphénolène	Polyéthylène d'UHMW

Acétal : Les acétals sont caractérisés par :

- Une haute résistance mécanique, rigidité, dureté
- Une haute technologie avec la stabilité dimensionnelle exceptionnelle due à l'absorption de faible humidité
- Une résistance au fluage et à la fatigue de vibration
- Un bas coefficient de frottement
- Une résistance élevée à l'abrasion et aux produits chimiques
- Une maintenance de leur efficacité même quand ils sont immergés dans l'eau chaude
- Une basse tendance à se soumettre à une contrainte

Nylon : Les nylons sont caractérisés par :

- Une haute résistance mécanique, rigidité, dureté
- Une bonne résistance à la fatigue
- Un haut pouvoir amortissant
- De bonnes propriétés de glissement
- Une excellente résistance à l'usure
- Un bas coefficient de frottement

Il est important de signaler que les nylons ne possèdent pas de limite d'endurance en fatigue. Le nylon le plus couramment utilisé pour la réalisation de roues dentées est le nylon 6-6.

Polyéthylène (UHMW) : Les polyéthylènes sont caractérisés par :

- Des catégories à grande variété
- Les types de faible densité sont flexibles et durs
- Les types moyens et à haute densité sont plus forts, plus durs et plus rigides
- Un poids léger
- Une facilité à être traités
- Leur coût réduit
- Une stabilité dimensionnelle faible et une bonne résistance thermique à la chaleur
- Une excellente résistance chimique.

1.3 PROBLÉMATIQUE

Les activités reliées à la problématique portent sur l'analyse expérimentale et sur la conception de systèmes mécaniques. Les problèmes posés par ces systèmes mécaniques sont liés soit à leur comportement cinématique et dynamique, soit à leur résistance [www.gmc.ulaval.ca Mars 2004].

Les principaux problèmes posés sont les suivants :

- Manque de logiciels appliqués aux systèmes mécaniques, de méthodes et techniques en particulier; la modélisation du processus de conception; le choix et le pilotage automatique des algorithmes; la représentation de forme et l'optimisation par la méthode des éléments finis et éléments finis de frontière (MEFF) en mécanique non linéaire (frottement, lubrification et plasticité).

- Prix de la fabrication et l'utilisation des matériaux composites.
- Le bruit et l'usure des engrenages surtout durant le contact à sec et en régime lubrifié (frottement de glissement/roulement).
- La caractérisation en tribologie, la modélisation du comportement thermomécanique des engrenages, les problèmes de contact.

1.4 BUT DE LA RECHERCHE

Ce projet vise à modéliser en Conception Assistée par Ordinateur (CAO) la géométrie des engrenages en plastique, à caractériser leur usure et leurs caractéristiques de frottement de roulement/glissement et à analyser le comportement des engrenages en fonction de la combinaison des matériaux, des conditions de fonctionnement et des diverses conditions de géométrie.

L'objectif de cette recherche est d'étudier les caractéristiques de tribologie des engrenages, en tenant compte de frottement du glissement/roulement, leur comportement thermomécanique incluant une approche qui nous aide à modéliser numériquement, à avoir une bonne méthode pour la fabrication des engrenages qui évite le plus possible les erreurs qui peuvent apparaître lors de la fabrication, en utilisant des logiciels.

1.5 COMPOSITION DU MÉMOIRE

Après avoir défini les objectifs et la méthodologie à suivre pour cette recherche, ce mémoire est composé en quatre parties:

La première partie, concerne les caractéristiques d'usure et de frottement de matériaux plastiques et composites ainsi que les contraintes des engrenages en plastique.

La deuxième partie, est la revue de littérature bibliographique dans lequel il sera traité de la tribologie des engrenages plastiques en général ainsi que les différentes théories existantes sur le frottement et l'usure. Les caractéristiques d'usure et de frottement de matériaux plastiques et composites seront aussi présentées.

La troisième partie, traite de l'analyse des résultats expérimentaux ainsi que la méthode de modélisation utilisée à l'aide du logiciel de CAO SolidWorks.

La quatrième et dernière partie est la modélisation sous CAO de la géométrie des dents des engrenages [Drouin G. 1986]. Des résultats y sont présentés sous forme graphique montrant l'évolution du coefficient de frottement en fonction des différents essais. Et nous retrouvons aussi la conclusion générale.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE

2.1 PRÉAMBULE

De nombreuses études ont été faites pour réduire le poids et le bruit des systèmes mécaniques. Une des manières d'y parvenir consiste à utiliser des matières plastiques plutôt que l'acier dans les paires d'engrenages. Jusqu'à récemment, les logiciels de CAO utilisaient une représentation par surfaces pour représenter les objets. Dernièrement sont apparus les systèmes de modélisation solide 3D, remplaçant progressivement la modélisation surfacique pour définir la géométrie idéale des objets. Ceux-ci permettent de disposer des données nécessaires permettant de calculer les propriétés de l'objet conçu, de pouvoir l'analyser à l'aide de la méthode des éléments finis, de calculer ses interférences statiques et dynamiques, etc.

Le but de ce chapitre est de présenter une revue de la littérature des différents aspects de la tribologie des engrenages. Notre revue est divisée en plusieurs sections expliquant chaque étude séparément.

2.2 RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Les travaux se présentent comme suit :

1. Frottement de glissement entre polymères et l'acier en contact sur une ligne [Batail et Yelle].

Cette étude a permis de déterminer la valeur du coefficient de frottement de divers polymères en contact entre eux-mêmes, sur d'autres polymères et sur l'acier en fonction de la charge et de la température. Le frottement a lieu sur une ligne de contact entre la génératrice d'un cylindre et un plan sans lubrification.

Des tests et des études expérimentales en laboratoire ont été faits afin de donner des résultats sous forme de représentation graphique montrant l'évolution du coefficient de frottement des différentes combinaisons étudiées en fonction de la température pour les deux charges.

H.Yelle et al. ont modélisé le coefficient de frottement en fonction de la charge et de la température avec des équations de régression de type :

$$f(F_N, \theta) = k + a.F_N + b.\theta + c.F_N^2 + d.\theta^2 + e.F_N.\theta + g.(F_N.\theta)^2 \quad (2.1)$$

Où

F_N : force normale

θ : température mesurée

k, a, b, c, n, d, e, f, g : sont des coefficient à déterminer

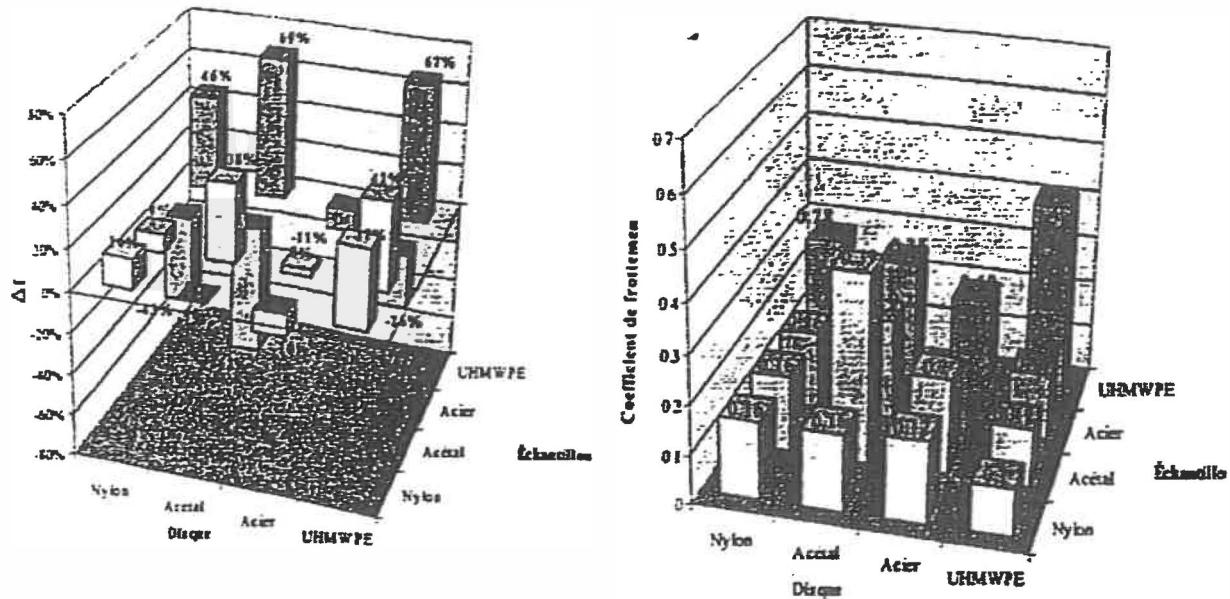


Figure 2.1 : Influence de la température (en haut à gauche) [Batail et Yelle]

Remarque : Ces graphiques montrent l'évolution du coefficient de frottement des différentes combinaisons étudiées en fonction de la température des échantillons pour deux charges différentes. Ces courbes indiquent la moyenne arithmétique du coefficient de frottement sur trois essais de trois différentes valeurs de température.

On remarque que le coefficient de frottement entre deux polymères varie avec la température. Dès que l'acier est présent, le coefficient de frottement baisse contrairement à la température qui augmente.

Il existe d'autres résultats qui malheureusement ne sont pas assez clairs pour être présentés. Ces résultats ont été obtenus en prenant comme valeur de la charge 8 N au lieu de 4.

2. Influence du rapport de conduite et de la géométrie de denture sur le comportement à l'échauffement et à l'usure des engrenages en plastique. [Koffi et al. 2000]

L'objectif de cet article est de mettre en valeur l'influence de la température et de l'usure sur le rapport de conduite et sur la géométrie de denture ainsi que sur la combinaison des engrenages en fonction des matériaux en présence dans la paire de roues dentées.

D. Koffi et al. présentent une base de données expérimentale dans laquelle sont présentés différents paramètres concernant les engrenages tels que :

- La forme de géométrie de denture
- Le rapport de conduite
- Les matériaux utilisés

L'étude comparative du comportement des diverses géométries et rapports de conduite pour des combinaisons de matériaux variées a amené à utiliser une méthode de caractérisation du comportement développée et validée par une étude de sensibilité.

L'analyse des résultats à l'aide de la méthode de caractérisation a permis d'établir un ordre comparatif dans le comportement à l'échauffement, à l'usure et dans le comportement combiné, mettant en évidence la géométrie de denture et le rapport de conduite (tableau 2.1). Il ressort de cette analyse que, lorsque toutes les conditions concernant les combinaisons réunies de matériaux et la position relative des roues de la

paire sont maintenues égales, le comportement se dégrade de façon générale selon l'ordre présenté dans le tableau 2.1 ci-dessous :

Tableau 2.1 : Différentes géométrie utilisées pour l'étude des comportements de combinaison des engrenages. [Koffi et al. 2000]

Approche	Retrait	Retrait avec denture normalisée	Retrait avec denture non normalisée
50 %	NA	50 %	NA
50 %	NA	NA	50 %
NA	100	NA	NA
100	NA	NA	NA

L'ordre comparatif des résultats de la classification suivant l'échelle de performance, joint au pointage moyen de chaque géométrie effectué entre les géométries étudiées permet de rendre compte de l'influence de la géométrie sur le classement des paires de matériaux. L'ordre est présenté comme suit :

- a) Comparaison 50 – 50 standard et 50 – 50 non standard
- b) Comparaison 50 – 50 non standard et 100% approche
- c) Comparaison 50 – 50 non standard et 100% retrait
- d) Comparaison 100% approche et 100% retrait

3. Étude du comportement des engrenages en matières plastiques lorsqu'ils s'engrènent avec un pignon (Zn – 27 % Al). [Ghamraoui et al. 200]

M. C. Mustapha Ghamraoui en 1985 a effectué des études dont l'objectif était d'évaluer les performances en fatigue des engrenages cylindriques droits en matières plastiques lorsqu'ils s'engrènent avec un pignon de Zn – 27 % Al.

Le but de son travail est d'évaluer l'effet de la conductibilité thermique de l'engrenage de métal dans une paire d'engrenages plastique/métal. Pour ce faire, des essais de fatigue sont effectués à sec sur une paire d'engrenages plastique / (Zn – 27 % Al) et les résultats sont comparés à ceux obtenus pour une paire d'engrenages plastiques/acier.

Ces résultats obtenus démontrent que les engrenages en Polyéthylène (UHMW) et en nylon 6.6 ont une meilleure capacité de charge lorsqu'ils sont engrenés avec un pignon de Zn – 27 % Al plutôt qu'avec un pignon d'acier.

4. La température et la contrainte résiduelle dans un engrenage moulé par injection.

[Kansal et al. 2001]

Les études réalisées dans cet article sont basées en particulier sur les engrenages moulés par injection. Cet article étudie la distribution de la température et la contrainte thermique résiduelle afin d'aboutir à un résultat qui conclut que quand le refroidissement commence, les contraintes dans les engrenages sont maximum aux coins des dents, mais tant que le refroidissement progresse, ils s'avèrent être maximum à la base des dents. On observe également que les contraintes radiales et tangentialles sont élevées au départ, mais qu'elles varient en fonction du refroidissement. Il est à noter que les contraintes

tangentialles sont de tension au centre de l'engrenage, mais qu'elles sont en compression au-dessus des dents, au profil et au centre des dents. Les contraintes de cisaillement sont négligeables tout le long du profil de l'engrenage, mais elles sont nulles suivant la ligne centrale. On remarque que dans ces engrenages les efforts tangentiels sont à quelques endroits plus grandes que les contraintes radiales. Mais cela n'est pas toujours le cas puisqu'à d'autres endroits on remarque le contraire.

5. Frottement de glissement entre polymère et acier. [Koffi et al. 2001]

Cette étude a permis d'évaluer le coefficient de frottement entre les polymères et l'acier en fonction de la charge et de la température en contact sec sur une ligne.

Les tests expérimentaux ont été faits en utilisant trois polymères et un acier :

- Polyamide, nylon 6/6 (N) ;
- Acétal homopolymère (A) ;
- Polyéthylène à très haut poids moléculaire, UHMWPE (U) ;
- Acier au carbone, G10100 (S)

Les résultats sont donnés sous forme de graphiques montrant l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la température (23°C , 60°C et 120°C).

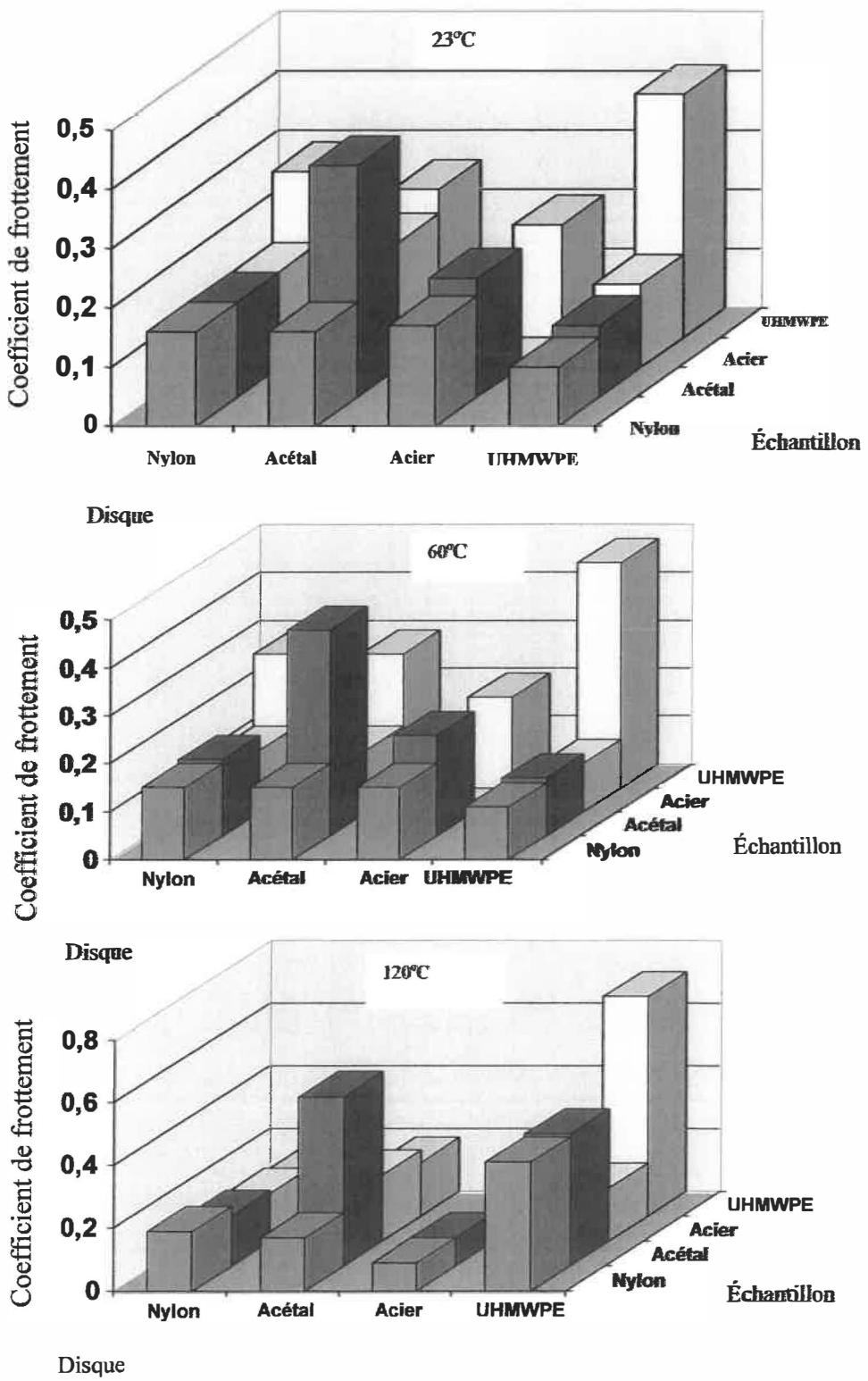


Figure 2.2 : Évolution de coefficient de frottement en fonction de la température

[Koffi et al. 2001]

Les résultats montrent que si les matériaux sont de natures différentes et que U n'est pas très chaud alors le coefficient de frottement de toutes les paires testées sont relativement faibles. Les paires qui possèdent les plus faibles coefficients de frottement quelle que soit la température sont U/N, U/S, et N/S (de 0.09 à 0.16). Celles qui possèdent les coefficients de frottement les plus élevés sont A/A et U/U (de 0.4 à 0.7).

6. Le rapport des caractéristiques de bruit et de la couche déformée moulée des engrenages en plastique. [Shoji et al. 2001]

Les engrenages en plastique étudiés dans cet article ont deux couches différentes, la couche à l'intérieur ayant une structure semi-cristalline celle à l'extérieur étant amorphe. Cet article étudie le rapport entre les caractéristiques du bruit et les couches. On remarque que ce rapport diffère en général d'une couche à l'autre et dans ce cas-ci de la couche semi-cristalline à la couche amorphe. La dureté de ces différentes couches est affectée par les caractéristiques du bruit. Généralement, les engrenages en plastique moulés par injection sont opaques, par conséquent, quand ils sont moulés à l'intérieur d'un moule en métal, la vitesse de refroidissement diffère localement dans ce moule. Il est impossible de voir la polarisation même en utilisant un microscope sauf si une dent est coupée à une certaine épaisseur dans la section droite. On pourra donc employer une double réfraction de deux facteurs; un de ces facteurs est la contrainte résiduelle qui se produit lorsque le plastique répète l'expansion et le rétrécissement tout en moulant. Les auteurs ont établi qu'il existe une relation entre le bruit et l'usure de la couche déformée moulée. Grâce à cette analyse, on a constaté que l'usure de la dent et l'amplitude du bruit différaient de la couche déformée moulée semi-cristalline à celle amorphe. Les résultats ont montré la

contrainte adéquate et les données de conception de bruit à utiliser pour fabriquer des engrenages en plastique moulés par injection plus durables.

7. Étude comparée du comportement à l'usure des engrenages en plastiques et des éprouvettes d'essai normalisé de tribologie. [Koffi et al. 2003]

Cette étude a pour but de comparer les résultats expérimentaux obtenus pour la caractérisation du comportement d'usure d'engrenages en plastiques par la perte de couple avec ceux obtenus sur les éprouvettes lors d'essais normalisés de tribologie par la mesure de la perte de masse.

Des tests ont été réalisés sur le nylon (N), l'acétal (A), le polyéthylène (U) et l'acier (S) en faisant tourner des éprouvettes sur un tribomètre « PLINT PARTNER ». Selon leur tenue à l'usure en fonction de la perte de couple, les engrenages peuvent être classifiés en trois catégories comme suit :

Bon : $\text{perte} < 10\%$; moyen : $10 \leq \text{perte} < 30\%$; mauvais : $\text{perte} \geq 30\%$;

La comparaison établie à partir de la mesure de la perte de masse lors d'un essai normalisé de tribologie tel que celui du frottement en contact avec le roulement et le glissement combinés permet de retrouver pratiquement les mêmes résultats relatifs à la tenue à l'usure mesurée par la perte des couples sur les engrenages.

2.3 SYNTHÈSE

Dans la pratique, les situations tribologiques sont souvent complexes. Les paramètres importants sont nombreux, peu ou moins connus, difficiles à mesurer et donc à maîtriser.

Dans la littérature, présentée ci-dessus, chaque auteur réalise les expériences sur les

engrenages d'une manière différente en prenant en considération comme paramètre essentiel : le coefficient de frottement, son évolution par rapport à d'autres contraintes (température, charge, etc.). Par ailleurs, la validité des simulations et des procédures d'essais qui sont employés pour déterminer le coefficient de frottement devient un des problèmes les plus importants, cela dû à leur complexité. La plupart des études actuelles et passées sont basées sur des essais et des expériences de type sphère/plan et cylindre/plan, qui permettent d'effectuer certains calculs. Les résultats obtenus sont propres au type et à la géométrie de denture. Ces types d'expériences sont considérés suivant deux régimes différents à savoir : sec et lubrifié.

De nombreuses mesures expérimentales du coefficient de frottement ont été faites en faisant varier la température de surface de contact du matériau. De nombreux essais ont été réalisés afin de déterminer la meilleure combinaison pour obtenir les meilleurs résultats. Suite à ces tests, plusieurs matériaux ont été utilisés et des couples tribologiques ont été formés par paire grâce à certains plastiques polymères et à un matériau en métal.

L'objectif de cet article est d'étudier les caractéristiques du frottement des éprouvettes de polymères différents pour ainsi analyser leur comportement en fonction de la combinaison des matériaux et des diverses conditions de fonctionnement. Il faut pouvoir montrer l'évolution du coefficient de frottement par rapport à certains paramètres et la comparer avec des résultats antérieurs.

Le choix est commandé par le manque d'informations sur les caractéristiques tribologiques des combinaisons de matériaux déjà étudiés pour les engrenages. L'étude

entreprise dans la recherche actuelle s'intéresse aux conditions de roulement / glissement combiné programmé pour s'approcher des engrenages.

Ensuite une étude sur la modélisation CAO de la géométrie des dents des engrenages sera effectuée afin de proposer une méthode de modélisation en utilisant le logiciel SolidWorks pour faciliter ultérieurement la prévision du comportement thermomécanique en situation d'usure.

CHAPITRE 3

PRINCIPE DU FROTTEMENT ET D'USURE

De plus en plus présent dans les petits actionneurs électromécaniques utilisés dans l'automobile, la domotique, etc., l'engrenage plastique est devenu incontournable. Cet intérêt grandissant se traduit par le nombre d'études qui lui sont consacrées ; comportement des engrenages en service (usure, échauffement, bris thermiques, mécanismes rupture), modélisation de la distribution de charge pour le calcul des dentures en flexion, conception par des règles simples. Le procédé n'est pas en reste avec : l'influence de l'injection sur leur tenue, les recommandations sur le moulage des petits modules, les règles de calcul des retraits et la tenue à la rupture et à l'usure (qui est le point faible des engrenages) des matériaux biodégradables.

La science et la technologie des surfaces solides en contact (Tribologie en grec signifie science du frottement) traitent des multiples aspects de frottement, de la lubrification, de l'usure et de l'adhérence [Cartier et al. 2000]. Dans certains domaines industriels (agro alimentation, médicale, nucléaire, etc.), la présence de lubrifiants est à proscrire et comme la plupart des lignes de production utilisent des systèmes de transmission par engrenages, il a fallu avoir recours à des engrenages non lubrifiés à l'huile ou à la graisse.

Il existe principalement trois solutions adoptées :

- ➔ Le contact métal – métal
- ➔ Le contact polymère – polymère
- ➔ Le contact métal – polymère

Compte tenu du jeune âge de la technologie de production des engrenages en plastiques et de la complexité de l'étude de la dynamique de l'engrènement, les concepteurs possèdent des données limitées sur la tenue thermomécanique et le comportement à l'usure des engrènements en plastique. Afin de pallier ce manque, les concepteurs se fient plutôt à des mesures découlant d'études expérimentales portant sur les engrenages pour le choix du meilleur matériau plastique. Par ailleurs, ce choix de matériaux basé sur des essais pratiques ne permet en aucun cas de mettre en évidence la contribution du rapport de conduite et de la géométrie de denture à la variation du comportement à l'échauffement et à l'usure de ces engrenages. Et entre autres, la validité des simulations et des procédures d'essais qui sont employés pour déterminer le coefficient de frottement devient un important problème, en particulier lorsque la géométrie du contact doit être considérée. La plupart des études actuelles et passées sont basées sur des essais du type sphère/plan, cylindre/plan et sur la géométrie de contact qui permet certains calculs. Les résultats sont donc propres à ce genre de géométrie.

