UNIVERSITE DE MONTREAL

USURE DU NYLON ET DE L'ACETAL FROTTANT SUR L'ACIER

par

M'hammed AMAROUCH

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

ECOLE POLYTECHNIQUE

MEMOIRE PRESENTE EN VU DE L'OBTENTION

DU GRADE DE MAITRE ES SCIENCES APPLIQUEES (M.Sc.A)

Novembre 1989

c M'hammed Amarouch 1989

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Canadian Theses Service
Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-58158-1

Canada

UNIVERSITE DE MONTREAL

ECOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

USURE DU NYLON ET DE L'ACETAL FROTTANT SUR L'ACIER

présenté par: M'hammed AMAROUCH

en vue de l'obtention de grade de: M.Sc.A

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. Habib Benabdallah, Ph.D., président

M. Raymond Gauvin , D.Sc.A

M. Henri Yelle , Ph.D.

A ma famille qui m'a supporté tout le long de mes études.

SOMMAIRE

L'usure est un phénomène qui existe depuis toujours. Ce n'est cependant que récemment que des études spécifiques dans le domaine ont été entammées. La nôtre a porté sur l'usure du nylon 6/6 (polyamide PA) et de l'acétal (polyoxyméthylène POM) lorsqu'ils frottent contre l'acier. Ces deux plastiques sont assez répandus dans la fabrication de pièces mécaniques frottantes, et la combinaison plastique/métal présente des avantages liés aux problèmes thermiques et se retrouve dans beaucoup d'applications et de montages mécaniques. Vu le caractère autolubrifiant des plastiques, on a choisi un frottement à sec. Ceci représente d'ailleurs la majorité des cas où les plastiques trouvent application.

L'examen de la littérature technique existante nous a permis de relever un manque imminent de données expérimentales surtout pour des conditions d'essais (charge, vitesse, rugosité) peu sévères. Dans notre projet, nous avons donc voulu plus particulièrement étudier, pour ce genre de conditions, l'influence de certains paramètres de fonctionnement à savoir:

. la pression de contact (78 KPa à 620 KPa).

. la vitesse de glissement (0,1 m/s à 0,5 m/s).

. la distance de glissement (2 km à 200 km).

. la rugosité moyenne de la surface d'acier (0,12; 0,76 et 5 μm R_a).

Pour produire de l'usure en laboratoire, un montage expérimental a été réalisé à l'aide d'une machine "Taber 505 Dual Abraser" qu'on a modifié afin de simuler un essai pointeau sur disque tournant (pin-on-disc). La technique utilisée pour mesurer l'usure était la pesée.

Les résultats expérimentaux nous ont permis de constater que:

- Le nylon s'use plus que l'acétal pour toutes les conditions d'opération.

- L'usure est proportionnelle à la pression de contact et à la distance de glissement.

- La vitesse influence l'usure uniquement dans le cas des finis rugueux de la piste d'acier (> 0,76 μm R_a)

- La rugosité de la surface métallique est le facteur prédominant dans la détermination de l'ampleur de l'usure du polymère.

Les résultats expérimentaux ont montré qu'après 200 km de glissement sous une pression apparente de seulement 310 KPa, une vitesse de 0,5 m/s et une rugosité de l'acier de 0,12 μm R_a, un échantillon d'acétal perd 0,6 pour cent de sa masse initiale par usure alors que le nylon en perd environ 4 pour cent. Ces pertes sont non négligeables et justifient bien l'intérêt de ces travaux et l'importance quant à la considération du paramètre "usure" même pour des conditions d'essais relativement peu sévères.

ABSTRACT

Wear is a phenomenon known and experienced by everyone. In spite of this, specific studies have just been started in a relatively recent past. This work concerns wear of nylon 6/6 (polyamide PA) and acetal (polyoxymethylene POM) sliding against steel. These plastics are often used in the fabrication of sliding components. The plastic/metal combination offers advantages related with thermic problems and is commun in several applications. Because of the inherent lubricity of plastics, a dry contact case has been investigated.

For the purpose of the program, a Taber 505 Dual Abraser machine has been modified to simulate a pin-on-disc apparatus. The wear has been mesured by weighing the plastic pins before and after the tests.

A literature review on existing theories on wear has been done. It showed only few experimental data for non severe operating conditions (load,speed,roughness). In this project, the following parameters and their variation have been studied:

. load (78 KPa to 620 KPa).

. slising speed (0,1 m/s to 0,5 m/s).

. sliding distance (2km to 200 km).

. roughness of the steel surface (0,12; 0,76 and 5 μm R_a).

Experimental results showed that:

- Nylon wears more than acetal in all the operating conditions investigated.

- Wear is proportional to the load and the sliding distance.

- The sliding speed influences wear only for rough steel surfaces (> 0,76 μm R_a).

- The roughness of the steel surface is the predominant parameter that affects the wear of polymers in the operating conditions investigated.

Experimental results also showed that after 200 km of sliding under a 310 KPa pressure at 0,5 m/s with a steel roughness of 0,12 μm R_a, an acetal pin looses 0,6 per cent of its initial weight in wear when a nylon pin looses nearly 4 per cent. This is substantial and justifies the present study and the necessity of considering the wear parameter even in relatively non severe operating conditions.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements au Docteur Henri Yelle pour avoir accepté de me diriger avec compétence dans le cadre de cette recherche, pour sa disponibilité et sa patience.

Je voudrais aussi remercier les professeurs et étudiants du groupe de recherche sur les plastiques et composites (GRPC) du département de génie mécanique pour leurs conseils et leur appui tout le long de ce travail.

Enfin, je désire remercier Messieurs G. Champagne, F. Morin, J. Beausoleil et N. Brescia pour leur soutien technique.

Mes remerciements vont également à Sylvie Lamontagne pour la mise en page d'une partie de ce mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE V

ABSTRACT VIII

REMERCIEMENTS X

LISTE DES FIGURES XIV

LISTE DES TABLEAUX XX

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS XXI

CHAPITRE I - INTRODUCTION 1

I-1 INTRODUCTION A LA TRIBOLOGIE 1

I-2 INTRODUCTION DE L'USURE 2

I-3 OBJECTIFS DU PROJET 7

I-4 ORGANISATION DU MÉMOIRE 8

CHAPITRE II - USURE ET CLASSIFICATION 11

II-1 INTRODUCTION 11

II-2 DÉFINITION 11

II-3 CLASSIFICATION 12

II-4 FACTEURS INFLUENÇANT L'USURE 22

II-5 TESTS D'USURE 23

II-5-1 Introduction 23

II-5-2 Machines d'essais mécaniques 25

II-5-3 Méthodes de mesure de l'usure 27

CHAPITRE III - THÉORIES DE L'USURE ET DISCUSSION 30

III-1 INTRODUCTION 30

III-2 RAPPEL SUR LA THÉORIE DU FROTTEMENT PAR ADHÉSION 32

III-3 THÉORIE DE L'USURE PAR ABRASION 34

III-4 THÉORIE DE L'USURE PAR ADHÉSION 37

III-5 FILM DE TRANSFERT 43

III-6 THÉORIE DE L'USURE PAR DÉLAMINATION 46

III-7 MODÈLE D'IBM POUR L'USURE 49

III-8 DISCUSSION DES THÉORIES D'USURE 51

III-9 FACTEUR D'USURE ET LA LIMITE (Pv) 60

CHAPITRE IV - TESTS D'USURE 64

IV-1 MACHINE D'ESSAIS 64

IV-2 PISTES D'USURE ET ÉCHANTILLON 68

IV-3 MESURE DE LA TEMPÉRATURE 72

IV-3-1 Introduction 72

IV-3-2 Circuit électrique 75

IV-3-3 Calibration 75

IV-4 PROCÉDURES ET CONDITIONS 80

IV-4-1 Mesure de l'usure 80

IV-4-2 Préconditionnement des échantillons 80

IV-4-3 Procédures expérimentales 81

CHAPITRE V - RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE 85

V-1 INTRODUCTION 85

V-2 RÉSULTATS DE MESURE DE TEMPÉRATURES 87

V-3 INFLUENCE DE LA CHARGE 94

V-4 INFLUENCE DE LA DISTANCE ET DE LA VITESSE DE GLISSEMENT 104

V-5 INFLUENCE DE LA RUGOSITE 125

V-6 VALEURS DES FACTEURS D'USURE ET DE LA LIMITE Pv 135

CHAPITRE VI - CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 142

BIBLIOGRAPHIE 146

LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1 - Différents types d'usure 16

FIGURE 2.2 - Principes de machines d'essais pour l'usure 26

FIGURE 3.1 - Représentation d'une interface 32

FIGURE 3.2 - Modèle théorique d'usure par abrasion 35

FIGURE 3.3 - Modèle théorique d'une particule d'usure par adhésion 39

FIGURE 3.4 - Propagation d'une fissure 47

FIGURE 3.5 - Relation entre le volume déplacé par unité de distance glissée et d'angle d'un indenteur cônique 55

FIGURE 3.6 - Rugosités de surface typiques obtenues par différents procédés de fabrication.... 56

FIGURE 4.1 - Tabor 505 Dual Abraser originale 66

FIGURE 4.2 - La machine Tabor modifiée 66

FIGURE 4.3 - Disques avec leurs quatre pistes d'usure 67

FIGURE 4.4 - Support en alluminium 67

FIGURE 4.5 - Poids servant de charges 68

FIGURE 4.6 - Échantillons de plastique 70

FIGURE 4.7 - Machine Tabor modifiée avec mesure des températures par RTD 73

FIGURE 4.8 - Disques utilisés lors des mesures des températures de surface 74

FIGURE 4.9 - Caractéristiques du RTD utilisé dans le montage 74

FIGURE 4.10- Schéma du circuit électrique 76

FIGURE 4.11- Relation entre la tension et la température en tenant compte de l'autoréchauffement .. 78

FIGURE 4.12- Organigramme de la procédure suivie lors des tests 84

FIGURE 5.1 - Evolution de la température de surface lors du glissement du nylon 88

FIGURE 5.2 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la pression de contact, après 6 h de glissement 95

FIGURE 5.3 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la pression de contact, après 6 h de glissement 96

FIGURE 5.4 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la pression de contact, après 24 h de glissement 97

FIGURE 5.5 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la pression de contact, après 24 h de glissement 98

FIGURE 5.6 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la pression de contact, après 48 h de glissement 99

FIGURE 5.7 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la pression de contact, après 48 h de glissement 100

FIGURE 5.8 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,1 m/s ...106

FIGURE 5.9 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,25 m/s ..107

FIGURE 5.10- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,35 m/s ..108

FIGURE 5.11- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,5 m/s .. 109

FIGURE 5.12- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,1 m/s ...110

FIGURE 5.13- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,25 m/s ..111

FIGURE 5.14- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,35 m/s ..112

FIGURE 5.15- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,5 m/s .. 113

FIGURE 5.16- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la distance de glissement sans tenir compte de la vitesse 114

FIGURE 5.17 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la distance de glissement sans tenir compte de la vitesse 115

FIGURE 5.18- Relation entre les valeurs expérimentales et les valeurs obtenues par

interpolation 117

FIGURE 5.19- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 10 km 119

FIGURE 5.20- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 30 km 120

FIGURE 5.21- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 50 km 121

FIGURE 5.22- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 10 km 122

FIGURE 5.23- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 30 km 123

FIGURE 5.24- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 50 km 124

FIGURE 5.25- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la rugosité de l'acier après une distance de glissement de 20 km 127

FIGURE 5.26- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la rugosité de l'acier après une distance de glissement de 20 km 128

FIGURE 5.27- Echantillon de nulon avant le test 129

FIGURE 5.28- Echantillon de nylon après 6 h de glissement 129

FIGURE 5.29- Filaments d'usure 131

FIGURE 5.30- Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon et de l'acétal en fonction de la distance de glissement pour 0,76 et 5 μm R_a 133

FIGURE 5.31- Dêpot de plastique aux bords des pistes d'usure 135

FIGURE 5.32- Zône utile de pressions et de vitesses ... 139

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1 - Interactions tribologiques et mécanismes d'usure 20

TABLEAU 2.2 - Systèmes tribologiques 21

TABLEAU 4.1 - Propriétés mécaniques moyennes de l'acier utilisé 69

TABLEAU 4.2 - Propriétés des plastiques utilisés 71

TABLEAU 4.3 - Relation entre la résistance et la tension des RTD 77

TABLEAU 4.4 - Relation entre la résistance et la température des RTD 77

TABLEAU 5.1 - Densités volumiques du nylon et de l'acétal 86

TABLEAU 5.2 - Valeurs calculées des températures de surface 92

TABLEAU 5.3 - Valeurs de K_p (mg/KPa) pour différentes vitesses de glissement 102

TABLEAU 5.4 - Durées de glissement à différentes vitesses pour glisser 40 km 116

TABLEAU 5.5 - Facteurs d'usure à l'équilibre pour le nylon et l'acétal 136

TABLEAU 5.6 - Valeurs du facteur d'usure K 137

TABLEAU 5.7 - Valeurs du Pv limite retrouvées dans la littérature (KPa.m/s) 140

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

A_a : surface apparente de contact, m^2

A_r : surface réelle de contact, m^2

d : distance de glissement, m

D : diamètre d'une aspérité, m

F : force appliquée, N

F_a : force d'adhésion, N

F_N : force normale appliquée, N

g : gravité spécifique: 9,81 m/s^2

h : épaisseur d'usure, m

H : dureté, MPa

k : conductibilité thermique, cal/m.s.°C

k_{abr} : coefficient d'usure par abrasion

k_{adh} : coefficient d'usure par adhésion

K : facteur ou taux d'usure, $m^3/N.m$

K_1 àK_4 : constantes

m : masse perdue par usure, kg

M : masse appliquée, kg

n : nombre de particules

N : nombre de contacts par unité de distance glissée, m^{-1}

P : pression apparente de contact, MPa

s : contrainte de cisaillement, MPa

t : durée de glissement, s

T_{amb} : température ambiante, °C

T_m : température moyenne de surface, °C

T^* : température flash, °C

v : vitesse de glissement, m/s

V : volume perdu par usure, m^3

W : volume usé par unité de distance glissée, m^3/m

μ : coefficient de frottement

PA : Polyamide (nylon)

POM : Polyoxyméthylène (acétal)

PE : Polyéthylène

UHMWPE : Polyéthylène à très haut poids moléculaire

LDPE : Polyéthylène à basse densité

HDPE : Polyéthylène à haute densité

PMMA : Polyméthacrylate de méthyle

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PTFE : Polytetrafluoroéthylène

PVC : Polychlorure de vinyle

PET : Polyéthylène téréphthalate

PCTFE : Polychlorotrifluoroéthylène

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

I-1 INTRODUCTION A LA TRIBOLOGIE

Autrefois, la formation des ingénieurs mettait l'accent sur la résistance des matériaux, les propriétés de volume des liquides et des solides et sur la mécanique continue pour s'assurer que les machines soient conçues de façon à éviter le bris catastrophique d'une ou de plusieurs composantes. C'est en partie parce que ces sujets sont relativement bien compris maintenant et aussi à cause de l'importance grandissante de la sécurité, du rendement et de la durée de vie des équipements que l'intérêt s'est tourné vers les propriétés de surface, vers la nature et les conséquences des interactions au niveau de l'interface et donc vers la tribologie.

Durant les dernières décennies, le domaine de la tribologie (frottement, usure et lubrification) a reçu une importance grandissante d'un point de vue scientifique, technique et pratique et une multitude d'ouvrages [1-6] traitant des principes fondamentaux et de l'applications de cette nouvelle science ont été publiés.

I-2 INTRODUCTION DE L'USURE

L'usure est un des trois problèmes industriels les plus courants qui conduit au remplacement des composantes des machines, les deux autres étant la fatigue et la corrosion et ont fait le sujet de beaucoup plus de recherche que l'usure.

L'usure engendre rarement un bris catastrophique mais diminue le rendement en augmentant les pertes de puissance, la consommation d'huile, les vibrations, le bruit et la fréquence de remplacement des composantes.

Les dommages et pertes dûs à l'usure ont un effet néfaste sur l'économie nationale même si certains secteurs de celle-ci dépendent directement, pour fonctionner, du changement périodique des pièces usées. Ainsi, une étude dirigée par Énergie, mines et ressources du Canada [7], avec la collaboration du Conseil national de recherches du Canada (CNRC), rapporte une perte annuelle d'environ $5 milliards dans différents secteurs de l'industrie canadienne due au frottement et à l'usure, cette dernière représentant la majeure part à savoir $3,9 milliards. Cette étude précise aussi que le quart de ces pertes peut être sauvé avec une bonne application des technologies existantes. On peut donc imaginer toutes les économies

qu'on pourrait faire avec des connaissances plus précises et approfondies dans le domaines et que seule la recherche scientifique peut réaliser.

Si dans le passé, il était plus simple de remplacer une pièce usée plutôt que de lui prévoir une durée de vie adéquate en usure, cette pratique est coûteuse et dans le contexte économique actuel, a tendance à disparaître. La considération du paramètre usure dans le design de machines s'avère indispensable de nos jours, et elle doit principalement commencer par une sélection adéquate de matériaux utilisés dans la fabrication des composantes frottantes. Ces matériaux doivent avoir un bon comportement en frottement et en usure, d'assez bonnes propriétés mécaniques et physiques tout en restant à un prix raisonnable.

Les plastiques et composites offrent jusqu'à un certain point tout cela. En effet leur lubricité inhérante, leur bas prix et leur excellente résistance à l'usure et à la corrosion en font les meilleurs candidats pour de nombreuses applications. En plus, comparés aux métaux, ces matériaux offrent une très large gamme de propriétés physiques et mécaniques (choix de la résine et/ou des renforts). Ils sont aussi faciles à fabriquer même dans les formes les plus complexes (surtout les thermoplastiques), et malgré leur limite de rupture, leur dureté et leur module

faibles (10 fois), ils possèdent néanmoins une haute résistance et rigidité spécifiques, tout cela sans oublier une bonne capacité à absorber les chocs et les vibrations.

Cependant, les polymères sont limités par les températures d'utilisation (<300°C), par leur basse conductibilité thermique qui engendre une mauvaise dissipation de chaleur, un haut coefficient d'expansion thermique et une assez grande absorption d'humidité.

La première application tribologique des polymères remonte à une cinquantaine d'années lorsque de la résine phénol-formaldéhyde (phénolique) fut utilisée, renforcée de fibres, dans la fabrication de paliers. Dès lors et plus particulièrement durant les années 60, un grand nombre de polymères est venu graduellement remplacer les métaux et alliages dans diverses applications d'ingénierie. Ainsi, on retrouve maintenant roulements, cames, engrenages, paliers et même des prothèses pour joints d'articulations humaines en matières plastiques [8]. Dans toutes ces applications techniques, l'aspect tribologique est d'une importance considérable.

L'usure lors du glissement d'une surface sur l'autre est essentiellement une réponse du matériau à des tractions de la surface. Une compréhension de l'usure nécessite donc

une maîtrise des mécanismes de déformation des couches en surfaces, des mécanismes de formation et de propagation des fissures et de ceux de la transmission de forces d'une surface à l'autre. Il faut aussi comprendre la thermodynamique chimique car l'usure à très hautes vitesses et/ou grandes charges peut être due à une fusion des matériaux aux points de contact.

Dans une application donnée, l'usure peut être due à tous ces différents mécanismes, mais dans la majorité des cas, un seul va dominer le processus d'usure. Il faut donc, pour résoudre un problème tribologique, être capable d'identifier parmi les mécanismes plausibles, celui qui prime.

Cette notion d'usure a longtemps été liée à celle du frottement, ce dernier étant plus facile à mesurer. En effet, la nature très complexe des différents mécanismes d'usure avait découragé toute recherche pour le développement d'une approche quantitative et rationelle du design des éléments de machines. Cette complexité réside dans le fait que l'usure (et le frottement) n'est pas une propriété intrinsèque du matériau mais une caractéristique du système frottant. Le moindre changement dans la charge, la vitesse ou l'environnement peut causer un changement appréciable du taux d'usure d'une ou des deux surfaces en contact.

Ce n'est que depuis peu de temps que des études spécifiques dans le domaine [9-12] ont été entreprises profitant de l'analyse dynamique détaillée des machines rendue possible à l'aide de l'informatique. Malgré cela, deux observations peuvent être faites:

-dans les études qui ont été faites, et afin d'accélérer le phénomène d'usure, la plupart des chercheurs imposaient des conditions d'essais (charge, vitesse, fini de surface etc.) sévères. Peu d'entre eux, cependant, se sont intéressés au même phénomène mais dans des conditions plus clémentes, conditions que l'on retrouve dans plusieurs applications, qui causent de l'usure, et qui devraient susciter autant d'intérêts et de recherches.

-il n'existe toujours pas de théorie ou de modèle d'usure satisfaisant ou général, applicable à des conditions de fonctionnement sévères ou autres. En fait, on ne possède même pas la quantité de données détaillées nécessaires pour ce genre de modèles.

L'état de l'art du phénomène d'usure des matériaux n'est donc qu'à son stade embryonnaire, surtout lorsqu'il s'agit de nouveaux matériaux comme les plastiques et composites. C'est dans le but d'y apporter une contribution que ce projet est né au sein du Groupe de recherche sur les

plastiques et composites de l'École Polytechnique de Montréal.

Notre intérêt a donc porté sur l'étude de l'usure du nylon (Polyamide PA 6/6) et l'acétal (Polyoxyméthylène POM) non chargés lorsqu'il frottent sur de l'acier. Ces deux thermoplastiques techniques sont assez répandus dansla fabrication de pièces mécaniques frottantes. La combinaison plastique/métal présente des avantages liés aux problèmes thermiques et se retrouve dans beaucoup d'applications et de montages mécaniques. Vu le caractère auto-lubrifiant des plastiques, on a choisi un frottement à sec. Ceci représente d'ailleurs la majorité des cas où les plastiques trouvent application.

I-3 OBJECTIFS DU PROJET

Ce projet se propose trois objectifs solidement interreliés:

1- Faire un relevé de toutes les théories existantes pour traiter l'usure des matériaux et identifier la plus réaliste et la plus applicable aux matériaux plastiques.

2- Développer un montage pour produire de l'usure en laboratoire et générer des données expérimentales pour les deux plastiques d'intérêt. Ce montage sera flexible et la procédure d'essai établie afin de permettre la même étude mais pour plusieurs autres matériaux. Ces résultats expérimentaux seront d'une grande utilité vu le manque imminent de telles données.

3- Analyser et interpréter les résultats obtenus, et trouver, pour des conditions d'essais non sévères, l'influence sur l'usure de paramètres comme la pression de contact, la vitesse et la distance de glissement, et finalement la rugosité de la piste en acier. On présentera alors, basé sur les résultats expérimentaux, le moyen le plus adapté au polymères pour calculer l'usure d'une pièce frottante ou encore pour faire la sélection de matériaux pour une application tribologique donnée.

I-4 ORGANISATION DU MEMOIRE

Le premier chapitre est une introduction à la science de la tribologie et plus particulièrement à l'usure. On relatera ainsi les différentes répercussion de cette der-

nière sur l'économie et la nécessité de plus de recherches afin de mieux la contrôler. On justifie aussi le choix des plastiques comme matériaux tribologiques.

Une brève familiarisation avec les terminologies, les définitions et les tests utilisés dans le domaine de l'usure est donnée au chapitre II.

Suit le chapitre III où on présente les différentes approches théoriques utilisées pour traiter ce problème d'usure. Une critique de celles-ci s'impose car, comme on le verra, les fondements de ces approches sont discutables, la plupart de celles-ci étaient faites à l'origine pour les matériaux métalliques. Leur application directe (comme le font beaucoup de chercheurs) aux matériaux plastiques est donc matière à beaucoup de discussions. Cette critique devrait idéalement nous permettre de choisir l'approche la plus applicable à ces matériaux.

Le chapitre IV renferme la description de la machine d'essai, des conditions et procédures expérimentales du programme d'essai.

Les résultats expérimentaux sont présentés au chapitre V avec leur analyse. On présentera aussi les données expérimentales à utiliser pour faire des calculs d'usure

d'une pièce frottante en plastique.

Des recommandations sont présentées au dernier chapitre quant aux travaux pertinents qui peuvent éventuellement compléter ce projet.

CHAPITRE II

USURE ET CLASSIFICATIONS

II-1 INTRODUCTION

Les définitions et les classifications de l'usure sont nombreuses. Elles sont soit vagues et perdent beaucoup de leur signification ou restreintes au domaine d'intérêt et en négligent trop d'autres. Dans ce qui suit, on essaiera de faire une synthèse et proposer la définition et la classification les plus adéquates dans le cas où les polymères sont impliqués.

II-2 DÉFINITION

L'organization pour la coopération et le développement économiques (OCDE 1969) [13] définit l'usure comme étant la perte progressive de matière de la surface opérante d'un corps résultant d'un mouvement relatif à la surface. Cette définition ne fait certes pas ressortir le caractère involontaire de l'usure afin de la différencier des autres formes d'enlèvement de matière comme l'usinage; elle n'inclut pas, non plus, l'usure due à la corrosion qui, dans certains cas, est la forme prédominante de détérioration. PETERSON [14] a proposé une définition plus complète à savoir,

L'usure est l'enlèvement involontaire de matériau par action chimique ou mécanique.

Mentionnons que ces définitions sont générales et ne tiennent pas compte de l'importance relative des différents mécanismes d'usure dans une application donnée.