Les zones d'application de ces engrenages sont plutôt limitées par la transmission de rotation même si la force des engrenages est faible et que souvent les dents sont soudainement usées avec une augmentation de couple. Ils ont plusieurs avantages en comparaison avec les engrenages en métal comme la légèreté, le bruit réduit, le bas prix de fabrication et le haut degré de liberté dans la géométrie des engrenages. Ils sont largement utilisés dans la plupart des photocopieurs, des télecopieurs et des imprimantes. Dans diverses applications, ils requièrent la connaissance des contraintes subies par les dents au cours du fonctionnement et de la température de ces dernières. La combinaison

des contraintes et la distribution de température permettent au concepteur -connaissant les limites du matériau utilisé- de prévoir les bris en fatigue de flexion et de surface ordinairement rencontrées dans les engrenages en acier et aussi le bris thermique spécifique aux engrenages en plastique.

La valeur de la chaleur de frottement associé au glissement entre les dents dépend de la grandeur de la force de frottement qui, à son tour, est liée à la charge normale transmise aux paires de dents en contact.

Malgré leurs multiples avantages, les matériaux plastiques possèdent une limitation notable : leur sensibilité à la température. Sous l'effet de la chaleur ils subissent une perte de leur rigidité, de leur résistance mécanique et de leur résistance à l'usure au fur et à mesure que la température se rapproche de la température de transition vitreuse ou de celle de fusion. La perte de rigidité entraîne une augmentation des erreurs de transmission, et par conséquent, une augmentation des vibrations, des charges dynamiques et du bruit. Le profil de denture universellement utilisé dans la fabrication des engrenages en plastiques est la développante de cercle à laquelle est associé inévitablement le frottement de glissement qui constitue la principale source de chaleur engendrée au cours de l'engrènement.

Le glissement étant inéluctable, le seul paramètre sur lequel le concepteur a une emprise est le coefficient de frottement. En absence de lubrification, il est bien connu que la combinaison des matériaux dans une paire tribologique a une importance sur le

coefficient de frottement. Aussi le comportement à l'échauffement et à l'usure dépend-il de la combinaison de matériaux dans la paire de roues dentées.

3.1 THÉORIE DE FROTTEMENT

Des études ont été faites concernant la détermination de la valeur du coefficient de frottement de divers polymères en contact entre eux-mêmes, avec d'autres polymères et avec l'acier en fonction de la charge et de la température.

Des équations de régression développées à partir des résultats expérimentaux permettent de calculer le coefficient de frottement à partir de la température et de la charge.

La relation entre frottement et adhésion est au centre des questions que soulève la tribologie depuis longtemps, et les idées imaginées par d'illustres scientifiques restent d'actualité. Les théories les plus anciennes sont celles de Léonard de Vinci (1500), Amontons (1699), Bélidor (1737), Euler (1748) et Coulomb (1780) (pp 82, frottement, usure et lubrification). Les matières plastiques les plus couramment utilisées pour les engrenages sont l'acétal (polyoxyméthylène), le nylon (polyamide), le polyéthylène à très haut poids moléculaire (HUMWE) et le polytétrafluoroéthylène (PTFE). Ces matériaux peuvent être renforcés avec des additifs tels que la fibre de verre ou de carbone. Ils possèdent des propriétés tribologiques intéressantes. Cependant, leur résistance mécanique se dégrade rapidement à des températures relativement basses.

Dans l'application des engrenages, c'est le frottement de glissement qui est la principale cause de l'élévation de la température. La température du matériau atteint sa valeur maximale seulement sur une mince épaisseur, car les polymères sont de mauvais conducteurs thermiques et l'évacuation de la chaleur se fait principalement par convection entre les surfaces.

3.2 PROBLÈMES DE FROTTEMENT

Depuis toujours, il existe certains problèmes concernant le frottement; on peut en présenter quelques uns comme suit :

1. La répartition de charge se fait en quelques points seulement de la surface portante
2. Les efforts exagérés aménagent les matériaux dans les premiers instants d'un frottement dans le sens d'une extension des aires d'appui
3. La géométrie des dessins de définition ne prévoit pas les surfaces réelles d'une pièce mécanique
4. Sur ces points d'appui géométriques se produit un effort d'autant plus considérable que les surfaces réelles sont plus restreintes
5. La température peut atteindre le point de fusion de l'un des matériaux (plastiques) de façon ponctuelle et ces élévations de température engendrent instantanément des phénomènes physiques (fusion, diffusion) et des phénomènes chimiques (solutions solides, oxydations)

6. La charge ne se répartit effectivement que sur un petit nombre d'arêtes ou des pics, qui sont arrachés et décapités par le déplacement relatif dans les zones d'appui des deux pièces en frottement (phénomènes plastiques)
7. La fatigue cyclique du derme dissipe de l'énergie et crée des résistances au mouvement ; les valeurs relatives de ces résistances et de la charge d'appui définissent les coefficients de frottement
8. Il naît de ces résistances une certaine quantité de chaleur qui ne se répartit pas d'une façon égale entre les deux corps ; on verra intervenir des caractéristiques physiques telles que la densité, la conductibilité thermique et la capacité calorifique
9. Le contact de deux surfaces ne pouvant être ponctuel, puisque les pressions seraient énormes, entraîne des déformations hertzienques qui touchent les couches profondes.

3.2.1 Variables intervenant dans le frottement

3.2.1.1 Coefficient de frottement

Les caractéristiques de frottement sont couramment décrites par deux coefficients de frottement : statique (μ_s) et cinétique (μ_k). C'est le second qui est le plus employé. De nombreuses études expérimentales du coefficient de frottement des plastiques ont déjà été présentées par différents chercheurs (Yukisaburo YAMAGUCHI). Le coefficient de frottement dynamique, dans un glissement à sec (sans lubrification), est affecté par un nombre de paramètres plus important que le coefficient de frottement statique et a peu de signification sans une définition précise des conditions de frottement.

Les principaux paramètres qui interviennent sont :

- ✓ La structure interne
- ✓ La pression de contact
- ✓ La vitesse de glissement
- ✓ La température et l'humidité
- ✓ La rugosité de surface
- ✓ Le matériau au contact.

L'influence de la structure a déjà été analysée. La figure 3.1 [Yamaguchi 2000] donne un exemple de la relation entre μ_k et la pression de contact (figure 3.1). La valeur de μ_k décroît lorsque la pression de contact augmente pour tous les plastiques, comme le prévoit la théorie. La température et la rugosité de surface semblent être affectées par la vitesse de glissement, la pression de contact et la durée du frottement. La figure 3.2 [Yamaguchi 2000] présente, pour un couple de frottement : polyamide – acier, les relations entre μ_k ou la température θ et la durée de frottement pour chaque vitesse de glissement. Il se peut que μ_k dépende davantage de la température tandis que la durée et la vitesse de glissement interviennent de façon plus complexe à cause de la discontinuité liée à la température de transition vitreuse T_v .

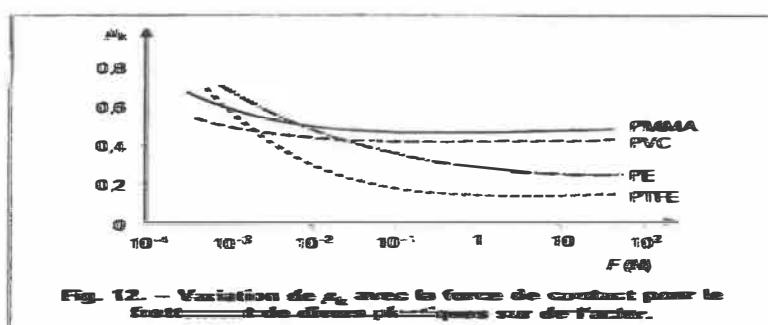


Figure 3.1 : Variation de μ_k avec la force de contact pour le frottement de divers plastiques sur de l'acier [Yamaguchi 2000]

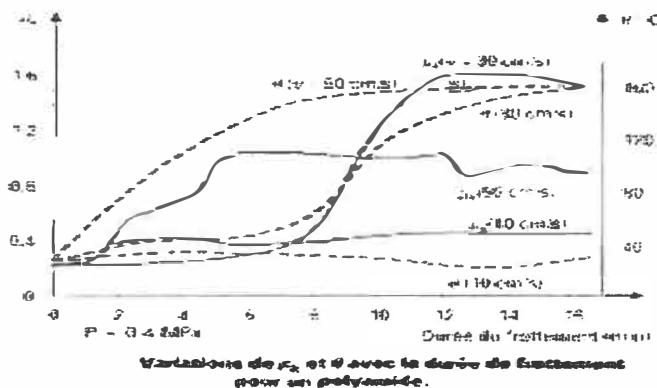


Figure 3.2 : Variation de μ_k et θ avec la durée de frottement pour un polyamide

[Yamaguchi 2000]

Dans ce sujet, R.Batail (stagiaire en mécanique), H.Kioua (étudiant au doctorat de mécanique) et M. H.Yelle (professeur au département de génie mécanique, École polytechnique de Montréal) ont effectué des études ainsi que des expériences qui ont été conduites afin de déterminer l'évolution du coefficient de frottement de polymères (Nylon 6/6, Acétal OM et UHMWE) et de l'acier (A304) en fonction de la charge et de la température en contact sur une ligne. Leur article « Frottement de glissement entre polymères et l'acier en contact sur une ligne » a donné des résultats sous forme de graphiques montrant l'évolution du coefficient de frottement des différentes combinaisons étudiées en fonction de la température θ_c pour les deux charges. On montre par la suite des courbes qui indiquent la moyenne arithmétique du coefficient de frottement sur trois essais examinés (figure 3.1 ; 3.2).

D'autre part, M. Yukisaburo YAMAGUCHI (Professor Emeritus, Kogakuin University, Tokyo), dans son article « Frottement » [Yamaguchi 2000], se base sur la théorie

désignée par adhérence – cisaillement et celle fondée sur l'énergie de surface qui ont été évoquées à propos du frottement de glissement. Ces expériences ont été effectuées à sec, ce qui est le plus courant pour les plastiques. [Yamaguchi 2000]

3.2.1.2 La charge et son influence

La charge est le facteur déterminant du comportement mécanique des matériaux frottant, puisqu'elle régit l'ensemble du réseau de contraintes superficielles au contact : contraintes normales dues aux seules forces d'appui, et contraintes tangentielles correspondant à la résistance du déplacement (coefficient de frottement). Après certaines études effectuées il était possible de démontrer une large dépendance entre la charge normale et le coefficient de frottement. Par ailleurs, la charge influe :

- d'une part sur le comportement du troisième corps et notamment la lubrification, l'agressivité des particules abrasives éventuellement présentes à l'interface (contraintes superficielles au contact abrasif/surface)
- d'autre part sur les possibilités de liaisons d'origine chimique et/ou métallurgique entre les corps (adhésion) qui sont liées à la dégradation des films superficiels, à l'accroissement de l'aire de contact, ainsi qu'à la température (produit $P \times V$)

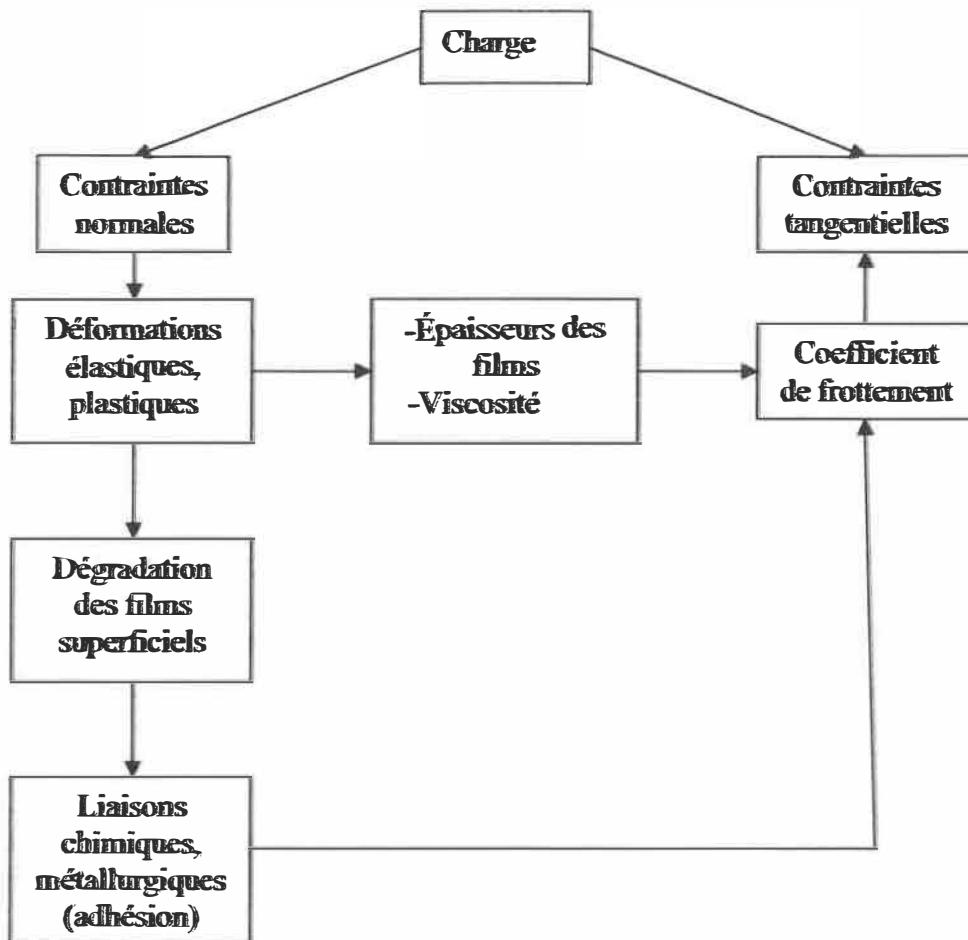


Figure 3.3 : Représentation schématique de l'influence de la charge [Cartier et al. 2000]

3.2.2 Échauffement dû au frottement

Le mouvement relatif de deux solides en contact crée une énergie qui se transforme en chaleur. Cette chaleur se dissipe à partir de la zone de contact, principalement dans les solides. Elle est susceptible de modifier les propriétés physico-chimiques de deux corps et de leur phase inter-faciale, et donc de modifier les mécanismes d'usure mis en jeu.

Pour déterminer la température de surface, il faut imaginer comment est distribuée la chaleur à partir de l'interface où elle est engendrée et comment elle s'écoule dans les volumes. La température de surface telle qu'elle est généralement définie, est déterminée à partir de la somme de tous les échanges élémentaires et aléatoires d'énergie au niveau de l'interface. Pour une quantité de chaleur Q générée, il pénétrera la quantité $Q_1=CP.Q$ dans le premier corps et $Q_2= (1-CP).Q$ dans le second. Le coefficient CP est appelé coefficient de partage. Cependant, la chaleur générée par frottement apparaît. Il faut donc introduire l'effet de la vitesse.

De nombreux travaux ont été effectués sur ce sujet depuis BLOCK en 1937. Mentionnons C.Jeager, P.Bowden, D.Tabor, et W. Wine. Les plus récents sont dus à S.Lim et M. Ashby et ils datent de 1988 [Jean-Marie 2000]. Il existe peu de résultats expérimentaux relatifs à la mesure de la température de surface lors du frottement. Ce manque d'information est surtout causé par l'inaccessibilité du point de mesure. Mais quelques résultats assez intéressants ont quand même été obtenus. Citons en l'occurrence CZICHOS qui, dans son ouvrage, illustre les principales techniques de mesure des températures d'intérêt (la température de surface en particulier). Il s'agit principalement de thermocouple et de pyromètres à infra rouge placé à proximité de la zone de contact. Les recommandations générales qui suivent sont utilisables pour, d'une part réduire les échauffements au contact et d'autre part maîtriser les effets indésirables de la température sur les propriétés de frottement et la tenue à l'usure des matériaux ; sont plus particulièrement concernées sous cet aspect les modifications dimensionnelles,

métallurgiques, physiques, chimiques qui entraînent par exemple: le rattrapage des jeux; un abaissement des caractéristiques mécaniques : dureté, résistance à la rupture, etc.; un changement d'état (solide → pâteux → liquide); une décomposition pouvant entraîner la dégradation partielle ou complète des matériaux.

- ✓ **Réduction des températures de contact** : abaisser le produit $p \times v$, le coefficient de frottement
- ✓ **Évacuation de la chaleur du contact** :
 - Jouer sur les propriétés des matériaux : la chaleur générée au contact est répartie entre les deux corps proportionnellement au coefficient $\sqrt{\lambda cd}$ de chacun des deux matériaux où λ est la conductibilité thermique, c la capacité thermique massique et d la densité
 - Jouer sur les conditions d'affectation des matériaux
 - Utiliser le pouvoir caloporeur de l'ambiance : amélioration de la lubrification, accroissement du débit de lubrifiant... [Jean-Marie 2000]

Ce paramètre qui est globalement abordé ici en prenant en compte indistinctement les élévations de température dues au frottement et l'ambiance de fonctionnement, a de multiples effets dont les principaux sont récapitulés dans le tableau 3.1. Un certain nombre d'entre eux ont une incidence généralement défavorable sur les propriétés de frottement et la résistance à l'usure, par exemple tous ceux conduisant à une dégradation des propriétés mécaniques ou physiques des matériaux, des lubrifiants. D'autres effets

peuvent avoir des conséquences éminemment variables, comme l'illustrent les exemples signalés dans le tableau 3.1.

Ainsi par exemple :

- ✓ Dans le cas de lubrifiants, les transformations physico-chimiques peuvent concerter les phénomènes allant de la dégradation thermique (carbonisation) de la base lubrifiante, à la formation de films superficiels favorables résultant de la réaction des additifs
- ✓ Dans le cas général de l'oxydation, le comportement en frottement dépend de la nature des oxydes formés. Ainsi, les caractéristiques tribologiques d'un matériau sont susceptibles d'évoluer brutalement avec la température, le seuil de transition correspondant à la modification du type d'oxyde
- ✓ Les réactions chimiques entre les matériaux, qui constituent une des causes possibles de l'adhésion, peuvent aussi avoir une influence favorable dans le cas où l'association des matériaux est propice à la génération de composés ou films réactionnels améliorant le frottement.

Tableau 3.1: Influence de l'accroissement de la température sur les propriétés tribologiques. [Cartier et al. 2000]

Effets	Conséquences possibles
Dilatations	- Distorsions géométriques - rattrapage de jeux
Altération des caractéristiques mécaniques des matériaux (chute de dureté, relaxation des contraintes résiduelles de compression...)	- dégradation plastique des films superficiels - Usure d'origine mécanique - fluage...
Désorption -évaporation des films absorbés (lubrifiants)	- Augmentation du coefficient de frottement
Diminution de la viscosité des lubrifiants	- Diminution du domaine de stabilité des films lubrifiants
Interactions métallurgiques - diffusion entre les matériaux	- Adhésion
Transformation structurale (changements de phase- recristallisation...)	- Dégradation ou bonification de certaines propriétés des matériaux (coefficient de frottement, caractéristiques mécaniques...)
Transformations physico-chimiques- selon réactivité de l'ambiance - (oxydation - réaction des additifs des lubrifiants...)	- Dégradation des propriétés des matériaux lubrifiants ou - Formation de composés favorables
Fusion superficielle	- Augmentation de l'adhésion - transfert ou - Diminution de coefficient de frottement
Réaction chimique entre les matériaux	- Augmentation des liaisons inter faciales ou - Formation de composés favorables

3.2.2.1 Produit PxV

L'énergie mise en jeu dans le contact et qui est de la forme $E = Q \cdot V \cdot F$ (dans laquelle Q est la charge appliquée au contact, V la vitesse de déplacement et F le coefficient de frottement) donne une représentation approximative de la quantité de calories générées par frottement.

Le critère PxV admissible est un référentiel généralement employé pour estimer les conditions limites d'utilisation des matériaux à usage tribologique tels que les polymères, les lubrifiants solides, les frittés autolubrifiants...

Lors des expérimentations, Evans et Senior [Centre technique des industries mécaniques, 1993] ont pu constater que pour une faible vitesse de frottement, la pression maximale de contact pouvant être utilisée est limitée par l'aptitude au fluage de la plupart des matériaux plastiques. Dans le cas de faibles pressions, la vitesse devient limitée par l'impossibilité du polymère à évacuer une trop grande énergie thermique dissipée par le frottement.

Par exemple, on considère que le PxV maximum admissible de ces matériaux frottant à sec, est de l'ordre de 1 MPa m/s.

Sous la pression de contact P, avec la vitesse de glissement V et pendant un temps de frottement t, la valeur maximale de PxV au-delà de laquelle un plastique ne peut continuer de glisser normalement à cause du dégagement de chaleur $Pv\mu_k t$ est appelée valeur limite du facteur PV ou PV limite. [Georges Jean-Marie 2000]

3.2.2.2 Influence de la vitesse relative

Il est à noter que la force d'adhésion qui est la base du mécanisme de frottement des polymères solides ne semble pas dépendre de la vitesse de glissement, mais plutôt de la charge normale. La principale difficulté qui survient lors de l'étude de l'influence de la vitesse pendant le frottement est liée à l'impossibilité de séparer cet effet de celui de la température. Ludema Bahador et Tabor [Ludema Kenneth C 1996] ont étudié la relation entre les propriétés de frottement et le comportement viscoélastique des polymères. En contrôlant la température lors des essais, ils ont conclu à une dépendance entre le coefficient de frottement et la vitesse de glissement.

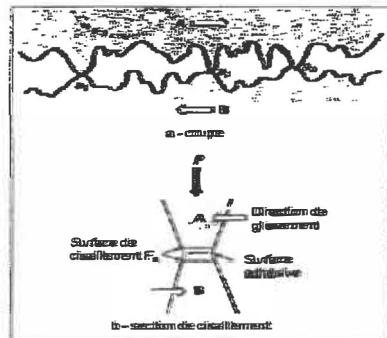


Figure 3.4 : Vue schématique macroscopique en coupe des surfaces de glissement en contact [Yamaguchi 2000]

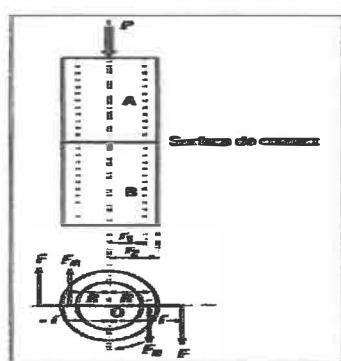


Figure 3.5 : Tribomètre Susuki [Yamaguchi 2000]

Dans certaines conditions seulement, le coefficient de frottement des polymères dépend très peu de la vitesse, ce qui est en accord avec la théorie d'adhésion.

Plusieurs auteurs déjà cités ont observé une augmentation du coefficient de frottement lorsque la vitesse de glissement croît dans un domaine compris entre 1 et 10 cm/s. Cette tendance est expliquée par l'augmentation de la surface de contact réelle.

3.2.2.3 Influence de l'ambiance

L'ambiance de fonctionnement qui caractérise l'environnement du contact (incluant bien évidemment le lubrifiant) joue un rôle à travers quatre composantes principales, dont les effets sont récapitulés dans le tableau 3.2.

Les effets de nature physico-chimique recouvrant un grand nombre de manifestations (tableau 3.2) correspondent à une transformation des matériaux, des surfaces et du milieu inter facial. Leurs conséquences sur les caractéristiques de frottement peuvent être reliées à différents facteurs allant de la composition des couches superficielles aux évolutions dimensionnelles, en passant par la rhéologie du troisième corps [Cartier et al. 2000].

Tableau 3.2 : Principaux paramètres caractérisant l'environnement.

[Cartier et al. 2000]

Paramètres	Effets
Températures	-Températures du contact (surfaces – troisième corps)
Composition – réactivité (associées à la température)	-Caractéristiques physico-chimiques des matériaux, des surfaces, du milieu interfacial
Propriétés physiques : -Viscosité -Conductibilité thermique- chaleur spécifique	-Séparation des corps -Évacuation des calories
Pollution (par abrasifs, débris d'usure...)	-Abrasif – érosion des surfaces (dégradation des états de surfaces, perte de cote) -Dégradation des films lubrifiants.

3.3 USURE

Dans le domaine de la tribologie, l'usure est une des conséquences du frottement. Elle correspond à une perte d'usage par suite de déformations plastiques, de fissuration ou d'un enlèvement de matière, d'un ou des corps en glissement.

Les causes possibles de l'usure sont extrêmement variées; les différents types de phénomènes pouvant intervenir, séparément ou simultanément, appartiennent à deux groupes de facteurs :

- Effets de l'environnement (atmosphère, lubrifiant, etc....)
 - Actions physico-chimiques dues à la composition du milieu,
 - Actions mécaniques induites par la nature, la propreté de ce milieu (par exemple caractère abrasif d'une ambiance polluée).

La diversité des formes et causes possibles d'endommagement des surfaces explique l'étendue des moyens d'action à disposition, par exemple en termes de matériaux.

3.3.1 Définitions et position du problème d'usure

Il est important de distinguer deux façons d'aborder les problèmes d'usure :

- On peut considérer **l'usure d'un système tribologique** constitué de deux corps, de l'environnement et du produit inter facial ou troisième corps. Dans ce cas, les phénomènes doivent être décrits à partir du comportement du matériau inter facial dont la présence et les propriétés sont primordiales, son comportement définissant la façon dont les premiers corps sont sollicités. On parle alors de vie du troisième corps, de débris d'usure, de débit de particules, de circuit tribologique (circulation ou non des particules perdues par le contact), etc.
- Une deuxième approche, complémentaire de la précédente, consiste à considérer **l'usure d'un corps frottant** soumis à des sollicitations tribologiques. On parle alors de réponse d'un matériau et de phénomène d'usure au sens classique du

terme. Il est bien évident que ce deuxième aspect n'a de sens qu'à partir du moment où le système est bien défini.