II-3 CLASSIFICATION

Plusieurs classifications de l'usure, toutes aussi discutables les unes que les autres ont été proposées. "Metals Handbook" (Vol. 1, 1961) a classifié l'usure suivant la nature des matériaux en cause (métal-métal, métal-non-métal, etc...). Peterson [15] a suggéré une classification basée sur les mécanismes d'enlèvement des particules, (coupe, fracture, fusion, arrachement, etc...), classification pratique lorsque le mécanisme est connu, car il peut être analysé en terme de géométrie, de propriétés du matériau et de conditions opératoires. Le désavantage cependant est que dans plusieurs situations d'usure, le mécanisme d'enlèvement de particules n'est pas connu ou que plusieurs mécanismes prennent place simultanément.

Archard et Hirst [16] classent l'usure en "lègère" et "sévère", d'autres en "excessive" et "normale" seulement, ce

qui est "léger" dans une application s'avère parfois "sévère" dans une autre. Tabor [17] a classé l'usure en adhésive, non-adhésive et en usure issue d'une combinaison des deux précédentes. Cependant, plusieurs chercheurs ont adopté la classification proposée dans les années 50, par Burwell [18]. S'appliquant assez bien aux matériaux plastiques, elle distingue quatre types d'usure, faciles à apprécier à l'échelle macroscopique et qu'on peut classer en trois groupes: l'usure due au frottement des surfaces, celle due à la fatigue des surfaces et l'usure tribochimique.

1- Usure due au frottement d'une surface sur une autre

* Usure par abrasion

Les aspérités d'une surface dure glissant sur une surface moins dure, la rayent et lui arrachent des copeaux, (Figure 2.1a) c'est "l'abrasion à deux corps" (ex.: plastique glissant sur une surface métallique rugueuse non contaminée ou sur un papier abrasif). Lorsque des particules dures sont prises entre les deux surfaces en mouvement, on est en présence d'une "abrasion à trois corps" (Figure 2.1b) . Notons que ces particules peuvent provenir de l'extérieur comme contaminants, ou du système frottant lui même comme résultat d'une corrosion ou d'une abrasion à

deux corps ou encore d'une usure par adhésion. L'érosion produite par un jet de fluide contenant des particules abrasives (du sable par exemple) sur une surface est comprise dans cette catégorie.

* Usure par adhésion

Lors du glissement, un contact de plus en plus intime se crée entre les deux surfaces (augmentation de la surface réelle de contact). Lorsque les forces d'adhésion deviennent suffisamment grandes, des micro-soudures se produisent. De la matière est alors arrachée de la surface tendre et reste collée à l'autre surface (Figure 2.1c). Occasionnellement, c'est l'inverse qui se produit et parfois, une partie de la matière transférée va se détacher par fracture, fatigue ou corrosion pour retourner sur la surface originale ou encore devenir des débris d'usure.

Mentionnons enfin, que le grippage est une forme accentuée de l'usure par adhésion car les arrachements se font au niveau de couches plus profondes.

2 - Usure due à la fatigue des surfaces

Lorsqu'une surface est soumise à un glissement, un roulement ou un impact de façon cyclique, les couches et

les sous-couches superficielles sont soumises à un ensemble de contraintes de compression, de cisaillement et de traction. Aux endroits où le matériau est particulièrement sollicité, des fissures se forment et se propagent à cause du frottement. Des écailles du matériaux se détachent alors et adhèrent à la contreface ou se détachent pour donner des débris d'usure (Fig. 2.1d). On peut aussi constater le même phénomène mais au niveau des aspérités de la surface.

Ce type d'usure est prédominant dans les détériorations des éléments roulants comme les engrenages, les roulements et les cames et plusieurs références [19,20] traitent du sujet plus en profondeur.

C- Usure tribochimique

Toute surface d'un matériau réagit avec l'environnement. Cette réaction peut être chimique, électrochimique, bactérienne ou autre et produit une sorte de film détérioré en surface. Lorsqu'en plus cette surface glisse sur une autre, le frottement va faciliter le détachement des débris de corrosion (Figure 2.1e), ce qui accélère les autres types d'usure surtout l'abrasion à trois corps dans le cas ou ces débris sont abrasifs.

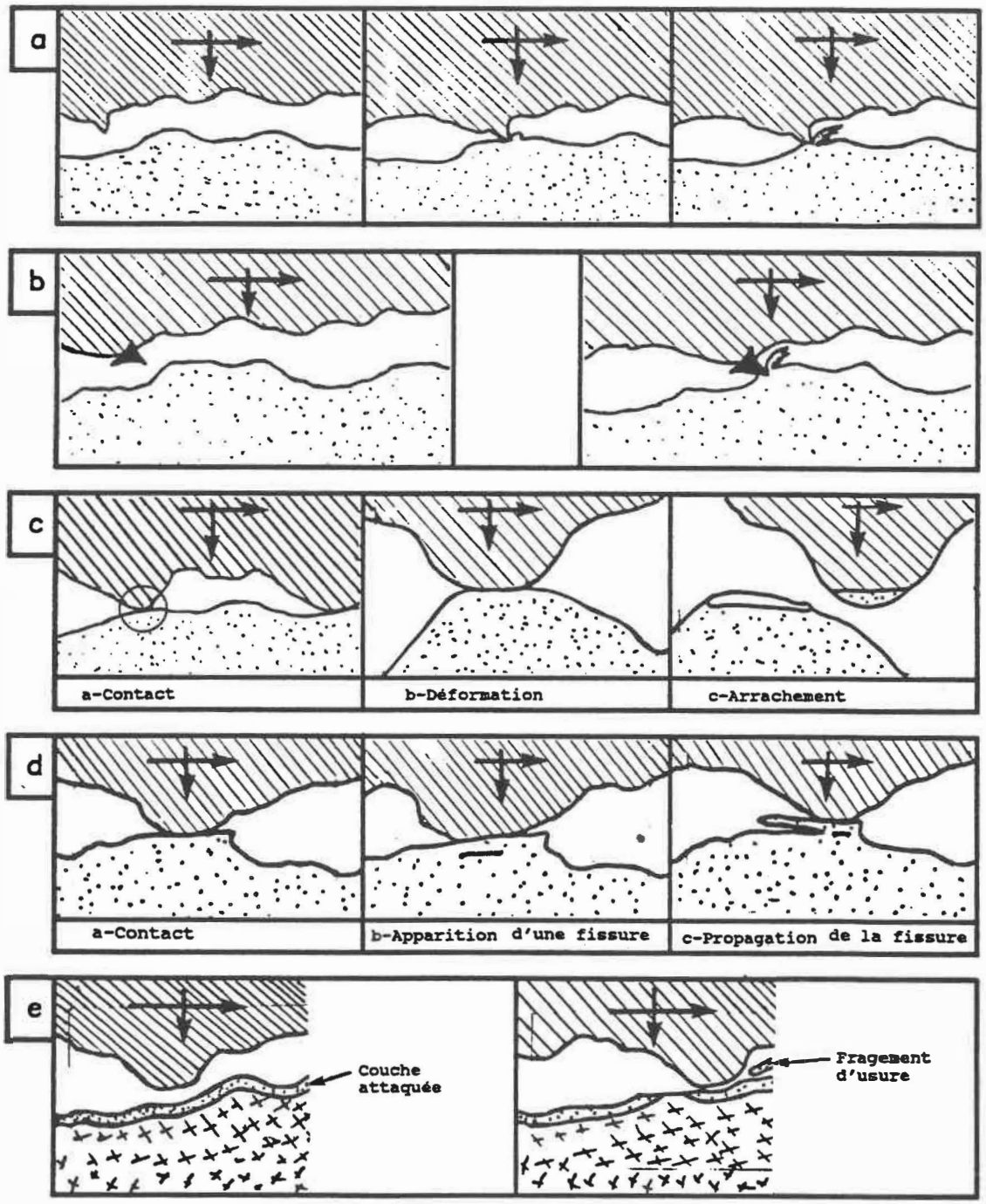


Figure 2.1 - Différents types d'usure

Dans le cas de cette étude, comme dans toute situation où deux pièces frottent l'une sur l'autre, tous ces mécanismes ont lieu en même temps. Cependant, dépendemment des conditions d'essai, certains d'entre eux seront plus déterminants que d'autres. Il est clair que si la surface métallique est très rugueuse, l'abrasion sera le mécanisme le plus responsable de l'usure. Si la surface est très lisse, ça sera l'adhésion. La fatigue, quant à elle, est toujours présente, et comme le milieu dans lequel nos essais ont été faits n'est pas corrosif, que les températures de surface ne sont pas élevées, et que les essais sont relativement de courtes durées, l'usure tribochimique peut être considérée comme secondaire. Dans une situation de frottement où il y a présence d'un lubrifiant corrosif, ce type d'usure sera prédominant, l'abrasion et l'adhésion ne seront alors que des mécanismes accélérateurs de cette usure tribochimique. Dans la discussion des résultats expérimentaux (chapitre V), nous reviendrons sur ce sujet pour faire des constatations quant aux mécanismes d'usure à partir de l'état des surfaces usées, de la forme des débris d'usure.

Dans la pratique industrielle, pour traiter un problème de détérioration de surface, on considère son importance sur la durée de vie de l'organe et son type. La sévérité de cette détérioration peut aller d'une usure

bénéfique comme l'usure de rodage, à l'usure catastrophique qui nécessite le remplacement de la pièce en cause, en passant par l'usure dite normale. Cette dernière est lente et cause le vieillissement des équipements. Il est à noter que des organes en opération peuvent aussi subir d'autres sortes de détérioration comme le fluage, la déformation plastique des surfaces ou encore la rupture.

Les mécanismes d'usure présentés sont considérés après établissement d'une sorte de régime permanent des conditions des surfaces frottantes. Ce régime permanent est déterminé, comme on le verra au chapitre V, par une stabilisation du taux d'usure du polymère. Les changements que subit l'interface durant la période de rodage (qui précède le régime permanent) sont d'une grande complexité et sont encore mal compris.

Les interactions tribologiques et les mécanismes d'usure présents lors du frottement d'une surface sur une autre et selon la classification qu'on a choisi sont illustrés au Tableau 2.1.

Il faut mentionner enfin, que dans la classification de l'usure, il faut aussi tenir compte:

- des matériaux utilisés

- du type de chargement (ex.: compression, tension, flexion, etc...);

- du type de mouvement (ex.: glissement, roulement, impact, etc...).

Les types de contact les plus fréquents et les mécanismes d'usure succeptibles de se produire, ainsi que des exemples d'applications sont présentés au Tableau 2.2.

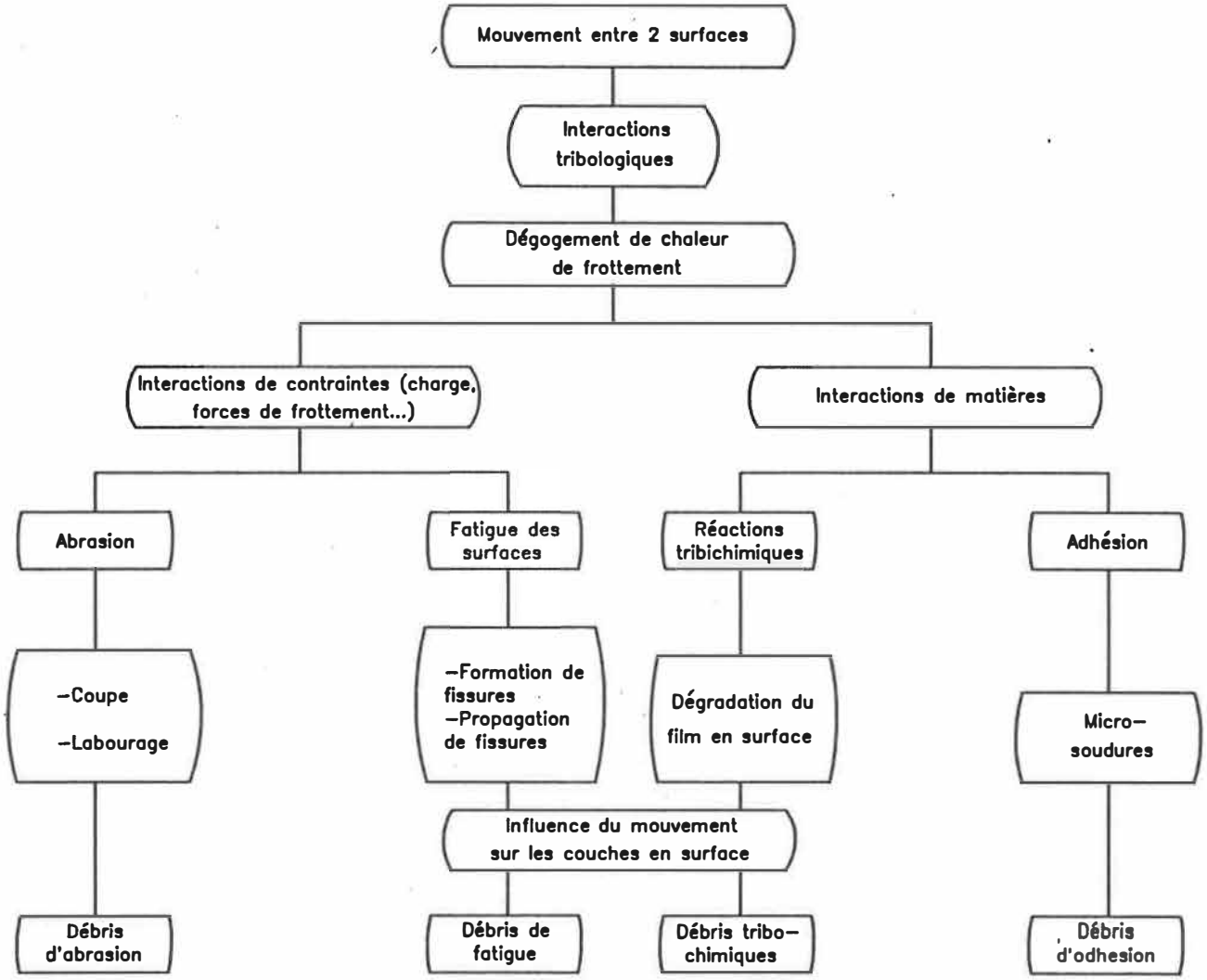


Tableau 2.1 - Intéractions tribologiques et mécanismes d'usure

Système	Type de contact	Schématisation	Mécanismes d'usure				Applications
			Abrasion	Adhésion	Fatigue de surface	Tribo-chimique	
Solide / Solide Avec ou sans lubrifiant	Glissement		X	X	X	X	Paliers, cames, engrenages, freins
	roulement		X	X	X	X	Roulements, pneus
	Impact		X	X	X	X	Presses
Solide / Solide avec particules	Glissement		X		X	X	Convoyeurs, équipement pour creuser la terre
	Glissement 3 corps		X		X	X	Systèmes glissants contaminés, broyeurs, équipement pour creuser
Solide / Fluide avec partic.	Erosion glissement		X		X	X	Tuyaux, barrages, pompes
Solide / gaz avec particules	Erosion glissement		X		X	X	Tuyaux, réservoirs, pompes
	Erosion impact		X		X	X	Pâles d'hélicoptère et de machines

Tableau 2.2 - Systèmes tribologiques

II-4 FACTEURS INFLUENÇANT L'USURE

Les facteurs pouvant avoir une influence sur l'usure sont nombreux. Dépendamment de l'application, certains de ces facteurs peuvent être plus déterminants que d'autres permettant ainsi de limiter leurs nombres et faire des observations quant à leurs influences.

Ces facteurs se classent en trois catégories:

- Propriétés intrinsèques
  - . matériaux utilisés (type, composition, structure)
  - . propriétés mécaniques
  - . propriétés physiques
  - . caractéristiques de la surface (fini, caractéristiques des aspérités)
  - . orientation des fibres (dans le cas des composites)

- Conditions opératoires

  D'une part:
  - . charges et contraintes
  - . vitesses relatives
  - . température
  - . durée de fonctionnement

d'autre part:

. type de contact (Tableau 2.2)

. nature de l'environnement

. vibrations

- Frottement et lubrification

. type de frottement (sec, lubrifié)

. coefficients de frottement

. types de lubrifiants, s'il y a lieu

L'influence de certains de ces facteurs sera discutée lors de l'interprétation des résultats expérimentaux au chapitre V, même si leur considération individuelle est un peu artificielle puisque dans une application donnée, l'usure est influencée par une combinaison de ces facteurs, chose qui sera aussi analysée.

II-4 TESTS D'USURE

II-5-1 Introduction

La sélection d'un test d'usure ne dépend pas uniquement du mode d'usure à étudier, mais aussi des objectifs du test, à savoir:

- la compréhension fondamentale du phénomène
- l'étude de l'influence des différents paramètres
- caractérisation et sélection des matériaux et des lubrifiants pour une application donnée
- la simulation

Les deux premiers points sont les objectifs principaux de la présente étude. La simulation est expérimentalement très compliquée, les conditions opératoires d'une pièce en service étant toujours très difficile à reproduire en laboratoire. A cause de la multitude de ces applications et de leurs objectifs, il n'existe pas actuellement de test d'usure standard. L'"American Society for Testing Materials" (ASTM) en suggère deux pour les matériaux plastiques, "Standard Test Methods for Resistance of Plastic Materials to Abrasion" (D1242 et D1252). Seulement ce test s'avère vite inadéquat si l'on considère un type d'usure différent (sans abrasif par exemple). D'autres associations concernées (européennes par exemple) proposent elles aussi leurs standards empêchant par ce fait même toute rationalisation d'un tel test.

Il reste cependant possible de relever à travers toute la littérature publiée sur le sujet, les procédures généralement respectées par la plupart des chercheurs. À ce propos, l'"American Society of Lubrication Engineers" (ASLE

maintenant STLE) a publié un recueil [21] comptant quelques 233 tests différents de frottement et d'usure.

II-5-2 Machines d'essais mécaniques

Le principe de base de ces machines consiste à faire frotter ensemble deux pièces, l'une d'entre elles étant en général immobile. La résistance à l'usure est alors caractérisée par la quantité de matériau perdue lors de ce frottement.

Évidemment, il n'existe pas de machine standard [21] mais certains principes ont été plus adoptés que d'autres et sont présentés à la Figure 2.2.

Le plus rudimentaire et le plus souvent utilisé est celui d'une tige qui frotte sur un disque (pin-on-disc). C'est d'ailleurs le principe utilisé dans le test standard de l'ASTM sur l'usure des plastiques et qu'on a aussi adopté dans nos essais.

En effet, ce genre de montage présente certains avantages par rapport aux autres parmi lequels on peut citer:

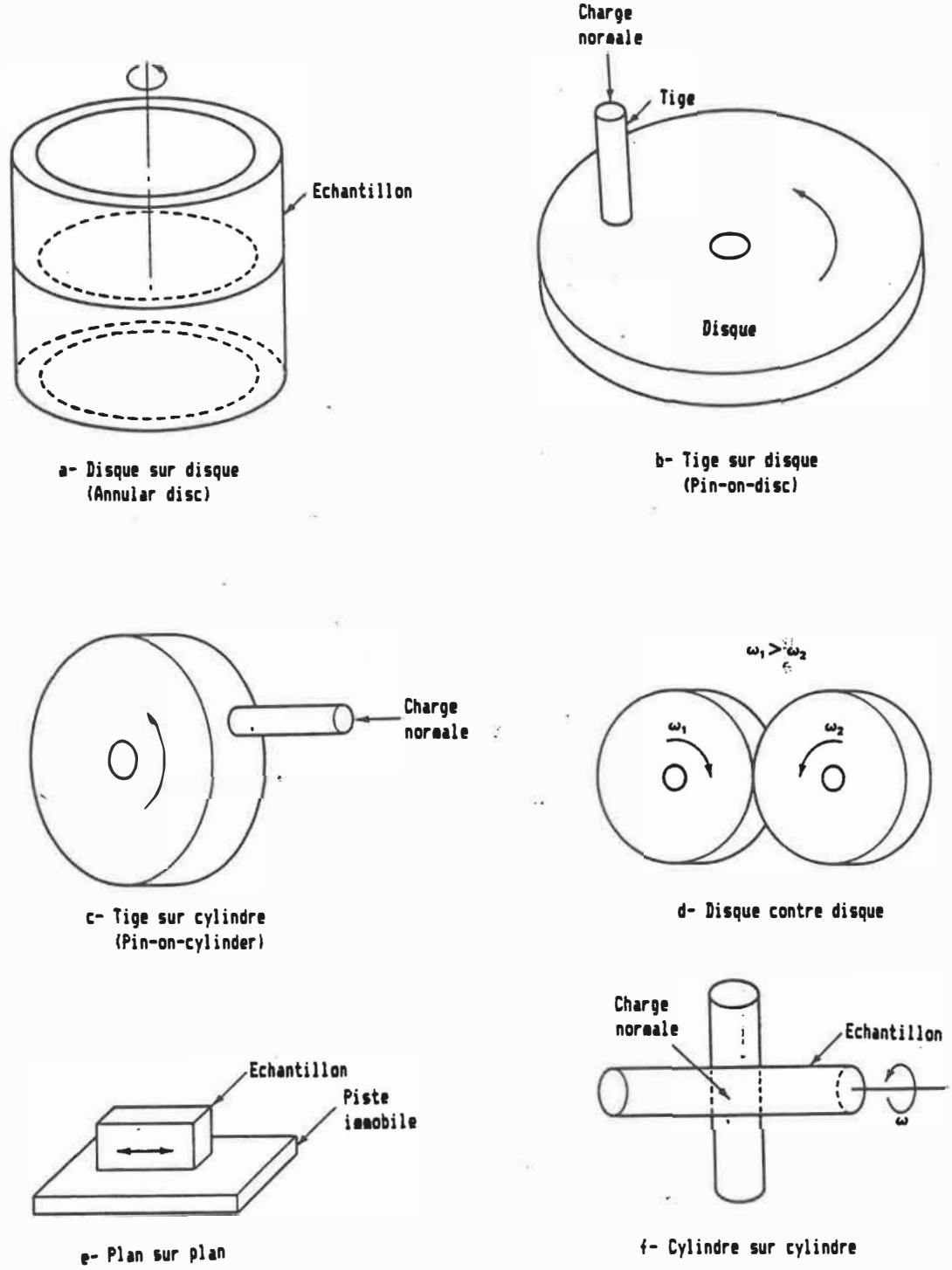


Figure 2.2 - Principes de machines d'essais pour l'usure

- facilité de farication des échantillons à tester
- facilité d'enlèvement des débris d'usure
- facilité de mesure de l'usure
- possibilité de tester plusieurs échantillons simultanément

II-5-3 Méthodes de mesure de l'usure

Ces méthodes sont nombreuses:

- La pesée

Cette méthode consiste à peser l'échantillon avant et après le test d'usure, c'est la plus conventionnelle d'autant plus qu'actuellement, on dispose de balances électroniques avec une précision de 10^{-5} gramme. Cette méthode est précise pour des petites pièces (<1kg), mais représente un désavantage dû au fait que certaines variations de poids peuvent être dues à des facteurs autres que l'usure (ex.: absorption ou perte d'humidité). Notons que la pesée était la technique utilisées pour la mesure de l'usure lors de nos essais.

- Mesure des dimensions

L'utilisation d'équipement conventionnel peut introduire beaucoup d'imprécisions dépendamment de la géométrie

du contact.

- Profilométrie

Cette méthode a l'avantage de permettre de détecter un désalignement ou de l'usure non-uniforme produite par une distribution irrégulière de contraintes, mais nécessite un équipement sophistiqué.

- Méthodes radioactives

Une des deux surfaces frottantes est rendue radioactive, on pourra ainsi facilement détecter les particules arrachées et en suspension et en déterminer l'importance.

- Méthodes analytiques

Analyses chimiques ou spectrographiques des lubrifiants ou centrifugation des particules en suspension.

- Jauges d'usure

Des jauges usantes sont placées à l'intérieur de la pièce au niveau de la surface opérante. En s'usant, leur résistance électrique varie proportionnellement à la quantité d'usure. Il y a aussi des capteurs de déplacement qu'on place par exemple sur un palier et qui donneront continuellement la distance entre celui-ci et l'arbre.

- Microscopie

L'utilisation de microscope permet aussi d'observer la détérioration de la surface frottante et son évolution. Ceci peut aussi être fait de façon sommaire à l'oeil nu tout simplement. D'autres méthodes comme l'analyse des variations de fréquences de vibrations sont aussi utilisées.

CHAPITRE III

THÉORIES DE L'USURE ET DISCUSSION

III-1 INTRODUCTION

Comme on a vu précédemment, le mot usure englobe plusieurs mécanismes: l'abrasion, l'adhésion, la fatigue des surfaces et la corrosion.

A tout instant, lors du glissement d'une surface sur une autre, ces différents mécanismes peuvent agir individuellement ou combinés. Ce dernier cas rend la situation très compliquée car on ne maîtrise pas encore ces mécanismes même individuellement; une possible interaction entre eux rend la tâche encore plus difficile. On peut alors faire deux observations:

1. Il n'existe pas encore de relation valable même empirique permettant de prédire la quantité de matière usée en fonction des paramètres opératoires (charge, vitesse...) et des propriétés des matériaux utilisés.

2. Cette situation a poussé les chercheurs à traiter l'usure en étudiant ses mécanismes séparément et ceci, en réduisant le plus possible tous les types d'usure excepté celui que l'on veut étudier. C'est Holm [1]

en 1946 qui a innové dans le domaine et considéré l'usure comme un processus atomique (transfert d'atomes d'une surface à une autre). Il a alors proposé une équation donnant le volume usé par unité de distance de glissement W et qui est:

$$W = \frac{V}{d} = \frac{z\ F}{p_m} \qquad (3.1)$$

où z est le nombre d'atomes enlevés par recontre atomique, F est la charge appliquée et p_m la pression d'écoulement du matériau le plus mou.