Dans cette partie on présentera principalement l'usure sous son aspect classique en considérant les phénomènes élémentaires responsables de la détérioration d'un corps en frottement. Les paramètres gouvernant l'usure sont souvent identiques à ceux pouvant influencer le frottement.

La nature, la structure cristallographique et les propriétés mécaniques des matériaux :

- L'état topographique, physico-chimique des surfaces frottantes (rugosité, couches d'oxydes, molécules absorbées...)
- La présence d'agents actifs en frottement (additifs anti-usure des lubrifiants...)
- La présence de films liquides de lubrifiant (cas de la lubrification hydrodynamique ou élastohydrodynamique).

3.3.2 Phénomènes élémentaires d'endommagement des surfaces

Sous l'effet des sollicitations tribologiques, une surface subit des modifications et endommagement dont les principales formes sont schématisées sur la figure 3.6.

Les endommagements peuvent être décrits simplement en faisant appel à un nombre réduit de phénomènes élémentaires mécaniques, physiques ou chimiques :

- Déformations plastiques, lorsque les contraintes créées par le contact glissant dépassent la limite d'élasticité; ces déformations plastiques induisent des modifications de géométrie des surfaces frottantes

- Fissurations, sous l'effet de contraintes dépassant la limite à la rupture ou le phénomène de fatigue
- Transformations physico-chimiques de surface, transformations structurales sans innovation de l'environnement ou réaction tribochimique entre les corps frottants et cet environnement
- Adhésion, entre les corps frottants, conduisant à la formation de transferts d'un des matériaux sur l'antagoniste.

Ces différents phénomènes élémentaires peuvent se produire simultanément ou successivement dans un contact donné. La description de la chronologie des événements correspond à celle d'un processus d'usure [Cartier et al. 2000].

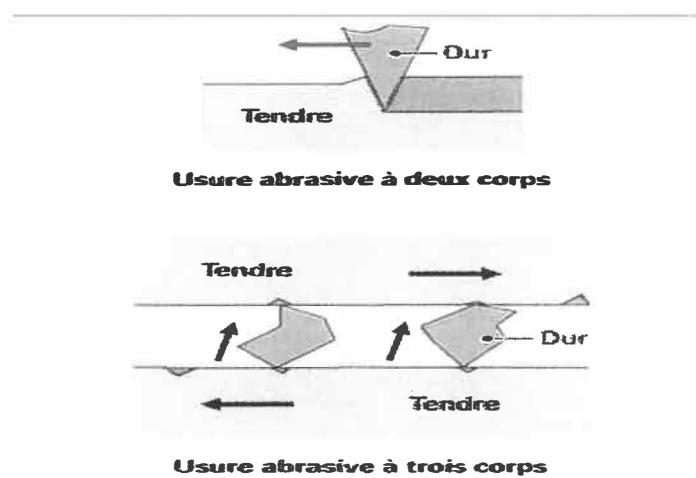


Figure 3.6 : Endommagement d'un corps frottant [Cartier et al. 2000]

3.3.3 Formes d'usure

A partir des phénomènes élémentaires qui viennent d'être évoqués, de nombreux processus d'usure ont été établis et peuvent être classés de différentes façons.

3.3.3.1 Classification empirique

Cette classification s'appuie sur un contact plutôt global du comportement du système frottant; on définit alors :

- L'usure **douce ou ultra douce** : le système s'use peu, les surfaces des corps restent lisses et la taille des particules émises ne dépasse pas quelques micromètres
- L'usure **sévère** : la durée de vie du système est réduite, les surfaces des corps sont profondément modifiées et les particules d'usure sont d'une taille pouvant dépasser 100 micromètres
- L'usure **catastrophique** : la durée de vie est très réduite; cette situation correspond le plus souvent à un grippage généralisé du système.

3.3.3.2 Classification technologique

Cette seconde classification s'appuie sur l'état de dégradation du système et sur le faciès (morphologie) des pièces usées. On parle alors de :

- **Grippage et microgrippage**, dans le cas où il y a un blocage de mécanismes par soudure ou un blocage de transfert d'un matériau sur l'autre. Il existe différents termes pour qualifier ce type de dégradation; en dehors du cas où l'avarie correspond au stade ultime du blocage, on parle de brunissage, scuffing

(gripping), scoring, galling (écaillage). On peut ainsi évoquer quelques exemples comme le scuffing des chemises de moteur à explosion, du scoring et du galling des engrenages et des roulements...

- **Piqûre, écaillage** : qui correspond à des pertes locales de matière sous forme d'écailles. Cet endommagement dû à un phénomène de fatigue du matériau est initié par les sollicitations répétitives exercées en cours de frottement et conduisant à une propagation de facteurs parallèles à la surface frottante; cette forme de dégradation est typique aux contacts soumis à des chargements cycliques avec des sollicitations de roulement, de choc ou de glissement en régime lubrifié (cames, engrenages, etc....) [Cartier et al. 2000];
- **Fretting – corrosion** : type d'usure associé à des oscillations tangentielles de faible amplitude se produisant lors d'un contact quasi statique en présence d'un milieu corrosif, et se manifestant dans sa phase finale par la création de débris qui agissent alors comme abrasif. Cette usure peut être rencontrée sur des pièces soumises à des vibrations, des assemblages frettés, des liaisons cannelées, etc.
- **Polissage** : qui correspond à une diminution importante de la rugosité initiale.

3.3.3.3 Classification scientifique

Cette dernière classification est basée sur la nature des phénomènes qui sont à l'origine des dégradations. Les cinq principaux types d'usure sont décrits ci-après, en distinguant ceux pouvant être initiés dans d'autres circonstances que le frottement proprement dit (usure par érosion, par cavitation).

3.3.4 Usures liées au frottement

3.3.4.1 Usure adhésive

Lorsque deux corps en contact sont en glissement, des jonctions élémentaires sont formées au niveau des points de contact sous l'effet du déplacement [Centre tech. des industries mécaniques 1993]. A un instant donné, la charge appliquée est supportée par l'ensemble des jonctions existantes. Au niveau de chaque jonction, des phénomènes d'adhésion peuvent se produire créant ainsi une liaison adhésive. La résistance mécanique de chaque jonction dépend de l'énergie localement dissipée; à l'extrême, une soudure peut être créée par une fusion des surfaces frottantes. Lorsque le mouvement se poursuit, la jonction est soumise à un cisaillement et deux situations peuvent alors exister :

- La jonction est peu résistante : les deux corps se séparent avec peu ou pas de modification;
- La jonction dispose d'une résistance mécanique supérieure à celle de l'un au moins des matériaux : il y a alors formation d'une fissure dans le corps le plus tendre ou le moins tenace, puis arrachement et transfert sur l'antagoniste. Ce cas est représenté sur la figure 3.7;

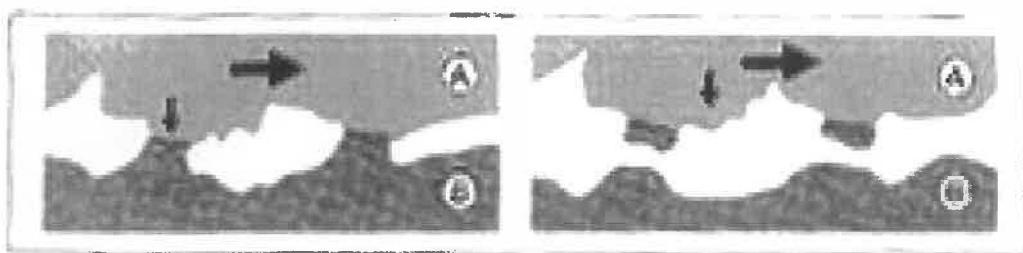


Figure 3.7 : Phénomène élémentaire de l'usure adhésive, formation de transfert.

[Cartier et al. 2000]

Le transfert initial peut ensuite évoluer et créer une dégradation plus importante par l'effet « boule de neige ».

Les particules d'usure sont dans ce cas de taille relativement importante et de nature composite (composées des deux corps en présence).

L'usure adhésive est favorisée entre autres par :

- L'accroissement de la pression de contact, de la vitesse (produit PxV);
- Le frottement à sec ou en lubrification aléatoire (frottement hors régime hydrodynamique);
- L'absence ou l'élimination des films superficiels constitués de couches absorbées, d'oxydes.

Les paramètres dépendant des matériaux sont principalement : la composition (nature métallique ou non), la structure, la dureté, la température de fusion, la nature des films superficiels et les propriétés de rétention des lubrifiants.

3.3.4.2 Usure abrasive à deux ou trois corps

L'usure abrasive correspond au cas où un corps dur déformerait plastiquement, avec ou sans enlèvement de matière, un corps plus mou. On distingue :

- L'usure abrasive à deux corps : des sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacement, par les aspérités du corps le plus dur
- L'usure abrasive à trois corps : des particules dures présentes dans l'interface déforment plastiquement les surfaces frottantes en créant des empreintes

Suivant les cas, l'usure abrasive peut engendrer des endommagements par déformation plastique, des enlèvements de matière par phénomène et /ou par fatigue superficielle.

L'usure abrasive est favorisée :

- Par l'accroissement de la température;
- Par l'humidité, l'agressivité chimique de l'ambiance (lorsque l'abrasion agit par effet de coupe).

Dans le cas de l'abrasion à trois corps, la nature et l'acuité des phénomènes dépendent des formes, de la granulométrie des particules abrasives, de la vitesse relative et de l'angle d'attaque de l'abrasif sur le substrat.

L'usure abrasive mettant en jeu, au niveau élémentaire, des phénomènes d'ordre mécanique, les paramètres dépendant des matériaux sont notamment : la dureté ou la limite d'élasticité, les contraintes résiduelles, la ténacité, la structure (homogénéité, taux d'écrouissage...) et les propriétés thermomécaniques dans le cas de sollicitations en température.

La dureté respective des corps en présence est un élément déterminant comme l'illustre la figure 3.8. Des règles simples de choix de matériaux ou de traitement de surface peuvent donc permettre d'optimiser un usinage par abrasion ou une lutte contre l'usure abrasive d'un élément de mécanisme donné.

3.3.5 Usure corrosive ou tribochimique

Cette forme d'usure intervient lorsque le frottement se produit dans un environnement réactif (atmosphère, lubrifiant...) pour les matériaux en présence. Dans ce type de

situation, l'usure peut être initiée ou accentuée par la réaction chimique entre l'environnement et les surfaces frottantes. Cette réaction, qui peut être créée ou activée par l'énergie dissipée en frottement dans l'interface, conduit à la formation d'une couche superficielle (film réactionnel) solide, non soluble dans l'environnement, de faible épaisseur, adhérente aux substrats et qui protège généralement les surfaces de l'usure adhésive. L'usure se manifeste alors lorsque les sollicitations de frottement au contact conduisent à l'élimination des couches formées.

3.3.6 Usure par fissuration

Les contraintes mécaniques générées par le frottement peuvent entraîner la création et la propagation de fissures, selon des processus différents en fonction du type de matériau considéré. Dans le cas des **matériaux ductiles**, on parle d'usure par fatigue superficielle ou par désamination; on peut de façon classique distinguer les phases d'initiation et de propagation de fissures en sous-couche. Cet endommagement apparaît en général lorsque le nombre de cycles de sollicitations est élevé. Pour les **matériaux à comportement fragile** (typiquement les céramiques), et pour lesquels on parle d'usure par fabrication, les fissures se produisent dans les zones où il y a les plus grandes contraintes en tension. Elles ne sont pas associées à un phénomène de fatigue superficielle, mais à un dépassement d'un seuil de rupture. Situées d'habitude à l'arrière du contact, elles sont en forme de « fer à cheval » et se propagent perpendiculairement à la surface (figure 3.8). Ce type de fissure peut se produire lorsque le nombre de cycles est très faible.

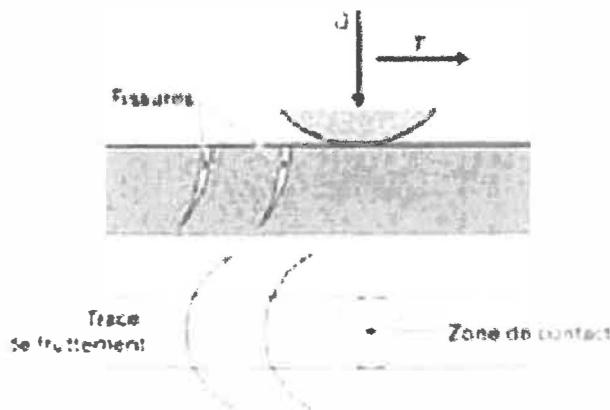


Figure 3.8 : Usure par fissuration dans le cas des matériaux fragiles

[Cartier et al. 2000]

L’usure par fissuration est bien évidemment favorisée par l’accroissement des contraintes mécaniques superficielles (contraintes normales et tangentielle), et dans une moindre mesure, par la réactivité chimique de l’environnement qui est susceptible d’agir sur les processus de propagation de fractures.

Les principaux paramètres dépendant des matériaux sont, outre les propriétés mécaniques macroscopiques (limites d’élasticité, résistance à la rupture, ténacité), la présence de défauts ou points faibles préexistants (homogénéité structurale, liaisons revêtements/substrat...) et les contraintes résiduelles.

3.3.7 Usure en fretting

Une situation d’usure en fretting (rongement) correspond au contact de deux corps soumis à un déplacement relatif de faible amplitude, générant des débris et/ou des dégradations de surfaces à l’intérieur du contact par des processus mécaniques, adhésifs.... Dans certains cas, des fissures orientées perpendiculairement à la surface de

frottement peuvent apparaître à l'extérieur du contact (figure 3.8), pour un nombre de cycles élevé aussi bien pour des matériaux ductiles que fragiles (phénomène de fatigue de surface). Si les débris d'usure générés dans l'interface ne sont pas évacués rapidement à l'extérieur, ils peuvent créer des fonctionnements ou des dégradations particulières (difficulté lors du démontage des assemblages due au colmatage des interfaces, usure abrasive...). Dans le cas d'une atmosphère créant une corrosion des débris d'usure, on parle de fretting – corrosion.

L'usure par fretting se rencontre dans de nombreux systèmes mécaniques et assemblages en construction mécanique. L'influence du phénomène sur l'abaissement de la tenue à la fatigue (fretting -fatigue) est particulièrement bien illustrée dans le cas des câbles où il peut être responsable de ruptures prématurées (câbles de ponts, de téléphériques, de renfort de poids lourd...) [Khonsari et al. 2001].

3.3.8 Autres formes d'usure

1. Usure par érosion

L'usure par érosion résulte de l'enlèvement de matière par un fluide chargé de particules en contact avec la surface d'un matériau; elle conduit à la création d'impacts et de rayures sur les surfaces. Dans les applications mécaniques, ce type d'usure intervient notamment sur les systèmes soumis à un flux de produits liquides ou pâteux chargés d'abrasif, et circulant à vitesse élevée; pièces de robinetterie.

2. Usure par cavitation

L'usure par cavitation est un phénomène d'usure associé à une fatigue superficielle du matériau sous l'effet des ondes de choc dues à l'implosion de bulles de vapeur (variation de pression très forte). Elle peut conduire à la formation d'écailles, de cavités dans des zones particulières de haute température ou de dépression.

3.3.9 Étude et quantification de l'usure

Dénormes progrès ont été réalisés dans les dernières décennies par les laboratoires de recherche en tribologie, grâce à la possibilité d'utiliser un matériel de saisie informatique de plus en plus performant. C'est ainsi qu'il a été possible, en combinant les tribomètres classiques avec de puissants capteurs, de mieux appréhender les processus d'usure et de frottement.

Ces études de l'usure sont également d'un grand intérêt quant à la compréhension des durées de vie de différents mécanismes et ce, en prévision d'éventuelles avaries ou dans l'optique de tester de nouveaux matériaux.

3.4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Cette étude a pour but de comparer les résultats expérimentaux obtenus pour la caractérisation du comportement d'usure des engrenages en plastiques par la perte de couple avec ceux obtenus sur les éprouvettes lors d'essais normalisés de tribologie par la

mesure de la perte de masse et ainsi de déterminer l'évolution du coefficient de frottement entre des polymères et de l'acier.

Les essais réalisés consistent en des tests de frottement des échantillons en contact avec un roulement de type glissant. Ces tests sont réalisés sur un tribomètre TE 53 "PLINT PARTNER" au laboratoire d'éléments de machines et tribologie de l'Université de Liège.

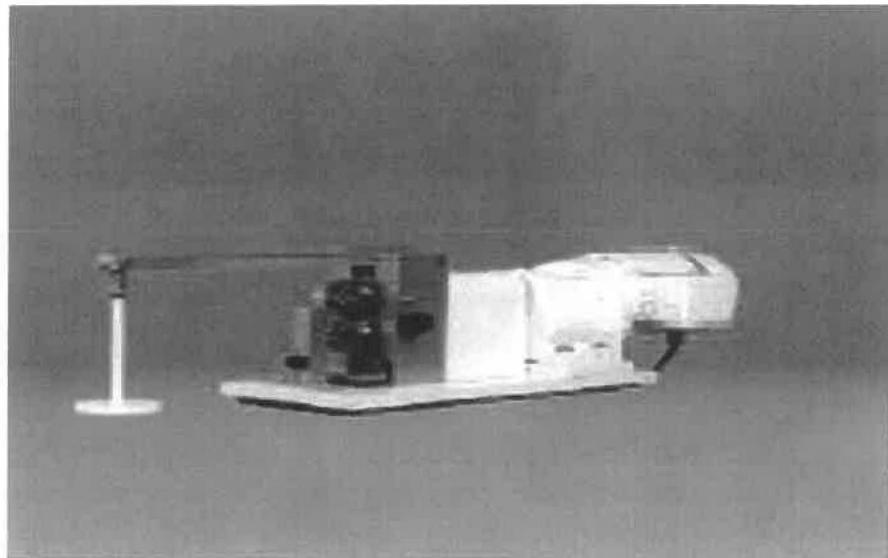


Figure 3.9 : Tribomètre TE 53 « PLINT PARTNER »

3.4.1 Principe de fonctionnement

La machine citée (Tribomètre) permet d'effectuer deux types d'essai : des mesures de coefficient de frottement et des mesures d'usure.

- Principe de mesure du coefficient de frottement

Les éprouvettes sont placées par paire sur les arbres A et B de la machine. Lors de la mise en rotation, les deux arbres (A, B) portant ces éprouvettes ne tournent pas à la même vitesse puisque les engrenages fixés sur ces arbres n'ont pas le même nombre de dents. La force est appliquée sur le bras d'un capteur de force qui envoie les résultats vers un fichier spécifique. La valeur du coefficient de frottement sera déduite et elle servira par la suite à analyser les données pour les différents matériaux utilisés dans les essais.

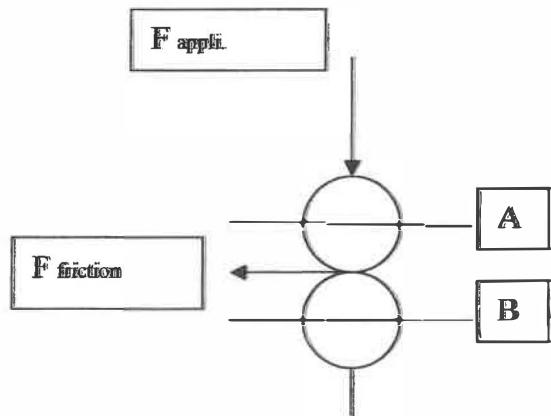


Figure 3.10 : Représentation graphique du coefficient de frottement

$$f = \frac{F_{friction}}{F_{appli.}} \quad (3.1)$$

- Principe de la mesure d'usure

L'arbre supérieur est toujours libre de bouger verticalement et horizontalement, seule la rotation est empêchée. Au cours du test, les échantillons commencent à s'user et l'arbre supérieur change de position vers le bas à cause de l'usure des échantillons. Un capteur de déplacement mesure donc l'usure et envoie les données au fichier.

Dans certaines conditions (charges et vitesses élevées...) le dégagement de chaleur est très important. Il est possible que la température augmente fortement. Il faut donc vérifier à fur et à mesure que l'on n'a pas de modifications des caractéristiques de la surface de l'échantillon. De plus, cette augmentation de température induit des dilatations qui peuvent fausser les mesures.

3.4.2 Types d'essai réalisables

Quatre différents matériaux (Nylon, Polyéthylène, Acétal et Acier) étaient choisis et utilisés dans les tests. Par la suite, la sélection de quatre taux de glissement / roulement différents est présentée dans un tableau standard (Tableau 3.3) ci-dessous pour définir les engrenages qui doivent être monter sur les arbres (A et B) de la machine.

Pour ces calculs, il était choisi une vitesse de rotation fixe d'une valeur de 850 t/min. Suite à ça, les essais ont progressé par variation des forces d'une échelle allant de 91.05 N (minimum) à 777.8 N (maximum que supportent les barres de la machine).

Les données ont été relevées suivant deux principes d'essais : à sec ou lubrifié. Dans notre cas, nous avons seulement pu faire les tests à sec.

En régime sec, les surfaces sont en contact par leurs aspérités [Drouin 1986]. La force de frottement est réduite en déposant entre les aspérités un lubrifiant solide dont la résistance au cisaillement est inférieure à celle du matériau de base.

Tableau 3.3 : Condition des conduites des expériences

Rapport glissement/roulement	Nb. de dents de l'engrenage inférieur	Nb. de dents de l'engrenage supérieur	Lettre correspondante
1.79%	57	56	A
5.13%	41	39	B
8.7%	50	46	C
10.53%	63	57	D
13.33%	51	45	E
18.18%	52	44	F
22.22%	66	54	G

NOTE : les valeurs en gras sont utilisées dans les expériences

Chaque lettre de la colonne de droite définit des engrenages qui doivent être montés sur des arbres suivant le rapport glissement/roulement de la colonne de gauche. Les deux roues dentées montées sur les arbres n'ont pas le même nombre de dents. Les deux colonnes du milieu présentent pour les engrenages inférieur et supérieur les nombres de dents standard.

3.4.3 Plan d'expérience

Le plan d'expérience consiste à étudier la variation du coefficient de frottement et d'usure des matériaux (Nylon, Polyéthylène, Acétal, acier) en fixant la force appliquée

sur le bras et en faisant varier le taux de glissement/roulement (les valeurs sélectionnées dans le tableau ci-dessus).

Les essais réalisés durant le stage à l'Université de Liège sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.4 : Combinaisons de matériaux

Menant	Acétal (A)	Nylon (N)	Polyéthylène (U)	Acier (S)
Mené				
Acétal (A)	A/A	A/N	A/U	A/S
Nylon (N)	N/A	N/N	N/U	N/S
Polyéthylène (U)	U/A	U/N	U/U	U/S
Acier (S)	S/A	S/N	S/U	...

3.4.4 Formulation de la méthode de calcul

La formulation se base sur la méthode de vérification des valeurs de la contrainte normale maximale σ_{\max} pour chaque type d'essai [Annexe A]. La vitesse de glissement est différente pour les quatre (4) types d'essais et elle dépend de la valeur du taux de glissement utilisé (5.13%, 10.53%, 1.79% et 22.22%); ce qui amène à considérer une nouvelle vérification des valeurs de V_{gli}^* σ_{\max} pour choisir la charge qui sera utilisée lors des expériences.

L'expression du calcul des contraintes [Ludma Keneth C 1996] est donc:

$$b = \left\{ \frac{4Q}{l\pi \sum \rho} \left[\frac{(1-\varepsilon_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\varepsilon_2^2)}{E_2} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{2Q}{lb\pi} \quad (3.3)$$

Cette formule contient deux sortes de paramètres :

- Des paramètres qui dépendent uniquement de la géométrie de l'engrenage. On les définit comme suit :
 - b: largeur de la denture [mm] ;
 - l: longueur de la roue effective [m];
 - $\Sigma\rho$: somme de la courbure [1/m];
 - Q : charge appliquée [N].

La formule précédente montre aussi que le paramètre b est dépendant du matériau employé.

- Des paramètres dont les valeurs ne dépendent que du matériau employé. Il s'agit des paramètres suivants :
 - ε : Le coefficient de Poisson
 - E : Module d'élasticité

Ces deux paramètres sont tirés des caractéristiques des matériaux en question.

Dans l'annexe A, des tableaux présentent tous les calculs faits afin de choisir, en suivant les conseils de M. Marc Nelis et M. J. L Bozet (enseignant - chercheur du laboratoire

d'Éléments de Machine et Tribologie de l'Université de Liège, qui ont supervisé mon stage), la force normale qu'on devait appliquer sur le support pour effectuer les essais. La valeur choisie est de 287.3 N.

Pour chaque essai, la charge normale et la force de frottement sont modélisées par des régressions linéaires et suivant un différent poids choisi de 1 à 15 Kg.

3.4.5 Explications – Relevés de données

Les informations provenant des capteurs de mesure ont été enregistrées sous différents types de fichiers et plus précisément trois types d'extensions.

a) DEF (Edit Definition File):

La fonction principale de ce fichier est d'indiquer les résultats qui seront fournis au tableau et sous quelle forme, les résultats sont fournis et traités dans le chapitre 5.

b) ALM (Alarm File) :

Ce fichier permet de définir les valeurs limites entre lesquelles peuvent varier les divers paramètres. On a soit une alarme c'est-à-dire un message qui s'affiche à l'écran, soit un arrêt « STOP » (le système est arrêté lorsqu'un paramètre atteint une des limites).

c) TSF (Test Sequence File):

Le test est constitué par une suite de séquences afin de déterminer les différentes caractéristiques (vitesse de rotation, température, etc.) pour chaque étape du test. En

général, il n'est pas utile de réaliser plusieurs opérations pour une simple mesure du coefficient de frottement (la période transitoire nous intéresse peu car nous ne considérons qu'une seule vitesse et une seule charge appliquée).

La description du logiciel sera divisée en deux étapes : la première (test simplifié) propose des valeurs courantes et donne des explications simplifiées quant aux raisons de ces choix; la seconde étape donne tous les détails et les différentes possibilités qu'offre le logiciel pour une meilleure compréhension.

3.4.6 Acquisition des données :

Les données (vitesse, force, coefficient de frottement, etc.) sont transmises au système d'acquisition par le logiciel de traitement de données « COMPEND » par l'intermédiaire d'une interface SLIM. Nous avons choisi d'afficher en temps réel à l'écran des données et de créer un fichier résultat dans lequel ces données sont envoyées à chaque seconde.

Les résultats obtenus permettent de comparer les différents paramètres cités ci-dessus et de les étudier par la suite. Ceux-ci sont actuellement saisis sous forme d'une base de données statistique qui pourra servir à une étude plus approfondie pour la suite de la recherche.

Les différents résultats obtenus seront présentés en détail par la suite, au chapitre 5 avec une discussion critique sur les différents résultats en fonction des paramètres tels que :

- ✓ La variation du coefficient de frottement en fonction de la perte de masse;

- La variation du coefficient de frottement en fonction des matériaux;
- La variation du coefficient de frottement en fonction des taux de glissement;
- La modélisation d'une dent d'engrenage à l'aide du logiciel de CAO SolidWorks.

CHAPITRE 4

MODELISATION EN CAO

4.1 INTRODUCTION

Leur étude étant complexe, les engrenages sont encore aujourd’hui l’objet de recherche dans plusieurs laboratoires et universités du Québec, notamment à l’École Polytechnique de Montréal, où on étudie plus spécialement les engrenages en matériaux plastiques.

Par la suite, on a choisi les engrenages cylindriques droits pour le traitement de la géométrie des engrenages, mais les principes de base pourront être appliqués à l’étude des autres types d’engrenage [Drouin 1986].

Tout d’abord, la géométrie des engrenages sera étudiée: la forme de la dent et ses caractéristiques, le fonctionnement d’une paire de roues dentées afin de présenter une modélisation par construction géométrique sur SolidWorks.

4.2 GÉOMÉTRIE DES DENTS

« Pour une paire de surfaces courbes en contact, les vitesses angulaires sont inversement proportionnelles aux longueurs $O_2 K$ et $O_3 K$ (figure 4.1) où le point K représente l’intersection de la normale commune avec la ligne des centres $O_2 O_3$ » [Drouin 1986].

Quel que soit le profil de la dent, ce théorème devra toujours être respecté et on pourrait l’utiliser, en supposant n’importe quel profil d’une dent, afin de déterminer le profil requis de l’autre dent.

On pourra donc écrire que: $\frac{w_2}{w_3} = \frac{O_3 K}{O_2 K}$ (4.1)

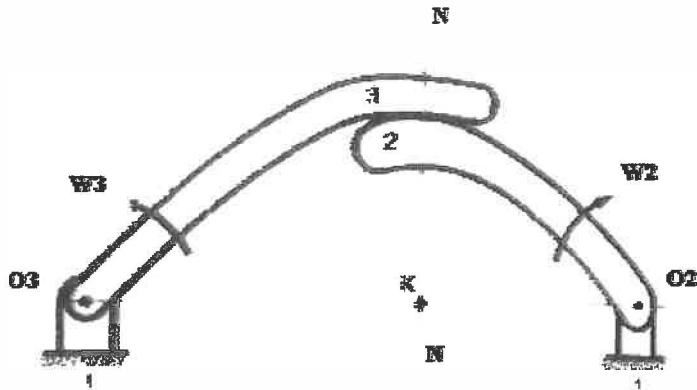


Figure 4.1: Vitesse angulaire inversement proportionnelle [Drouin 1986]

Développante de cercle

La développante de cercle est une courbe mathématique décrite par la trajectoire d'un point choisi sur une corde tendue alors que cette corde s'enroule ou se déroule sur la circonférence d'un cercle. Ainsi si on attache (figure 4.2) une corde autour d'un cylindre fixe, n'importe quel point T de la corde tracera, en déroulant la corde, une développante de cercle.

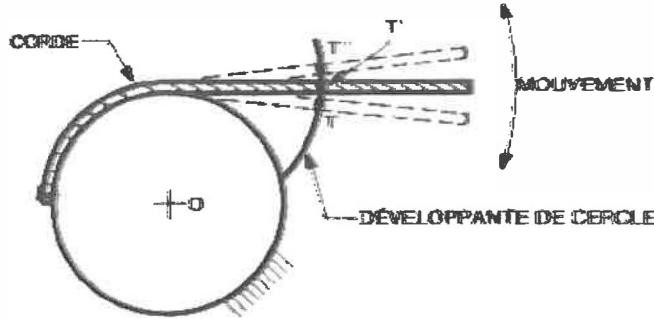


Figure 4.2 : Corde tournant autour d'un cylindre fixe [Drouin 1986]

La droite génératrice est une courbe décrite par un point d'une droite qui roule sur une courbe de base convexe (la courbe de base est habituellement un cercle). Cette courbe sert généralement à dessiner le profil de la dent d'engrenage :

$$\begin{aligned}x(t) &= Rb * (\cos(t) + t * \sin(t)) \\y(t) &= Rb * (\sin(t) - t * \cos(t))\end{aligned}\tag{4.2}$$

Deuxième méthode pour tracer la développante de cercle

Soient deux disques, de centres fixes O_1 et O_2 , ayant des rayons respectifs O_1A et O_2B (figure 4.3). Ils sont entraînés par une corde et on suppose qu'il n'y a pas de glissement. Les points A et B sont les points de tangence de la corde et des disques. La ligne des centres O_1O_2 coupe la ligne AB au point P. Si la corde est tirée vers la gauche ou la droite, elle entraînera les deux disques à des vitesses de rotation w_1 et w_2 dans le rapport :

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{O_2B}{O_1A} = \frac{O_2P}{O_1P}\tag{4.3}$$

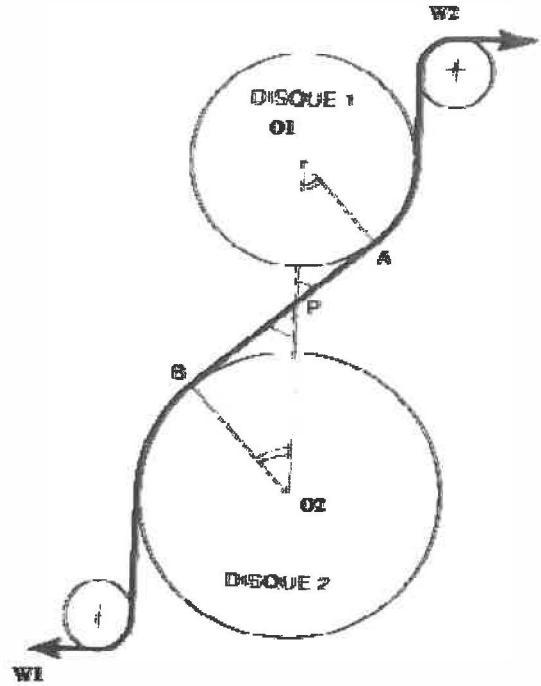


Figure 4.3 : Montage pour générer des profils de développante de cercle [Drouin]

1986]

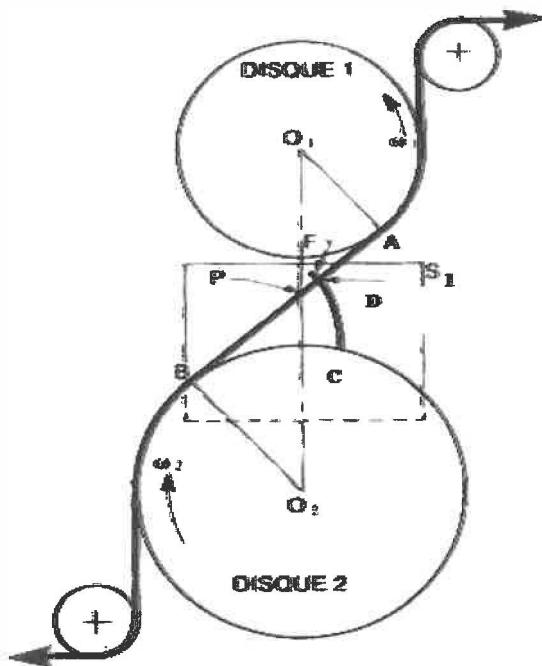


Figure 4.4 : Génération d'une développante de cercle relative au disque 1 [Drouin]

1986]

Une plaque S_1 est fixée au disque 1 et le point K sur la corde représente une pointe traçante (figure 4.4) qui tracera la courbe CD sur la plaque. Le point C est obtenu lorsque le point K est superposé au point A. De ce point de départ, en déroulant la corde vers la gauche, le point K se déplace vers D en traçant une courbe que l'on appelle une développante de cercle. Puisque l'on a supposé qu'il n'y a aucun glissement entre le disque et la corde, alors KA est égale à l'arc AC. Si le même procédé est représenté sur le disque 2, on obtient le profil EKF (figure 4.5).

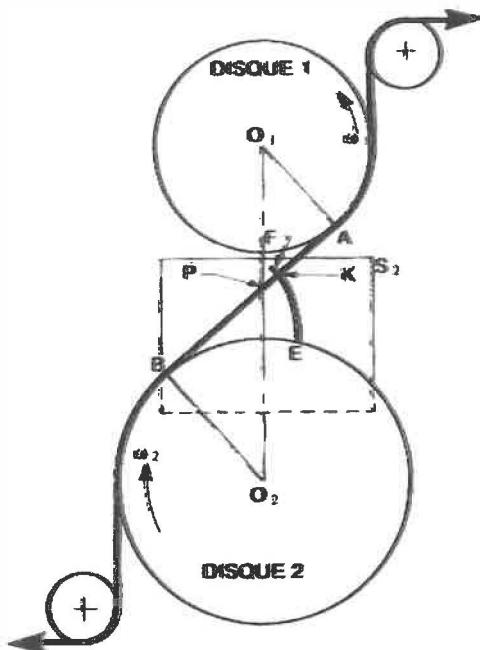


Figure 4.5 : Génération d'une développante de cercle relative au disque 2. [Drouin

1986]

- Cercle primitif.

En découplant les plaques suivant les courbes CKD et EKF et en les juxtaposant, deux profils de développante de cercle sont en contact au point K (figure 4.5). La droite AB est

donc la perpendiculaire commune aux deux profils et elle coupe toujours la ligne des centres en P. Ce point s'appelle *point primitif*.

Les cercles de centre O₁ et O₂ passant par le point P (figure 4.6) sont appelés *cercles primitifs*.

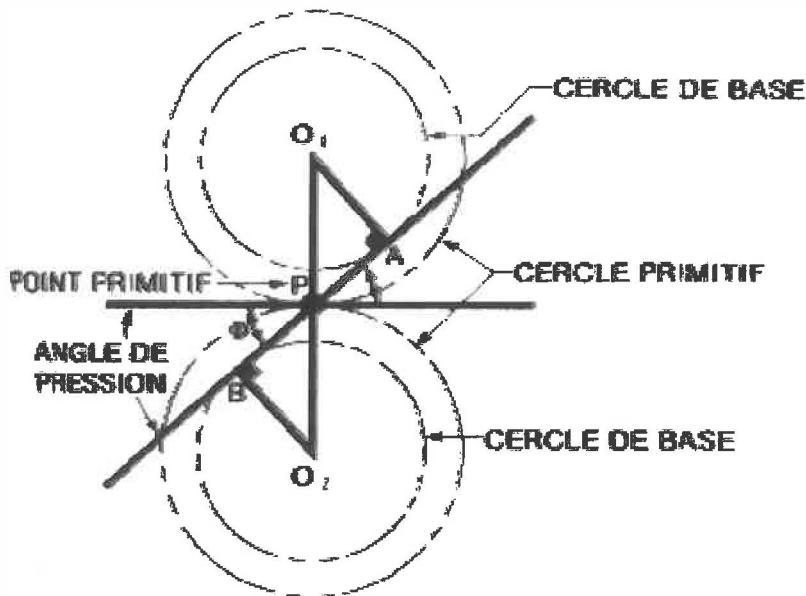


Figure 4.6 : Définition des termes [Drouin 1986]

Remarque : le rayon du cercle primitif est égal à la distance entre l'axe d'une roue et son point primitif.

$$dp = \frac{N}{P} \quad (4.4)$$

$$dp = m * Z$$

p : (Pas circulaire) représente la longueur de l'arc de cercle primitif entre les lignes de centre.

$$p = \frac{\Pi * Dp}{N} \quad [Norme AGMA] \quad (4.5)$$

P : (Pas diamétral) représente la grosseur de la dent et il augmente lorsque la taille des dents diminue.

$$P = \frac{N}{D_p} \quad [\text{Norme AGMA}] \quad (4.6)$$

Les cercles de rayons O₁A et O₂B, à partir desquels on génère la développante, sont appelés *cercles de base*.

- Cercle de tête

Le cercle de tête se trouve au sommet des dents. C'est celui que l'on peut mesurer directement à l'aide d'un pied à coulisse.

$$\begin{aligned} da &= \frac{N + 2}{P} \\ da &= df + 2 * ha \end{aligned} \quad (4.7)$$

- Cercle de pied

C'est le cercle coïncidant ou tangent à la surface de pied de l'entre dents (cercle à fond de dent).

$$\begin{aligned} df &= \frac{N - 2.5}{P} \\ df &= df - 2 * hf \end{aligned} \quad (4.8)$$

- Saillie et creux

La saillie est la distance radiale du sommet de la dent au cercle primitif. Le creux est la distance radiale du cercle primitif à la racine de la dent (figure 3.18). Les cercles passant par le sommet et la racine de la dent sont appelés respectivement le cercle de saillie et le cercle de creux.

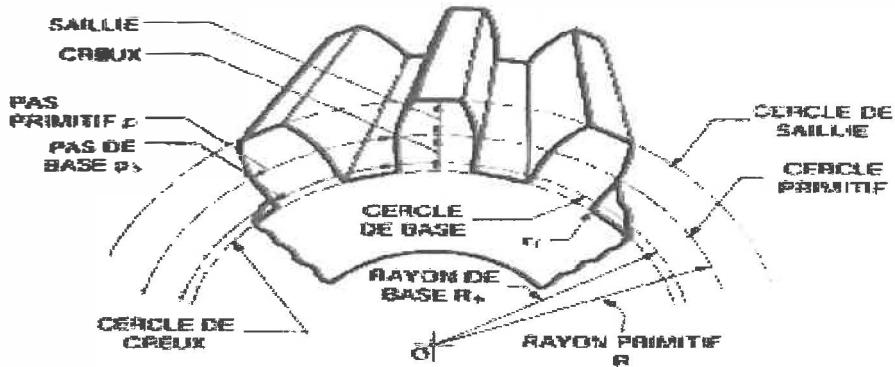


Figure 4.7 : Définition des termes relatifs à un engrenage [Drouin 1986]

La crémaillère est un engrenage particulier dont le diamètre primitif est égal à l'infini.

Ainsi au lieu de parler du cercle primitif d'une crémaillère, on emploiera le terme ligne primitive (figure 4.7).

- Propriétés de la développante de cercle

Trois relations mathématiques importantes peuvent maintenant être développées pour :

- L'angle de la développante
- La fonction développante (involute)
- L'épaisseur de la dent

Angle de la développante

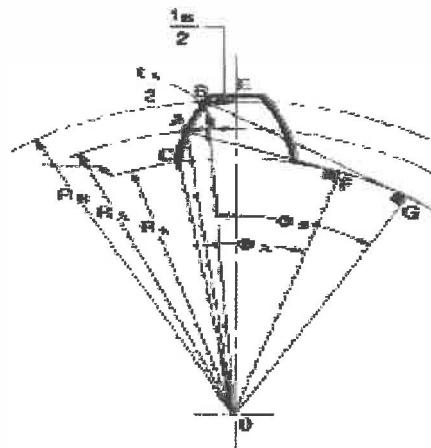


Figure 4.8 : Profil d'une dent [Drouin 1986]

Les points A et B sont deux points du profil de développante de cercle. R_A et R_B sont les rayons aux points A et B. φ_A et φ_B sont les angles de développante pour les points A et B.

Puisque dans les triangles FOA et GOB les côtés OF et OG sont respectivement égaux aux rayons du cercle de base R_b , on peut donc écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_b = R_A \cos \varphi_A \text{ et } R_b = R_B \cos \varphi_B \\ \cos \varphi_B = \frac{R_A}{R_B} \cos \varphi_A \end{array} \right\} \quad (4.9)$$

Cette équation permet de calculer l'angle de la développante en fonction du rayon en tout point du profil.

Fonction développante

La fonction développante ou involute est une fonction mathématique particulière qu'on utilise souvent pour calculer la géométrie des engrenages. Cette dernière pourra s'écrire :

$$\operatorname{inv} \varphi_B = \tan \varphi_B - \varphi_B \quad (4.10)$$

Épaisseur de la dent

Si l'épaisseur et l' $\operatorname{inv} \varphi_A$ sont connus à un autre rayon, on pourra alors calculer l'épaisseur de la dent à un rayon donné avec l'équation :

$$t_B = 2R_B \times \left[\frac{t_A}{2R_A} + (\operatorname{inv} \varphi_A - \operatorname{inv} \varphi_B) \right] \quad (4.11)$$

Trochoïde :

Courbe décrite par un point situé au bout du rayon d'un cercle qui roule sur une courbe ou sur une ligne. C'est aussi la courbe décrite par un point situé sur la perpendiculaire d'une droite qui roule sur le côté convexe d'une courbe de base. En vertu de la première définition, la trochoïde est une dérivée de la cycloïde ; en vertu de la seconde définition, elle est une dérivée de la développante de cercle.

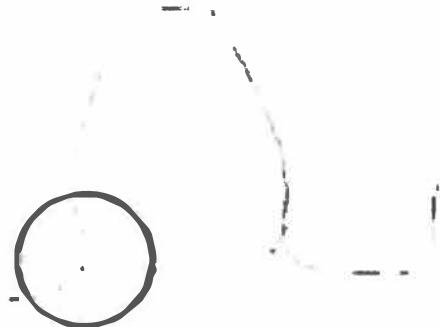


Figure 4.9 : Définition de la trochoïde [Drouin 1986]

4.3 MODÉLISATION PAR CONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE

4.3.1 Introduction

Pour la suite du projet, il a fallu modéliser par représentation graphique les dents d'engrenage et un engrenage complet. Mais après de vaines recherches, aucun logiciel ou module de modélisation correspondant aux critères souhaités n'a été trouvé.

Cependant, il existe un logiciel de CAO (SolidWorks) de simulation qui permettra la réalisation de l'étude avec l'intégration d'un programme réalisé en Visual Basic (VB) (Annexes C). Une bibliothèque sur les engrenages paramétrés est incorporée à l'origine dans le logiciel avec une documentation et des exemples d'exécution qui sont fournis en aide [<http://swcad.com>, septembre 2003].

Cette bibliothèque permet de générer les principaux types d'engrenages (roues dentées, vis sans fin et crémaillères). De plus, elle permet aussi de représenter les pièces (roues, vis sans fin et crémaillères) et les esquisses de base sous forme d'équations pour l'assemblage des pièces. Ces esquisses sont paramétrées pour positionner correctement les pièces dans les fichiers d'assemblages et éventuellement les animer simplement par modification d'un seul paramètre angulaire.

4.3.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du logiciel SolidWorks est d'utiliser des équations pour créer des modèles, dont les paramètres de contrôle sont :

- Pas diamétral : P [formule 4.6]
- Nombre de dents : N
- Angle de pression : ϕ

Une des options de la bibliothèque est de pouvoir éditer l'esquisse « Paramètres » dans l'arbre de construction Feature Manager (module de construction) d'un modèle de la bibliothèque swcad et, de plus, les caractéristiques du pignon pourraient être modifiées pour créer un nouveau modèle (figure 4.10).

Equations				
Actif	Equation	Equivaut		
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{PI@Parametres} = 3.141592654$	$\checkmark \quad 3.14159\pi$	Ajouter...	
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{Alpha_rad@Parametres} = \text{Alpha@Par...}$	$\checkmark \quad 0.349066...$	Supprimer	
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{R@Parametres} = \text{Z@Parametres} / \text{in...}$	$\checkmark \quad 22\pi$	Tout éditer...	
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{RT@Parametres} = \text{R@Parametres} + ...$	$\checkmark \quad 24\pi$	Configurations...	
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{RP@Parametres} = \text{R@Parametres} - 1...$	$\checkmark \quad 19.5\pi$	Aide	
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{Rb@Parametres} = \text{R@Parametres} * \text{co...}$	$\checkmark \quad 20.6732\pi$	OK	
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{E@Parametres} = \text{PI@Parametres} * \text{R...}$	$\checkmark \quad 3.14159\pi$	Annuler	
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{Eb@Parametres} = \text{Rb@Parametres} * \text{I...}$	$\checkmark \quad 3.56838\pi$		
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{As@Parametres} = \text{sin}(\text{pi} * \text{RT@Param...})$	$\checkmark \quad 0.532806...$		
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{EI@Parametres} = \text{RT@Parametres} * \text{I...}$	$\checkmark \quad 1.41204\pi$		
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{Ap@Parametres} = (\text{E@Parametres})^2 / \text{...}$	$\checkmark \quad 8.18182\pi$		
<input checked="" type="checkbox"/>	$\text{M1@Parametres} = \text{M2@Parametres}$	$\checkmark \quad 0.000000$		

Figure 4.10 : Représentation des formes d'équations

En étudiant de plus près l'esquisse des pignons issus de la bibliothèque swcaddb, le résultat de la représentation n'est pas signifiant. À la suite de nombreuses tentatives d'utilisation, on remarque que certains paramètres ne sont pas appropriés à la simulation par exemple en traçant des cercles et en construisant des tangentes, on constate une erreur de précision lorsque l'on fait une intersection courbe / droite.

4.3.3 Développement d'une application

À la suite de ces résultats non concluants, une application spécifique a été développée (Annexe C). Cette application a été réalisée et mise en place avec une stagiaire en génie mécanique de la maîtrise IUP de l'IFTS de Charleville-Mézières, France sous la direction de Pr. D. Koffi.

Cette application a pour but de représenter une roue dentée avec la prise en compte de tous les paramètres. L'outil développé ENGPLAS_CAO (figure 4.11) permet la mise en

place d'une communication dans SW pour dessiner la roue dentée. Ce logiciel installé est maintenant totalement indépendant.

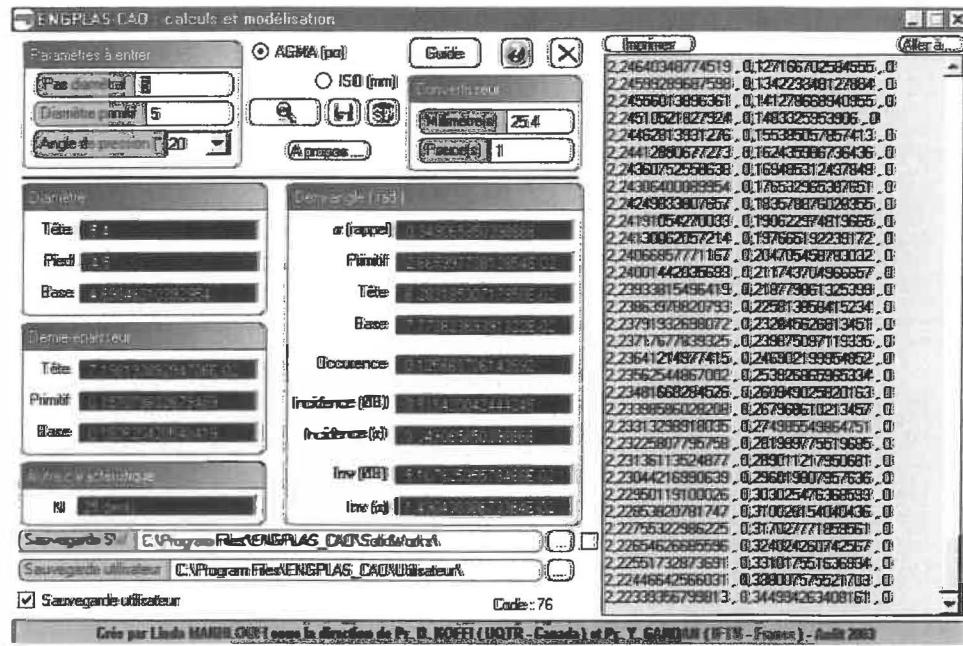


Figure 4.11 : Représentation de l'application ENGPLAS CAO

4.3.4 Exemple d'application

L'application ENGPLAS_CAO permet d'obtenir la modélisation suivante d'un pignon à l'aide de SolidWorks (figure 4.12).

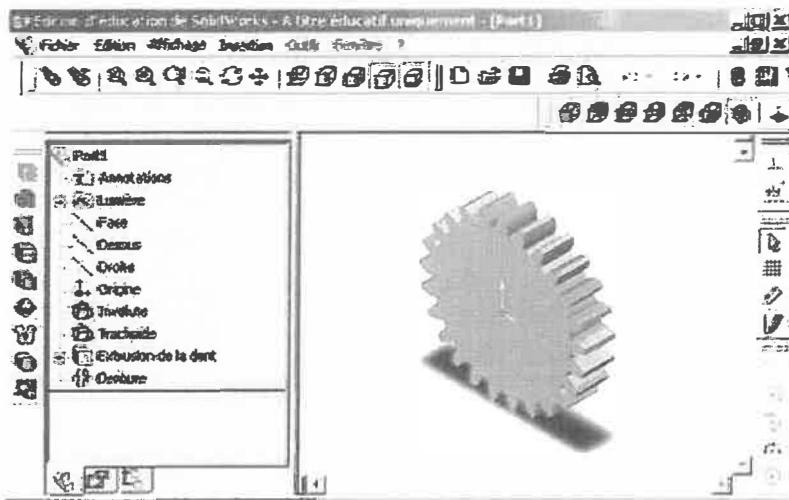


Figure 4.12 : Exemple de simulation pour un pignon normalisé : 5-5-20.