Plusieurs équations de la même forme ont été proposées par la suite par Burwell et Strang [23] (1952), Archard [24] (1953), Rabinowicz [25] (1953) et d'autres [26, 27].

De toutes ces théories et équations qui en découlent; aucune n'a été convaincante et n'a démontré être valable dans un cas général. Faute de mieux, les concérnés utilisent celles qui sont les plus citées dans la littérature, pour faire leurs calculs d'usure et sélectionner leurs matériaux et donc s'exposent à des risques d'erreurs. Dans ce qui suit certaines de ces théories sont exposées de façon condensée; le lecteur intéressé à plus de détails peut consulter les références indiquées.

III-2 RAPPEL SUR LA THÉORIE DU FROTTEMENT PAR ADHÉSION

Un des concepts les plus contreversés actuellement lorsqu'il s'agit de contact, est celui de la surface réelle qu'engendre ce contact lorsqu'un nombre limité d'aspécités de deux surfaces reposant l'une sur l'autre se touchent. En effet, lorsque deux surfaces sont amenées en contact, elles se touchent à travers une surface beaucoup plus petite que la surface apparente (A_a) (Figure 3.1). Cette surface est appelée surface réelle de contact (A_r).

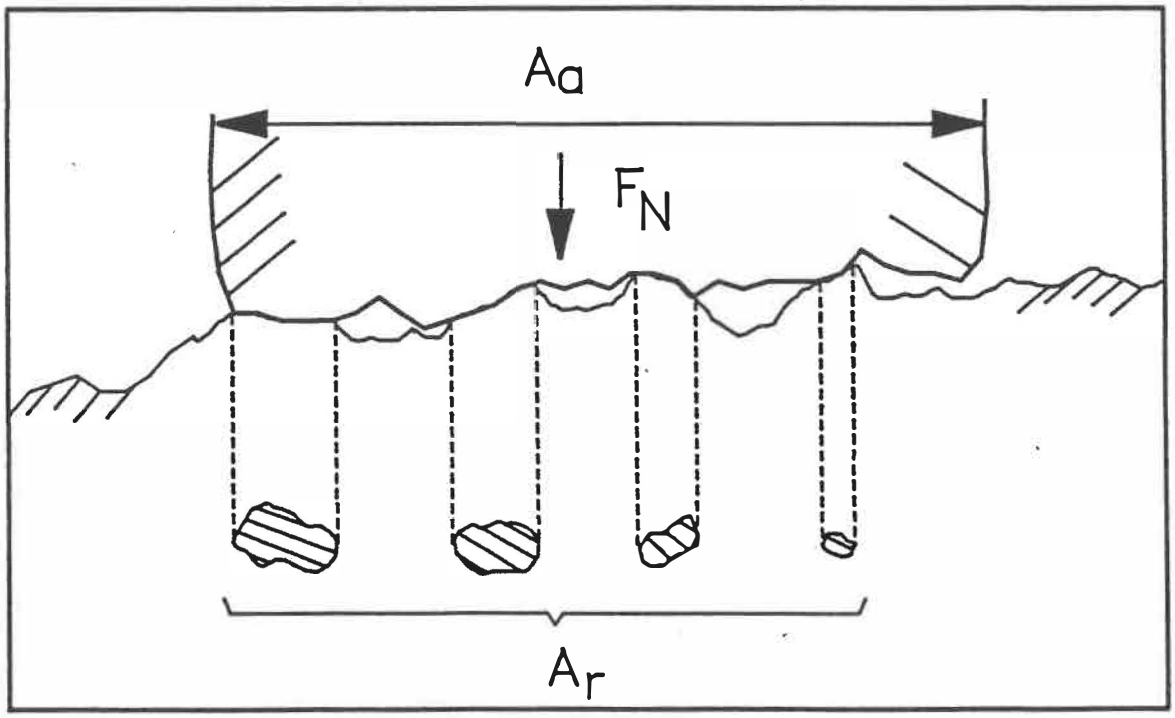


Figure 3.1 - Représentation d'une interface

Ernst et Merchant [28, 29], Holm [22] et Bowden et Tabor [1] ont été les premiers à soutenir que les surfaces réelles de contact étaient tellement faibles que les pressions tendaient à la limite vers la dureté (H) du matériau le plus mou.

Si F est la force appliquée, la surface réelle de contact A_r est alors obtenue par:

$$A_r = \frac{F}{H} \tag{3.2}$$

C'est la surface, selon la théorie de l'adhésion, où il y a micro-soudure entre les aspérités. La force nécessaire pour cisailler ces jonctions et initier le mouvement est la composante de frottement en adhésion F_a :

$$F_a = s\ A_r \tag{3.3}$$

Où s est la contrainte en cisaillement au niveau des jonctions (contacts). En combinant (3.2) et (3.3), on obtient le coefficient de frottement μ.

$$\mu = \frac{F_a}{F} = \frac{sA_r}{HA_r} = \frac{s}{H} \tag{3.4}$$

Il est évident que l'équation (3.2) est basée sur l'hypothèse que la déformation des aspérités est toujours plastique et ceci soulève beaucoup d'objections qui seront discutées à la section 6 de ce même chapitre.

Une autre remarque qui ressort concernant cette théorie est qu'elle est simplifiée à savoir que l'équation (3.2) donne l'aire réelle de contact dans des conditions de chargement statique. Il est certain que si l'on combine un chargement tangentiel au chargement normal, cette surface augmentera et sera dépendante de F et du coefficient de frottement μ. Des études [1] ont montré que lorsqu'il y avait une forte adhésion, il y avait effectivement une augmentation significative de la taille des jonctions, de la valeur de μ et qu'il y avait une relation non-linéaire entre les forces tangentielle et normale. Cependant, lorsque l'adhésion est faible, ce qui est le plus fréquent dans le domaine de l'ingénierie, la théorie de l'adhésion est une bonne approximation de ce qui se passe en réalité.

III-3 THÉORIE DE L'USURE PAR ABRASION

Lors de l'usure par abrasion, deux mécanismes prédominants causent l'enlèvement de matière.

- La formation de rainures qui ne cause pas automatiquement un enlèvement de matière, mécanisme où la déformation plastique joue un rôle prédominant.
- Enlèvement de matériaux par fracture avec une déformation plastique limitée.

Le mode d'usure par abrasion a souvent été assimilé à un processus de coupe et le modèle le plus simple décrivant ce mécanisme a été proposé par Rabinowicz [30] en 1965. Il considère le cas idéalisé où les aspérités sont sous forme de cônes dont les parois font un angle θ avec le plan de la surface opposée (Figure 3.2). Cette surface est par hypothèse lisse et donc sans aspérité.

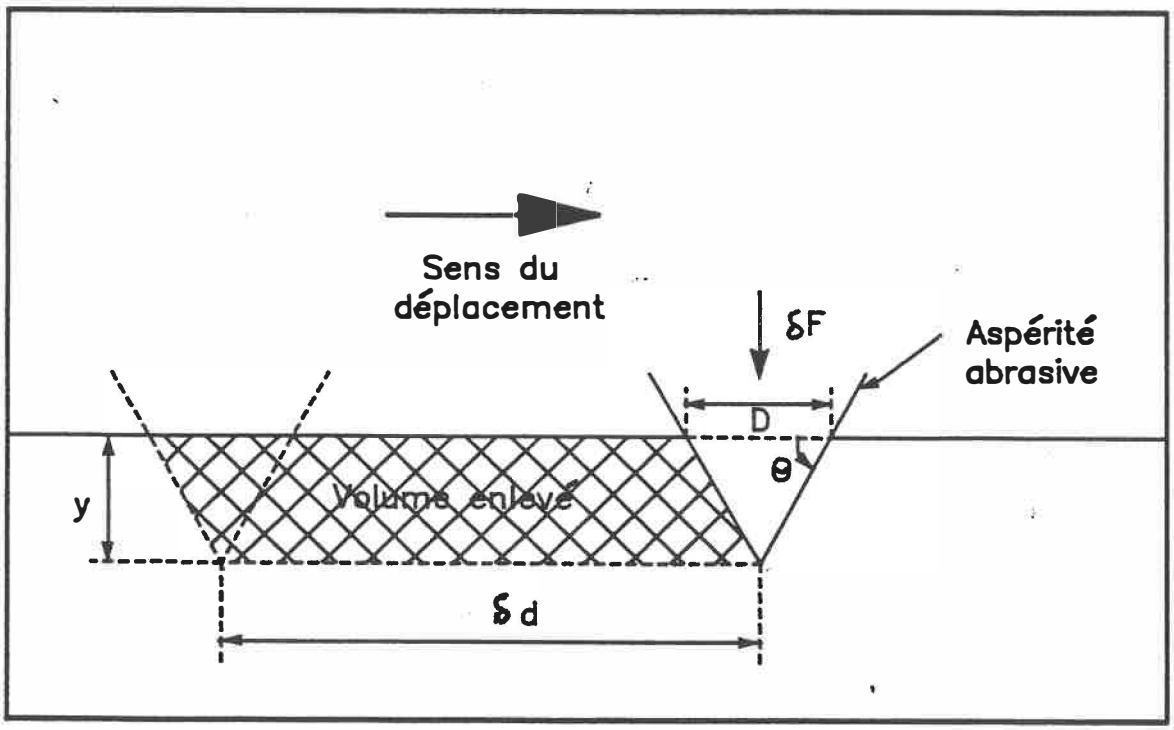


Figure 3.2 - Modèle théorique d'usure par abrasion

Soit δV la fraction de volume enlevée lors d'un déplacement δd:

$$\delta V = \frac{D}{2} y \delta d = \frac{D^2}{4} \operatorname{tg} \theta \, \delta d$$

avec $y = \frac{D}{2} \operatorname{tg} \theta$

Le volume total enlevé V pour un glissement d sera alors:

$$V = \frac{D^2}{4} (\operatorname{tg} \theta)_m \, d \qquad (3.5)$$

$(\operatorname{tg} \theta)_m$ est une moyenne des valeurs de tg θ sur la distance d:

$$A_r = \pi \frac{D^2}{4} = \frac{F}{H} \qquad \text{d'où}$$

$$\frac{D^2}{4} = \frac{F}{\pi H}$$

dans (3.5)

$$V = \frac{(tg\ \theta)_m\ Fd}{\pi\ H} = k_{abr}\ \frac{Fd}{3H} \qquad (3.6)$$

ou encore

$$W = \frac{V}{d} = \frac{(tg\ \theta)_m\ F}{\pi\ H} \qquad (3.7)$$

Où W est le volume usé par abrasion par unité de distance glissée. k_{abr} est appelé coefficient d'usure par abrasion et est sans dimension.

$$k_{abr} = \frac{3VH}{Fd} = \frac{3\ (tg\ \theta)_m}{\pi} \qquad (3.8)$$

Mentionnons que cette théorie, d'abord élaborée pour les métaux, a été étendue aux matériaux plastiques sans aucune modification ou condition additionnelle.

III-4 THÉORIE DE L'USURE PAR ADHÉSION

Cette théorie découle de celle du frottement par adhésion. Elle stipule que l'usure des matériaux est due à une "micro-soudure" aux points de contact des aspérités.

La fracture du matériau le moins rigide tout près de cette micro-soudure va alors produire une particule d'usure.

Dans les zones où il y a contact (A_r), les atomes vont se toucher et générer des forces interatomiques. Ces forces sont associées aux liaisons métalliques dans le cas de métaux, aux liaisons covalentes en ce qui concerne les céramiques et pour les plastiques, aux forces de van der Waals, aux forces électrostatiques et aux liaisons d'hydrogène [31]. Lorsqu'une charge est appliquée, les contraintes compressives locales aux points de contact seront très élevées et causeront une déformation d'abord élastique, puis plastique et ce, jusqu'à ce que la surface réelle de contact soit suffisamment grande pour supporter la charge. La force tangentielle requise pour causer un glissement entre les deux surfaces est en d'autres mots la force nécessaire pour cisailler ces jonctions ou micro-soudures instantanées qui viennent de se former. Lorsque ces dernières sont plus résistantes que les matériaux mêmes, le matériau le moins rigide va lâcher et se fracturer non loin de l'interface. A l'occassion, l'inverse peut se produire lorsque le matériau mou va rencontrer une zone du matériau dur qui présente un défaut ou encore qui a été affaiblie par fatigue.

Un fragment de matière est alors produit et sera transféré d'une surface à l'autre. Il se détachera par la suite pour coller à la surface originale ou devenir un débris d'usure.

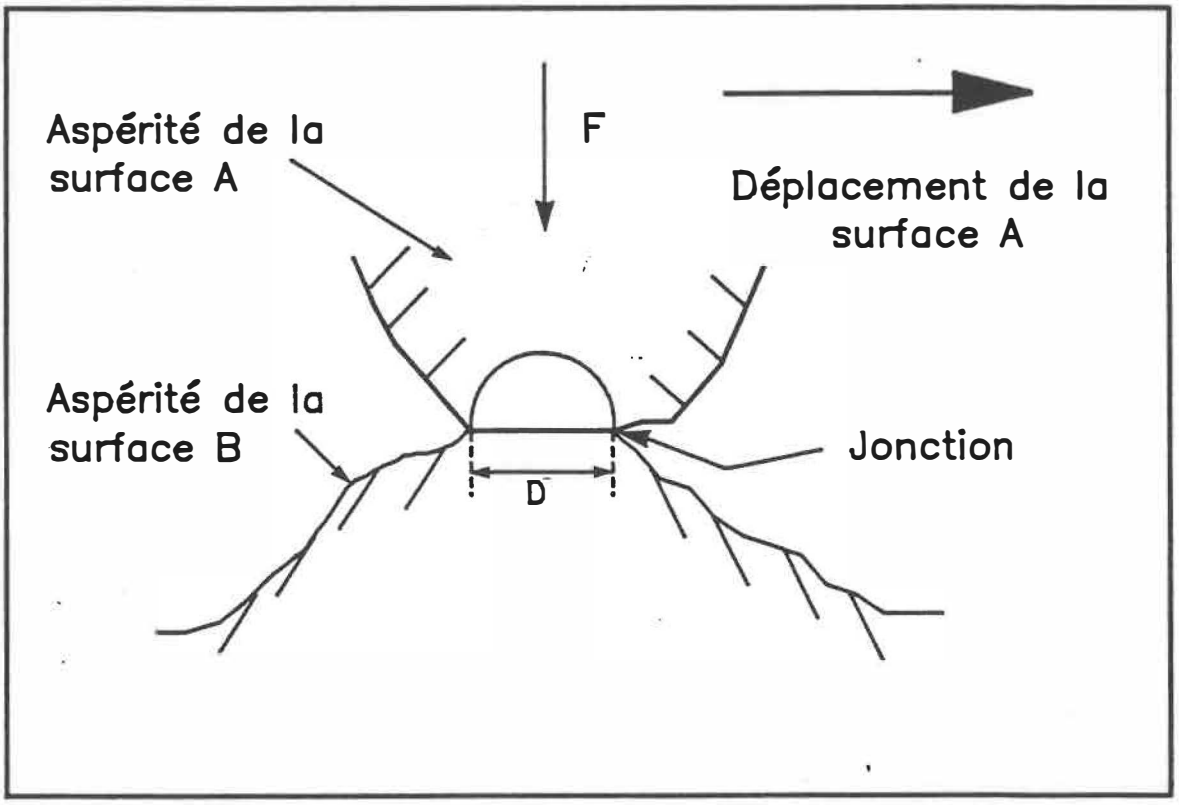


Figure 3.3 - Modèle théorique d'une particule d'usure par adhésion

Si on considère le contact de la Figure 3.3 entre deux aspérités de deux surfaces se déplaçant l'une par rapport à l'autre et si l'on assume que la particule d'usure est de forme hémisphérique et que tous les contacts sont de la

même taille, des disques de diamètre D (Figure 3.3), la surface de contact A_1 pour une aspérité sera alors $A_1 = \pi D^2/4$ et pour n particule:

$$A_n = n\ \pi D^2/4 \qquad (3.9)$$

Ce qui représente en fait, la surface réelle de contact ($A_n = A_r$). De (3.9) et (3.2) on obtient

$$n = \frac{4A_r}{\pi D^2} = \frac{4F}{\pi HD^2} \qquad (3.10)$$

Si N le nombre de contact par unité effective de distance glissée.

$$N = \frac{n}{D} = \frac{4F}{\pi\ HD^3} \qquad (3.11)$$

Soit k_{adh} la probabilité pour qu'un contact entre deux aspérités donne un fragment d'usure supposé hémisphérique. Le volume d'usure par unité de glissement $\delta V/\delta d$ est:

$$\frac{\delta V}{\delta d} = k_{adh}\ N\ V_h \qquad (3.12)$$

où $V_h = \frac{\pi\ D^3}{12}$: volume d'une hémisphère de diamètre D

(3.12) devient alors:

$$\frac{\delta V}{\delta d} = k_{adh} \; N \frac{\pi \; D^3}{12} \qquad (3.13)$$

avec (3.11) on obtient:

$$\frac{\delta V}{\delta d} = k_{adh} \frac{F}{3H} \qquad (3.14)$$

Le volume de fragments arraché sur une distance glissée d est donc:

$$V = k_{adh} \frac{Fd}{3H} \qquad (3.15)$$

où H est la dureté du matériau le plus mou.

C'est la loi fondamentale de l'usure par adhésion proposée par Archard [24]. k_{adh} est appelé coefficient d'usure par adhésion et est aussi sans dimension:

$$k_{adh} = \frac{3VH}{Fd} \qquad (3.16)$$

L'équation (3.15) peut être présentée sous d'autres formes. L'épaisseur d'usure h s'écrirait par exemple:

$$h = k_{adh} \frac{Fd}{3HA_a}$$

et puisque $H = \frac{F}{A_r}$ on obtient:

$$h = k_{adh} \frac{A_r d}{3A_a} \qquad (3.17)$$

On remarquera que l'équation (3.15) est similaire à celle de Holm (3.1) sauf pour le facteur trois au dénominateur. Ce facteur peut être considéré comme un facteur de forme relié à l'hypothèse d'Archard quand à la forme hémisphérique des aspérités. Une autre forme de celles-ci aurait donc produit un facteur différent.

Si on compare (3.6) et (3.15), on remarque qu'elles sont de la même forme seulement, la constante $k_{adh}/3$ dans le cas de l'adhésion est remplacée par $(\mathrm{tg}\ \Theta)_m/\pi$ dans celui de l'abrasion.

III-5 FILM DE TRANSFERT

Le phénomène de transfert de matière durant le glissement entre deux corps solides influence directement les caractéristiques tribologiques du système, et a fait l'objet de nombreuses recherches depuis qu'il fût rapporté pour la première fois par Bowers, Clinton et Zisman [32, 33] en 1953 lors d'une étude sur le frottement du PE et du PTFE.

C'est l'adhésion, la déformation et la rupture qui sont à l'origine du film de transfert. Ce film va se romper et se détacher à certains endroits générant des débris d'usure pendant que le nouveau transfert prendra place. Le transfert de matière peut être bénéfique dans le cas des polymères ductiles tels que PE et le PTFE car il donne naissance à une contreface plus lisse [34,35]. Cependant, on a observé le phénomène inverse dans le cas des polymères durs et fragiles comme le polyester et le polystyrène [36]. D'autres chercheurs [33, 37, 38] ont observé une orientation des chaînes moléculaires dans la direction du glissement pour le PTFE et le HDPE et ce, au niveau de la surface plastique et du film de transfert. Ils ont aussi relié [37] la facilité de formation de ce film au caractère lisse du profil moléculaire de ces polymères.

Cette modification de l'interface (orientation moléculaire) peut expliquer les diminutions du coefficient de frottement entre les deux surfaces, des contraintes de contact locales et donc du taux d'usure. La diminution de la friction peut aussi être expliquée par une grande oxydation du film de transfert, ce qui défavorise le phénomène d'adhésion entre les deux surfaces [39]. Tanaka [40] a pour sa part essayé de relier le transfert à l'usure et trouvé que leur taux était élevé au début du glissement jusqu'à une certaine épaisseur d'équilibre du film de transfert à la suite de quoi on observait une diminution du taux d'usure et ce, pour le HDPE, le LDPE et le Nylon 6. Pour le PTFE cependant, ce taux n'a pas diminué. Lorsque le film de transfert se forme, on se trouve en présence d'une sorte de glissement entre deux plastiques (échantillon/film plastique) dont les modules élastiques sont très semblables, les contraintes locales se voient diminuées et la surface réelle de contact augmentée.

Ces deux facteurs ainsi que l'apparition d'une contreface plus lisse vont tous ensembles, affecter le taux d'usure après la formation du film de transfert.

Tanaka et Miyata [41] ont établi une ressemblance entre le UHMWPE, le HDPE et le PTFE de point de vue transfert. Rhee et Ludema [42] ont observé que le transfert

était plus massif dans le cas du POM et du Nylon 6.6 que dans celui du PTFE, HDPE et UHMWPE et qu'il était non orienté.

Kar et Babadur [43] ont étudié les micro-mécanismes de l'usure. Ils affirment que dans le cas du HDPE et du POM, le film de transfert se détachait par ramollissement thermique et même par fusion, et que le transfert se faisait plutôt par cisaillement dans le cas du PTFE.

Eiss et Smyth [44] ont simulé le film de transfert en déposant une mince couche de plastique sur une contreface rugueuse en acier, ce qui représente en d'autre terme, l'équilibre en transfert lors du glissement. Ils ont alors trouvé que le frottement et l'usure étaient moindres pour des surfaces recouvertes que pour les surfaces non couvertes dans le cas du LDPE, mais que la présence du film n'influençait pas le comportement tribologique du PVC et du PCTFE lorsque les propriétés mécaniques du film étaient similaires à celles du frotteur plastique.

Une autre sorte de transfert peut aussi avoir lieu, celle du métal vers la surface plastique. Ce phénomène a été rapporté par de nombreux chercheurs [45, 46] et se produit lorsque les interactions à l'interface deviennent plus importantes que la résistance des couches en surface du

métal. Ceci peut être causé par un affaiblissement local dû soit à un traitement avant le glissement, à une fatigue des couches en surface (phénomène de délamination de Suh à la section III-6) ou encore à une oxydation de la surface métallique. Toutes ces imperfections vont produire des fragments métalliques qui iront s'encastrer sur la surface plastique et il n'est pas rare de les voir par la suite, rayer la contreface métallique et lui causer des dommages.

III-6 THÉORIE DE L'USURE PAR DÉLIMINATION

La théorie de l'usure par délamination est la dernière née dans le domaine. Introduite par Suh [26] en 1973, elle décrit les mécanismes les plus responsables de l'usure lors du glissement d'une surface sur une autre. Cette théorie est la suivante:

Si on considére une fissure au dessous de la surface comme le montre la figure 3.4, le taux d'usure sera fonction de la propagation de la fissure aux deux extrémités D et G. Si ΔC_{iD} est la propagation de la fissure à droite après i cycle et N le nombre total de passages requis pour l'enlèvement d'une lamelle, le volume V_1 de cette lamelle d'usure sera alors:

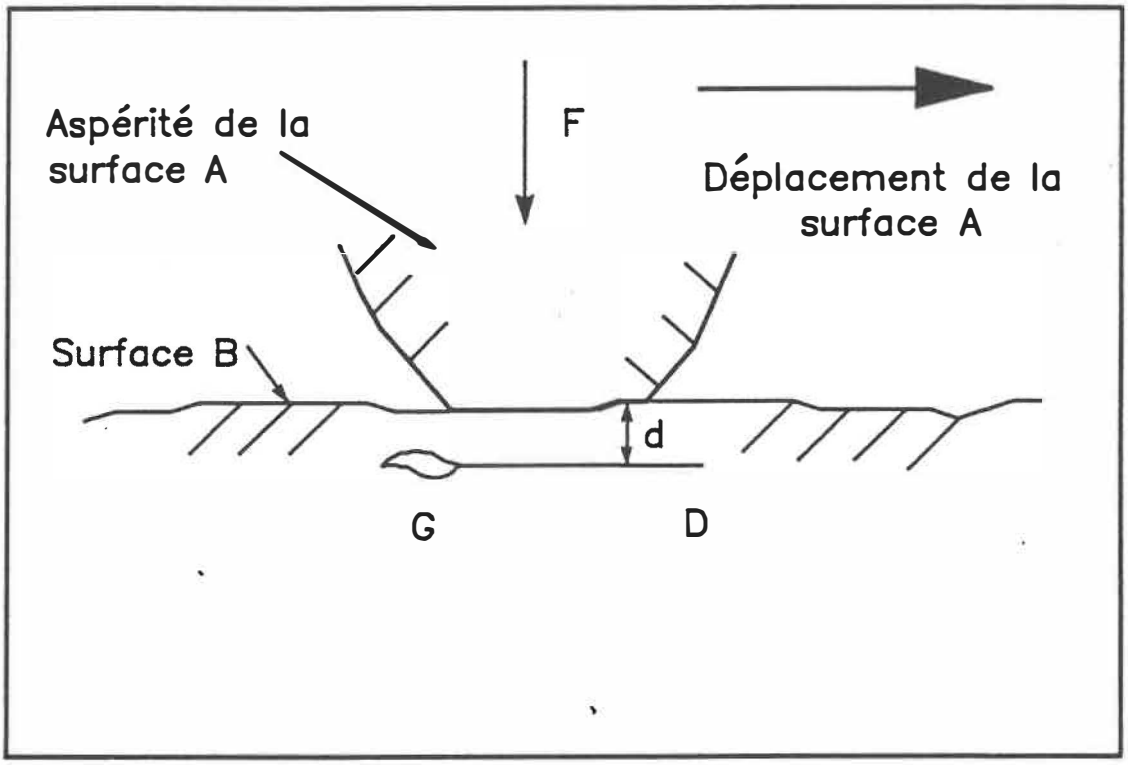


Figure 3.4 - Propagation d'une fissure

$$V_1 = wd \sum_{i}^{N} (\Delta C_{G\,i} + \Delta C_{D\,i}) \qquad (3.18)$$

avec d la profondeur et w la largeur de la lamelle. Le volume total d'une couche d'usure est alors:

$$V = N_c \; N_w \; wd \sum_{i}^{N} (\Delta C_{G\,i} + \Delta C_{D\,i}) \qquad (3.19)$$

Avec N_c le nombre de craques le long de la direction du glissement, et N_w le nombre de lamelles d'usure suivant la largeur de contact.

Comme $N_w w$ est approximativement égal à la largeur de contact L_w, on peut finalement écrire:

$$V = N_c L_w \; d \sum_{i}^{N} (\Delta C_{G\,i} + \Delta C_{D\,i}) \qquad (3.20)$$

Selon Suh, avant qu'il y ait formation d'une lamelle d'usure, les événements suivants sont observés:

- Les aspérités de la surface tendre vont se déformer et se fracturer formant ainsi des petites particules d'usure, les aspérités dures subissent la même chose mais à un rythme plus lent. Tout ceci va donner naissance à une surface plus lisse.

- Les tractions en surface exercées par les aspérités dures aux points de contacts produisent un accroissement des déformations plastiques par cycle de chargement.

- Des craques et des fissures paraissent au dessous de la surface; avec le temps, elles se propagent parallèllement à la surface à une profondeur contrôlée par les propriétés du matériau et par le type de chargement.

- Lorsque les fissures arrivent à la surface, des fines lamelles de matériaux vont se détacher. Le taux d'usure est donc contrôlé par le taux d'apparition des fissures et celui de leur propagation.

Même si cette théorie a originalement été avancée pour les métaux, selon Suh, elle devrait être applicable à tous les matériaux qui permettent des déformations plastiques, la formation et la propagation de fissures (comme est le cas des thermoplastiques cristallins); mais vu la complexité de ces phénomènes, cette théorie n'a jamais été vérifiée pour les polymères.

III-7 MODÈLE D'IBM POUR L'USURE

Une approche tout à fait différente de ce problème d'usure lors du glissement a été suggérée par Bayer et Al [47] de la compagnie IBM en 1962. En effet, après avoir testé 120 combinaisons différentes de matériaux métalliques en glissement à sec et lubrifié, ils se sont aperçus que l'usure pouvait rester négligeable ou même être éliminée pour un certain temps si la contrainte maximale de cisaillement τ_{max} est gardée en bas d'une fraction de la contrainte d'écoulement en cisaillement τ_y du matériau le plus faible.

Ils ont montré que cette fraction β dépendait des matériaux et des lubrifiants utilisés, et ils ont déterminé sa valeur pour un grand nombre de matériaux. Ces conditions (Zero wear) se présentaient comme suit:

- Pour éliminer un labourage (Ploughing):

$$\tau_{max} < \tau_y$$

  τ_{max} doit être déterminée pour chaque cas particulier de contact, la méthode de Hertz peut être utilisée pour le calcul des contraintes.
- Pour éliminer l'usure par adhésion et par abrasion durant une seule traverse:

$$\tau_{max} < \alpha\tau_y \quad , \quad \alpha < 1$$

- Pour déterminer l'usure pour un certain nombre de traverses:

$$\tau_{max} < \beta\tau_y \quad , \quad \beta \leq \alpha < 1$$

Un travail ultérieur de Clinton et al. [48] montrait que ces mêmes observations et conditions s'appliquaient aussi aux plastiques.

Après avoir testé plusieurs sortes de plastique en faisant glisser dessus une bille en acier inoxydable 2000

fois, ils ont trouvé que le facteur β était toujours de 0.54 et ce lorsque le glissement se faisait à sec ou lubrifié.

Pour les matériaux métalliques, les valeurs de β étaient comprises entre 0.2 et 0.54, et l'élimination du lubrifiant diminuait celles-ci. Les deux dernières constations montrent bien le caractére auto-lubrifiant propre aux plastiques et que leur utilisation comme matériaux tribologiques est un bon choix.

III-8 DISCUSSION DES THEORIES D'USURE

La théorie de l'usure par abrasion et celle de l'usure par adhésion ont un point en commun: elles supposent toutes les deux que les déformations des zones en contact sont entièrement plastiques puisque ces deux théories se basent sur la théorie du frottement par adhésion qui, elle, suppose que la déformation est plastique et d'où la présence du terme H (dureté) dans les équations (3.2),(3.6) et(3.15).

Pour vérifier le mode de déformation au niveau de la surface de contact, certains critères ont été élaborés et que l'on appelle indices de plasticité:

- Indice de plasticité de Greenwood et Williamson [49]:

$$\psi_{GW} = \frac{E'}{H} \left[\frac{\sigma_p}{\beta_p}\right]^{1/2} \qquad (3.21)$$

σ_p = Déviation moyenne de la hauteur des aspérités.

β_p = Rayon de courbure moyen des sommets des aspérités.

$$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \upsilon_1^2}{E_1} = \frac{1 - \upsilon_2^2}{E_2} \qquad (3.22)$$

(E_1, υ_1) et (E_2, υ_2) sont respectivement les modules élastiques et les coefficients de poisson de deux corps en contact, et H la dureté du matériau le plus mou.

- Indice de plasticité de Whitehouse et Archard [50]:

$$\psi_{WA} = \frac{E'}{H} \frac{\sigma}{\beta^*} \qquad (3.23)$$

σ = Déviation standard de la distribution de la hauteur des aspérités.

β^* = Espacement entre deux aspérités de même hauteur.

Notons que les paramètres topographiques σ_p, β_p, σ et β^* sont des paramètres équivalents correspondants aux deux surfaces.

$$\frac{1}{\beta_p} = \frac{1}{\beta_{p1}} + \frac{1}{\beta_{p2}} \quad \text{et} \quad \sigma_p = (\sigma_{p1}{}^2 + \sigma_{p2}{}^2)^{1/2}$$

$(\sigma_{p1}, \beta_{p1})$ et $(\sigma_{p2}, \beta_{p2})$ étant la déviation moyenne et le rayon de courbure moyen des surfaces 1 et 2 en contact. Ces paramètres sont obtenus à l'aide de mesures profilométriques assistées par ordinateur.

Le critère de plasticité est que si ψ_{GW} ou ψ_{WA} dépassent l'unité, la déformation des aspérités est plastique, alors que si ψ_{GW} ou ψ_{WA} sont inférieurs à 0.6, la déformation est alors essentiellement élastique. Ces deux modèles ainsi que l'analyse des limites des déformations élastiques/plastiques ont été élaborés pour le cas particulier d'un contact entre deux métaux avec un coefficient de poisson de 0.286. Dans le cas des polymères, ce coefficient est de l'ordre de 0.5. En plus, les auteurs ont relié la dureté H à la contrainte à l'écoulement σ_y à l'aide de l'approximation $H = 3\sigma_y$, relattion qui n'est pas veriviée dans le cas des polymères. L'utilisation des indices de Greenwood et d'Archard n'est donc pas recommandée lorsqu'il s'agit d'un contact où il y a des matériaux plastiques.

Récemment, Bhushan [51] s'est basé sur le modèle de Greenwood et Williamson pour définir un indice de plasticité pour les polymères ψ_p :

$$\psi_p = \frac{E'}{\sigma_y} \left[\frac{\sigma_p}{\beta_p}\right]^{1/2} \tag{3.24}$$

σ_y est la contrainte à l'écoulement du matériau mou, et σ_p, β_p et E' sont les mêmes que dans l'équation (3.21). Les déformations seront principalement élastiques lorsque $\psi_p < 1.8$ (sauf si les charges sont très élevées) et plastiques pour $\psi_p > 2.6$ même pour des faibles charges. Entre ces deux valeurs, le mode de déformation n'est pas bien connu et peut être l'un ou l'autre.

On pourrait donc croire, pour être en accord avec le fondement des théories de l'usure par abrasion et par adhésion (les déformations sont plastiques), qu'il y a usure par ces mécanismes seulement pour des $\psi_p > 2.6$. Or, dans le cas des polymères des études prouvent que dans la plupart des contacts dynamiques plastiques/métal, les déformations sont souvent élastiques plutôt que plastiques, ce qui pousserait à conclure que l'adhésion et l'abrasion ne seraient peut-être pas les principaux mécanismes de l'usure des polymères, et que les coefficients k_{adh} et k_{abr}

ne pourrait non plus décrire adéquatement le comportement en usure de ces matériaux.

Cette conclusion est appuyée par les travaux de Lancaster [52] sur l'abrasion des polymères qui rapportent le volume déplacé par unité de distance glissée en fonction de l'angle θ d'un indenteur cônique pour un nombre de polymères et de métaux. Un exemple est donné à la figure 3.5.

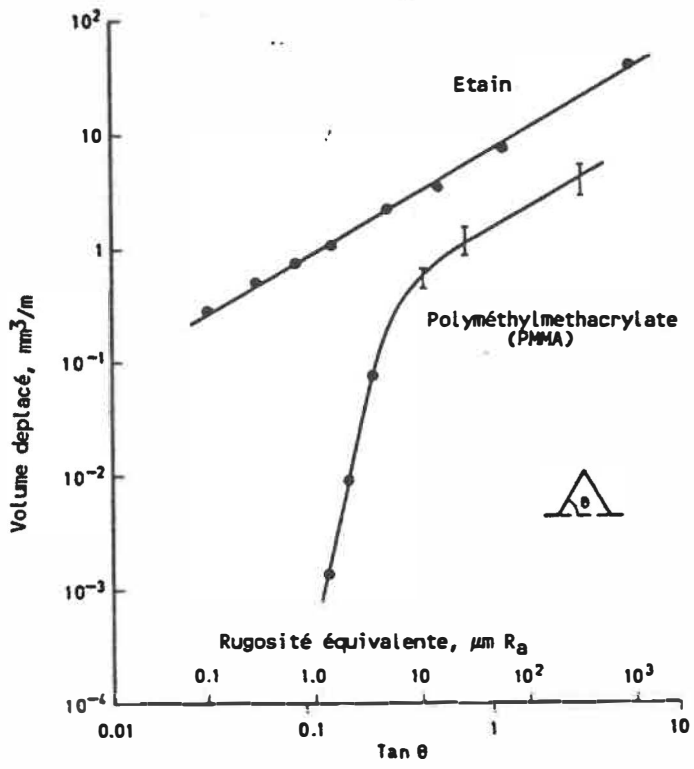


Figure 3.5 - Relation entre le volume deplacé par unité de distance glissée et l'angle d'un indenteur cônique (d'après [36])

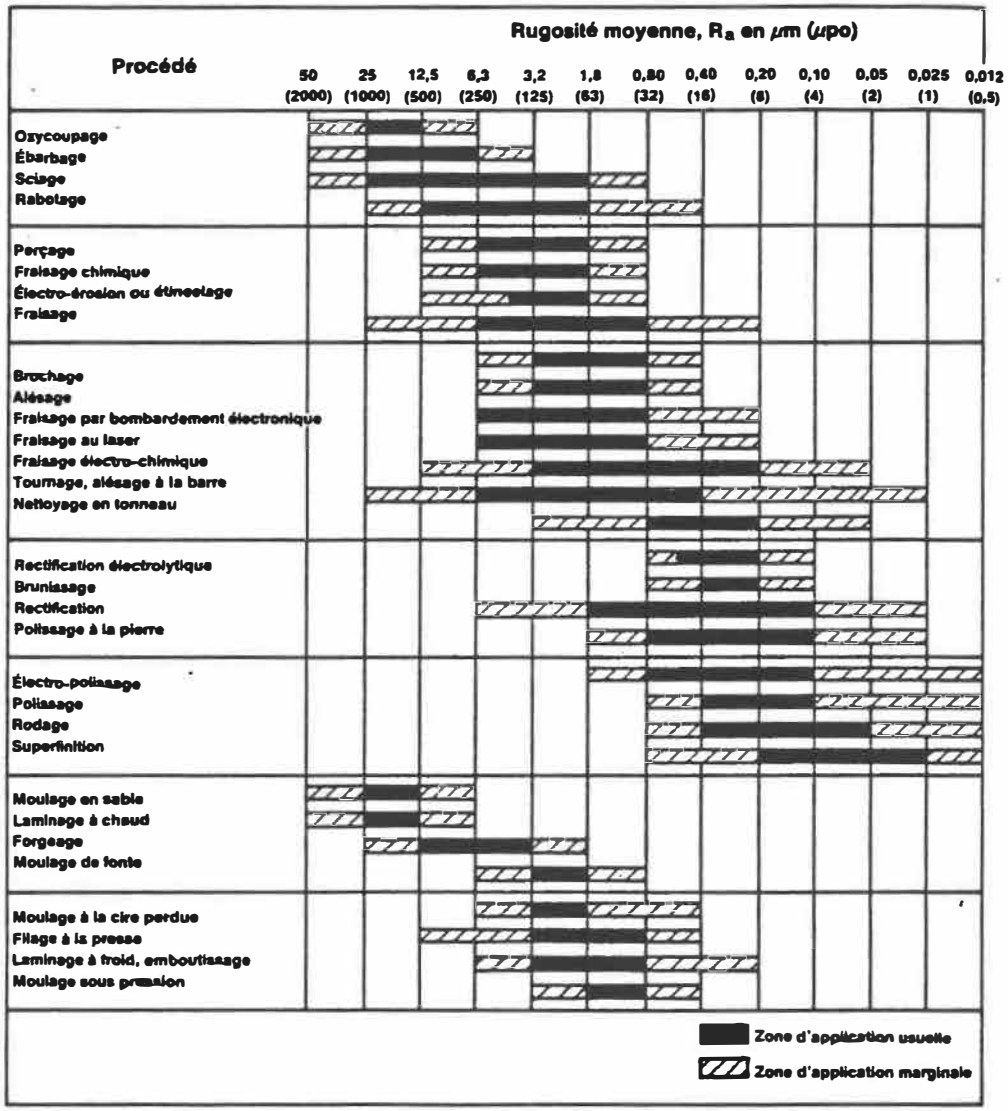


Figure 3.6 - Rugosités de surface typiques obtenues par différents proçédés de fabrication (d'après [55])

Pour le métal, on peut voir qu'il y a déformation plastique pour n'importe quel angle θ, ce qui est en accord avec la relation (3.7) et la théorie de l'usure par abrasion. Ce n'est cependant pas le cas pour les polymères et il n'y a relation linéaire entre le volume et tgθ que pour des valeurs de θ dépassant 30° degrés. Ceci veut dire que lorsqu'un plastique frotte sur un métal, il faut que la surface métallique ait au moins une rugosité de 25 μmRa (1000 μinRa) pour que ses aspérités déforment plastiquement la surface du polymère, la rayent ou lui arrachent des copeaux et concorder en conséquence avec la théorie de l'usure par abrasion. Ce genre de rugosité est loin d'être rencontré dans les procédés courants de fabrication de n'importe quelle pièce frottante ou pas (figure 3.6), mais est typique à des papiers abrasifs, dont la rugosité varie d'environ 6 μm pour 600 mesh à 38 μm pour 100 mesh (SiC). Notons que ce domaine de l'usure des polymères sur des papiers abrasifs a particulièrement été étudié par des chercheurs russes [53, 54].

Finalement, un point très important concernant les modèles de Rabinowicz et d'Archard est l'apparition du terme "H" dans les équations (3.8) et (3.16). Le concept de "dureté" (H) pour les polymères a une signification physique différente de celle des métaux. En effet, beaucoup de polymères et de composites couramment utilisés dans des

applications tribologiques présentent un comportement viscoélastique-plastique. La dureté de ces matériaux, définit comme la charge par unité de surface d'indentation, change continuellement en fonction du temps de pénétration, par conséquent, le comportement en usure de ces matériaux ne peut être caractérisé en terme de coefficient d'usure comme celui défini pour l'abrasion (3.8) ou pour l'adhésion (3.16) et où k_{abr} et k_{adh} sont fonction de H. En outre, on a remarqué que l'utilisation d'une valeur de coefficient d'usure présentée dans la littérature et son application à un cas étudié peut donner des résultats erronés même si les conditions opératoires sont assez semblables à celles utilisées dans la littérature. Ceci a d'ailleurs été noté par Rabinowicz [56] dans une étude où il a comparé les différentes valeurs du coefficient k_{adh} retrouvées dans la littérature, et montre bien le caractère aléatoire d'un tel coefficient.

Ce qu'on peut conclure concernant les modes de déformations et les critères qu'on a exposé c'est que l'usure est plus importante lorsque les aspérités se touchent plastiquement que dans un contact purement élastique. Il est donc souhaitable de dessiner les composantes de machines dans un régime élastique ($\psi_p < 1.8$ pour les polymères, $\psi_{GW} < 0.6$ pour les métaux) avec un $\psi_p \sigma_y$ ($\psi_{GW} H$ dans le cas des métaux) aussi grand que possible et ce en utilisant des

combinaisons de matériaux donnant de grandes valeurs de E'. Physiquement, ça serait des solides qui auraient une surface réelle de contact aussi grande que possible ou des modules d'élasticité les plus semblables possibles.

La théorie de l'usure par délamination de Suh quant à elle, fait intervenir les mécanismes de formation et de propagation des fissures dans les matériaux. Ces mécanismes sont complexes et les connaissances dans ce domaine sont assez limitées mêmes lorsqu'on considère ces intéractions à l'intérieur des solides où les propriétés sont continues. Tout près de la surface, la formation et la propagation des fissures est influençée par la corrosion, la fatigue des surfaces (glissement) et donc l'usure. La délamination est une façon acceptable pour décrire les mécanismes responsables de l'usure, mais l'équation (3.20) proposée par Suh ne peut être utilsé pour calculer le taux d'usure d'un matériau dans un système tribologique donné.

Finalement, le modèle d'IBM ne donne pas d'information sur l'usure si les conditions ne sont pas celles du "Zero wear". C'est donc une approche pour diminuer l'usure à l'étape du design qui s'avère inutilisable pour estimer l'usure d'une pièce d'un ensemle frottant.

III-9 FACTEUR D'USURE ET LA LIMITE (Pv)

Cette approche qui découle tout simplement des travaux de Burwell et de Archard a été proposée par Lewis [27] pour prédire l'usure des matériaux plastiques lorsqu'il n'y a pas de lubrification. Notons qu'elle a été adoptée par nombre de compagnies dont Du Pont, un des géants de la résine plastique.

Dans une situation de glissement entre deux surface, lorsque la période de rodage est terminée et donc une sorte de condition d'équilibre en usure s'établit, presque tout le monde s'entend sur deux observations:

a) Le volume usé augmente avec la distance de glissement;

b) Le volume de matériau usé, pour une certaine vitesse de glissement, augmente avec la charge appliquée pourvu que le mécanisme d'usure ainsi que la température ne changent pas.

On peut donc se permettre d'écrire:

$$V = K\ F\ d$$

ou

$$K = \frac{V}{F\ d} = \frac{h}{P\ d} = \frac{h}{P\ v\ t} \qquad (3.25)$$

ou encore

$$K = \frac{V}{F\ v\ t} = \frac{m}{\rho\ F\ v\ t} = \frac{m}{\rho\ F\ d} = \frac{m}{\rho\ M\ g\ d} \qquad (3.26)$$

d = distance de glissement (m);

F = force appliquée (N);

g = gravité spécifique: 9.81 m/s^2;

h = épaisseur usée (m);

K = facteur de proportionnalité;

m = masse usée (kg);

M = masse appliquée (kg);

P = pression apparente appliquée (Pa);

t = temps de glissement (s);

v = vitesse de glissement (m/s);

V = volume usé (m^3);

ρ = densité volumique (kg/m^3);

K est un facteur de proportionnalité définissant la perfomance en usure du matériau et est communément appelé facteur d'usure. Les auteurs américains ont tendances à l'exprimer en in^3.min/ft.lb.h afin de lui donner plus de signification physique. Dans le système métrique, ses unités ont l'inverse d'une pression c'est-à-dire à dire le m^2/N ou encore le $mm^3/N.m$. Un plastique qui a donc un

facteur d'usure de 1 $mm^3/N.m$ perdera 1 mm^3 de matière par usure lorsqu'il est soumis à une force normale de 1 N et ce, après avoir glissé sur une distance de 1 m.

Dans l'équation (3.20), aucun terme n'est directement relié aux propriétés du matériau. Cette caractéristique la rend plus générale comparativement aux équations d'Archard et de Rabinowicz où la dureté du matériau apparaît, ou à la façon russe de présenter l'usure comme étant le volume perdu par unité de distance et par unité de surface réelle de contact (facteur d'intensité). Cette dernière dépend implicitement des propriétés mécaniques et des caractéristiques topographiques des matériaux en cause et présente certaines difficultés à être mesurée.

L'autre avantage d'une telle façon de caracteriser l'usure des matériaux réside dans le fait que plusieurs études d'abords faites par Lewis [27] lui même, puis par des compagnies comme Du Pont ont montré que pour une géométrie déterminée de l'ensemble frottant, le facteur d'usure K était essentiellement constant (moins qu'un ordre de grandeur) pour une certaine marge de pressions et de vitesses d'utilisation à condition que des paramètres relatifs aux surfaces en présences, comme le type de matériau, la dureté ou la rugusité restent inchangés.

Le facteur K devient donc un moyen très commode de calcul d'usure et de sélection des matériaux pour autant que vitesses et pressions et donc le produit (Pv) ne dépasse pas une limite critique, à partir de laquelle le plastique usera de façon exagérée et sera "tribologiquement" mal utilisé. Cette limite (Pv) relative à un taux d'usure déterminé est imposée par:

- L'aptitude au fluage de la plupart des polymères aux hautes pressions.
- La mauvaise évacuation de la part des plastiques de l'énergie thermique générée par le frottement aux hautes vitesses.

Nous avons donc pour toutes ces raisons, choisi cette approche pour caractériser l'usure et représenter les résultats expérimentaux obtenus par nos essais.

CHAPITRE IV

TESTS D'USURE

IV-1 Machine D'ESSAI

Une des machines d'essais utilisées pour l'évaluation de la résistance à l'abrasion des matériaux est la TABER 505 Dual Abraser (Figure 4.1).

Dans cette machine dont le champ d'application s'étend des matériaux métalliques aux plastiques en passant par le cuir et le textile, le roulement deux meules normalisées sur un échantillon plat cause l'usure de celui-çi. Ceci n'étant pas le type d'usure que l'on s'est proposé d'étudier, une petite modification a été apportée à la machine TABER afin de la rendre de type "tige sur disque" (pin-on-disc) en lui ajoutant un montage simple, mais qui permet d'avoir une machine beaucoup plus flexible; effectuant les tâches de la "505 Dual Abraser" et au besoin, l'étude de l'usure de glissement pour une infinité de combinaisons de matériaux; avantage par rapport à la machine originale qui, elle, ne permet que les combinaisons meule/échantillon. Vu que l'usure de glissement est le type le plus courant dans les applications tribologiques, une telle adaptation devient donc très utile.

Ce montage permet aussi de tester simultanément, à quatre vitesses différentes, huit échantillons pouvant supporter des charges différentes les unes des autres.

La machine telle que modifiée est montrée à la figure 4.2. Notons qu'il est très simple et rapide de passer d'une version à l'autre de cette machine. Cette modification consiste à remplacer les disques et les meules originaux par :

- Deux disques qui constituent les pistes d'usure (Figure 4.3). Ces disques peuvent être fabriqués en n'importe quel matériau dépendemment de l'étude en cours. Dans notre cas, nous avons utilisé de l'acier pour des raisons déjà citées.

- Un support en aluminium pouvant accueillir jusqu'à huit échantillons simultanément (Figure 4.4).

- Des poids de 250, 500 et 1000 g (Figure 4.5) qui ont été usinés dans de l'acier et qui servent de charges qu'on applique individuellement sur les échantillons.

National Library
of Canada

Canadian Theses Service

Bibliothèque nationale
du Canada

Service des thèses canadiennes

NOTICE

THE QUALITY OF THIS MICROFICHE IS HEAVILY DEPENDENT UPON THE QUALITY OF THE THESIS SUBMITTED FOR MICROFILMING.

UNFORTUNATELY THE COLOURED ILLUSTRATIONS OF THIS THESIS CAN ONLY YIELD DIFFERENT TONES OF GREY.

AVIS

LA QUALITE DE CETTE MICROFICHE DEPEND GRANDEMENT DE LA QUALITE DE LA THESE SOUMISE AU MICROFILMAGE.

MALHEUREUSEMENT, LES DIFFERENTES ILLUSTRATIONS EN COULEURS DE CETTE THESE NE PEUVENT DONNER QUE DES TEINTES DE GRIS.