Les modèles de l'étude qui ont été conçus sur SolidWorks ont permis de mieux maîtriser le programme réalisé et d'apprendre à manipuler les équations. Ceci est très important dans la mesure où ces mêmes équations servent pour l'assemblage de pièces (pour plus d'informations à ce sujet, l'annexe C peut être consultée).

4.3.4 Conclusion

L'objectif de l'application qui était de créer des modèles de pignons et de pouvoir réaliser des assemblages, a donc presque été atteint. En effet, la suite logique serait de créer un engrenage, c'est-à-dire d'assembler plusieurs roues dentées en imposant des contraintes et des équations liant les côtes, la finalité étant de réaliser des simulations à l'aide des éléments finis afin de prédire l'usure en fonctionnement des engrenages en plastiques et composites à denture droite.

CHAPITRE 5

ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans le chapitre suivant, on traitera des différents résultats des tests expérimentaux, résultats qui montrent que les coefficients de frottement varient en fonction de certains paramètres. Les résultats expérimentaux obtenus reflètent les démarches et les montages qui ont déjà été décrits précédemment dans le chapitre 3.

Cette partie traite principalement de l'analyse des différents résultats des tests sur le frottement en fonction de différents paramètres tels que :

- La variation du coefficient de frottement en fonction de la perte de masse,
- La variation du coefficient de frottement en fonction des taux de glissement,

5.1 ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans le tableau ci-dessous on retrouve les résultats des différents essais représentant plusieurs échantillons d'alliage et de polymères combinés entre eux.

Ces essais représentent les résultats de la perte de masse (avant l'essai, après l'essai) selon quatre (4) taux de glissement différents (5.13%, 10.53%, 1.79%, 22.22%).

On remarque que plusieurs résultats ne sont pas significatifs car ils représentent une perte négative ce qui est impossible puisqu'on ne peut avoir une masse supérieure à la masse

d'origine. Cette erreur s'est répété quelques fois au cours de deux (2) des quatre (4) essais réalisés ($S = 5.13\%$; $S = 1.79\%$).

L'erreur dans la lecture peut être causée par la méthode de manipulation ou un mauvais réglage des appareils de mesure. Malgré ces différentes erreurs, nous atteignons notre but puisque le taux de glissement des quatre (4) expériences est représentatif et que la deuxième expérience ($S = 10.53\%$) donne le meilleur résultat.

Tableau 5.1: Tableau de différence de poids

#	Mené	Menant	Avant		Après		Différence		
			P (mené)	P (menant)	P (mené)	P (menant)	mené	menant	Sav - Sap
S = 5.13%									
1	A1	A2	53.1944	53.24703	53.19438	53.24664	0.00012	0.00129	0.00041
2	A3	N1	53.2117	43.62517	53.2128	43.65142	-0.00112	-0.02625	-0.02737
3	A4	U1	53.2713	35.27745	53.27126	35.28183	0.00008	-0.00438	-0.0043
4	A5	S1	53.3164	Xxxx	53.31877	Xxxx	-0.00240		
5	N2	A6	43.5406	53.20589	43.53555	53.20322	0.00493	0.00267	0.0076
6	N3	N4	43.5901	43.54792	43.58886	43.54526	0.00127	0.00256	0.00393
7	N5	U2	43.5513	35.53379	43.54549	35.53858	0.00584	-0.00479	0.00105
8	N6	S2	43.6049	Xxxx	43.60069	Xxxx	0.00396		
9	U3	A7	35.5063	53.27039	35.50909	53.26548	-0.00277	0.00491	0.00214
10	U4	N7	35.1835	43.61543	35.18588	43.60239	-0.00237	0.01304	0.01057
11	U5	U6	35.4922	35.31367	35.55067	35.33412	-0.05849	-0.02046	-0.07894
12	U7	S3	35.5408	Xxxx	35.61072	Xxxx	-0.06992		
13	S1	A8	Xxxx	53.18798	Xxxx	53.28051		-0.09253	
14	S2	N8	Xxxx	43.58887	Xxxx	43.65766		-0.07879	
15	S3	U8	Xxxx	35.41897	Xxxx	35.48627		-0.0673	
S = 10.53%									
16	A9	A10	53.3796	53.32148	53.28737	53.22858	0.09218	0.0929	0.18508
17	A11	N9	53.2658	43.71151	53.16915	43.64586	0.09667	0.06565	0.16232
18	A12	U9	53.2817	35.51851	53.17793	35.44313	0.10381	0.07538	0.17919
19	A13	S1	53.3653	Xxxx	53.26322	Xxxx	0.10135		
20	N10	A14	43.6433	53.17532	43.63416	53.16792	0.00915	0.0074	0.01655
21	N11	N12	43.6844	43.56838	43.68002	43.56385	0.00434	0.00453	0.00387
22	N13	U10	43.5816	35.53007	43.57767	35.5311	0.00397	-0.00103	0.00294
23	N14	S2	43.6467	Xxxx	Xxxx	Xxxx			
24	U11	A15	Xxxx	53.21034	Xxxx	Xxxx			
25	U12	N15	Xxxx	Xxxx	Xxxx	Xxxx			
26	U13	U14	35.4571	35.44692	35.3892	35.35073	0.05785	0.09619	0.16404
27	U15	S3	35.5301	Xxxx	35.53078	Xxxx	-0.00071		
S = 1.79%									
28	A17	A18	53.151	53.21034	53.14251	53.2022	0.00847	0.00814	0.01661
29	A19	N17	53.1605	43.70401	53.15614	43.69618	0.00440	0.00783	0.01223
30	A20	U17	53.2008	35.56928	53.19854	35.5708	0.00229	-0.00152	0.00077
31	A21	S1	53.1603	Xxxx	53.3155	Xxxx	-0.15519		
32	N18	A22	Xxxx	Xxxx	Xxxx	Xxxx			

Tableau 5.1: Tableau de différence de poids (suite)

#	Mené	Menant	Avant		Après		Différence		
			P(mené)	P (menant)	P (mené)	P (menant)	mené	menant	Sav - Sap
33	N19	N20	43.6691	43.61303	43.66962	43.61224	-0.00050	0.00079	0.00029
34	N21	U18	43.6561	35.30425	43.66139	35.30605	-0.00250	-0.00181	-0.00711
35	N22	S2	43.6171	Xxxx	43.61399	Xxxx	0.00309		
36	U19	A23	Xxxx	Xxxx	Xxxx	Xxxx			
37	U20	N23	Xxxx	Xxxx	Xxxx	Xxxx			
38	U21	U22	35.3409	35.53473	35.33625	35.53983	0.00452	-0.0051	-0.00048
39	U23	S3	35.2815	Xxxx	35.28275	Xxxx	-0.00121		
			S = 22.22%						
40	A24	A25	53.29563	53.29508	53.29329	53.29171	0.00305	0.00337	0.00542
41	A26	N24	53.2115	43.61523	53.20762	43.61231	0.00387	0.00292	0.00679
42	A27	U24	53.2033	35.21536	43.12393	35.06533	10.07940	0.15003	10.22943
43	A28	S1	53.2453	Xxxx	53.24326	Xxxx	0.00205		
44	N25	A29	Xxxx	Xxxx	Xxxx	Xxxx			
45	N26	N27	43.6548	43.55407	43.65308	43.54818	0.00176	0.00589	0.00765
46	N28	U25	43.631	35.52001	43.59378	33.97225	0.03721	1.54776	1.58497
47	N29	S2	43.5721	Xxxx	43.56841	Xxxx	0.00369		
48	U26	A30	Xxxx	Xxxx	Xxxx	Xxxx			
49	U27	N30	Xxxx	Xxxx	Xxxx	Xxxx			
50	U28	U29	35.5083	35.51574	35.14525	35.17705	0.39405	0.33899	0.73274
51	U30	S3	35.5325	Xxxx	35.53338	Xxxx	-0.00091		

Tableau 5.2 : Valeurs de comparaison

Combinaison Menée/Menant	$\Delta m \%$	Rg.	ΔF_{rac}	qualité	Rg.
A / U	0.2	(6)	19	Moy.	(4-5)
A / A	0.175	(5)	40	Moy.	(6)
A / N	0.17	(4)	18-25	Moy.	(4-5)
N / A	0.02	(3)	3-4	Bon	(2)
N / N	0.015	(2)	3	Bon	(1)
N / U	0.01	(1)	11	Moy.	(3)

- Δm (%) : pourcentage de perte de masse totale des deux disques (menant et mené)
- ΔF_{rac} : pourcentage de perte de couple
- Qual. : qualification de l'engrenage par rapport la tenue à l'usure.

Le tableau ci-dessus présente les résultats comparés éprouvettes/engrenages de la perte de masse. La troisième colonne donne le rang rg. suivant Δm et l'on note que N/U a le rang (1) tandis que A/U a le rang (6).

En comparant les valeurs de Δm et ΔF_{rac} , on a remarqué avec les études réalisées sur des engrenages de mêmes combinaisons de matériaux [Koffi et al. 2003] que :

- Le rang (1) devient (3), (2) devient (1), (3) devient (2), (4) devient (4-5), (5) devient (6) et (6) devient (4-5) [D. Koffi et al. 2003].
- Malgré un léger décalage dans le rang suivant l'étude considérée, les combinaisons gardent globalement les mêmes tendances ; ainsi, les bonnes combinaisons pour l'usure selon la perte de couple restent identiques pour la perte de masse et il en est presque de même pour les mauvaises.
- Le classement des combinaisons en fonction de la perte de masse est identique pour la somme de deux éprouvettes et le menant alors qu'il présente quelques modifications pour la somme et le mené.
- Hormis U/U, les combinaisons incluant l'acétal ont une usure plus prononcée et cette usure l'est encore plus pour l'acétal mené quel que soit le menant.

- La combinaison N/A (acétal menant) a une perte de masse huit (8) fois plus petite que celle de A/N ; et dans ce même ordre on retrouve une proportion d'environ six (6) pour la perte de couple.

La mesure de la perte de masse lors d'essais tels que celui de frottement en contact de roulement et glissement combiné permet de retrouver pratiquement les mêmes résultats relatifs à la tenue à l'usure mesurée par la perte de couple sur les engrenages [Koffi et al. 2003].

Une autre comparaison graphique concernant le coefficient de frottement pour une certaine combinaison des polymères sera présentée par la suite.

Un montage expérimental de trois polymères et un acier fait frotter un disque de rotation sur la génératrice d'un échantillon cylindrique. Les résultats de ce montage seront présentés sur un graphique qui montre l'évolution du coefficient de frottement à la température de 60° (figure 3.11) [Batail et Yelle].

Le tableau ci-dessous présente les valeurs du coefficient de frottement relevées lors des expériences d'un montage qui fait frotter deux échantillons en rotation à une vitesse fixe et avec un taux de glissement de 10.53%. Pour mieux comparer les résultats on présente à la figure 3.10 le graphique de l'évolution du coefficient de frottement à 60°C.

Tableau 5.3 : Valeurs de coefficient de frottement

Mené \ Menant	Nylon	Acétal	Polyéthylène	Acier
Nylon	0.1	0.11	0.36	0.27
Acétal	0.11	0.08	0.16	0.27
Polyéthylène	0.36	0.16	0.37	0.25
Acier	0.27	0.27	0.25	0

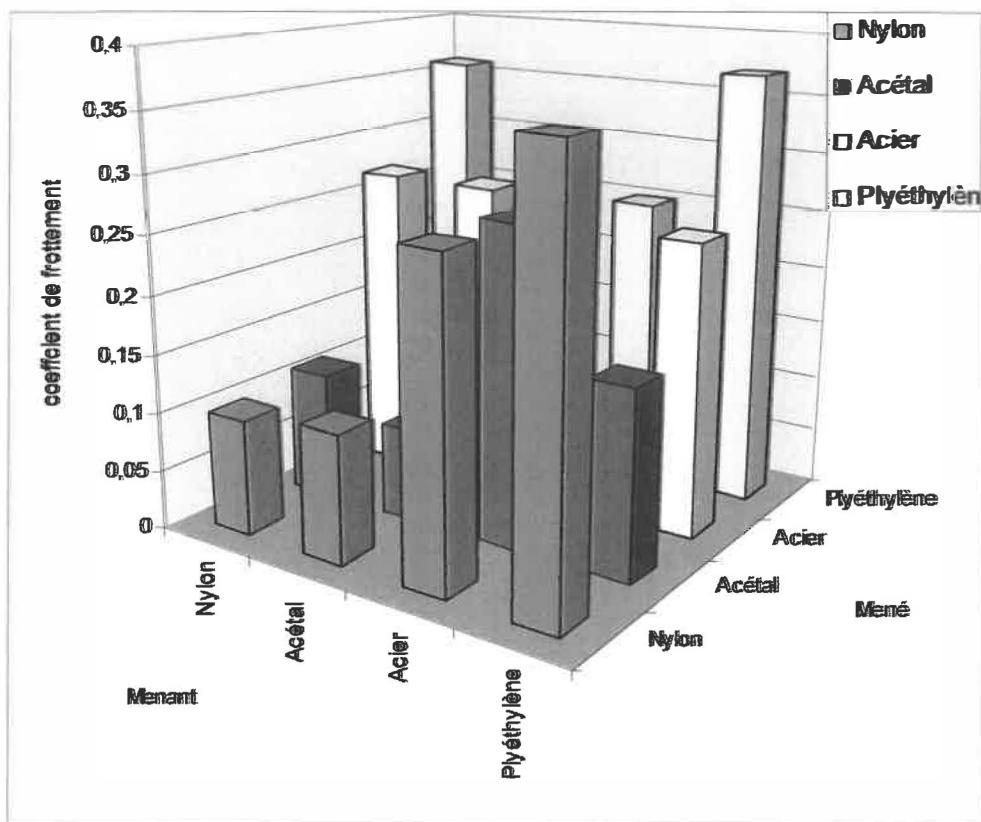


Figure 5.1: Évolution de coefficient de frottement

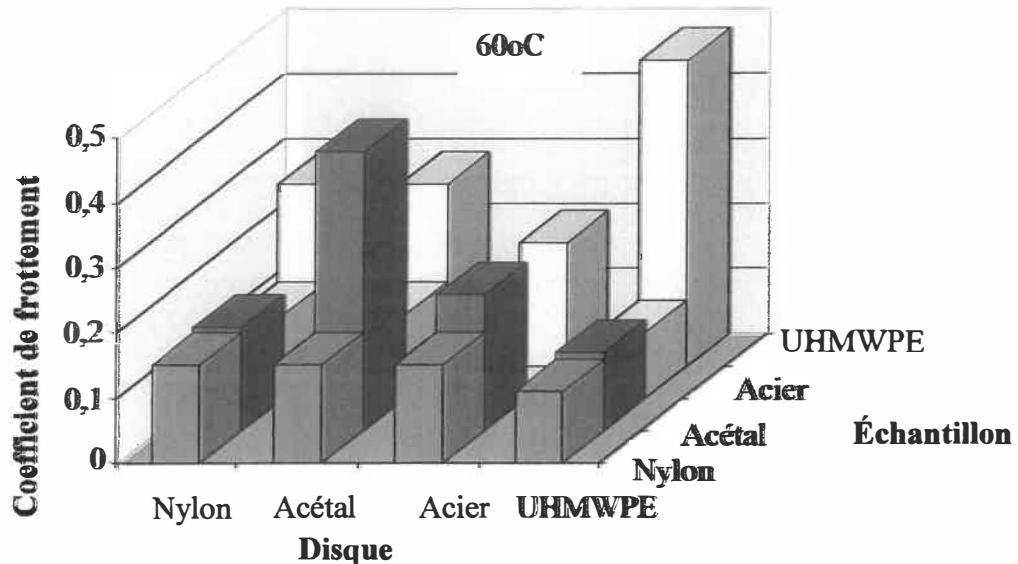


Figure 5.2: Évolution de coefficient de frottement des essais sur un disque

On remarque que dans les deux cas, le coefficient de frottement entre les deux polymères de même nature (UHMW) est le plus élevé. Par contre, le deuxième graphique montre que le coefficient de frottement d'un polymère sur lui-même est toujours supérieur à celui d'un polymère contre un matériau différent sauf pour le N/U ce qui n'est pas le cas dans la figure 5.2 où seulement le polymère U contre lui-même donne la valeur la plus élevée.

On constate que les coefficients de frottement de toutes les paires testées sont relativement faibles. Les paires qui possèdent les plus faibles coefficients de frottement sont A/A et N/N (0.08 et 0.1) (tableau 3.7). Celles qui possèdent les coefficients de frottement les plus élevés sont N/U et U/U (0.36, 0.37).

Les tableaux et les graphiques qui seront présentés à l'annexe B montrent l'évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement et en fonction de la différence

de poids pour chaque type d'essai. Chaque tableau montre la combinaison d'un polymère (mené) avec les autres types (menant).

5.2 INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Au chapitre 3 et dans le plan d'expérience, on a montré les combinaisons des matériaux nécessaires pour effectuer des essais ainsi que le principe de fonctionnement suivi pour les réaliser. Le but par la suite est d'analyser les résultats de la variation du coefficient de frottement et de la perte de masse pour chacune de ces combinaisons d'essais réalisés en tenant compte de l'influence des matériaux en position de mené et de menant.

5.2.1 Coefficient de frottement

5.2.1.1 Influence du matériau mené

Les combinaisons de matériaux qui seront traitées par la suite se présentent sous la forme menant/mené. Pour chacun des cas suivants, quatre combinaisons seulement seront étudiées en prenant le menant comme matériau fixe par rapport à lui-même et aux trois autres qui seront considérés comme des menés. Les valeurs du coefficient de frottement dans chacun des cas qui suivent ont été prises du tableau des résultats (tableau 5.3) ; la figure 5.1 montre l'évolution du coefficient de frottement pour tous les essais menant et mené tandis que les cas suivants étudient l'influence de chaque matériau pris isolément.

- **Cas du nylon menant**

Les valeurs du coefficient de frottement présentées dans le tableau 5.3 pour le Nylon menant, amènent à dessiner le graphique suivant de l'évolution du coefficient du frottement en tenant compte de l'influence du Nylon sur lui-même, de l'acétal, du polyéthylène et de l'acier.

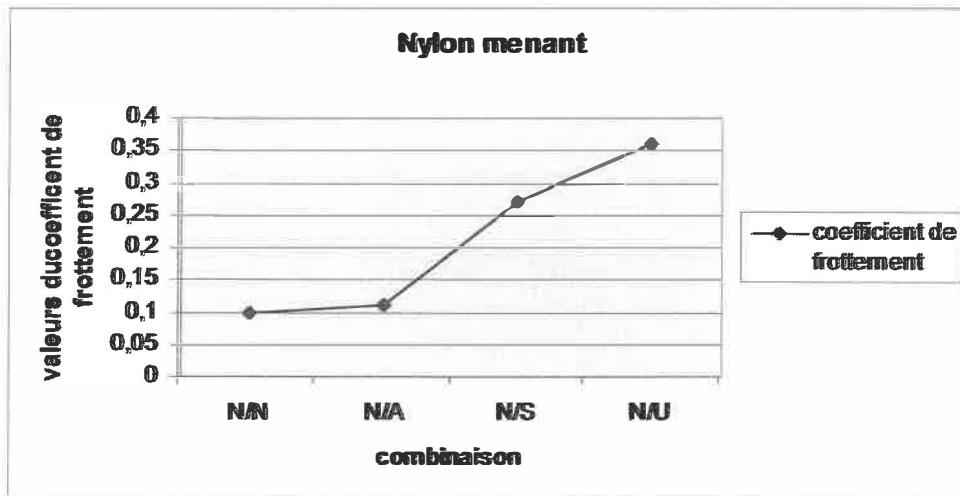


Figure 5.3 : Évolution du coefficient du frottement (Nylon menant)

On remarque que la combinaison N/N a le coefficient de frottement le moins élevé (0.1), coefficient qui est par contre très proche de celui de la combinaison N/A; N/U a un coefficient trois fois plus grand que celui du N/N et qui est même plus élevé que celui de l'acier N/S.

- **Cas de l'acétal menant**

En suivant la même méthode que le Nylon menant, on pourra dresser le graphique de l'Acétal menant comme suit:

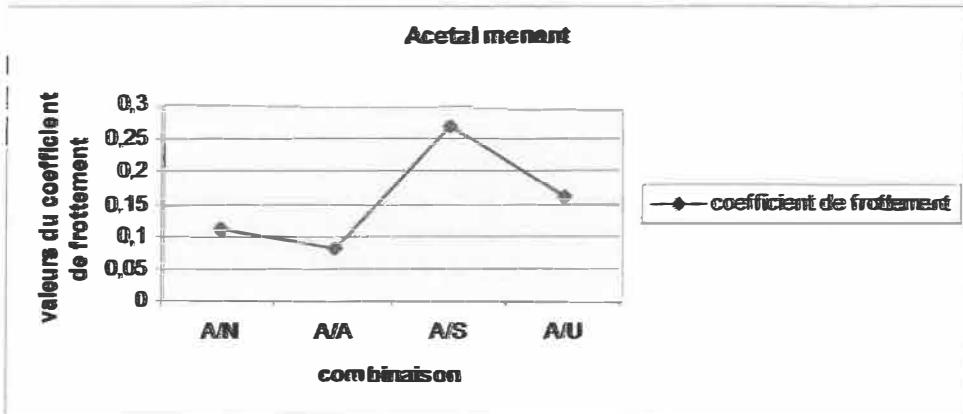


Figure 5.4 : Évolution du coefficient du frottement (Acétal menant)

Les combinaisons A/N et N/A donnent toujours les mêmes valeurs du coefficient de frottement donc il n'y a pas de modification en faisant changer le matériau du menant. En combinant l'acétal avec lui-même A/A, on a eu une valeur (0.08) qui est inférieure à celle du N/N (0.1). Avec le polyéthylène on a toujours eu une valeur élevée.

- **Cas du polyéthylène menant**

Le graphique ci-dessous montre l'évolution du coefficient du frottement des matériaux combinés avec le Polyéthylène menant.

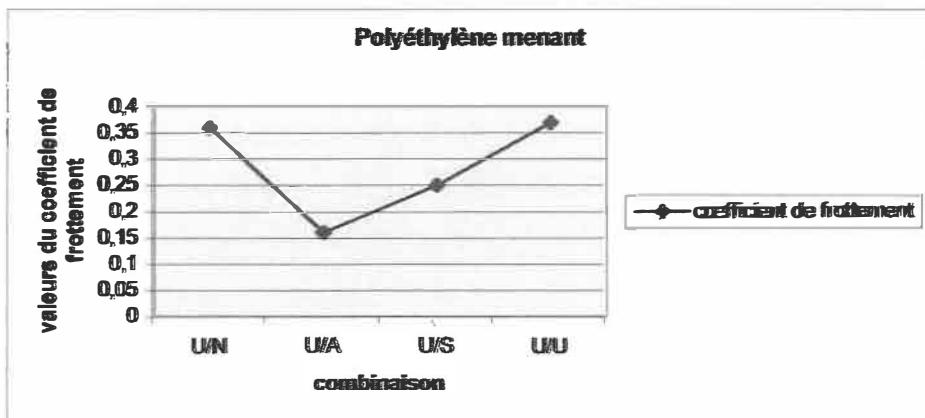


Figure 5.5 : Évolution du coefficient du frottement (Polyéthylène menant)

Le graphique montre qu'en prenant le Polyéthylène comme menant, les valeurs du coefficient de frottement sont assez élevées comparativement aux autres cas. On peut remarquer aussi que même dans les deux cas précédents (les cas où il était mené) la valeur du coefficient du frottement était élevée.

- **Cas de l'acier menant**

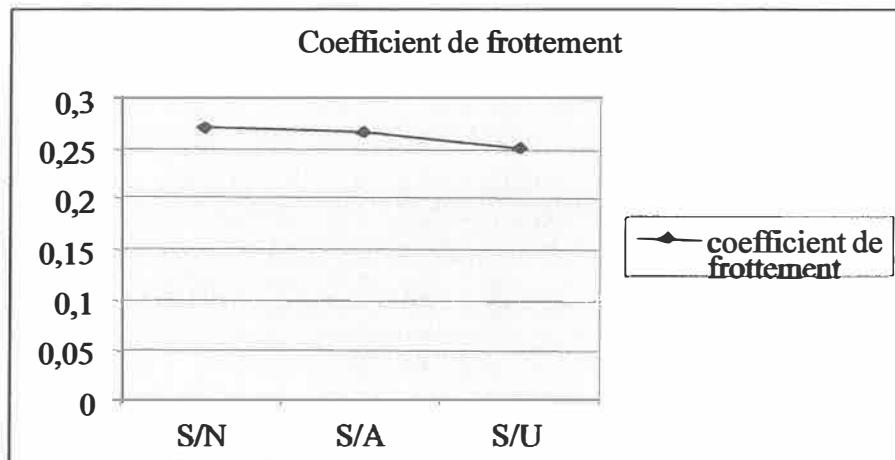


Figure 5.6 : Évolution du coefficient du frottement (Acier menant)

Dans le cas de l'acier, on ne trouve aucun changement qu'il soit mené ou menant, les valeurs sont assez élevées même si on lui change de position.