Figure 4.1 - TABER 505 Dual Abraser originale

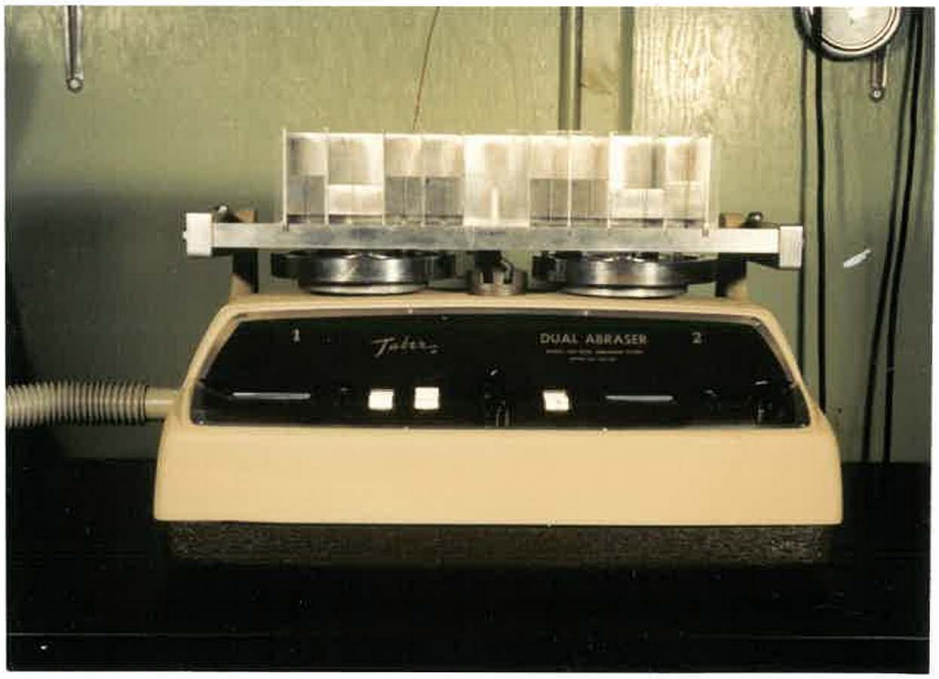


Figure 4.2 - La machine TABER modifiée.

Figure 4.3 - Disques avec leurs quatre pistes d'usure

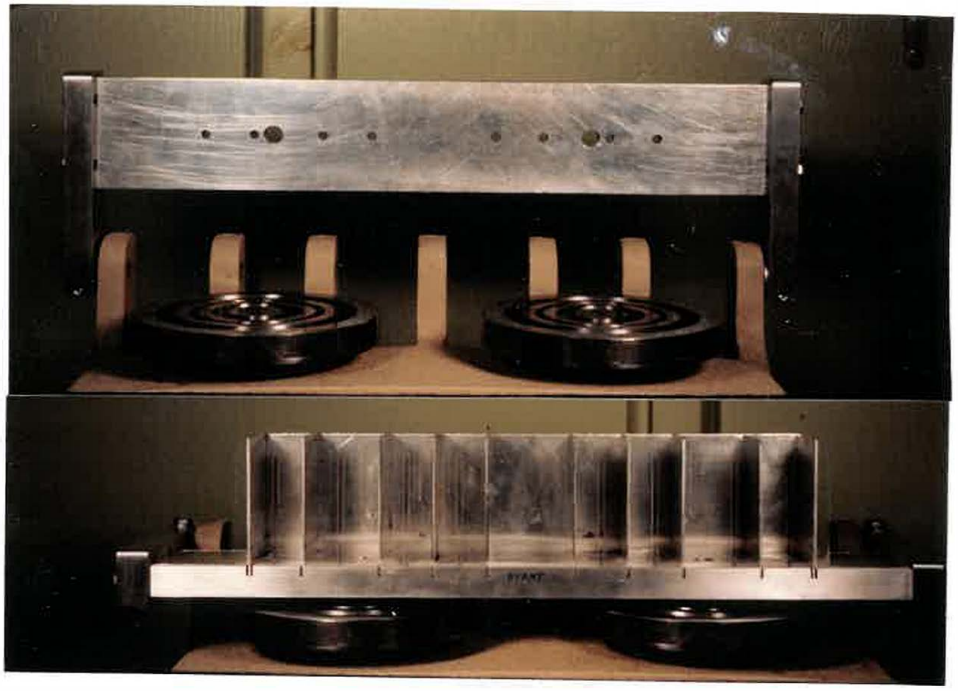


Figure 4.4 - Support en alluminium

Figure 4.5 - Poids servant de charges

IV-2 PISTES D'USURE ET ECHANTILLONS

Des disques de 19 mm d'épaisseur (Figure 4.3) ont été usinés dans des barreaux d'acier fini à froid (AISI C-1020) de 152,4 mm de diamètre et dont les propriétés mécaniques sont données au Tableau 4.1. Des pistes de 7 mm de large ont été par la suite aménagées sur ces disques en pratiquant des rainures circulaires de 9,5 mm de profondeur . Ceci a été fait afin de minimiser le transfert de chaleur d'une piste à l'autre. Finalement, la surface des pistes a été réctifiée à la meule puis finie à la main à l'aide de

papier abrasif (carbure de silicone - 400 mesh). Ceci s'est fait dans le but d'enlever les marques unidirectionnelles de la rectification et obtenir ainsi un fini de surface presque uniforme d'environ 0,12 μm Ra dans toutes les directions.

Acier AISI	Résistance trac.(MPa)	Contrainte écoul.(MPa)	Dureté Brinell
C1020	510	324	137

Tableau 4.1 Propriétés mécaniques moyennes de l'acier utilisé. D'aprés Drummond, McCall & Co.[67]

Une fois montés sur la machine, ces disques seront entraînés à une vitesse de 72 rpm ce qui donne des vitesses linéaires aux pistes de 0.1, 0.25, 0.35 et 0.5 m/s.

Les échantillons sont des tiges de plastique extrudées de 6,35 mm (1/4 po) de diamètre et de 31,75 mm (1 1/4 po) de long (Figure 4.6). La première dimension a été choisie du fait que plusieurs matériaux sont fabriqués en tiges ayant ce diamètre. On évite ainsi l'usinage des pièces, chose qui peut modifier leurs propriétés mécaniques, sans oublier les pertes de temps et d'argent que cela occasionnerait. La hauteur de 31,75 mm a été choisie en fonction des dimensions du support d'alluminium afin d'éviter le

flambage de la tige sous chargement et d'assurer du matériel en quantité suffisante pour des tests de durée raisonnable.

Les échantillons ont été fabriqués à partir de longues tiges de plastique qui ont été coupées à la scie en tigelles d'environ 32 mm de long. Leurs extrémités ont ensuite été usinées sur le tour puis surfacées à la main à l'aide de papier abrasif de 400 mesh aussi, afin d'enlever les fragements d'usinage. Une fois finis, les échantillons de nylon et d'acétal pèsent environ 1,15 g et 1,40 g respectivement.

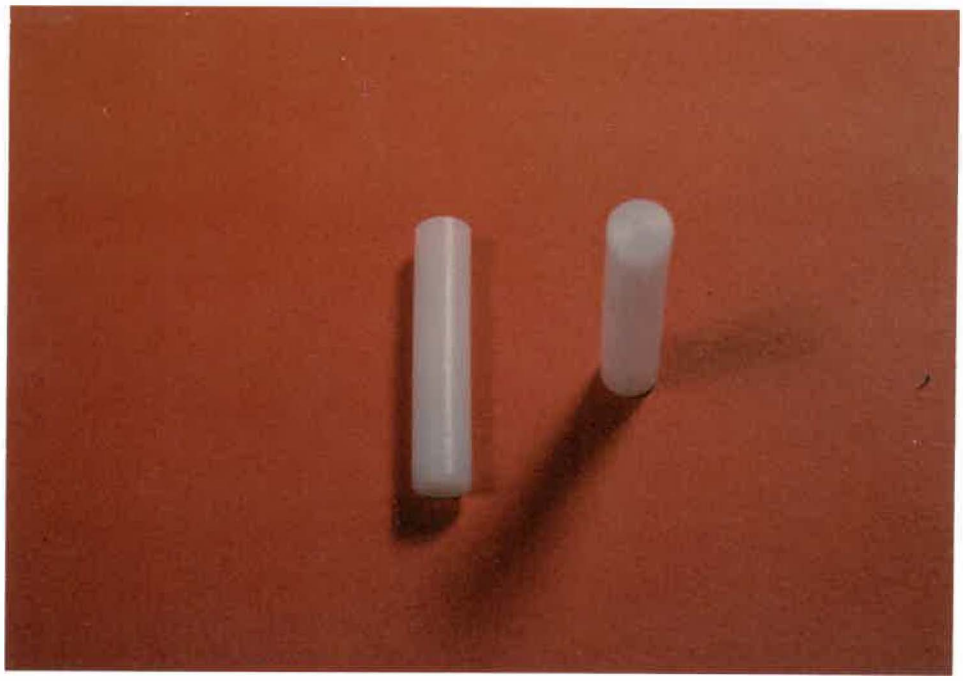


Figure 4.6 - Echantillons de plastique

Les plastiques testés ainsi que leurs caractéristiques telles que données par le catalogue du fournisseur sont présentés au Tableau 4.2 çi-dessous.

	Property	Units	Test Method ASTM	Acetal	Nylon 101
Mechanical	Specific Gravity	—	D792	1.41-1.42	1.14-1.15
	Tensile Strength, 73°F.	psi	D638	8,800-12,000	9,000-12,000
	Tensile Modulus of Elasticity, 73°F.	psi	D638	410,000-520,000	250,000-400,000
	Elongation, 73°F.	%	D638	12-75	20-200
	Flexural Strength, 73°F.	psi	D790	13,000-15,500	12,500-14,000
	Flexural Modulus of Elasticity, 73°F.	psi	D790	375,000-550,000	175,000-410,000
	Shear Strength, 73°F.	psi	D732	7,700-9,500	9,600
	Compressive Strength, 10% Def.	psi	D695	16,000-18,000	12,000
	Compressive Modulus of Elasticity, 73°F.	psi	D695	—	—
	Coefficient of Friction (Dry vs. Steel) Dynamic	—	—	.15-.35	.17-.43
	Hardness, Rockwell, 73°F.	—	D785	R119-122	R110-120
	Durometer, 73°F.	—	D676	—	D80-85
	Tensile Impact, 73°F.	ft. lb./in.^{2}	D1822	40-90	90-180
Thermal	Coefficient of Linear Thermal Expansion	in./in./°F.	D696	$4.2\text{-}4.7 \times 10^{-5}$	5.5×10^{-5}
	Deformation Under Load (122°F. 2,000 psi)	%	D621	0.3-1.0	1.0-3.0
	Deflection Temperature 264 psi	°F.	D648	230-255	200-450
	66 psi	°F.	D648	316-338	400-460
	Melting Point	°F.	D789	329-347	482-500
	Continuous Service Temperature In Air (Max.)	°F.	—	180	180-200
Electrical	Dielectric Strength Short Time	Volts/mil	D149	380-500②	300-400②
	Volume Resistivity	OHM-CM	D257	$1 \times 10^{14}\text{-}1 \times 10^{15}$	4.5×10^{13}
	Dielectric Constant, 60Hz		D150	3.7	4.1
	10^3Hz		D150	3.7	4.0
	10^6Hz		D150	3.7	3.4
Chemical	Water Absorption Immersion 24 Hours	%	D570③	0.12-0.25	0.6-1.5
	Saturation	%	D570	0.80-0.90	7-9
	Acids, Weak, 73°F.			A	A
	Strong, 73°F.			U	U
	Alkalies, Weak, 73°F.			A	A
	Strong, 73°F.			U	A
	Hydrocarbons-Aromatic, 73°F.			A	A
	Hydrocarbons-Aliphatic, 73°F.			A	A
	Ketones, 73°F.			A	A
	Ethers, 73°F.			A	A
	Esters, 73°F.			A	A
	Alcohols, 73°F.			A	A
	Inorganic Salt Solutions, 73°F.			—	A
	Continuous Sunlight, 73°F.			—	L

Tableau 4.2 - Propriétés des plastiques utilisés.
D'après Polypenco Ltée [66]

IV-3 MESURE DE LA TEMPÉRATURE

IV-3-1 INTRODUCTION

Même si les conditions de glissement étudiées n'étaient pas sévères, on s'est proposé de faire des mesures de température le plus proche possible de la surface de contact pour certaines conditions de glissement, afin d'avoir une idée sur l'augmentation de la température de surface due au frottement, et sa valeur moyenne après la stabilisation des conditions de glissement.

Pour ce faire, et pour chaque piste d'usure, un RTD (Resistance Temperature Detector), dont les caractéristiques sont données à la figure 4.9, a été placé à 0.75 mm de la surface (Figure 4.8). Comme ces RTD fonctionnent suivant le principe de la variation de la résistance électrique en fonction de la température, un circuit électrique a été mis sur place et permet de passer d'une résistance (Ω) à une tension (mV) qui elle, peut être directement relevée sur un traceur (Figure 4.7), il suffira par la suite de convertir la tension en température à l'aide d'une relation bien déterminée. Les RTD présentent certains avantages par rapport aux autres systèmes couramment utilisés dans la mesure des températures de "surface" comme les thermocouples. Parmi ces avantages on peut citer:

- Bas prix car ils s'utilisent sans boîte de compensation.

- Absence de problèmes liés aux fils électriques (effet de thermocouple).

- Ne nécessitent pas de tables pour avoir les températures (coefficient standard).

- Plus linéaires que les thermocouples.

La machine modifiée avec système de mesure des températures de surface est montrée à la figure 4.7. La figure 4.8 illustre les disques utilisés lors de ces essais.

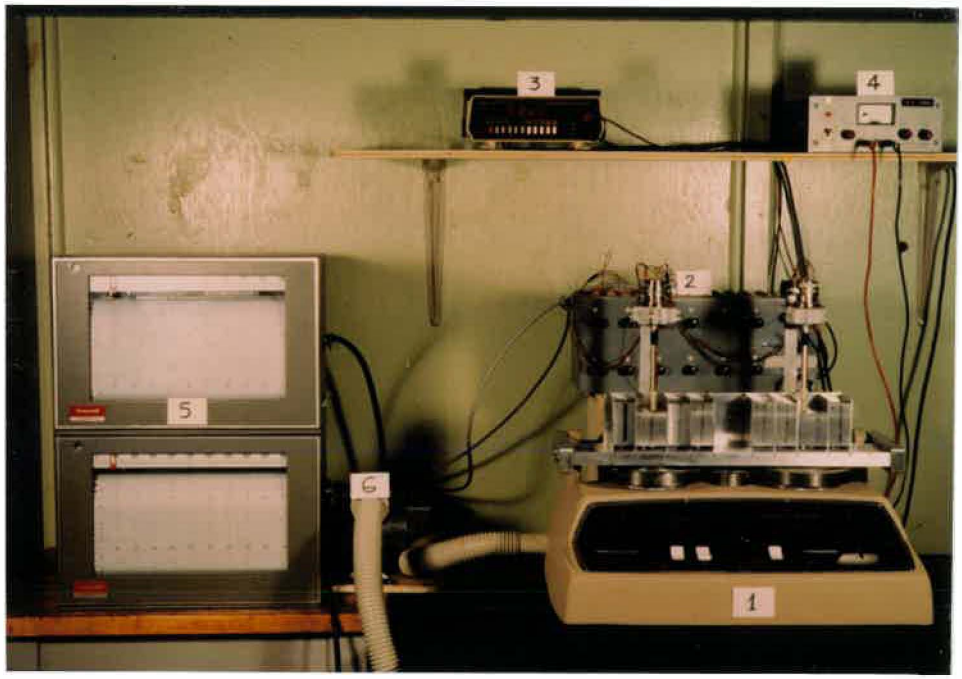


Figure 4.7 - Machine TABER modifiée avec mesure de température par RTD. (1: Taber modifiée, 2: pont Weatstone, 3: millivoltmètre, 4: générateur de tension, 5: traceurs, 6: conduit d'air pour refroidissement des moteurs de la machine).

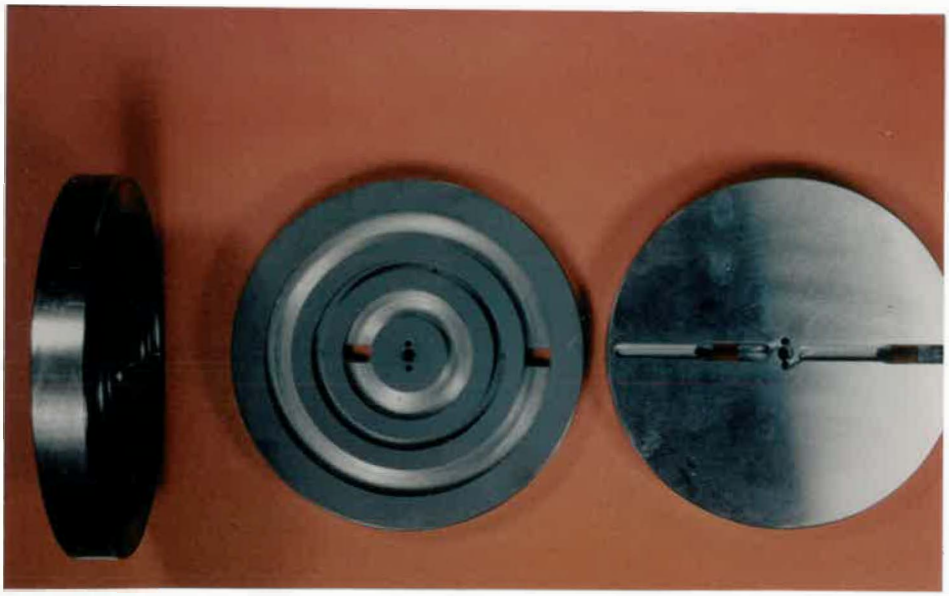
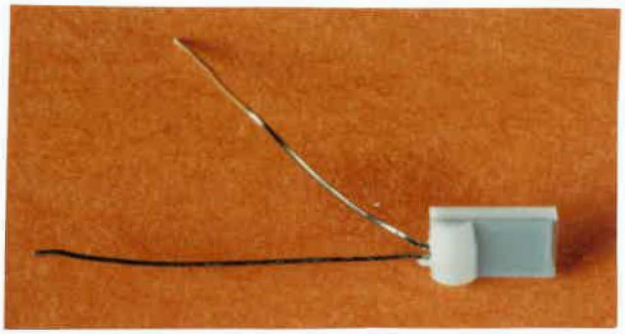


Figure 4.8 - Disques d'acier utilisés lors des mesures des températures de surface.

RTD au Platine

(Alpha = 0,00385)



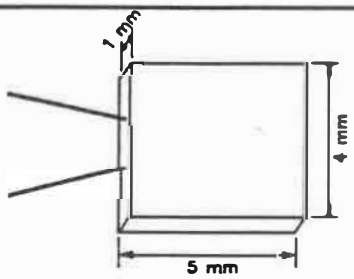
Série	Dimensions	Résistance nominale	Plage de températures	Numéro de catalogue
F		100	−50 C à 600 C	F3102

Figure 4.9 - Caractéristiques du RTD utilisé dans le montage

IV-3-2 CIRCUIT ELECTRIQUE

Lorsque placé dans un milieu ayant une température donnée, le RTD se comporte comme une résistance électrique dont la valeur peut être mesurée à ses bornes. Pour les RTD en platine qu'on a utilisé, ces valeurs sont 100 Ω à 0°C et 138,5 Ω à 100°C, ce qui donne une pente moyenne, appelée coefficient standard de température, α de 0,00385 Ω/Ω/°C. Cette pente est très faible et la simple résistance électrique des fils peut causer d'importantes imprécisions quant à la mesure de température.

Pour remédier à ce problème, un pont WHEATSTONE (Figure 4.10) a été utilisé et la tension à la sortie (V_0) sera une indication indirecte de la résistance du RTD et donc de sa température. L'avantage est que le multivoltmètre digital donne la tension aux bornes du RTD et sera insensible aux fils électriques et à leurs longueurs une fois que le pont ait été balancé à l'aide du potentiomètre.

IV-3-3 CALIBRATION

L'utilisation du pont WHEATSTONE crée une relation non-linéaire entre la variation de la résistance et celle de la tension. Pour déterminer cette relation, le RTD a été remplacé par une boite à décade (résistance variable)

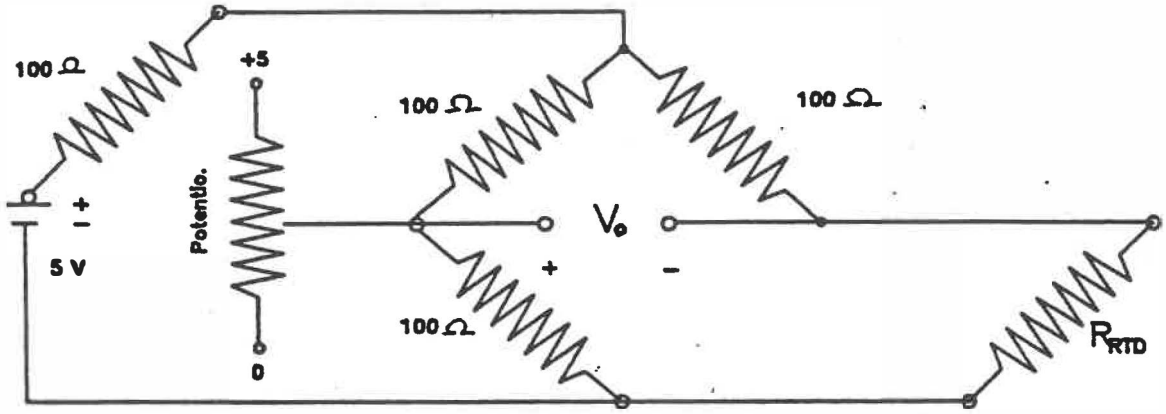


Figure 4.10 - Schéma du circuit électrique

qui simule la résistance aux bornes de celui-ci et pour des résistances de 100Ω à 194,5 Ω, nous avons mesuré des tensions de 0mV à 417,4 mV (Tableau 4.3)

Pour vérifier la table du manufacturier qui donne la température en fonction de la résistance du RTD ($T_{RTD.M}$ = $f(R_{RTD})$. Tableau 4.4), un RTD a été placé au fond d'un tube de cuivre et recouvert de pâte thermoconductrice (afin d'améliorer la conduction). Le tube a par la suite été plongé dans un bain à différentes températures.

Les valeurs de température obtenue à l'aide de la table du manufacturier ($T_{RTD.M}$ Tableau 4.4) et celles du bain (T_B) présentaient une différence d'environ 1,3°C

($T_{RTD.M} > T_B$). Ceci est dû au rechauffement du RTD causé par le passage du courant électrique. En effet, le manufacturier prévoit un auto-rechauffement typique de 0,1°C par milliwatt. Dans notre cas, la puissance était de 12,7 mW, ce qui correspond effectivement à un rechauffement d'environ 1,3°C, rechauffement qui sera pris en considération lors des mesures.

Résist. (Ω)	Tension (mV)	Résist. (Ω)	Tension (mV)	Résist. (Ω)	Tension) (mV)
100	0	142	215,6	170	330,7
103,5	20,4	145,5	231	173,5	343,8
107	40,3	149	246,2	177	356,7
110,5	59,7	152,5	261	180,5	369,3
114	78,7	156	275,5	184	381,6
117,5	97,2	159,5	289,7	187,5	393,8
121	115,3	163	303,7	191	405,8
124,5	132,9	166,5	317,3	194,5	417,4

Tableau 4.3 Relation entre la résistance et la tension des RTD

Résist. (Ω)	Temp. (°C)	Résist. (Ω)	Temp. (°C)	Résist. (Ω)	Temp. (°C)
100	0	142	72	170	146
103,5	9	145,5	81	173,5	156
107	18	149	91	177	165
110,5	27	152,5	100	180,5	175
114	36	156	109	184	184
117,5	45	159,5	118	187,5	194
121	54	163	128	191	203
124,5	63	166,5	137	194,5	213

Tableau 4.4 Relation entre la résistance et la température des RTD. D'après OMEGA [58]

En combinant les tableaux 4.3 et 4.4 on peut avoir la relation entre la température et la tension du RTD. Ceci a été traité par ordinateur et la relation a été approximée par une regression polynomiale d'odre 3:

$$T = 3{,}665\times10^{-7}V_0^{\,3} + 2{,}466\times10^{-4}V_0^{\,2} + 4{,}356\times10^{-1}V_0 + 2{,}372\times10^{-3}$$

Si on tient compte de l'autorechauffement des RTD, la température mesurée à 0,75 mm de la surface sera donc :

$$T = 3{,}665\times10^{-7}V_0^{\,3} + 2{,}466\times10^{-4}V_0^{\,2} + 4{,}356\times10^{-1}V_0 - 1{,}29$$

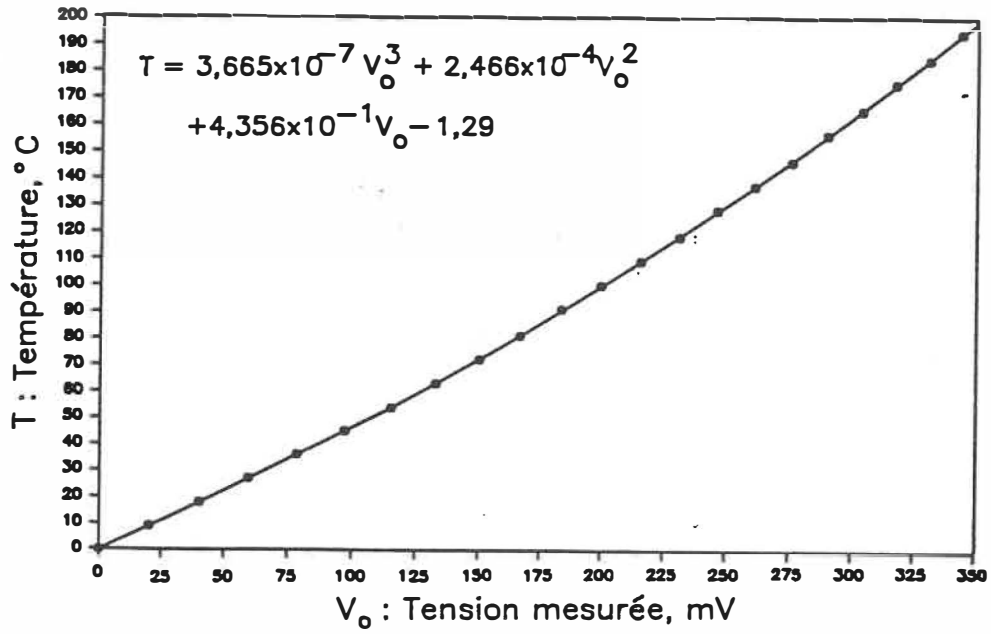


Figure 4.11 - Relation entre la tension et la température en tenant compte de l'autorechauffement

ou T est en degré Celcius (°C) et V_0 la tension mesurée en millivolt (mV), avec une variance de 1. Le temps de réponse est de 0,1 seconde pour atteidre 63 % de la température ultime, et la marge d'erreur de ces RTD est de ±0,5°C, ce qui est largement suffisant pour nos besoins.

Notons enfin que l'augmentation de la température des pistes d'usure ne sera pas due uniquement à la chaleur dégagée lors du frottement mais aussi à toute variation de la température au voisinage immédiat des disques d'acier. Cette température est influencée par l'ambiance mais surtout par le réchauffement des moteurs.

Pour détecter cette variation de température qui n'est pas due au frottement, un disque similaire à ceux de la figure 4.8 a été placé entre les deux disques de la machine TABER modifiée (Figure 4.2). N'étant pas sujet au frottement, son RTD indiquera donc toute variation de température causée par l'ambiance ou encore par le réchaffement des moteurs. On pourra ainsi déduire l'augmentation de température directement reliée au frottement.

IV-4 PROCÉCURES ET CONDITIONS

IV-4-1 Mesure de l'usure

L'usure des échantillons a été mesurée par pesée. Les pesée ont été faites à l'aide d'une balance d'analyse électronique (METTLER AE 240, figure 4.11, précision d'affichage de 10^{-5}g). Les conditions ambiantes durant les essais étaient de 23°C + 2°C et de 30% + 2% d'humudité relative. Quelques problèmes avec la climatisation de la salle de laboratoire occasionnaient parfois des variations plus importantes.

IV-4-2 Préconditionnement des échantillons

Dans un milieu humide, les polymères ont tendance à absorber l'eau. Ceci influence directement certaines de leurs propriétés et augmente leurs poids (surtout les polyamides: 0.4 à 1.5% d'augmentation en poids). Afin de minimiser les erreurs engendrées par cette propriété des plastiques, tous les échantillons ont été nettoyés dans de l'eau distillée et du méthanol. Ils ont par la suite été séchés, numérotés et laissés au moins 48 heures dans la salle de laboratoire avant leur utilisation.

Aussi, pour détecter des variations éventuelles de poids qui ne serait pas dues à l'usure mais à l'absorption ou à la perte d'humidité ou encore aux conditions de la pesée (la balance est sensible à la variation des conditions ambiantes), un échantillon témoin qui ne frottait pas était placé près de la machine durant tous les tests, et pesé au même titre que les autres échantillons. Lorsque l'échantillon témoin présentait une variation de poids, une correction était alors aussitôt apportée sur la perte de poids mesurée sur les autres échantillons et ce, en soustrayant (ajoutant) à la masse perdue l'augmentation (la diminution) de masse qu'a subit l'échantillon temoin. Notons enfin que ces corrections n'étaient pas fréquentes et variaient de 1 à 5 10^{-5} gramme.

IV-4-3 Procédures expérimentales

Le schéma de la figure 4.12 illustre les différentes étapes de la procédure suivie lors des tests. Pour chaque plastique, après avoir nettoyé les échantillons à l'eau distillée et au méthanol, les avoir séchés (étape A), ces derniers sont numérotés puis entreposés 48 heures (étape B) et les pistes rectifiée(C). Après avoir complété ces procédures, on choisit les charges à appliquer sur les huit échantillons (78 KPa à 620 KPa). Dépendement de la piste sur laquelle ils seront placés, ces échantillons sernt

testés deux à deux à une vitesse de 0,1, 0,25, 0,35 ou 0,5 m/s. On va par la suite finir les pistes au papier abrasif, les nettoyer à l'eau distillée et au méthanol et les sécher (D). Les échantillons ainsi qu'une zône identifiée de la surface frottante sont examinées au microscope optique et des photos sont prises à l'occasion (F et G). La rugosité des pistes est aussi mesurée (E) à l'aide d'un rugosimètre CLEVITE BRUSH MS-5000 afin de s'assurer que la topographie est la plus semblable d'une expérience à l'autre. Les échantillons sont alors pesés et placés sur la machine d'essai (H et I). Après des durées cumulatives de glissement de 6 et 24 heures, on arrête la machine et on nettoie les échantillons à l'aide d'un jet d'air filtré (y compris le témoin) pour enlever les débris d'usure, puis on les pese (J, K et H). Après la pesée, on replace les mêmes échantillons sur la machine (étape I) exactement à l'endroit et dans la position azimuth initiale, position repérée à l'aide d'une marque sur les échantillons et sur le support d'alluminium et qui permet de respecter le sens des sillons d'usure labourés sur la surface de l'échantillon au préalable.

Lorsque l'expérience est terminée (48 heures), on choisit d'autres conditions opératoires et on reprend à la procédure D avec d'autres échantillons. Notons que pour faire les pesées, la machine a été arrêtée, la température

aux environs des pistes ainsi que la température ambiante et l'humidité relative ont été notées.

Légende de la figure 4.12 de la page suivante :

A - Nettoyer les échantillons à l'eau distillée et au méthanol et sécher

B - Numéroter les échantillons et entreposer 48 heures pour préconditionnement

C - Rectifier les pistes

D - Finir les disques au papier abrasif, les nettoyer à l'eau distillée et au méthanol et sécher

E - Mesurer la rugosité des pistes

F - Observer les échantillons au microscope

G - Observer les pistes au microscope

H - Peser les échantillons y compris le temoin

I - Placer les échantillons sur la machine d'essai à une position repère et mettre en marche

J - Arrêter la machine

K - Nettoyer les échantillons au jet d'air

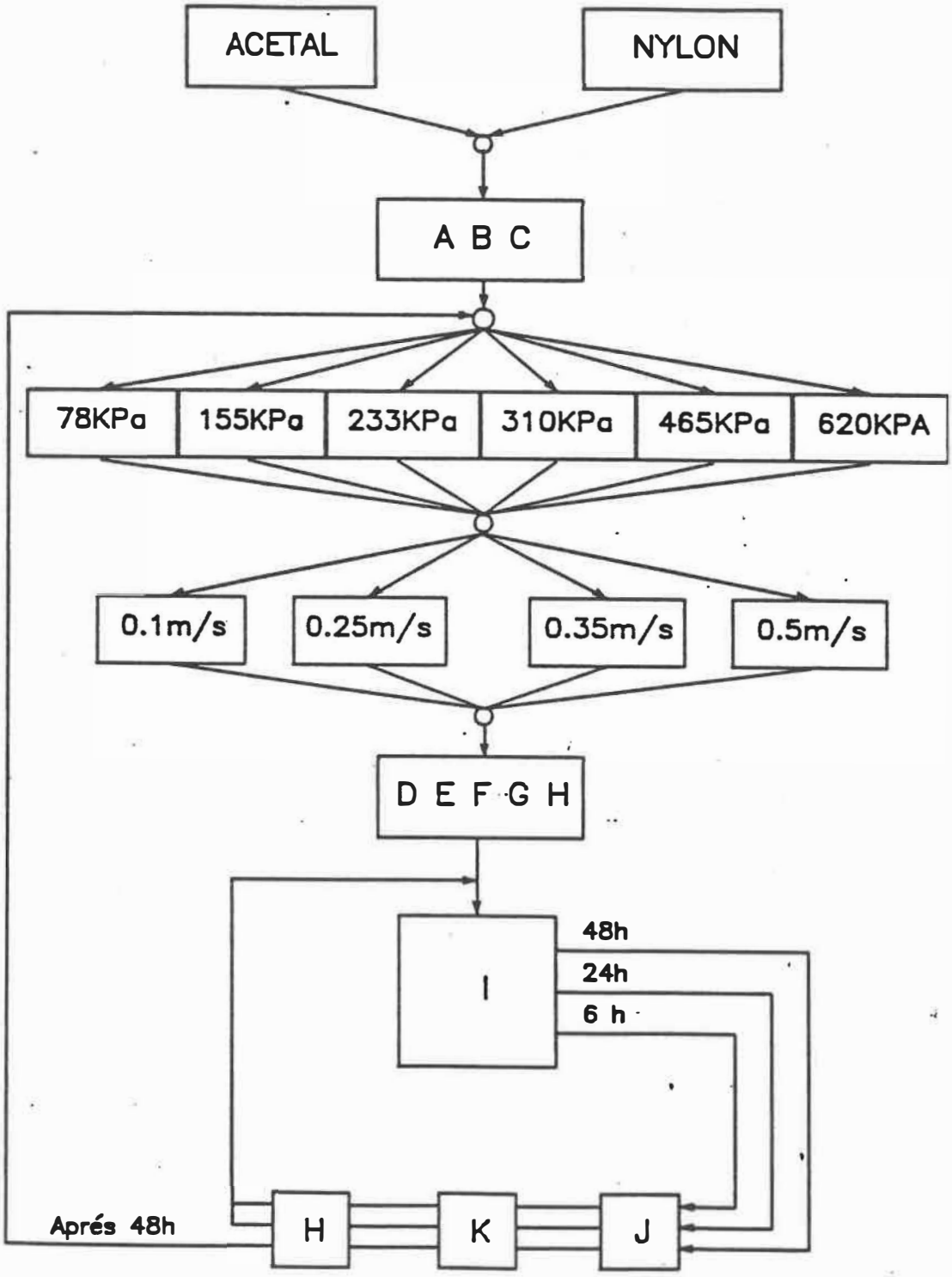


Figure 4.12 - Organigramme de la procédure suivie lors des tests. (Légende à la page 82)

CHAPITRE V

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE

V-1 INTRODUCTION

Les résultats expérimentaux exposés dans ce chapitre ont été obtenus pour les conditions opératoires et à l'aide des montages présentés au chapitre IV. L'expérimentation nous a permis de suivre l'évolution de l'usure du nylon et de l'acétal en fonction de la pression de contact, la vitesse de glissement, la distance glissée et de la rugosité de la surface d'acier. On présentera donc l'influence de chacun de ces paramètres sur l'usure, accompagnée de discussions et de comparaisons avec d'autres travaux de recherches.

L'usure a été présentée sous forme de masse perdue (cumulative) et de facteur d'usure K (aussi appelé taux d'usure) qui a été calculé à l'aide de l'équation 3.26 à savoir;

$$K = \frac{m}{\rho M g d} \qquad (mm^3/N.m) \qquad (5.1)$$

Pour mesurer la densité volumique ρ, 10 tiges de nylon ont été pesées puis plongées dans une éprouvette graduée

remplie d'eau, l'augmentation du volume d'eau nous donnait le volume des 10 tiges, et la densité était alors calculée à l'aide de la relation: $\rho = m/V$

La même chose a été faite pour l'acétal et les résultats obtenus sont présentés au tableau 5.1.

	$\rho_{mesuré}$ (kg/m^3)	$\rho_{manifacture}$ (kg/m^3)
Nylon	1100	1140 - 1150
Acétal	1340	1410 - 1420

Tableau 5.1 - Densités volumiques du nylon et de l'acétal

La différence entre les valeurs mesurées et celles indiquées par le manufacturier qui est d'environ 5% peut être attribuée à plusieurs facteurs comme la méthode et les conditions de mesure (humidité). Les valeurs de densités utilisées dans le calcul du facteur d'usure sont celles obtenues par nos mesures.

Mentionnons enfin que tous les points expérimentaux des figures qui suivent correspondent à la moyenne d'au moins deux mesures expérimentales dans les mêmes conditions. La méthode des moindres carrés a été utilisée pour approximer les courbes par des équations pôlynomiales de

deuxième et de premier ordre.

V-2 RÉSULTATS DE MESURE DE TEMPÉRATURE

La figure 5.1 donne l'évolution de la température moyenne des quatre pistes d'usure (0,1; 0,25; 0,35 et 0,5 m/s) lors du glissement et ce pour une pression de contact de 310 KPa (force normale de 9,81 N). Cette figure est directement obtenue à l'aide des tables tracantes connectées à la machine TABER modifiée (figure 4.2) et montre que la température moyenne de surface après 4 heures de glissement est d'environ 35°C. La température ambiante initiale était de 19°C, ce qui correspond à une augmentation totale de température de 16°C qui se compose en une augmentation de 9°C due à l'ambiance et au réchauffement des moteurs mesurée à l'aide du disque fictif tel que discuté à la section VI-3-3, et en une augmentation de 7°C directement reliée à la génération de chaleur causée par le frottement de l'échantillon en plastique sur la surface métallique.

La figure 5.1 montre qu'il y a augmentation de la température de surface des pistes d'usure pendant les quatre premières heures de fonctionnement après quoi, ces températures se stabilisent et le taux d'usure devient assez constant marquant ainsi la fin de la période de

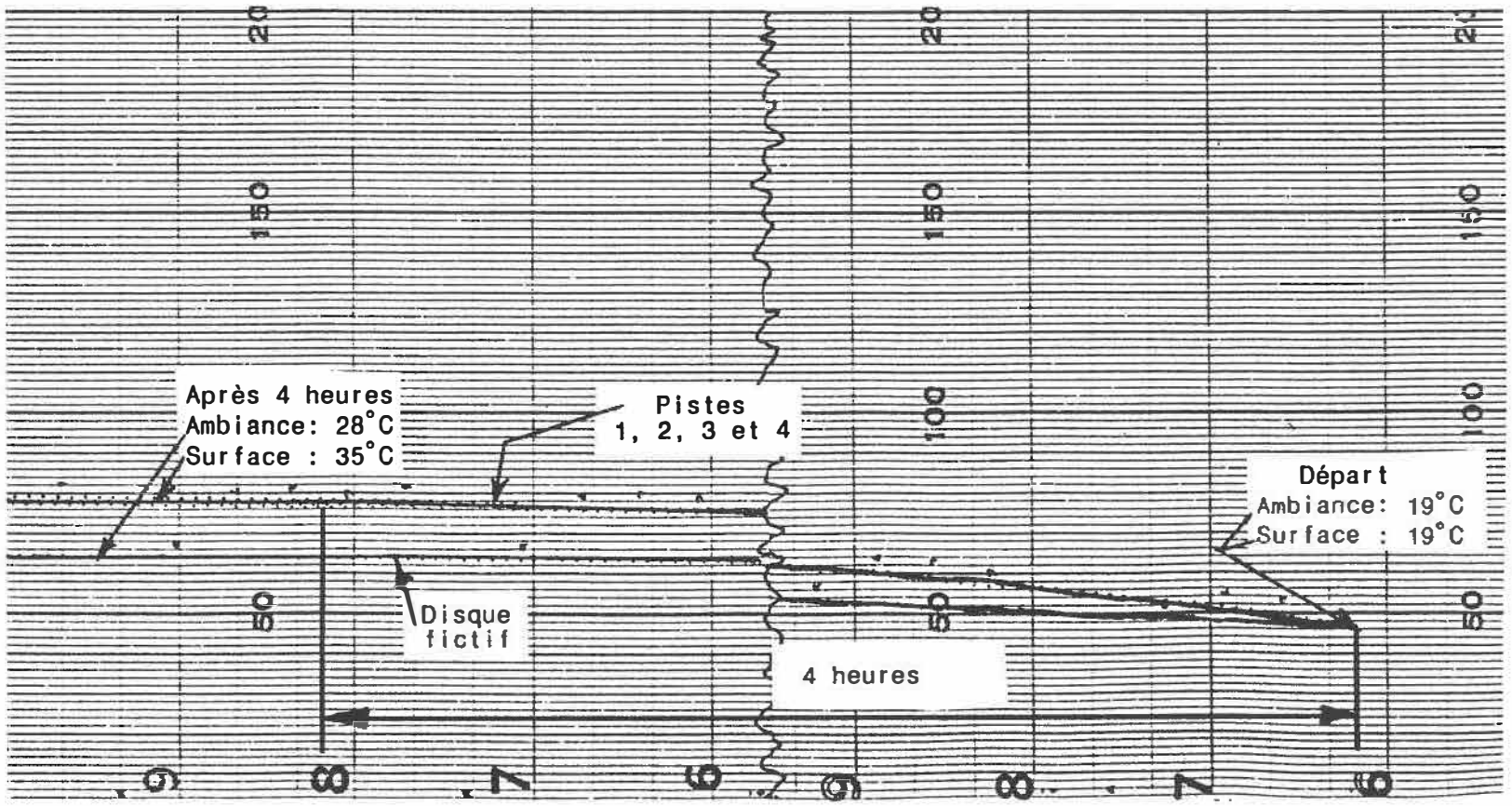


Figure 5.1 - Evolution de la température de surface lors du glissement du nylon (310 KPa, Acier: 0,12 μm R_a)

rodage. On considèrera donc que le régime permanent en usure s'établit en moyenne après 4 heures de glissement sur une surface fraîche (propre) et ce, pour les plastiques et les conditions de fonctionnement étudiés. Comme la première mesure d'usure a été effectuées après 6 heures de glissement, nous admetterons que tous nos résultats sont pour un régime permanent en usure.

Comme nous l'avons déjà vu, le contact entre deux surfaces glissant l'une sur l'autre se fait à travers une aire (A_r) généralement très petite. L'énergie générée durant le glissement est dissipée sous forme de chaleur à travers ces petites régions de contact. Vue la faible condultibilité thermique des plastiques, cette chaleur est comme emprisonnée au niveau du contact, ce qui laisse supposer que la température aux points de contact entre les deux surfaces pourrait être assez élevée. Cette supposition est soutenue par les théories de transfert de chaleur mais ne peut être confirmée par des mesures expérimentales car les techniques actuelles de mesure de telles températures ne donnent qu'une température moyenne générée près du contact (il est impossible de s'approcher suffisament de l'interface).

Il est donc nécessaire de faire la distinction entre la température moyenne de surface et la température en un point de contact entre les aspérités des deux corps frot-

tants, appelée température "flash". Une méthode analytique de calcul de ces températures a été proposée par Jaeger [57] et consistait en la résolution de l'équation différentielle de la conduction dans les solides à l'aide des fonctions modifiées de Bessel de second espèce. Cette analyse a par la suite été simplifiée par Lancaster [58] et appliquée à une paire de frottement plastique/métal. Les expressions de Lancaster se lisent comme suit:

- Température moyenne de surface, T_m:

$$T_m = T_{amb} + \frac{\mu F v}{4,24 \ell (k_1 + k_2)} \qquad (5.2)$$

où T_{amb} est la température ambiante (°C), μ est le coefficient de frottement dynamique, ℓ est la longueur équivalente à la moitié du coté d'une surface de frottement de forme carrée ($2\ell \simeq \sqrt{A_a}$) et k_1 et k_2 les conductibilités thermiques des deux matériaux en contact (J/m.s.°C);

- Température "Flash", T^*:

Pour les faibles vitesses (notre cas):

$$T^* = 10^{-2} \mu H^{1/2} F^{1/2} v \qquad (5.3)$$

Pour les hautes vitesses:

$$T^* = 5.7\ 10^{-5}\ \mu\ H^{3/4}\ F^{1/4}\ v^{1/2} \qquad (5.4)$$

On notera ici que la température flash est celle des points de contact entre les aspérités et que ces points forment en fait, la surface réelle de contact. C'est pour cette raison que la force F de l'équation (5.2) a été remplacée, comme le stipule la théorie de l'adhésion, par le produit $H.A_r$, d'ou la présence du terme dureté H dans les équations (5.3) et (5.4). Dans le cas particulier d'un contact plastique/acier, la conductibilité thermique du polymère (0,1 à 0,4 J/ms°C) est très faible comparée à celle de l'acier (40 à 60 J/ms°C) et a donc été négligée. Les valeurs typiques des propriètés thermiques des aciers k_1=46 J/ms°C, ρ_1=7,8.10^3 kg/m^3 et c_1=460 J/kg°C ont aussi été utilisées.

- Température totale à l'interface, T_t :

$$T_t = T_m + T^* \qquad (5.5)$$

Le tableau 5.2 donne ces différentes températures calculées à l'aide de certaines valeurs de μ et H retrouvées dans la littérature, pour une force normale de 9,81 N et une vitesse maximale de 0,5 m/s. Nous avons utilisé k_{acier}=46 J/ms°C λ=28,1 10^{-4}m. et T_{amb}=19°+9°=28°C.

		REFERENCES		
		[58]	[59]	[60]
Acier (μm R_a)		0,15	0,75	—
ACETAL	μ	0,24	0,28	0,21
	H (20°C)	283 MPa	200 MPa	200 MPa
	T_m (°C)	30	30,5	30
	T^* (°C)	63	62	46,5
	T_t (°C)	93	92,5	76,5
	H^T (°C)	206 MPa	146 MPa	158 MPa
	T^{*T} (°C)	54	53	41,5
NYLON	μ	0,35	0,35	0,26
	H (20°C)	155 MPa	130 MPa	130 MPa
	T_m (°C)	31	31	30
	T^* (°C)	68	62,5	46,5
	T_t (°C)	99	93,5	76,5
	H^T (°C)	110 MPa	95 MPa	103 MPa
	T^{*T} (°C)	57,5	53,5	41

Tableau 5.2- Valeurs calculées des températures de surface. (F = 9,81 N; v = 0,5 m/s)

Notons que pour être plus rigoureux dans les calculs, il aurait fallu tenir compte de la variation de la dureté en fonction de la température. Des travaux de Lancaster [58] ont montré que la dureté de la plupart des polymères diminuait exponentiellement avec la température et pouvait être approximée à l'aide de la relation:

$$H^T = H_0 \exp(-aT^*) \qquad (5.6)$$

ou H_0 est la dureté à la température ambiante ($\approx$ 20°C), a est une constante du matériau (souvent $a \approx 0{,}005$) et T^*, la température "flash" aux points de contact des aspérités.

Les valeurs de H^T ainsi que les températures flash corrigées (T^{*T}) sont indiquées au tableau 5.2. La différence en terme de température totale à l'interface est d'environ 10 %.

En comparant les températures moyennes de surface calculées (T_m) et celles mesurées de la figure 5.1, on se rend compte qu'elles sont du même ordre de grandeur. Pour des vitesses et des pressions de contact plus faibles (0,1 m/s et 155 KPa), les équations de Lancaster prédisent une augmentation de température moyenne négligeable; ceci concorde

avec le fait qu'on n'a pas pu la détecter à l'aide de notre dispositif à RTD.

Dans les conditions de nos essais, l'élévation de la température de surface était assez modeste et que la température totale à l'interface, telle qu'exprimée par la théorie de transfert de chaleur (pour la vitesse maximale de 0,5 m/s), est assez élevée pour causer un ramollissement du polymère mais reste relativement faible comparée à sa température de fusion ($T_{f.Acétal}$=175°C, $T_{f.Nylon}$=260°C).

Des mesures et des calculs de températures on peut conclure, qu'en principe, on ne devrait pas observer d'augmentation brusque du taux d'usure, comme le rapportent certaines études [58,61], due à une élévation de la température de surface à une valeur voisine de la température de fusion du polymère.

V-3 INFLUENCE DE LA CHARGE

Les figures 5.2 à 5.7 montrent la masse perdue par usure (mg) ainsi que le facteur d'usure calculé (mm^3/N.m) pour les échantillons de nylon et d'acétal en fonction de la pression apparente de contact, à différentes vitesses et après 6, 24 et 48 heures de glissement. Dans tous ces cas, la rugosité de la surface métallique est de 0,12 μm R_a.