5.2.1.2 Influence du matériau menant

Les combinaisons de matériaux qui seront traitées par la suite sont de forme mené/menant. Comme dans le cas précédent du matériau mené, quatre combinaisons seulement seront étudiées en prenant le mené comme matériau fixe par rapport à lui-même et aux trois autres qui seront considérés comme des menant. Les valeurs du

coefficient de frottement dans chacun des cas ont aussi été tirées du tableau des résultats (tableau 5.3).

- **Cas du Nylon mené**

On procède toujours de la même manière pour établir le graphique qui montre l'évolution du coefficient de frottement.

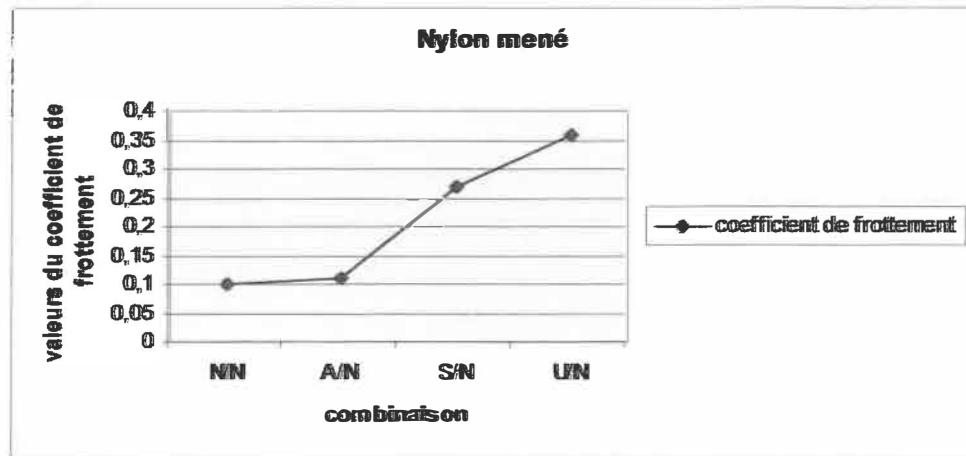


Figure 5.7 : Évolution du coefficient du frottement (Nylon mené)

On remarque que les valeurs du coefficient de frottement ne changent pas, que ce soit le Nylon soit mené ou menant.

- Cas de l'Acétal mené

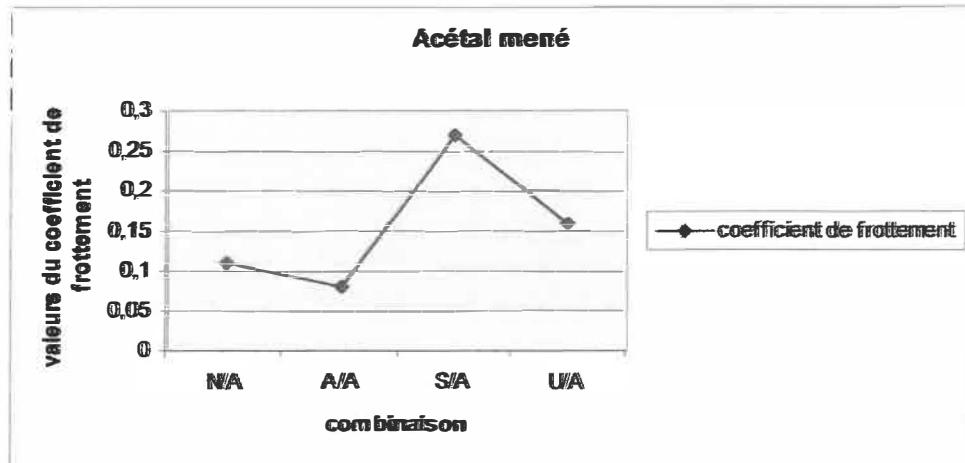


Figure 5.8 : Évolution du coefficient du frottement (Acétal mené)

On ne trouve toujours aucun changement, les combinaisons avec l'Acétal mené ou menant donnent toujours les mêmes valeurs du coefficient de frottement.

- Cas du Polyéthylène mené

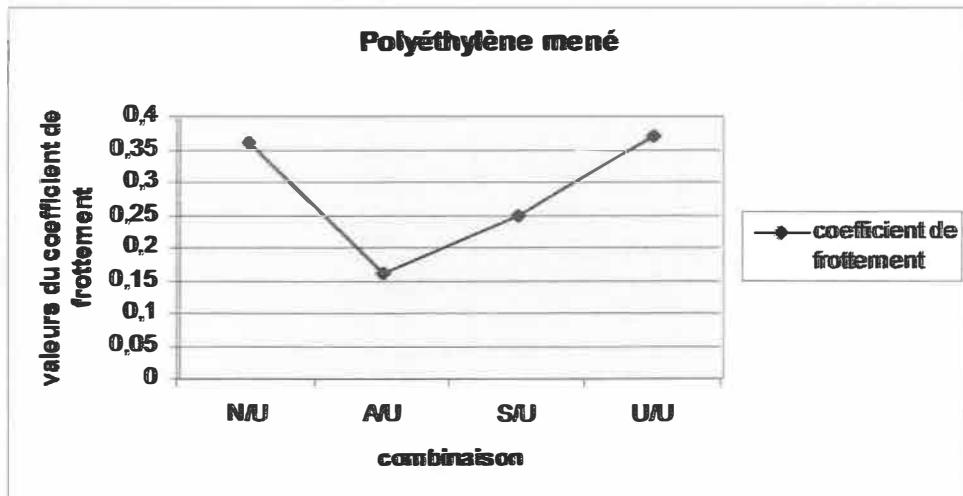


Figure 5.9 : Évolution du coefficient du frottement (Polyéthylène mené)

Comme dans les deux autres cas précédents, on n'a trouvé aucun changement.

- Cas de l'Acier mené

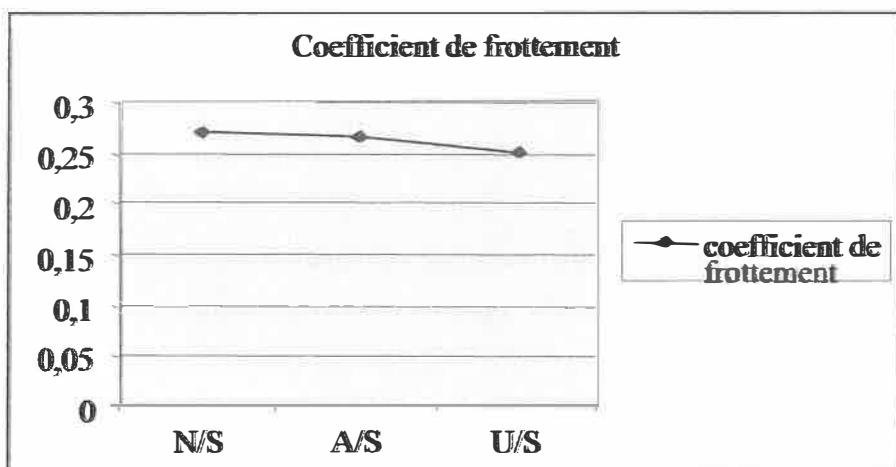


Figure 5.10 : Évolution du coefficient du frottement (Acier mené)

Le graphique est le même que celui de l'Acier menant. L'essai S/S était exclu des expériences.

5.2.1.3 Conclusion

Les coefficients de frottement de toutes les paires testées sont relativement faibles et ne diffèrent pas lorsqu'on change la position d'un matériau (mené ou menant). La paire qui possède le plus faible coefficient de frottement est A/A (figure 5.8). Les paires N/N, A/N et N/A donnent aussi des bons résultats puisque le coefficient de frottement n'est relativement pas élevé.

5.2.2 Perte de masse

5.2.2.1 Influence du matériau mené

Les valeurs de la perte de masse utilisées pour dessiner les graphiques ci-dessous ont été prises du tableau 5.1 pour le taux de glissement 10.53%.

- **Cas du Nylon menant**

Les combinaisons avec l'acier ont été exclues de ce graphique, car les données de la perte de masse prises du tableau 5.1 ne montrent aucune valeur pour les combinaisons avec l'acier.

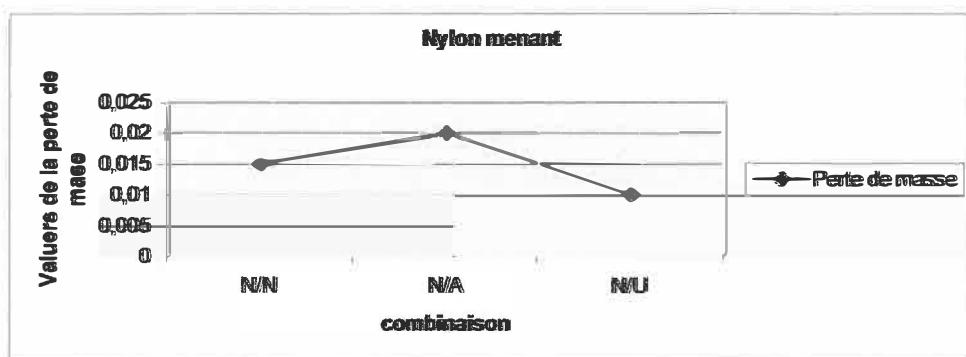


Figure 5.11 : Évolution de la perte de masse (Nylon menant)

La paire N/U donne le meilleur résultat pour la perte de masse. La combinaison N/A a une perte de masse deux (2) fois plus élevée que celle du N/U.

- **Cas de l'Acétal menant**

Comme dans le cas du Nylon menant, on exclut l'acier de ce graphique.

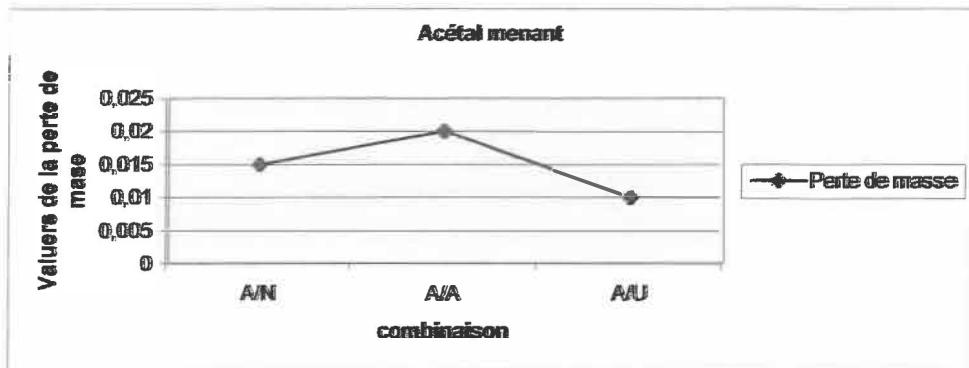


Figure 5.12 : évolution de la perte de masse (Acétal menant)

On remarque que la combinaison A/U a une perte de masse deux (2) fois plus petite que celle du A/A.

- **Cas du Polyéthylène menant**

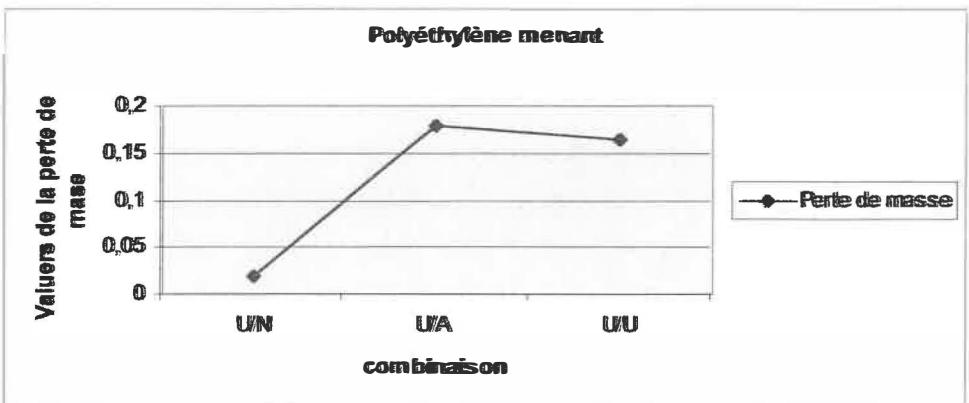


Figure 5.13 : Évolution de la perte de masse (Polyéthylène menant)

U/N présente le meilleur résultat pour la perte de masse en la comparant avec les autres combinaisons qui présentent des valeurs beaucoup plus élevées que celle-ci.

5.2.2.2 Influence du matériau menant

Comme dans les cas du matériau mené, les valeurs de la perte de masse sont tirées du tableau 5.1.

- **Cas du Nylon mené**

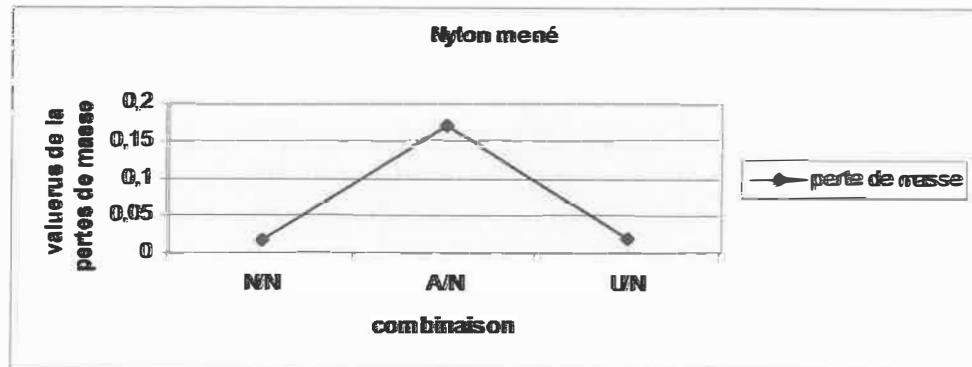


Figure 5.14 : Évolution de la perte de masse (Nylon mené)

Le classement des combinaisons N/N et U/U en fonction de la perte de masse est identique et les valeurs sont cinq (5) fois plus petites que celle de A/N. On remarque alors que dans le cas du Nylon mené, les polymères de même nature ont de bons résultats.

- **Cas de l'Acétal mené**

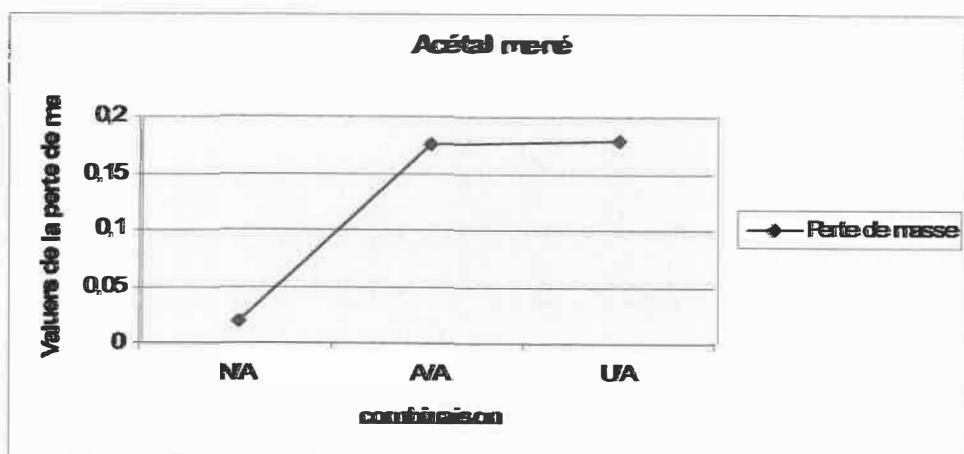


Figure 5.15 : Évolution de la perte de masse (Acétal mené)

La combinaison N/A a la perte de masse la plus basse par rapport aux autres combinaisons qui montrent des pertes de masse assez élevées.

- **Cas du Polyéthylène mené**

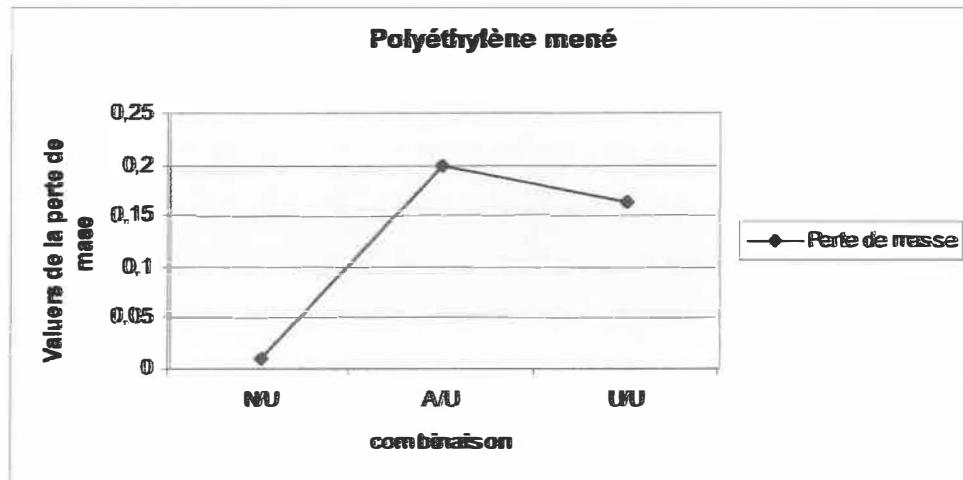


Figure 5.16 : Évolution de la perte de masse (Polyéthylène mené)

La combinaison incluant le Nylon a une usure plus faible et vingt (20) fois plus petite que celle de A/U.

5.2.2.3 Conclusion

A l'opposé des résultats de l'analyse du coefficient de frottement, les pertes de masse des paires testées ne sont pas identiques dans les cas des matériaux mené et menant. La paire qui possède la plus faible perte de masse est N/N (0.015), la combinaison A/A a une perte de masse comprise entre celle du N/N et celles des autres combinaisons avec le Polyéthylène qui ont les valeurs les plus élevées, en particulier le A/U.

CHAPITRE 6

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 RÉCAPITULATION

La réalisation de ce mémoire constitue un état d'avancement sur l'étude de la tribologie des engrenages en plastique. Elle est le fruit d'une collaboration entre trois équipes de recherches associées : l'Université de Liège en Belgique, l'Université du Québec à Trois-Rivières et l'École polytechnique de Montréal.

Au chapitre 1, les informations générales sur les engrenages en plastique sont fournies, incluant l'historique, la définition générale ainsi que leurs classifications. On peut déjà comprendre à cette étape que les engrenages sont classifiés suivant la position des axes de la paire des roues ainsi que les types de matériaux les constituant. Ensuite la problématique y est présentée nous disant que les problèmes posés sont liés à leur comportement cinématique et dynamiques ou à leur résistance. Les divers objectifs à atteindre au cours de ce mémoire sont d'aborder les caractéristiques d'usure et du frottement, de proposer une méthode de modélisation en utilisant le logiciel de CAO SolidWorks et d'analyser les résultats basées sur la variation du coefficient du frottement et d'usure par rapport à certains paramètres (température, perte de couple,...etc).

Au chapitre 2, la recherche bibliographique a permis d'étudier les travaux existants et de comprendre le fonctionnement et les principes de la tribologie des engrenages en plastique.

Pour le chapitre 3, les variables intervenant dans le frottement ainsi que leur influence sont déterminées afin de définir et positionner les problèmes de frottement et d'usure qui sont une de ses conséquences. Une étude expérimentale est présentée, elle décrit les types d'essais réalisés ainsi que le principe de fonctionnement de la machine utilisée pour réaliser ces essais.

Le chapitre 4 présente une modélisation par construction géométrique sur SolidWorks en étudiant la géométrie des engrenages (la forme de la dent et ses caractéristiques) ainsi que le fonctionnement d'une paire d'engrenages.

Le chapitre 5 traite les différents résultats des expériences; ils sont présentés dans des tableaux et des graphiques montrant la variation du coefficient de frottement en fonction de certains paramètres. Ces résultats expérimentaux obtenus reflètent les démarches et les montages qui ont déjà été décrits précédemment dans le chapitre 3.

Finalement, le chapitre 6 conclut en faisant ressortir les points critiques du projet et relève l'appréciation des résultats obtenus.

6.2 DISCUSSION

Grâce à cette collaboration, le sujet des engrenages en plastiques a permis d'approfondir certaines études de recherches et de mettre sur pieds un outil de travail qui facilitera les calculs par la suite.

Il a été ainsi intéressant d'élaborer un modèle de prévision du comportement thermomécanique et de la détérioration des engrenages en plastique et composite, face à la fatigue en flexion et de surface, à l'endommagement thermomécanique généralisé ainsi que face aux diverses formes d'usure sous l'effet combiné des contraintes induites et de l'échauffement des dents.

A l'aide de mesures expérimentales et d'un modèle de représentation théorique des engrenages, l'analyse des résultats nous a permis d'élaborer un modèle de calcul des propriétés tribologiques des engrenages ainsi que d'évaluer le coefficient du frottement pour certaines combinaisons des matériaux composites des engrenages en plastique.

Ainsi nous avons réussi, à modéliser à l'aide de SolidWorks, le profil en développante de cercle d'une roue dentée théorique en plastique normalisée ainsi que la trochoïde en racine de dent, et, d'autre part, à créer un autre modèle réel selon la même procédure et de comparer les résultats. Enfin, il s'agissait d'élaborer une procédure de création automatique de modèle numérique de pignon d'engrenage par une approche paramétrique.

6.3 RECOMMANDATION ET PERSPECTIVES DE LA RECHERCHE

L'intégration du module ENG_PLAS dans le logiciel SolidWorks a permis de réaliser des travaux et des modélisations qui ont pu approfondir ceux existant déjà dans certains logiciels commerciaux. La mise en place de cette solution a permis de réaliser et de simuler une roue dentée avec la prise en compte de tous les paramètres.

Un des objectifs du travail par la suite serait de développer en profondeur cette application afin de pouvoir réaliser des simulations et des calculs complexes sur des systèmes de chaînes d'engrenages en tenant compte des différents paramètres tels que l'usure, le coefficient de frottement, etc... par la méthode des éléments finis.

Cette application sera une grande innovation pour la mise en place de la conception dans le cadre de la tribologie des engrenages en plastique, car elle permettra de faire la modélisation et la simulation sur les différents polymères existants. Grâce à la recherche, la compatibilité des combinaisons polymères/polymères et des combinaisons de polymères/métal sera facilement définie.

BIBLIOGRAPHIE

- Adams Clifford E, « Plasting gearing: selection and application », NewYork: M. Dekker, 1986.
- ASM International, « Friction, lubrification and wear technology », Metals park, Ohio: ASM International, 1992.
- C.H. Jensen ; « Dessin Industriel » ; Traduction: J.Beaugrand-Champagne et P. Joubert ; McGraw-Hill ; Mtl ; ISBN 07-092982-3 ; 1972.
- Cartier Michel éd. HEF Groupe, « Guide d'emploi des traitements de surfaces appliqués aux problèmes de frottement », Paris : technique et documentation Lavoisier, c200
- Centre technique des industries mécaniques, « Conception mécanique et tribologie », Senlis, France : Centre technique des industries mécaniques, c1993.
- Chedmail Patrick éd., « CAO et simulation en mécanique », Paris : Hermès, 2002.
- Couffin Pierre, Herbin Jean-Yves et Puzenat Maurice, « CAO en mécanique », Paris : A.Colin, c1989.
- Craveur Jean-Charles et Marceau Dominique, « De la CAO au calcul », Paris : Dunod, 2001.
- D. Koffi, H. Yelle, R.Batail ; « Frottement de glissement entre polymère et acier » ; 2001.
- D.Koffi, H.Yelle, J.L.Bozet et M.Nelis ; « Étude comparée du comportement à L'usure des engrenages en plastiques et des éprouvettes d'essai normalisé de tribologie ; 2003.

- Demagna Koffi, Henri Yelle, Renald Guilbault; « Influence du rapport de conduite et de la géométrie de denture sur le comportement à l'échauffement et à l'usure des engrenages en plastique »; bulletin N°116, 2000.
- Drouin G., Gou M., Thiry P., Vinet R., avec collaboration de Yelle H. et Youssef A. Y. École Polytechnique de Montréal « Éléments de machines », QC, 1986.
- Ewert Richard H, «Gears and gear manufacture: the fundamentals», NewYork:Chapman and Hall, c1997.
- G.Kansal, P.N.Rao, S.K.Atrya; « La température et l'effort résiduel dans un engrenage moulé par injection »; Elsevier Science B.V, 2001.
- Georges Jean-Marie, « Frottement, usure et lubrification: tribologie ou science des surfaces », Paris : Eyrolles, 2000.
- Halling J., « Introduction to tribology », London: Wykeham, 1976.
- Institut de l'engrenage et des transmissions ; « Définition, éléments pour la fabrication, contrôle, tables d'involute » ; centre technique des industries mécaniques; Paris; 1998.
- Khonsari Michael M. ET Booser E Richard, « Applied tribology: bearing design and lubrication », NewYork: J. Wiley, 2001.
- Kurokawa, Massaya, Uchiyama, Yoshitaka ; Iwai, Tomoaksi ; Nagai, Susumu ; « Performance des engrenages en plastique fait en fibre de carbone renforcé du polyamide 12 » ; Wear v 254 n 5-6 March 2003.
- Ludema Kenneth C, « Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology », Boca Raton, Fla: CRC Press, 1996.