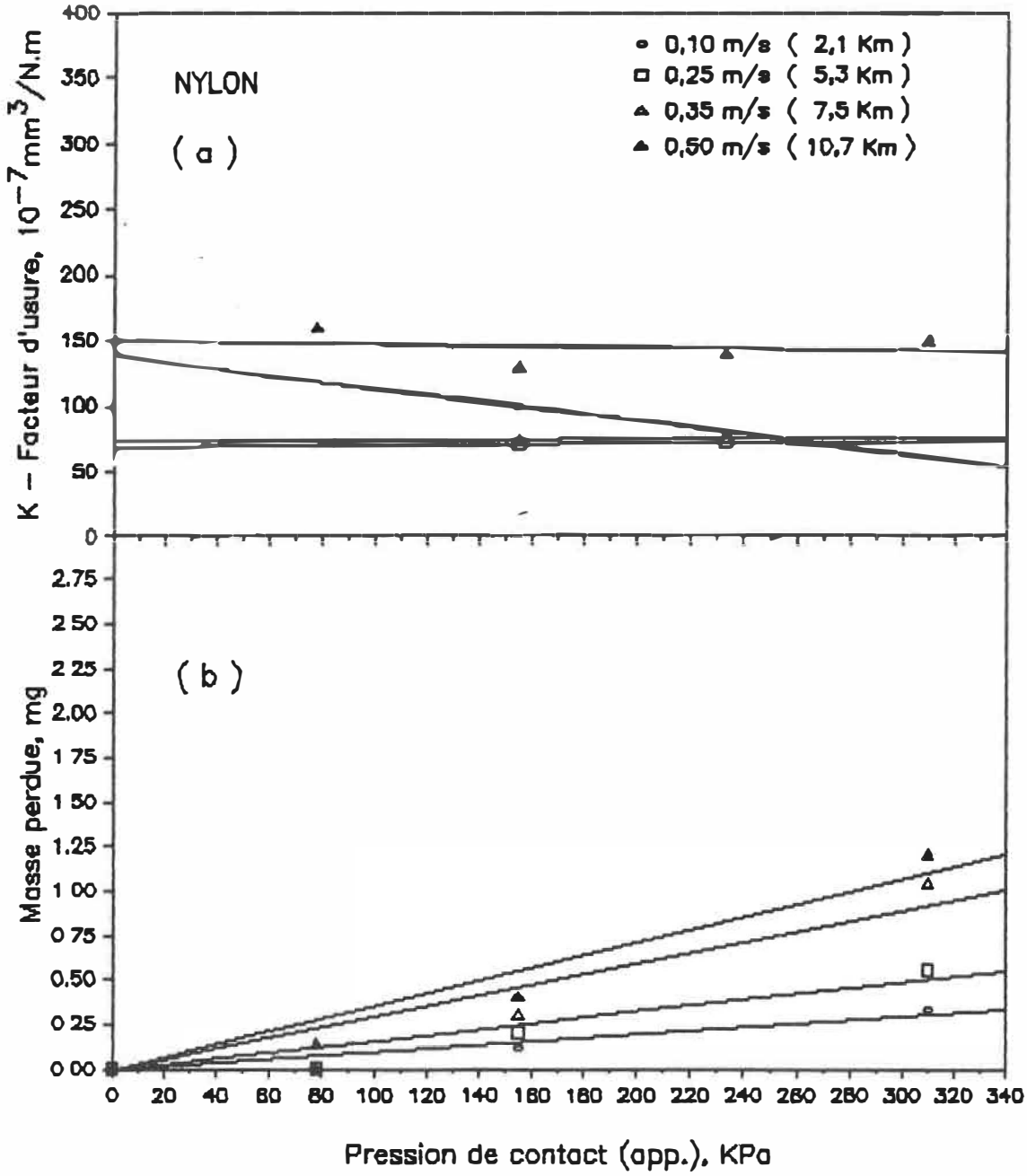


Figure 5.2 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la pression de contact, après 6 h de glissement
(Acier: 0,12 μm R_a)

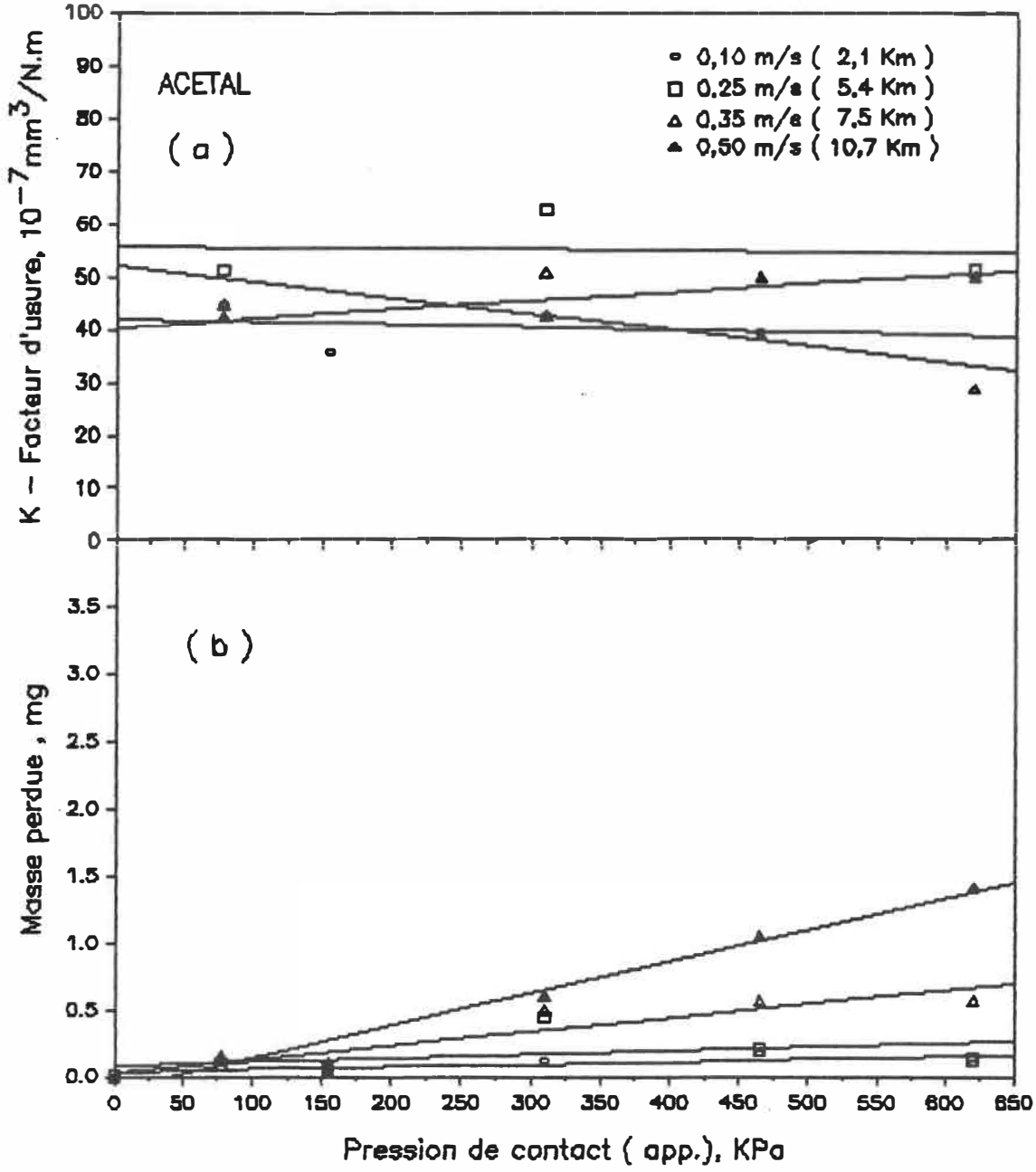


Figure 5.3 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la pression de contact, après 6 h de glissement (Acier: 0,12 μm R_a)

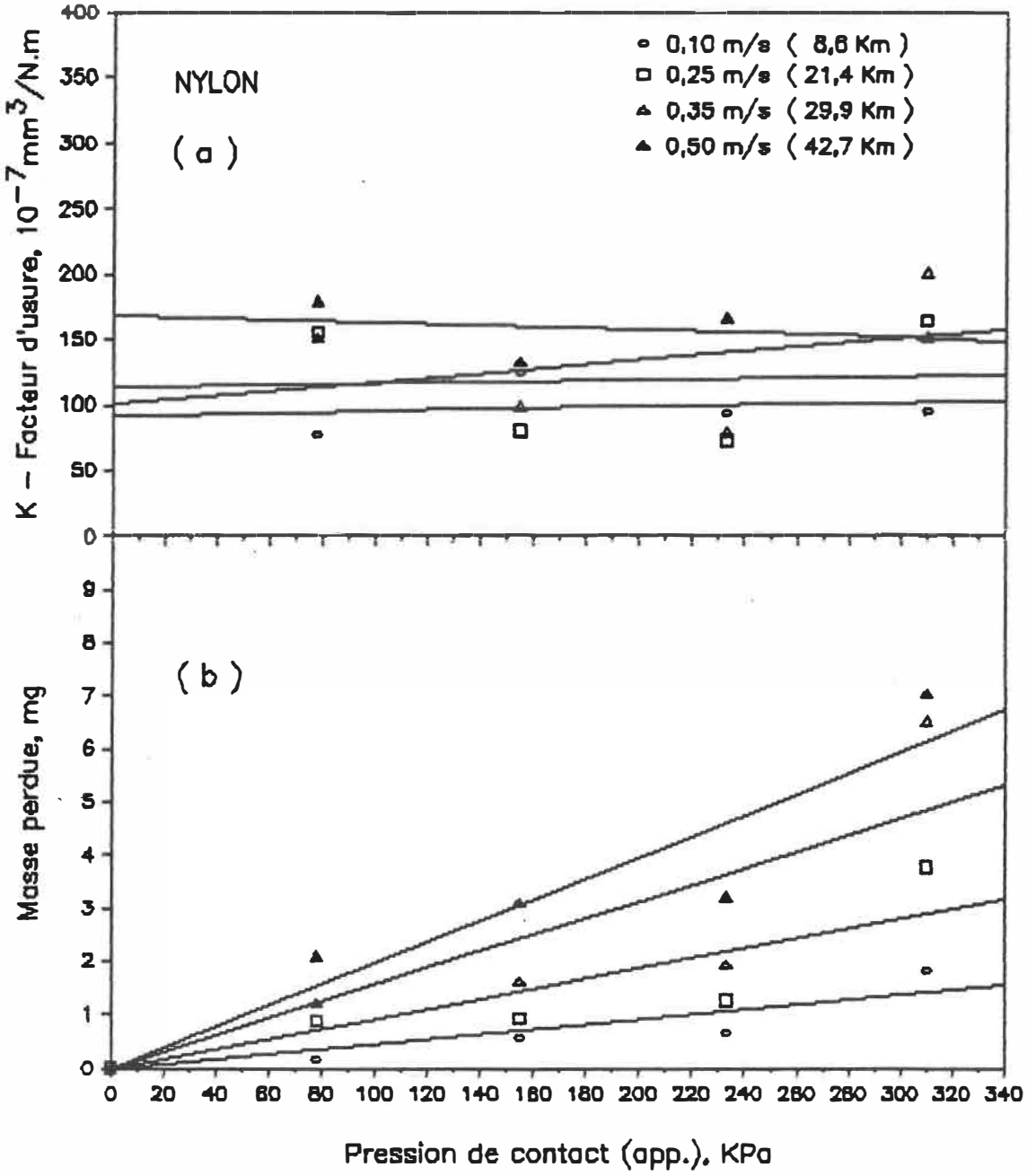


Figure 5.4 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la pression de contact, après 24 h de glissement (Acier: 0,12 μm R_a)

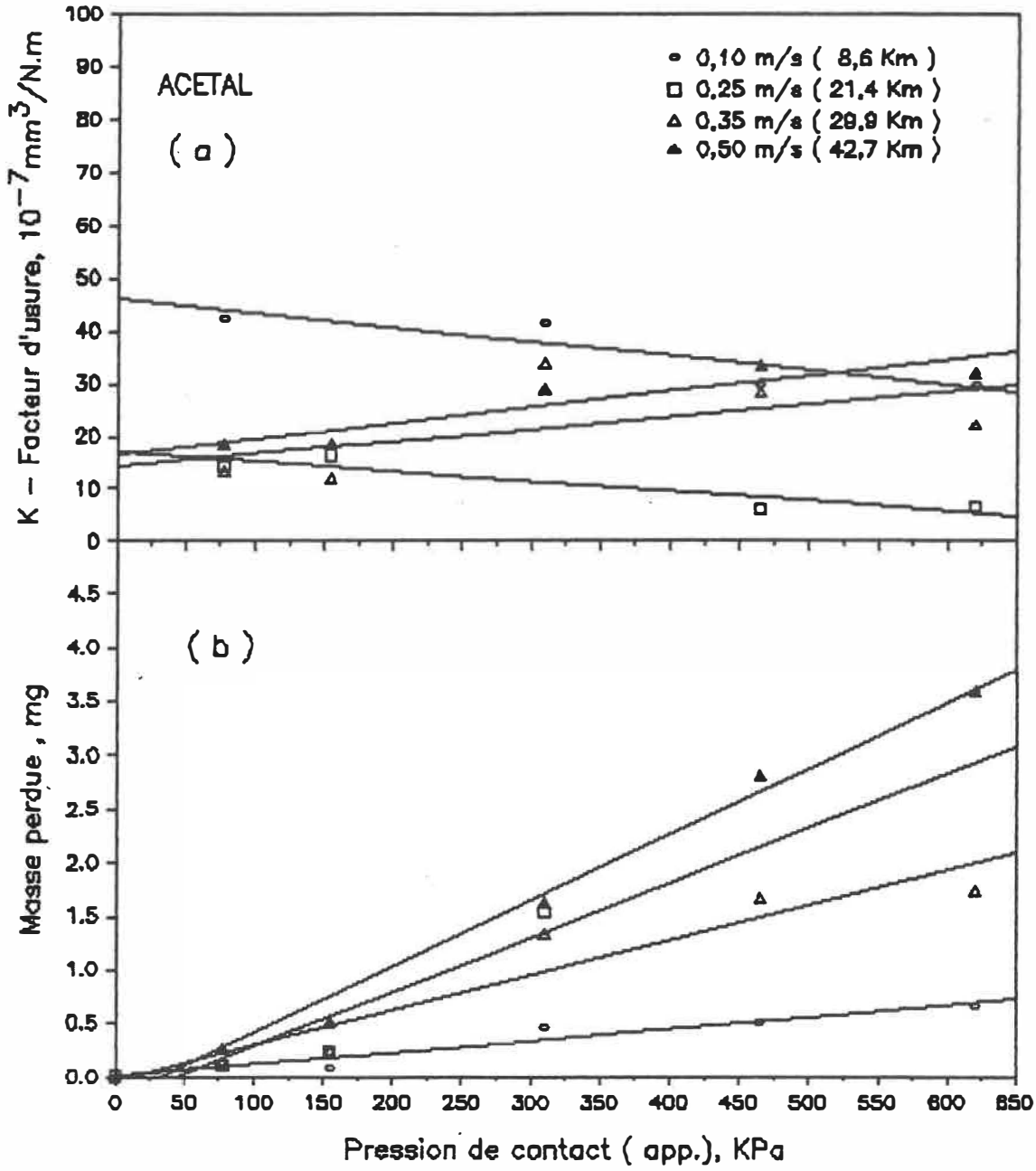


Figure 5.5 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la pression de contact, après 24 h de glissement (Acier: 0,12 μm R_a)

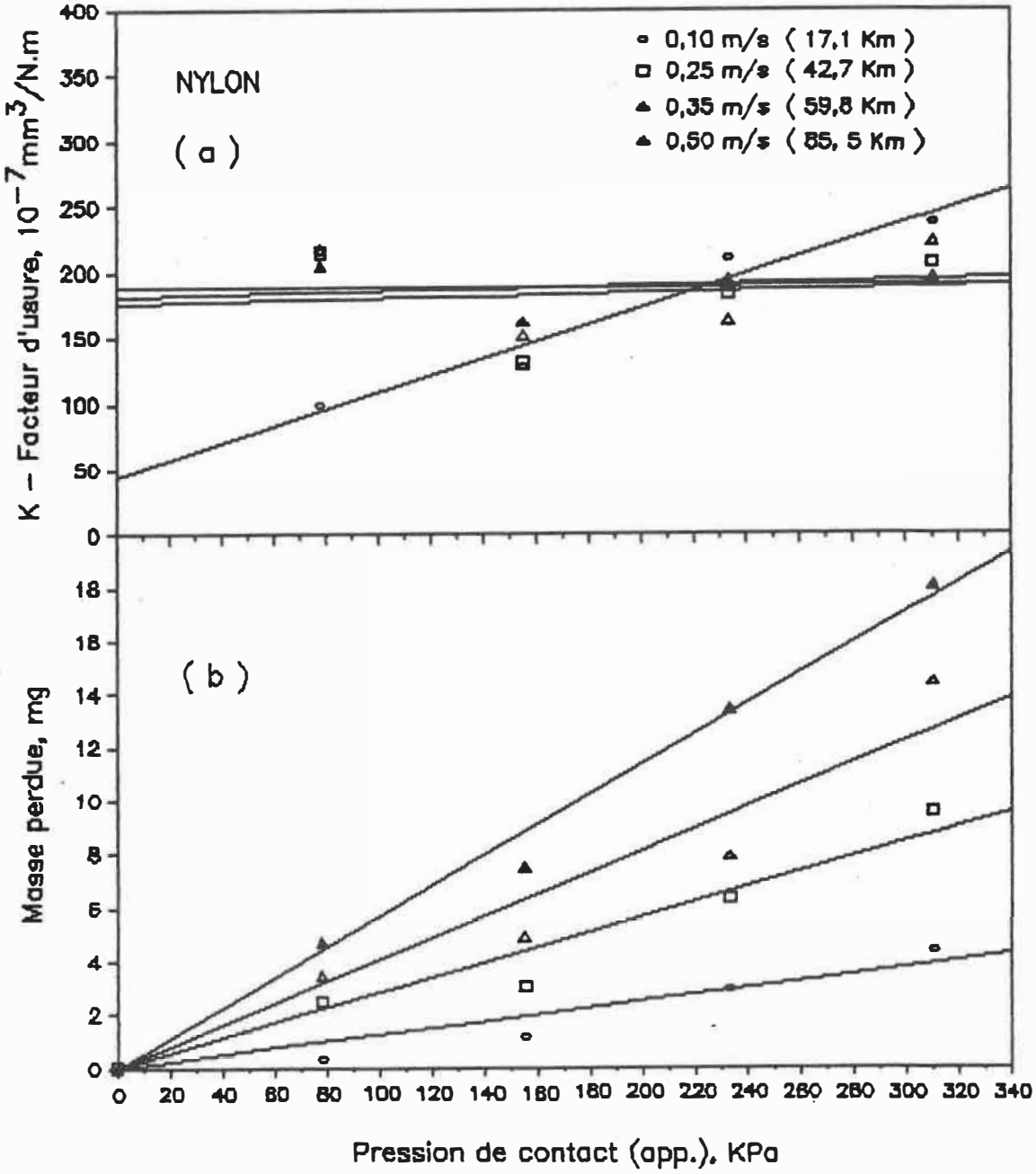


Figure 5.6 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la pression de contact, après 48 h de glissement (Acier: 0,12 μm R_a)

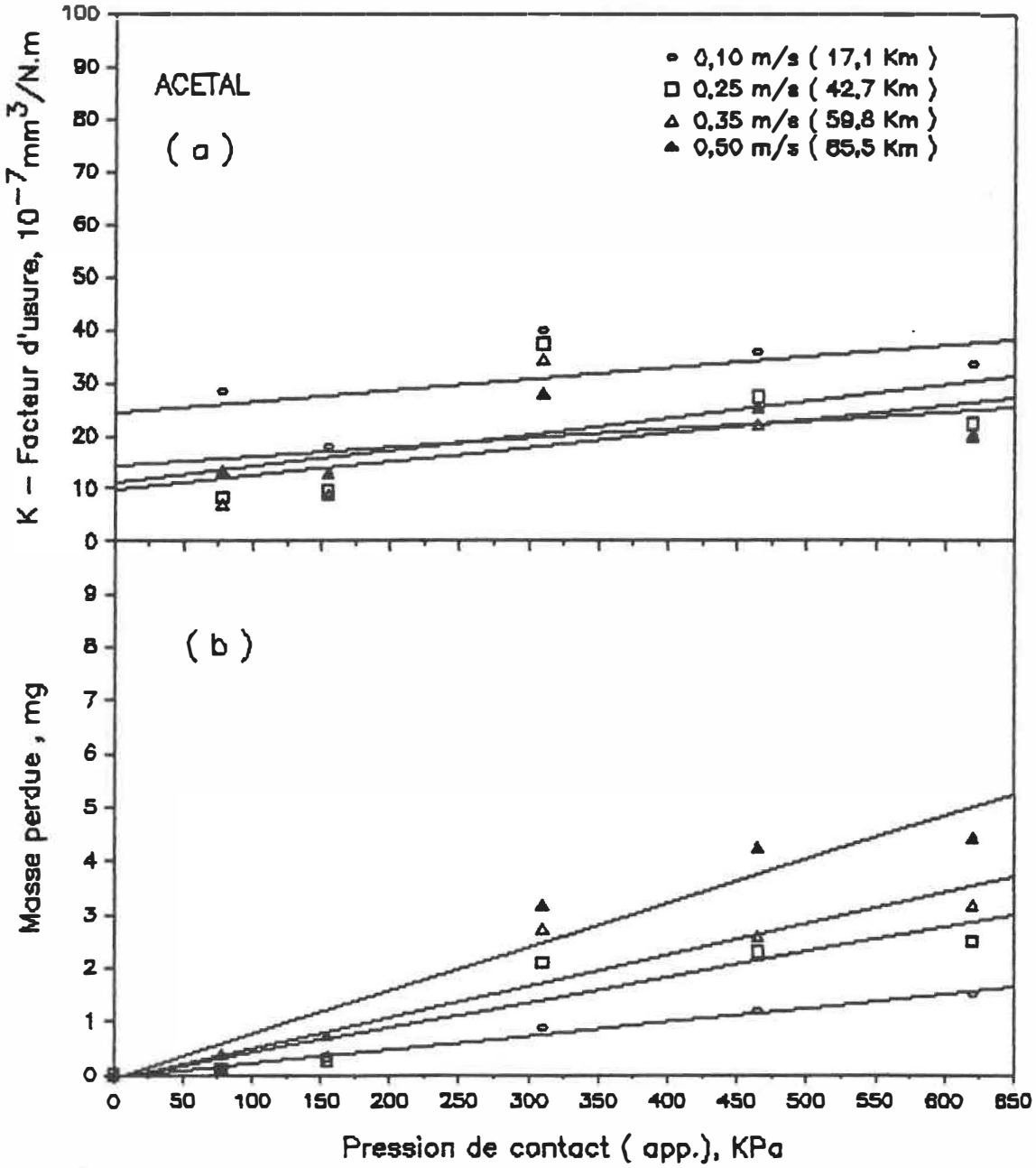


Figure 5.7 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la pression de contact, après 48 h de glissement (Acier: 0,12 μm R_a)

Une première observation qu'on peut faire est que pour les mêmes conditions opératoires et après le même temps de glissement, le nylon 6/6 s'use plus que l'acétal et ceci est valable pour toutes les pressions de contact, les quatre vitesses étudiées et quelque soit la distance glissée.

Deuxièmement, on constate qu'en général, le facteur d'usure est relativement constant en fonction de la pression de contact. Ceci a aussi été observé par Anderson [61] et confirme d'ailleurs ce qui a été avancé auparavant quant à l'absence d'une brusque augmentation du taux d'usure, qui serait due à une température à la surface près du point de fusion du polymère. Pour la vitesse de 0,1 m/s cependant, le facteur K montre des fluctuations dont les causes sont difficiles à cerner.

Finalement, comme le prédisent les simples théories de l'usure qu'on a vues, on constate une bonne proportionnalité entre la masse perdue par usure et la charge appliquée. Pour une distance glissée à une vitesse donnée, plus la charge augmente, plus l'usure est considérable (aussi visible sur les figures 5.8 à 5.15). Suite à ceci, on peut écrire:

$$m = k_p \; P \qquad (5.7)$$

ou k_p est une constante de proportionnalité en mg/KPa et est fonction de la vitesse, la durée de glissement, la rugosité de la surface métallique et des matériaux frottants. La constante K_p n'est en fait autre que la pente des droites des courbes (b) des figures 5.2 à 5.7. Les valeurs de K_p sont données au tableau 5.3 pour différentes vitesses de glissement et après 6, 24 et 48 heures de glissement.

Pour tenir compte des paramètres dont dépend K_p, on peut réecrire l'équation 5.7 ainsi:

		VITESSE DE GLISSEMENT			
	Temp.glis	0,1 m/s	0,25 m/s	0,35 m/s	0,5 m/s
NYLON	6 h.	$1\ 10^{-3}$	$1,6\ 10^{-3}$	$2,9\ 10^{-3}$	$3,5\ 10^{-3}$
	24 h.	$4,5\ 10^{-3}$	$9,3\ 10^{-3}$	$1,6\ 10^{-2}$	$2\ 10^{-2}$
	48 h.	$1,3\ 10^{-2}$	$2,8\ 10^{-2}$	$4,1\ 10^{-2}$	$5,7\ 10^{-2}$
ACETAL	6 h.	$1,8\ 10^{-4}$	$2,7\ 10^{-4}$	$1\ 10^{-3}$	$2,4\ 10^{-3}$
	24 h.	$1,1\ 10^{-3}$	$5,1\ 10^{-3}$	$3,3\ 10^{-3}$	$6,1\ 10^{-3}$
	48 h.	$2,5\ 10^{-3}$	$4,6\ 10^{-3}$	$5,6\ 10^{-3}$	$8\ 10^{-3}$

Tableau 5.3 - Valeurs de k_p (mg/KPa) pour différentes vitesses de glissement.
(Acier: 0,12 μm R_a)

$$m = K_1 \; v \; t \; P \qquad (5.8)$$

Si on remplace P par F/A_a et on insère une constante ρ, densité volumique du matériau, on a :

$$m = K_2 \; v \; t \; \frac{F}{A_a} \; \rho \qquad \text{avec } K_2 = K_1/\rho \qquad (5.9)$$

Puisque dans les présents essais A_a est une constante, on peut écrire:

$$m = K_3 \; v \; t \; \rho \; F \qquad \text{ou} \qquad K_3 = K_2 \; / \; A_a$$

On remarque alors que K_3 n'est autre que le facteur d'usure tel que défini par Lewis [27] et donné par l'équation (3.26) (page 60), soit:

$$K_3 = K = \frac{m}{\rho F v t} = \frac{m}{\rho A_a P v t}$$

Pour un produit vt constant on peut aussi écrire:

$$K_3 = K = \frac{m}{K_4 \; P} \qquad \text{ou} \qquad K_4 = \rho \; A_a v \; t$$

D'où $m = K K_4 P$

Avec l'équation (5.7) on a alors:

$$K K_4 = K_p = cste$$

et donc $K = cste$

Ceci signifie que pour un produit vt constant, le facteur d'usure K doit être constant. Ceci est bien confirmé par les figures 5.2 (a) à 5.7 (a) qui montrent un taux d'usure relativement indépendant de la pression appliquée. La même constatation a d'ailleurs été faite par Lancaster [58] et Anderson [61] pour une plus grande variété de polymères et avec des pressions de contact beaucoup plus élevées.