- M. C Mustapha Ghamraoui; « Étude du comportement des engrenages en matières plastiques lorsqu'ils s'engrènent avec un pignon (Zn – 27% Al) ».
- M. Cartier, P. Kapsa; « Manifestation de l'usure » ; Technique de l'ingénieur ; BM 5068 ; 2000.
- Murray David, « Inside SolidWorks 2003 » [3rd ed.], Clifton Park, NY: Delmar Learning; Santa Fe: Onward Press, 2003.
- R. Batail, H. Kioua, H. Yelle ; « Frottement de glissement entre polymères et l'acier en contact sur une ligne ».
- Rohatgi Pardeep K, Blau Peter J, Yudt Charles S, ASM International. Wear Resistant Materials Group États-Unis. Dept. Of Energy. Office and advanced Transportation Materials, Tribology Program, «Tribology of composite materials», ASM International Metals Park, Ohio, c1990.
- Shoji, Akira, Ohisa, Tadayoshi, Kakinuma, Norihisa, Ttashiro; “Le rapport moulé a déformé la couche et le bruit caractéristique de l'injection à moulé la vitesse en plastique » ; Hiroshi MT Proceedings of the international Conference on Mechanical Transmissions (ICMT 2001)
- Smith James D, «Gears and their vibration: a basic approach to understanding gear noise», New York: M. Dekker, 1983.
- Y. Yamaguchi ; « Frottement » ; Technique de l'ingénieur ; A 3138 ; 2000.

- <http://www.psrc.usm.edu/macrog/plastic.htm>; <http://www.matweb.com>.
- <http://www.gmc.ulaval.ca/html/Recherche/Systemes.htm>.
- <http://swcadapp.com>.

ANNEXE A

Calcul des contraintes pour certains types de contact

Tableau A.1 : Type de contact A/A, S=5.13%, Vgli =0.1374 m/s

X (kg)	Q (N)	B (mm)	2b (mm)	Sigma max (N/m ²)	Vgl*Sigmax (Mpa-m/sec)
0,2	51,81	0,501	1,002	4115384,362	0,565453811
0,3	56,72	0,524	1,048	4305787,326	0,591615179
0,5	66,53	0,568	1,135	4663328,917	0,640741393
1	91,05	0,664	1,328	5455613,331	0,749601272
1,5	115,6	0,748	1,496	6146608,58	0,844544019
2	140,1	0,824	1,647	6767412,893	0,929842532
2,5	164,6	0,893	1,786	7335867,876	1,007948246
3	189,2	0,957	1,914	7863335,026	1,080422233
3,5	213,7	1,017	2,035	8357578,474	1,148331282
4	238,2	1,074	2,148	8824182,579	1,212442686
4,5	262,7	1,128	2,256	9267323,153	1,273330201
5	287,3	1,179	2,359	9690219,742	1,331436193
5,5	311,8	1,229	2,458	10095416,73	1,387110258
6	336,3	1,276	2,552	10484966,34	1,440634375
6,5	360,8	1,322	2,644	10860552,44	1,492239905
7	385,4	1,366	2,732	11223576,95	1,542119473
7,5	409,9	1,409	2,818	11575221,8	1,590435476
8	434,4	1,45	2,901	11916494,45	1,637326338
8,5	458,9	1,491	2,982	12248261,93	1,682911189
9	483,5	1,53	3,06	12571276,8	1,727293433
9,5	508	1,568	3,137	12886197,29	1,770563508
10	532,5	1,606	3,212	13193603,03	1,812801056
10,5	557	1,642	3,285	13494007,6	1,854076645
11	581,6	1,678	3,356	13787868,63	1,89445315
11,5	606,1	1,713	3,426	14075595,96	1,933986885
12	630,6	1,748	3,495	14357558,35	1,972728518
12,5	655,1	1,781	3,562	14634089,04	2,010723834
13	679,7	1,814	3,629	14905490,34	2,048014373

Tableau A.2 : Type de contact A/A, S=10.53%, Vgli =0.0.2821 m/s

X (kg)	Q (N)	B (mm)	2b (mm)	Sigma max (N/m ²)	Vgl*Sigmax (Mpa-m/sec)
0,2	51,81	0,501	1,002	4115384,362	1,160949929
0,3	56,72	0,524	1,048	4305787,326	1,214662605
0,5	66,53	0,568	1,135	4663328,917	1,315525087
1	91,05	0,664	1,328	5455613,331	1,539028521
1,5	115,6	0,748	1,496	6146608,58	1,733958281
2	140,1	0,824	1,647	6767412,893	1,909087177
2,5	164,6	0,893	1,786	7335867,876	2,069448328
3	189,2	0,957	1,914	7863335,026	2,218246811
3,5	213,7	1,017	2,035	8357578,474	2,357672888
4	238,2	1,074	2,148	8824182,579	2,489301906
4,5	262,7	1,128	2,256	9267323,153	2,614311861
5	287,3	1,179	2,359	9690219,742	2,733610989
5,5	311,8	1,229	2,458	10095416,73	2,847917058
6	336,3	1,276	2,552	10484966,34	2,957809004
6,5	360,8	1,322	2,644	10860552,44	3,063761844
7	385,4	1,366	2,732	11223576,95	3,166171058
7,5	409,9	1,409	2,818	11575221,8	3,265370071
8	434,4	1,45	2,901	11916494,45	3,361643085
8,5	458,9	1,491	2,982	12248261,93	3,45523469
9	483,5	1,53	3,06	12571276,8	3,546357186
9,5	508	1,568	3,137	12886197,29	3,635196257
10	532,5	1,606	3,212	13193603,03	3,721915415
10,5	557	1,642	3,285	13494007,6	3,806659545
11	581,6	1,678	3,356	13787868,63	3,889557741
11,5	606,1	1,713	3,426	14075595,96	3,97072562
12	630,6	1,748	3,495	14357558,35	4,050267211
12,5	655,1	1,781	3,562	14634089,04	4,128276519
13	679,7	1,814	3,629	14905490,34	4,204838825

Tableau A.3 : Type de contact A/A, S=18.18%, Vgli =0.4871 m/s

X (kg)	Q (N)	B (mm)	2b (mm)	Sigma max (N/m ²)	Vgl*Sigmax (Mpa-m/sec)
0,2	51,81	0,501	1,002	4115384,362	2,004603723
0,3	56,72	0,524	1,048	4305787,326	2,097349006
0,5	66,53	0,568	1,135	4663328,917	2,271507515
1	91,05	0,664	1,328	5455613,331	2,657429253
1,5	115,6	0,748	1,496	6146608,58	2,99401304
2	140,1	0,824	1,647	6767412,893	3,29640682
2,5	164,6	0,893	1,786	7335867,876	3,573301243
3	189,2	0,957	1,914	7863335,026	3,830230491
3,5	213,7	1,017	2,035	8357578,474	4,070976475
4	238,2	1,074	2,148	8824182,579	4,298259334
4,5	262,7	1,128	2,256	9267323,153	4,514113108
5	287,3	1,179	2,359	9690219,742	4,720106036
5,5	311,8	1,229	2,458	10095416,73	4,917477487
6	336,3	1,276	2,552	10484966,34	5,107227103
6,5	360,8	1,322	2,644	10860552,44	5,290175094
7	385,4	1,366	2,732	11223576,95	5,467004332
7,5	409,9	1,409	2,818	11575221,8	5,63829054
8	434,4	1,45	2,901	11916494,45	5,804524447
8,5	458,9	1,491	2,982	12248261,93	5,966128385
9	483,5	1,53	3,06	12571276,8	6,123468931
9,5	508	1,568	3,137	12886197,29	6,276866702
10	532,5	1,606	3,212	13193603,03	6,426604036
10,5	557	1,642	3,285	13494007,6	6,572931103
11	581,6	1,678	3,356	13787868,63	6,71607081
11,5	606,1	1,713	3,426	14075595,96	6,856222792
12	630,6	1,748	3,495	14357558,35	6,993566674
12,5	655,1	1,781	3,562	14634089,04	7,128264772
13	679,7	1,814	3,629	14905490,34	7,260464345

Tableau A.4 : Type de contact A/N, S=5.13%, Vgli =0.1374 m/s

X (kg)	Q (N)	b (mm)	2b (mm)	Sigma max (N/m ²)	Vgl*Sigmax (Mpa-m/sec)
0,2	51,81	0,539	1,078	3825275,385	0,525592838
0,3	56,72	0,564	1,128	4002256,125	0,549909992
0,5	66,53	0,611	1,221	4334593,26	0,595573114
1	91,05	0,714	1,429	5071026,555	0,696759049
1,5	115,6	0,805	1,61	5713310,942	0,785008923
2	140,1	0,886	1,772	6290352,416	0,864294422
2,5	164,6	0,961	1,921	6818734,861	0,93689417
3	189,2	1,03	2,059	7309018,86	1,004259191
3,5	213,7	1,094	2,189	7768421,223	1,067381076
4	238,2	1,156	2,311	8202132,643	1,126973025
4,5	262,7	1,214	2,427	8614034,565	1,183568349
5	287,3	1,269	2,538	9007119,577	1,23757823
5,5	311,8	1,322	2,644	9383752,697	1,289327621
6	336,3	1,373	2,746	9745841,486	1,33907862
6,5	360,8	1,422	2,844	10094951,11	1,387046282
7	385,4	1,47	2,939	10432384,65	1,433409651
7,5	409,9	1,516	3,032	10759240,73	1,478319676
8	434,4	1,56	3,121	11076455,78	1,521905024
8,5	458,9	1,604	3,208	11384835,71	1,564276427
9	483,5	1,646	3,292	11685080,05	1,605529999
9,5	508	1,687	3,375	11977800,61	1,645749804
10	532,5	1,728	3,455	12263536,15	1,685009868
10,5	557	1,767	3,534	12542764,07	1,723375784
11	581,6	1,806	3,611	12815909,73	1,760905997
11,5	606,1	1,843	3,686	13083354,07	1,79765285
12	630,6	1,88	3,76	13345439,87	1,833663439
12,5	655,1	1,916	3,833	13602476,87	1,868980322
13	679,7	1,952	3,904	13854746,07	1,90364211

Tableau A.5 : Type de contact A/N, S=10.53%, Vgli =0.2821 m/s

X (kg)	Q (N)	b (mm)	2b (mm)	Sigma max (N/m ²)	Vgl*Sigmax (Mpa·m/sec)
0,2	51,81	0,539	1,078	3825275,385	1,079110186
0,3	56,72	0,564	1,128	4002256,125	1,129036453
0,5	66,53	0,611	1,221	4334593,26	1,222788759
1	91,05	0,714	1,429	5071026,555	1,430536591
1,5	115,6	0,805	1,61	5713310,942	1,611725017
2	140,1	0,886	1,772	6290352,416	1,774508416
2,5	164,6	0,961	1,921	6818734,861	1,923565104
3	189,2	1,03	2,059	7309018,86	2,06187422
3,5	213,7	1,094	2,189	7768421,223	2,191471627
4	238,2	1,156	2,311	8202132,643	2,313821619
4,5	262,7	1,214	2,427	8614034,565	2,430019151
5	287,3	1,269	2,538	9007119,577	2,540908433
5,5	311,8	1,322	2,644	9383752,697	2,647156636
6	336,3	1,373	2,746	9745841,486	2,749301883
6,5	360,8	1,422	2,844	10094951,11	2,847785707
7	385,4	1,47	2,939	10432384,65	2,942975709
7,5	409,9	1,516	3,032	10759240,73	3,035181809
8	434,4	1,56	3,121	11076455,78	3,124668175
8,5	458,9	1,604	3,208	11384835,71	3,211662155
9	483,5	1,646	3,292	11685080,05	3,296361083
9,5	508	1,687	3,375	11977800,61	3,378937552
10	532,5	1,728	3,455	12263536,15	3,459543549
10,5	557	1,767	3,534	12542764,07	3,538313745
11	581,6	1,806	3,611	12815909,73	3,615368135
11,5	606,1	1,843	3,686	13083354,07	3,690814184
12	630,6	1,88	3,76	13345439,87	3,764748588
12,5	655,1	1,916	3,833	13602476,87	3,837258725
13	679,7	1,952	3,904	13854746,07	3,908423866

Tableau A.6 : Type de contact A/N, S=1.79%, Vgli =0.4871 m/s

X (kg)	Q (N)	b (mm)	2b (mm)	Sigma max (N/m ²)	Vgl*Sigmax (Mpa·m/sec)
0,2	51,81	0,501	1,002	4115384,362	2,004603723
0,3	56,72	0,524	1,048	4305787,326	2,097349006
0,5	66,53	0,568	1,135	4663328,917	2,271507515
1	91,05	0,664	1,328	5455613,331	2,657429253
1,5	115,6	0,748	1,496	6146608,58	2,99401304
2	140,1	0,824	1,647	6767412,893	3,29640682
2,5	164,6	0,893	1,786	7335867,876	3,573301243
3	189,2	0,957	1,914	7863335,026	3,830230491
3,5	213,7	1,017	2,035	8357578,474	4,070976475
4	238,2	1,074	2,148	8824182,579	4,298259334
4,5	262,7	1,128	2,256	9267323,153	4,514113108
5	287,3	1,179	2,359	9690219,742	4,720106036
5,5	311,8	1,229	2,458	10095416,73	4,917477487
6	336,3	1,276	2,552	10484966,34	5,107227103
6,5	360,8	1,322	2,644	10860552,44	5,290175094
7	385,4	1,366	2,732	11223576,95	5,467004332
7,5	409,9	1,409	2,818	11575221,8	5,63829054
8	434,4	1,45	2,901	11916494,45	5,804524447
8,5	458,9	1,491	2,982	12248261,93	5,966128385
9	483,5	1,53	3,06	12571276,8	6,123468931
9,5	508	1,568	3,137	12886197,29	6,276866702
10	532,5	1,606	3,212	13193603,03	6,426604036
10,5	557	1,642	3,285	13494007,6	6,572931103
11	581,6	1,678	3,356	13787868,63	6,71607081
11,5	606,1	1,713	3,426	14075595,96	6,856222792
12	630,6	1,748	3,495	14357558,35	6,993566674
12,5	655,1	1,781	3,562	14634089,04	7,128264772
13	679,7	1,814	3,629	14905490,34	7,260464345

Tableau A.7 : Type de contact N/S, S=5.13%, Vgli =0.1374 m/s

X (kg)	Q (N)	b (mm)	2b (mm)	Sigma max (N/m ²)	Vgl*Sigmax (Mpa·m/sec)
0,2	51,81	0,202	0,404	10208910,44	1,402704295
0,3	56,72	0,211	0,423	10681237,36	1,467602013
0,5	66,53	0,229	0,458	11568180,05	1,589467938
1	91,05	0,268	0,535	13533576,21	1,859513371
1,5	115,6	0,302	0,603	15247707,38	2,095034994
2	140,1	0,332	0,664	16787718	2,306632454
2,5	164,6	0,36	0,72	18197867,21	2,500386955
3	189,2	0,386	0,772	19506339,14	2,680170997
3,5	213,7	0,41	0,82	20732394,02	2,848630939
4	238,2	0,433	0,866	21889884,82	3,007670174
4,5	262,7	0,455	0,909	22989170,33	3,158712004
5	287,3	0,475	0,951	24038237,21	3,302853792
5,5	311,8	0,495	0,991	25043397,2	3,440962776
6	336,3	0,514	1,029	26009741,23	3,573738445
6,5	360,8	0,533	1,066	26941446,4	3,701754735
7	385,4	0,551	1,101	27841990,4	3,825489481
7,5	409,9	0,568	1,136	28714305,23	3,945345539
8	434,4	0,585	1,169	29560890,05	4,061666292
8,5	458,9	0,601	1,202	30383895,66	4,174747264
9	483,5	0,617	1,234	31185188,97	4,284844964
9,5	508	0,632	1,265	31966402,78	4,392183741
10	532,5	0,647	1,295	32728974,96	4,496961159
10,5	557	0,662	1,324	33474179,56	4,599352271
11	581,6	0,677	1,353	34203151,79	4,699513056
11,5	606,1	0,691	1,381	34916908,34	4,797583206
12	630,6	0,704	1,409	35616363,98	4,893688411
12,5	655,1	0,718	1,436	36302345,36	4,987942253
13	679,7	0,731	1,463	36975602,42	5,080447772

Tableau A.8 : Type de contact N/S, S=10.53%, Vgli =0.2821 m/s

X (kg)	Q (N)	b (mm)	2b (mm)	Sigma max (N/m ²)	Vgl*Sigmax (Mpa·m/sec)
0,2	51,81	0,202	0,404	10208910,44	2,879933635
0,3	56,72	0,211	0,423	10681237,36	3,013177058
0,5	66,53	0,229	0,458	11568180,05	3,263383591
1	91,05	0,268	0,535	13533576,21	3,817821848
1,5	115,6	0,302	0,603	15247707,38	4,301378252
2	140,1	0,332	0,664	16787718	4,735815249
2,5	164,6	0,36	0,72	18197867,21	5,133618341
3	189,2	0,386	0,772	19506339,14	5,50273827
3,5	213,7	0,41	0,82	20732394,02	5,848608354
4	238,2	0,433	0,866	21889884,82	6,175136507
4,5	262,7	0,455	0,909	22989170,33	6,485244951
5	287,3	0,475	0,951	24038237,21	6,781186716
5,5	311,8	0,495	0,991	25043397,2	7,064742351
6	336,3	0,514	1,029	26009741,23	7,337348001
6,5	360,8	0,533	1,066	26941446,4	7,60018203
7	385,4	0,551	1,101	27841990,4	7,854225492
7,5	409,9	0,568	1,136	28714305,23	8,100305506
8	434,4	0,585	1,169	29560890,05	8,339127082
8,5	458,9	0,601	1,202	30383895,66	8,571296967
9	483,5	0,617	1,234	31185188,97	8,797341808
9,5	508	0,632	1,265	31966402,78	9,017722223
10	532,5	0,647	1,295	32728974,96	9,232843836
10,5	557	0,662	1,324	33474179,56	9,443066054
11	581,6	0,677	1,353	34203151,79	9,648709121
11,5	606,1	0,691	1,381	34916908,34	9,850059842
12	630,6	0,704	1,409	35616363,98	10,04737628
12,5	655,1	0,718	1,436	36302345,36	10,24089163
13	679,7	0,731	1,463	36975602,42	10,43081744

Tableau A.9 : Type de contact N/S, S=18.18%, V_{gli} =0.4871 m/s

X (kg)	Q (N)	b (mm)	2b (mm)	Sigma max (N/m ²)	V _{gl} *Sigmax (Mpa·m/sec)
0,2	51,81	0,202	0,404	10208910,44	4,972760275
0,3	56,72	0,211	0,423	10681237,36	5,202830716
0,5	66,53	0,229	0,458	11568180,05	5,634860501
1	91,05	0,268	0,535	13533576,21	6,592204971
1,5	115,6	0,302	0,603	15247707,38	7,427158265
2	140,1	0,332	0,664	16787718	8,177297439
2,5	164,6	0,36	0,72	18197867,21	8,86418112
3	189,2	0,386	0,772	19506339,14	9,501537793
3,5	213,7	0,41	0,82	20732394,02	10,09874913
4	238,2	0,433	0,866	21889884,82	10,66256289
4,5	262,7	0,455	0,909	22989170,33	11,19802487
5	287,3	0,475	0,951	24038237,21	11,70902534
5,5	311,8	0,495	0,991	25043397,2	12,19863878
6	336,3	0,514	1,029	26009741,23	12,66934495
6,5	360,8	0,533	1,066	26941446,4	13,12317854
7	385,4	0,551	1,101	27841990,4	13,56183352
7,5	409,9	0,568	1,136	28714305,23	13,98673808
8	434,4	0,585	1,169	29560890,05	14,39910954
8,5	458,9	0,601	1,202	30383895,66	14,79999558
9	483,5	0,617	1,234	31185188,97	15,19030555
9,5	508	0,632	1,265	31966402,78	15,57083479
10	532,5	0,647	1,295	32728974,96	15,9422837
10,5	557	0,662	1,324	33474179,56	16,30527286
11	581,6	0,677	1,353	34203151,79	16,66035524
11,5	606,1	0,691	1,381	34916908,34	17,00802605
12	630,6	0,704	1,409	35616363,98	17,3487309
12,5	655,1	0,718	1,436	36302345,36	17,68287243
13	679,7	0,731	1,463	36975602,42	18,01081594

ANNEXE B

**Évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement
et de la différence de poids de chaque type d'essai**

Tableau B.1 : Valeurs du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement et du poids / acétal mené

Type d'essai	Taux de glissement	coefficient de frottement	Différence de poids
Acétal/Acétal	1,79%	0,05	0,01661
Acétal/Acétal	5,13%	0,06	0,0004
Acétal/Acétal	10,53%	0,08	0,18508
Acétal/Acétal	22,22%	0,08	0,00642

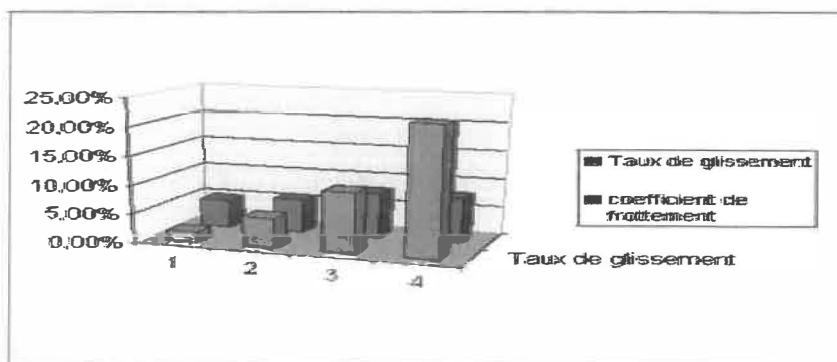


Figure B.1: Évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement

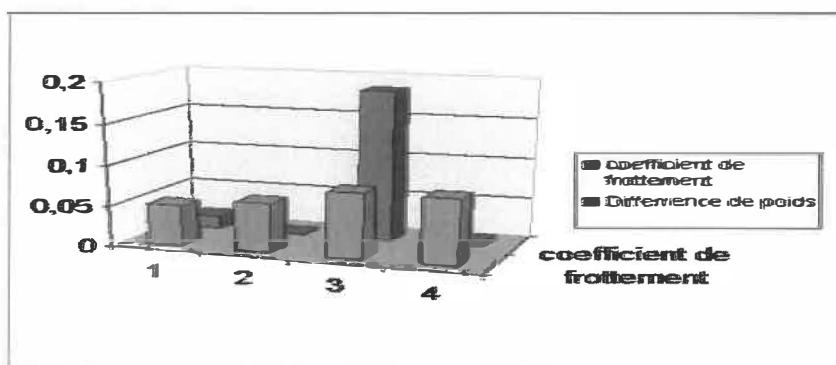


Figure B.2: Évolution du coefficient de frottement en fonction de la différence de poids.

Tableau B.2 : Valeurs du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement et du poids, Acétal / Nylon

Type d'essai	Taux de glissement	coefficient de frottement	Déférence de poids
Acétal/Nylon	1,79%	0,06	0,01223
Acétal/Nylon	5,13%	0,1	0,02737
Acétal/Nylon	10,53%	0,11	0,16232
Acétal/Nylon	22,22%	0,08	0,00379

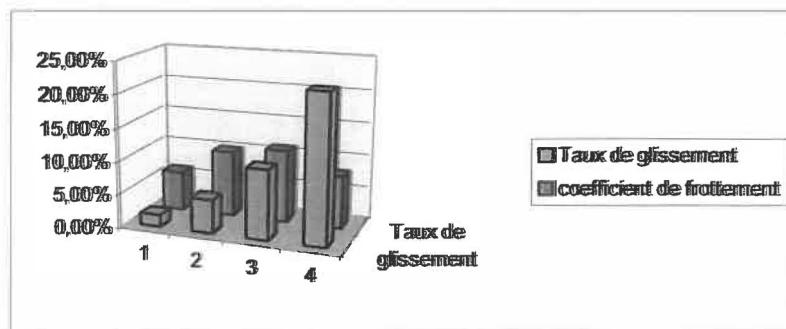


Figure B.3: Évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement

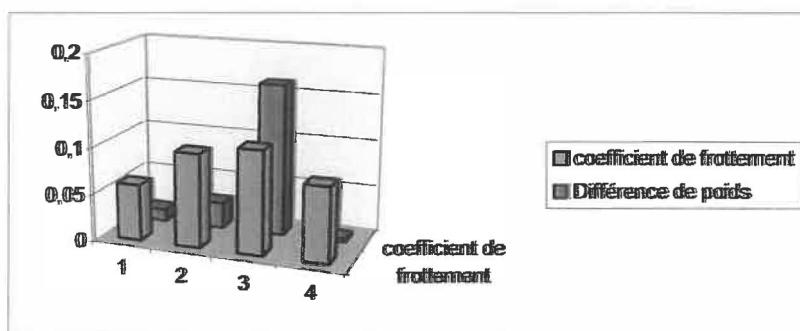


Figure B.4: Évolution du coefficient de frottement en fonction de la différence de poids.

Tableau B.3 : Valeurs du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement et du poids, Acétal / UHMW

Type d'essai	Taux de glissement	coefficient de frottement	Différence de poids
Acétal/UHMW	1,79%	0,17	0,00077
Acétal/UHMW	5,13%	0,26	0,00214
Acétal/UHMW	10,53%	0,27	0,17919
Acétal/UHMW	22,22%	0,18	10,22943

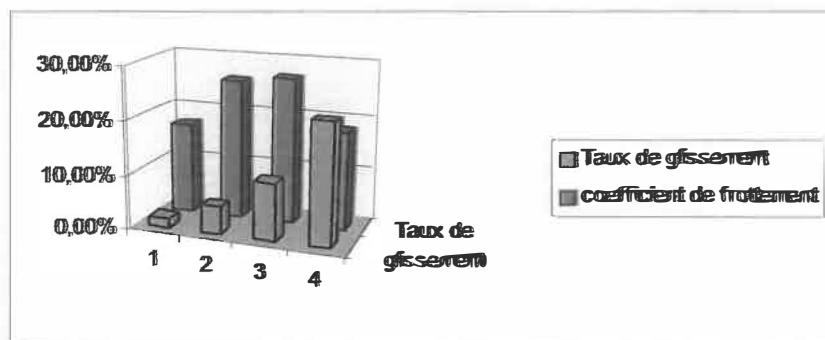


Figure B.5: Évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement

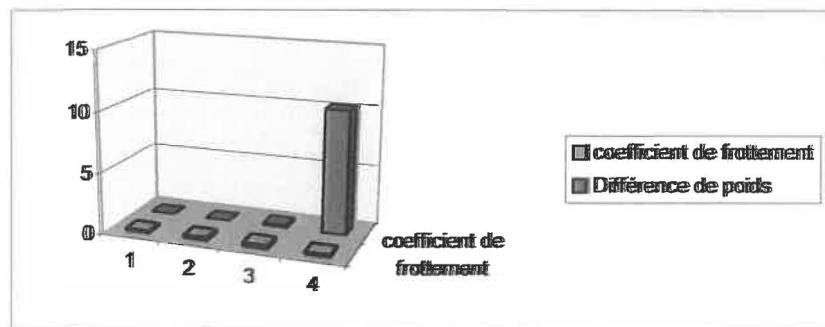


Figure B.6: Évolution du coefficient de frottement en fonction de la différence de poids.

Tableau B.4 : Valeurs du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement et du poids, Nylon / Acier

Type d'essai	Taux de glissement	coefficient de frottement	Différence de poids
Nylon/Acier	1,79%	0,21	NA
Nylon/Acier	5,13%	0,5	NA
Nylon/Acier	10,53%	0,36	NA
Nylon/Acier	22,22%	0,26	NA

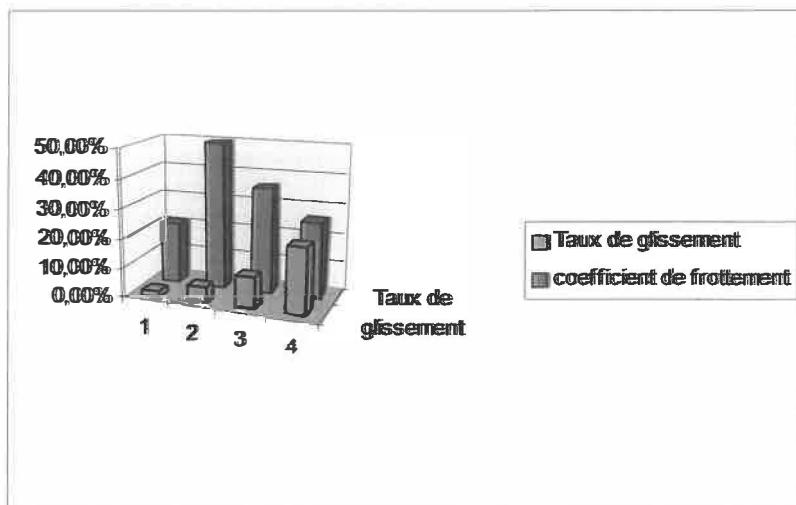


Figure B.7: Évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement

Tableau B.5 : Valeurs du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement et du poids, Nylon / Nylon

Type d'essai	Taux de glissement	coefficient de frottement	Différence de poids
Nylon/Nylon	1,79%	0,06	0,00029
Nylon/Nylon	5,13%	0,09	0,00393
Nylon/Nylon	10,53%	0,1	0,00887
Nylon/Nylon	22,22%	0,07	0,00765

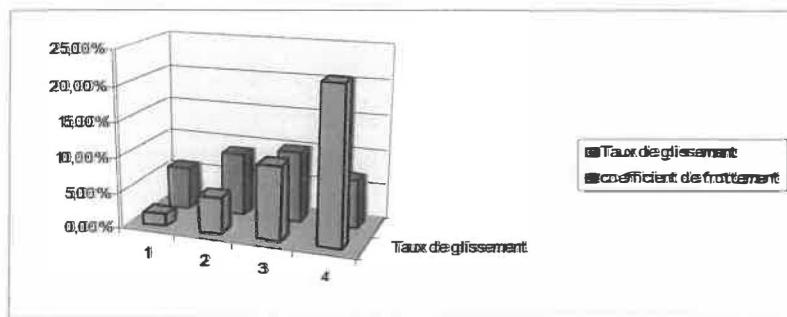


Figure B.8: Évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement

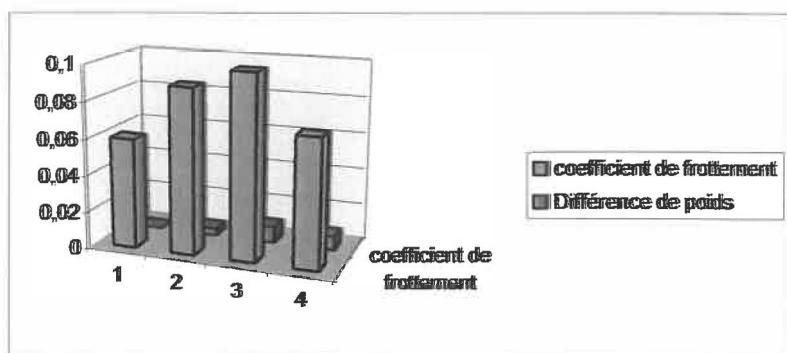


Figure B.9: Évolution du coefficient de frottement en fonction de la différence de poids.

Tableau B.6 : Valeurs du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement et du poids, Nylon / UHMW

Type d'essai	Taux de glissement	coefficient de frottement	Déférence de poids
Nylon/UHMW	1,79%	0,19	-0,00711
Nylon/UHMW	5,13%	0,24	0,00105
Nylon/UHMW	10,53%	0,27	0,00294

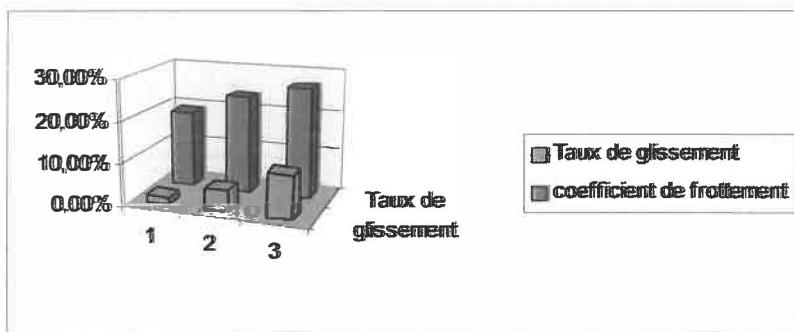


Figure B.10: Évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement

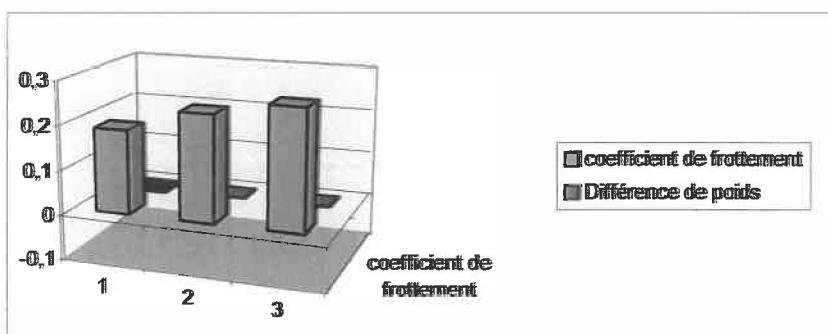


Figure B.11: Évolution du coefficient de frottement en fonction de la différence de poids.

Tableau B.6 : Valeurs du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement et du poids, UHMW / Acier

Type d'essai	Taux de glissement	coefficient de frottement	Différence de poids
UHMW/Aacier	1,79%	0,18	NA
UHMW/Aacier	5,13%	0,27	NA
UHMW/Aacier	10,53%	0,25	NA
UHMW/Aacier	22,22%	0,21	NA

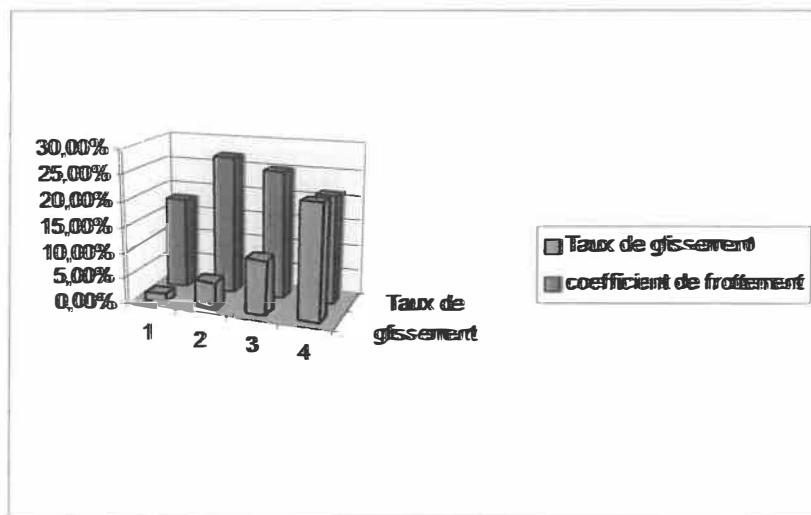


Figure B.12 : Évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement

Tableau B.7 : Valeurs du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement et du poids, UHMW / Acier

Type d'essai	Taux de glissement	coefficient de frottement	Différence de poids
UHMW/UHMW	1,79%	0,22	-0,00048
UHMW/UHMW	5,13%	0,36	-0,07894
UHMW/UHMW	10,53%	0,37	0,16404
UHMW/UHMW	22,22%	0,27	0,73274

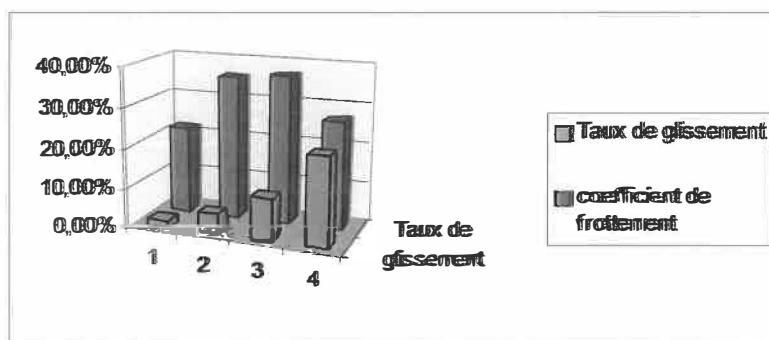


Figure B.13 : Évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement

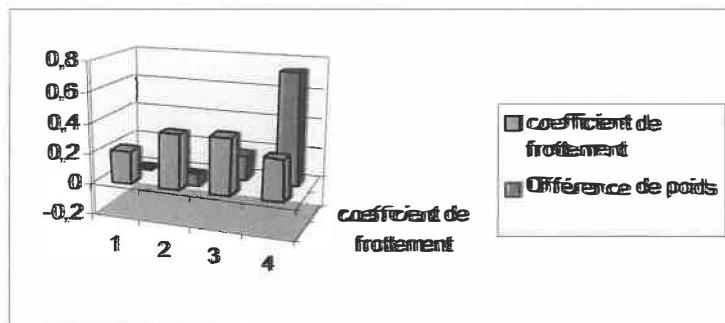


Figure B.14: Évolution du coefficient de frottement en fonction de la différence de poids.

ANNEXE C

**Exemple d'application spécifique de la modélisation d'une roue dentée
en utilisant SoliWorks**

Mode d'emploi :

Développé dans le but de faciliter la création de modèles de roues dentées, le programme **ENGPLAS-CAO** permet de modéliser de manière complètement automatique, un pignon à denture droite.

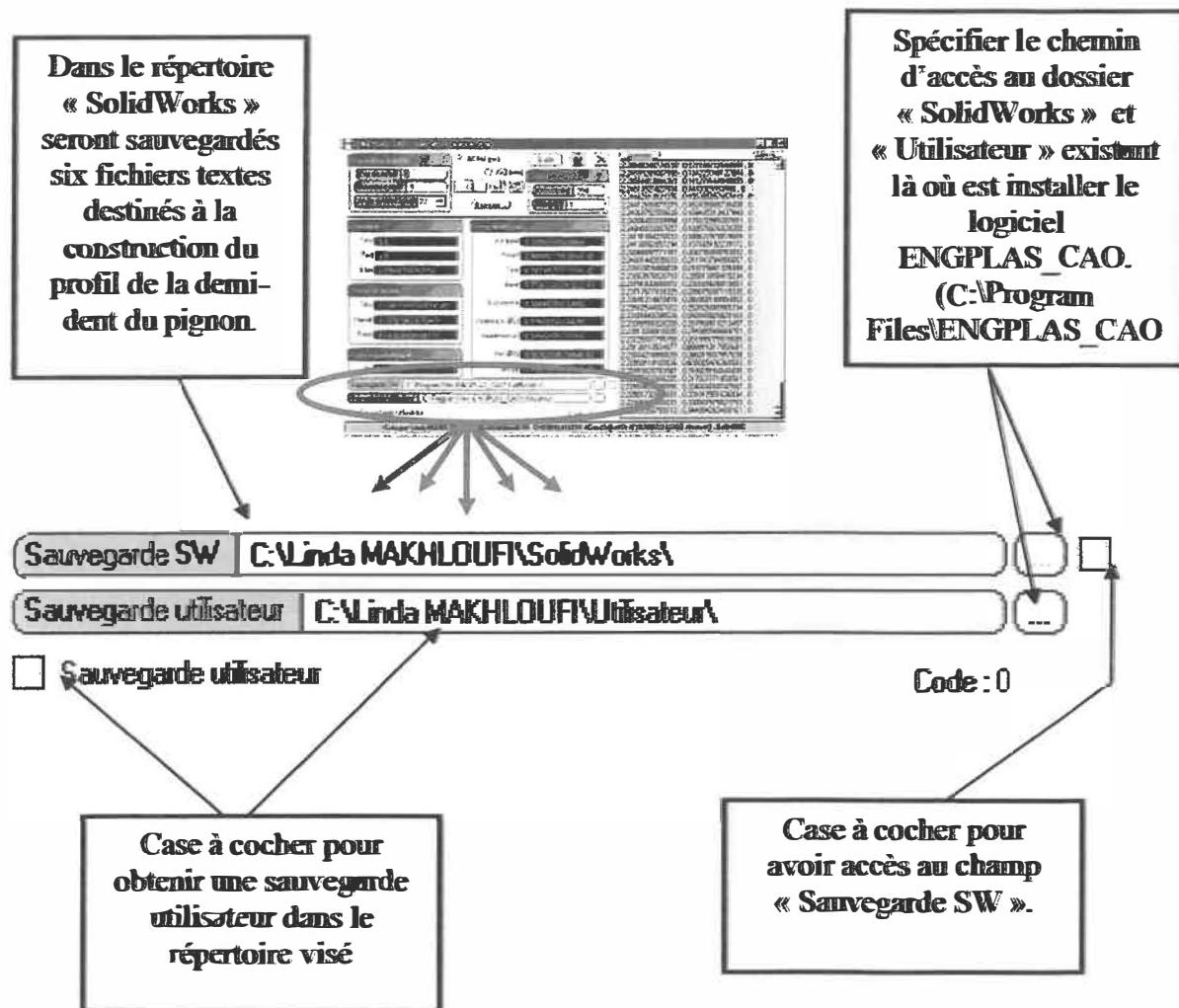


Figure C.1 : les chemins d'accès spécifiés à la sauvegarde

Le dossier « SolidWorks » ne doit en aucun cas être modifié car il contient les fichiers sources indispensables à la modélisation du modèle sur SolidWoks.

La sauvegarde utilisateur est commandée par la case à cocher et cet enregistrement se fera dans le dossier spécifié dans le champ « Sauvegarde utilisateur ».

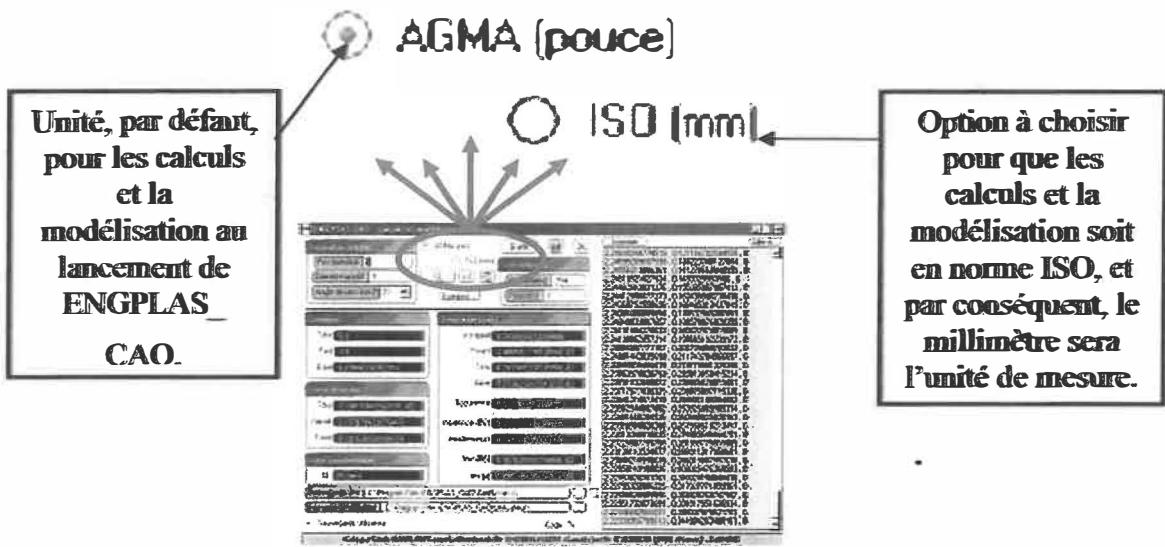


Figure C.2 : Choix de l'unité

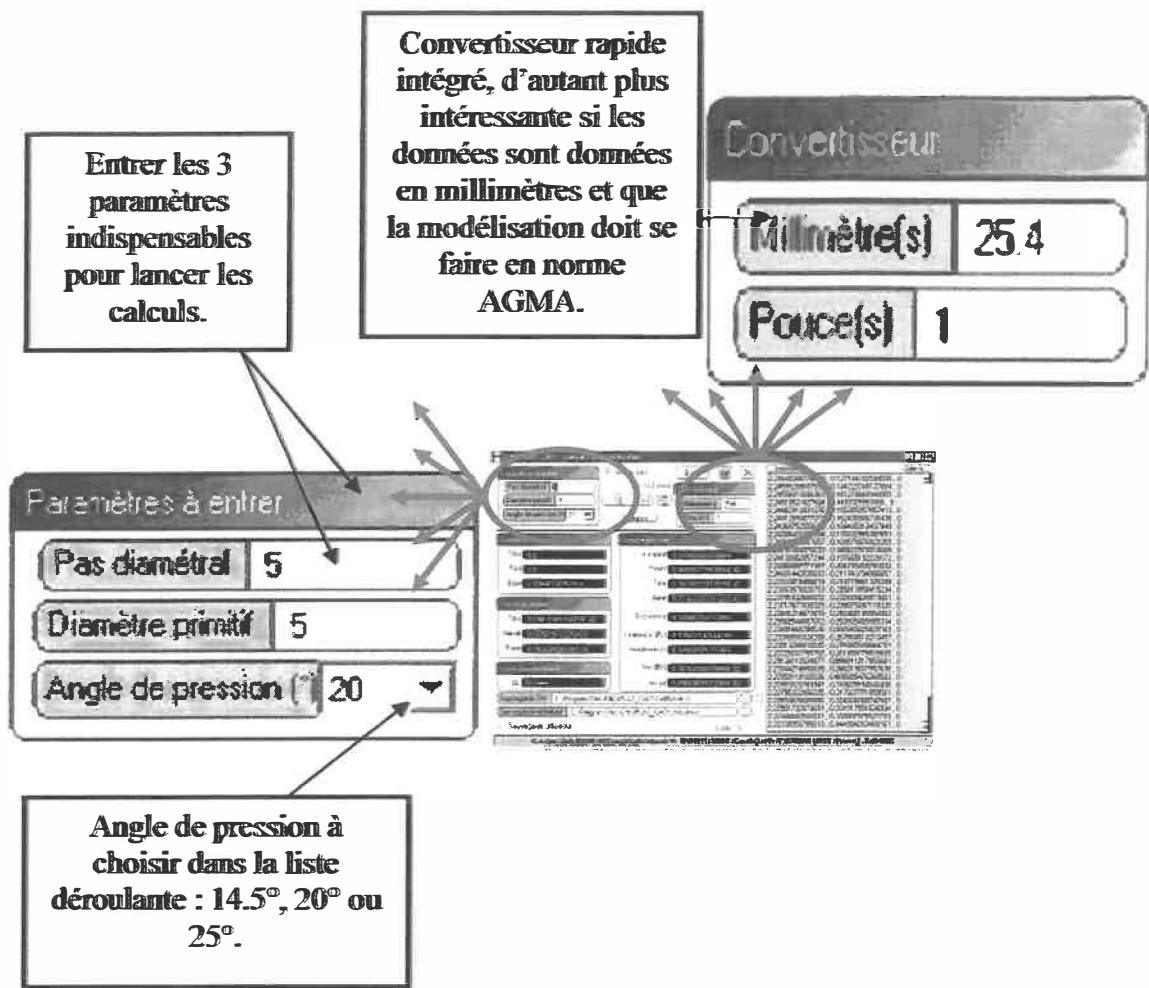


Figure C.3 : La saisie des paramètres



Figure C.4: Lancement des paramètres

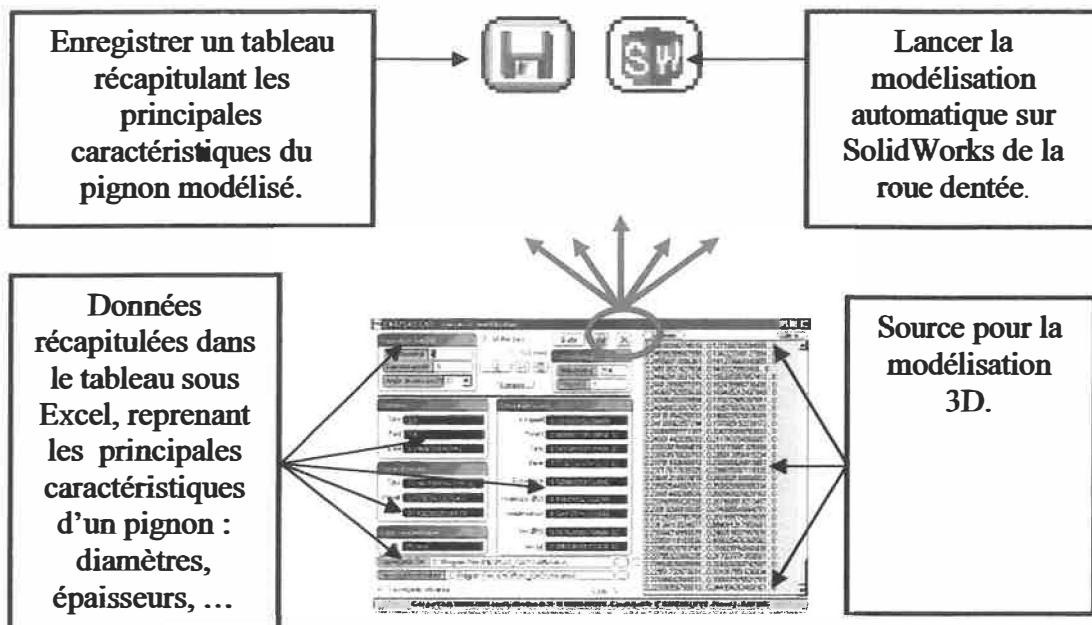


Figure C.5 : Enregistrement et modélisation

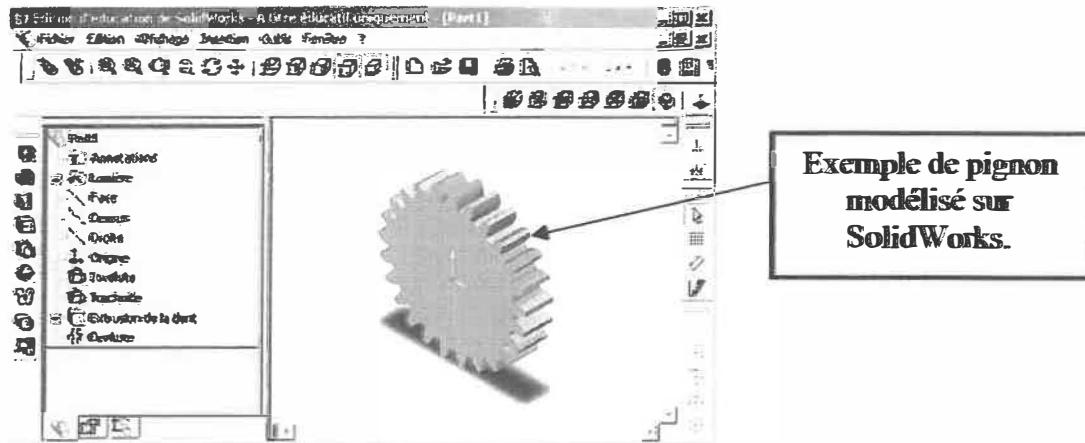


Figure C.6: Roue dentée modélisée par SolidWorks