V-4 INFLUENCE DE LA DISTANCE ET DE LA VITESSE DE GLISSEMENT

Les figures 5.8 à 5.15 donnent l'évolution de la masse perdue et du facteur d'usure en fonction de la distance de glissement pour les différentes pressions de contact et à chacune des vitesse de glissement. Là encore, plusieurs remarques peuvent être faites que ce soit pour le nylon ou pour l'acétal.

- La masse perdue par usure est proportionnelle à la distance de glissement et à la pression de contact.

- Le facteur d'usure de l'acétal est assez faible comparé à celui du nylon et ceci est vrai à toute les distances de glissement.

- Pour une vitesse de glissement donnée, le facteur d'usure K augmente d'abords légèrement avec la distance glissée puis se stabilise ensuite dans le cas du nylon, mais c'est le contraire qui se produit pour l'acétal.

Les mêmes observations que celles qu'on vient de citer peuvent être faites concernant les figures "résumé" 5.16 et 5.17 et ou le paramètre vitesse n'a pas été considéré. Ces figures nous donnent aussi, pour des durées de glissement assez longues:

$K_{Nylon} \approx 183,5 \pm 21,5 \quad 10^{-7}\ mm^3/N.m$

et

$K_{Acétal} \approx 19 \pm 6 \quad 10^{-7}\ mm^3/N.m$

La distance de glissement s'averre donc, tout comme la pression de contact, un paramètre important dans la détermination de la grandeur de l'usure.

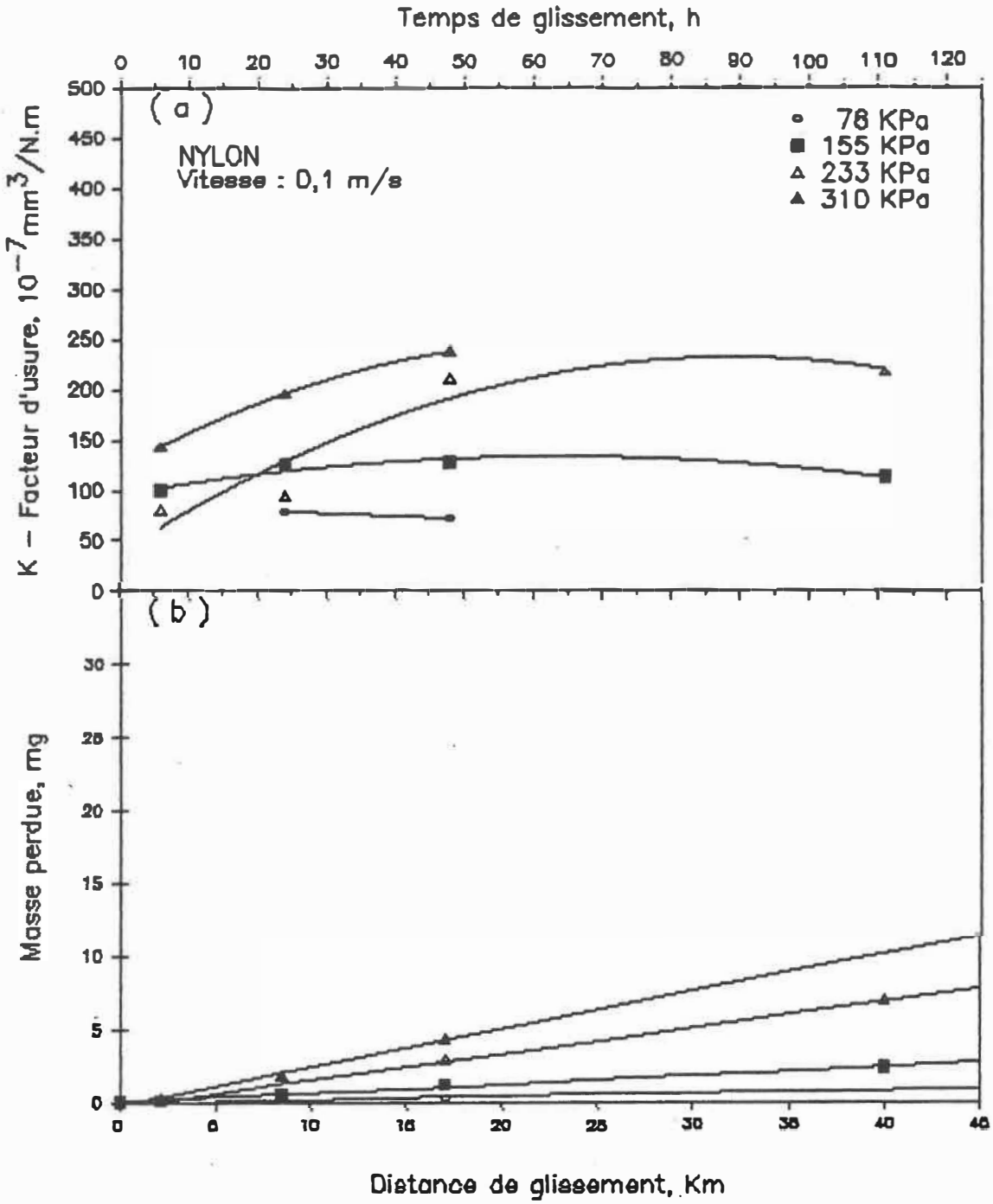


Figure 5.8 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,1 m/s
(Acier: 0,12 μm R_a)

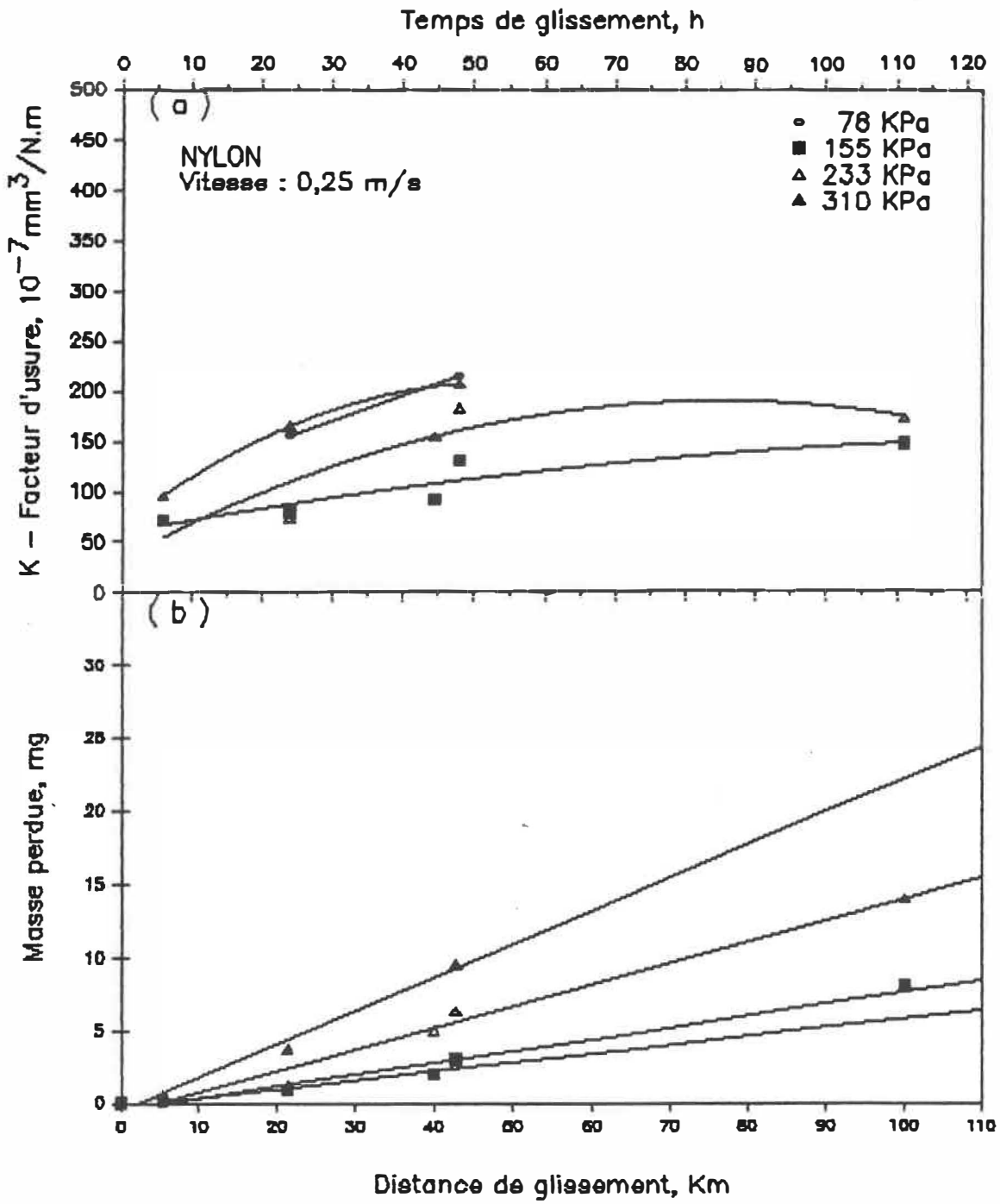


Figure 5.9 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,25 m/s (Acier: 0,12 μm R_a)

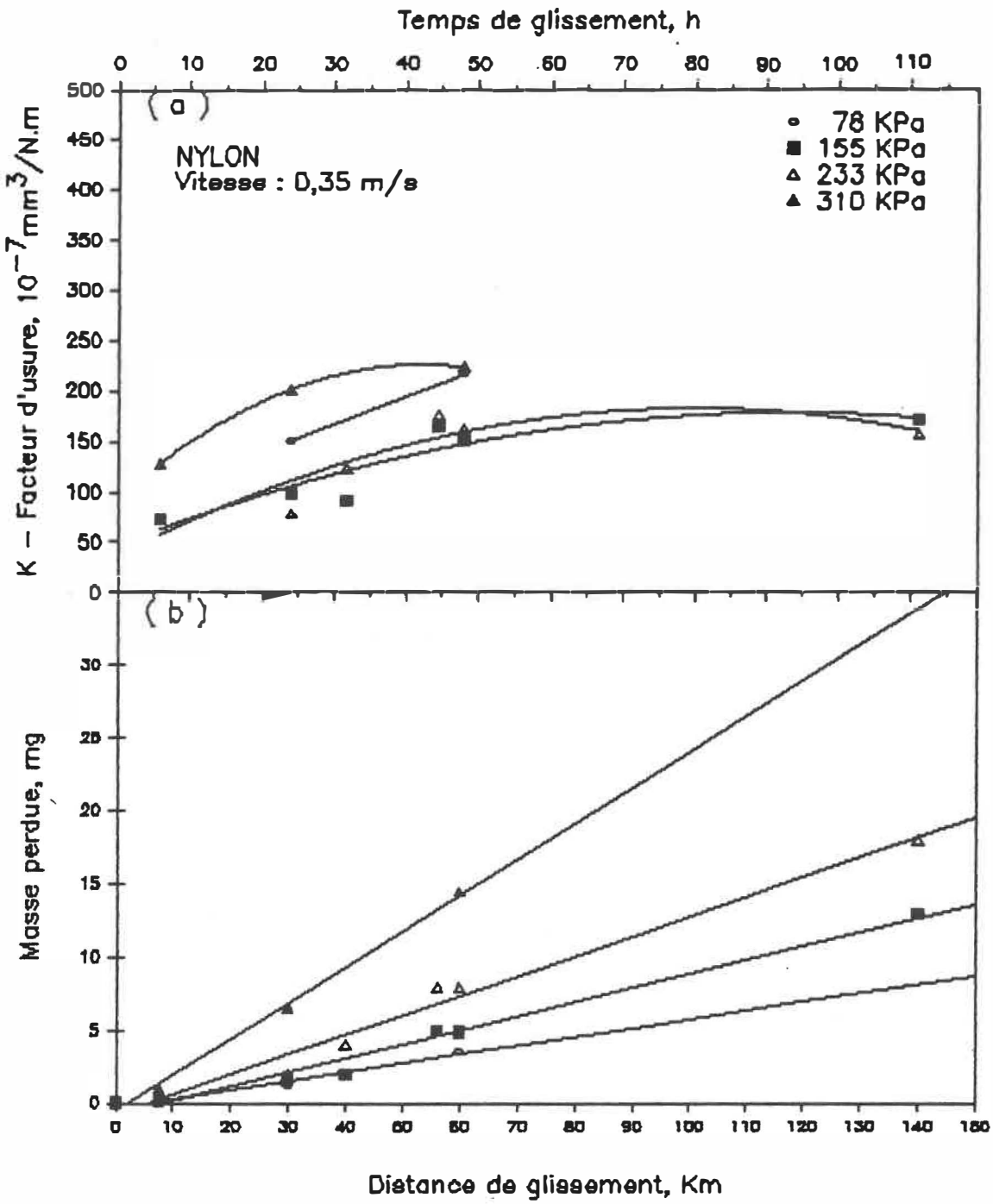


Figure 5.10 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,35 m/s (Acier: 0,12 μm R_a)

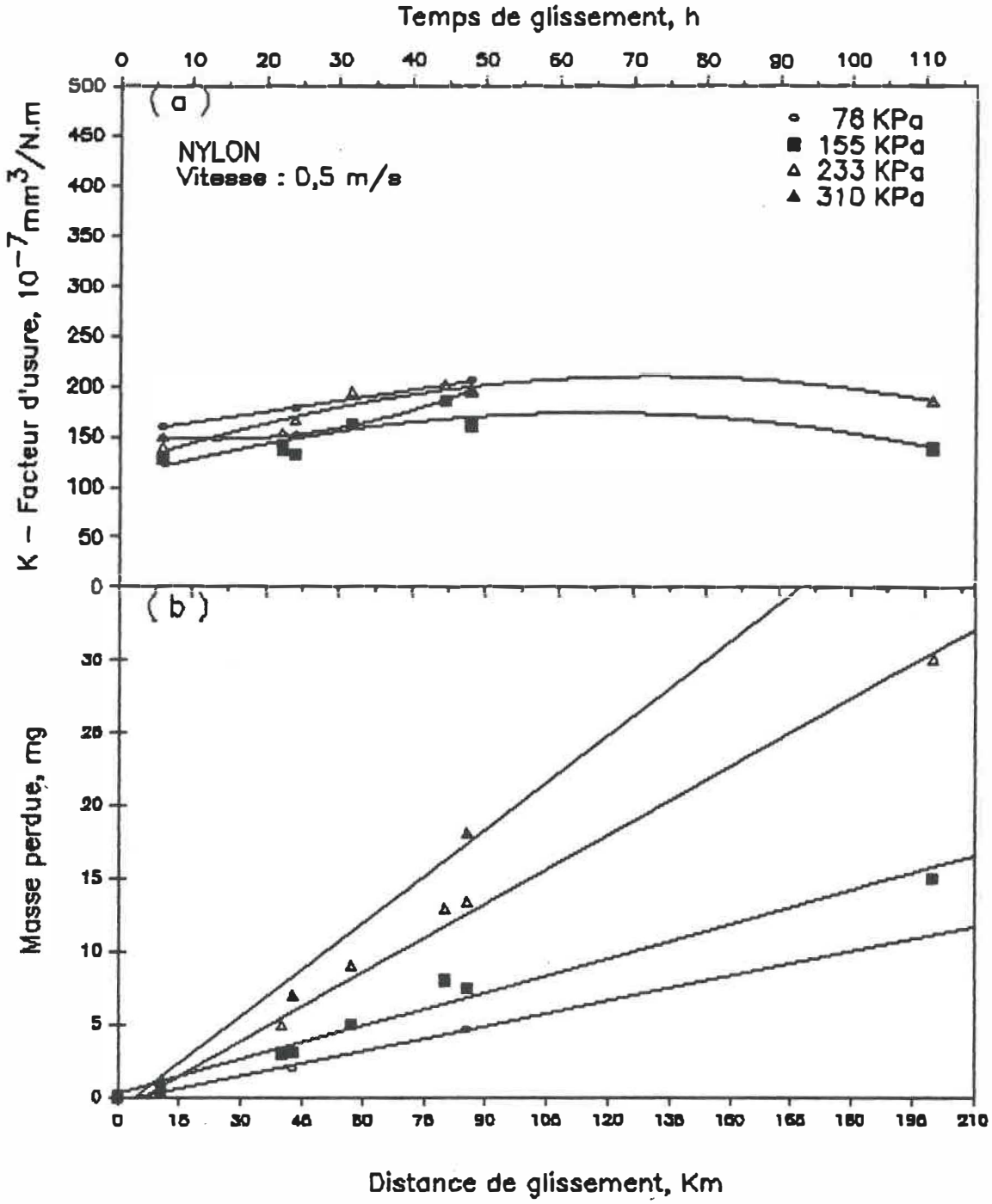


Figure 5.11 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,5 m/s (Acier: 0,12 μm R_a)

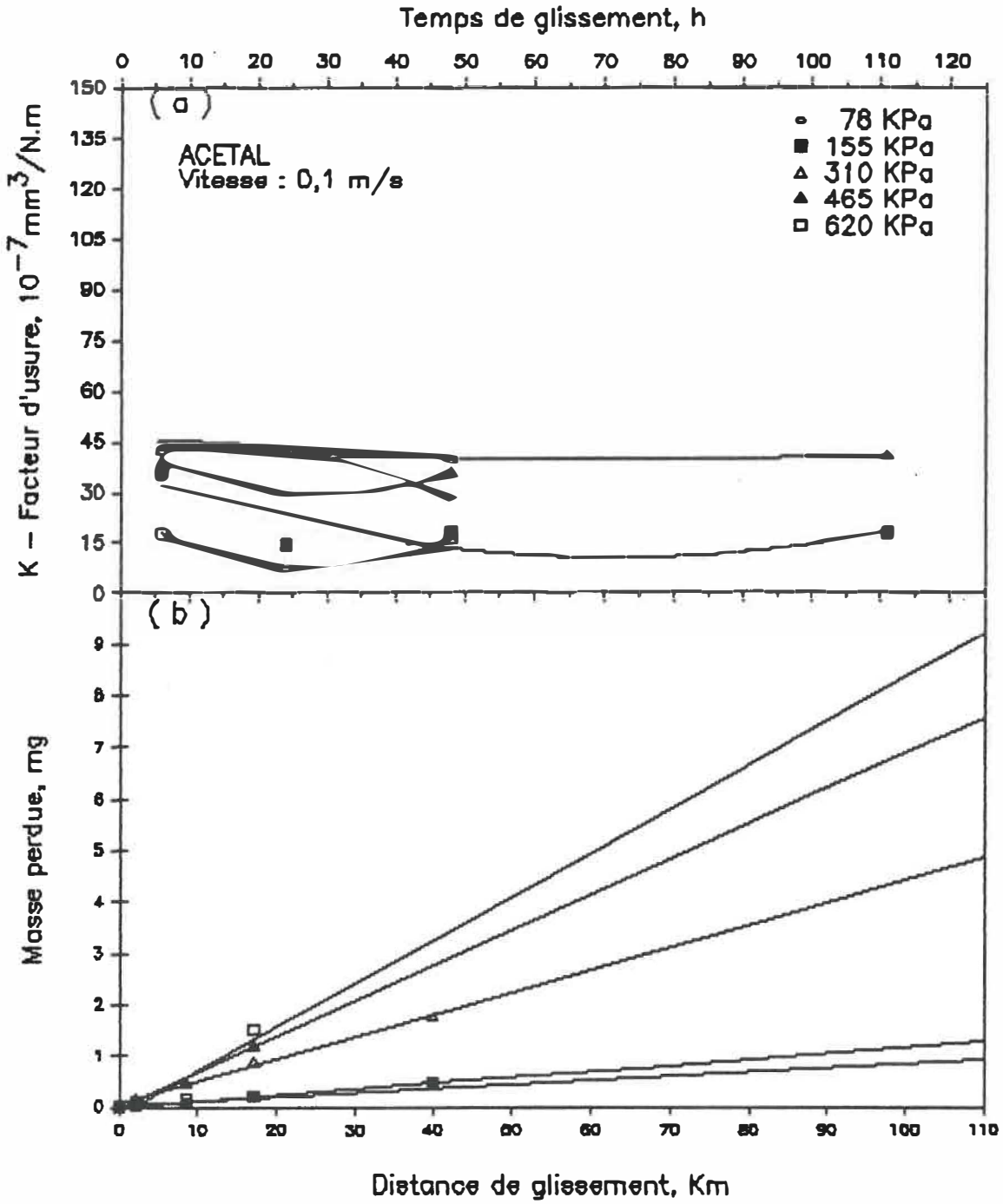


Figure 5.12 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,1 m/s (Acier: 0,12 μm R_a)

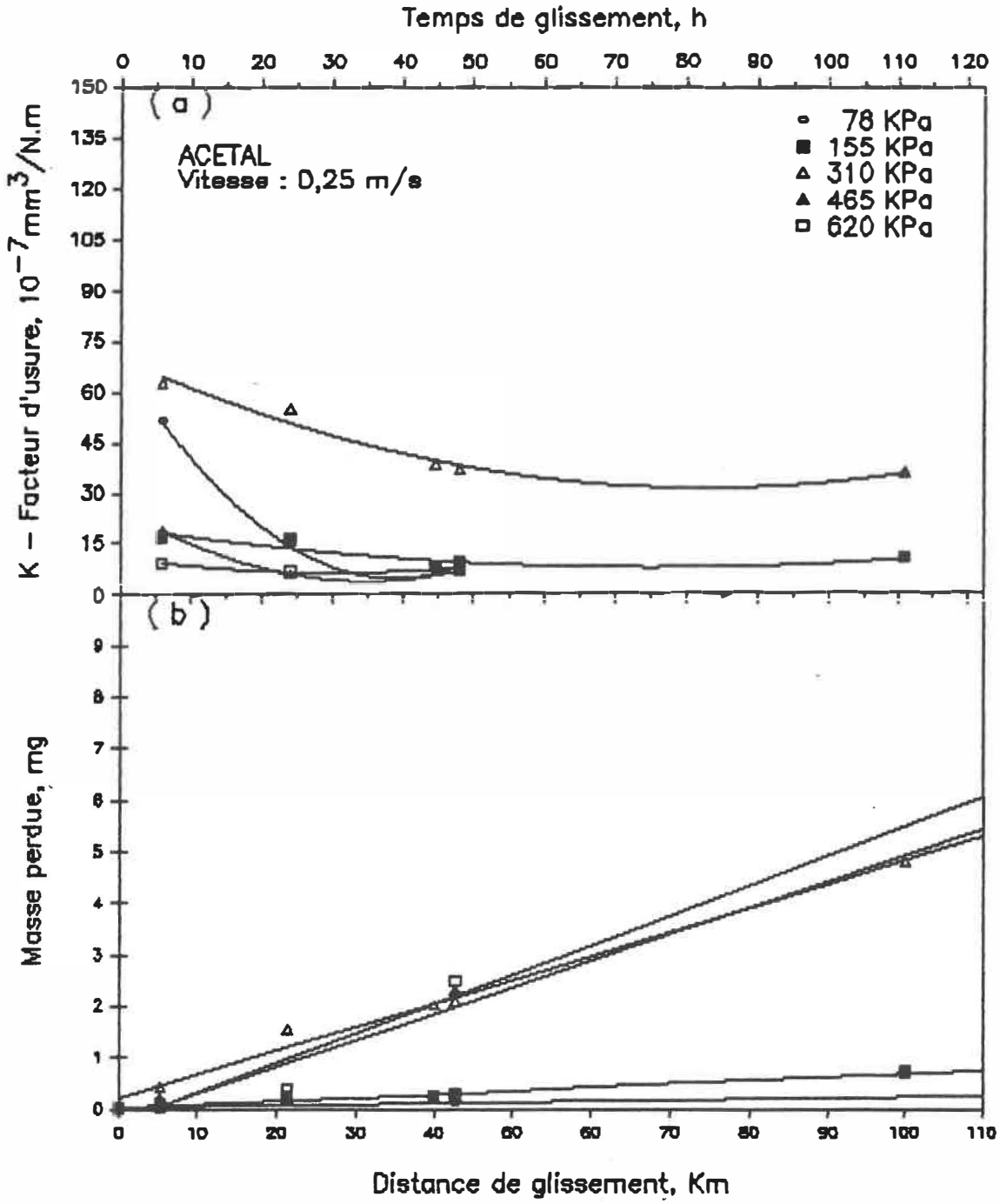


Figure 5.13 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,25 m/s (Acier: 0,12 μm R_a)

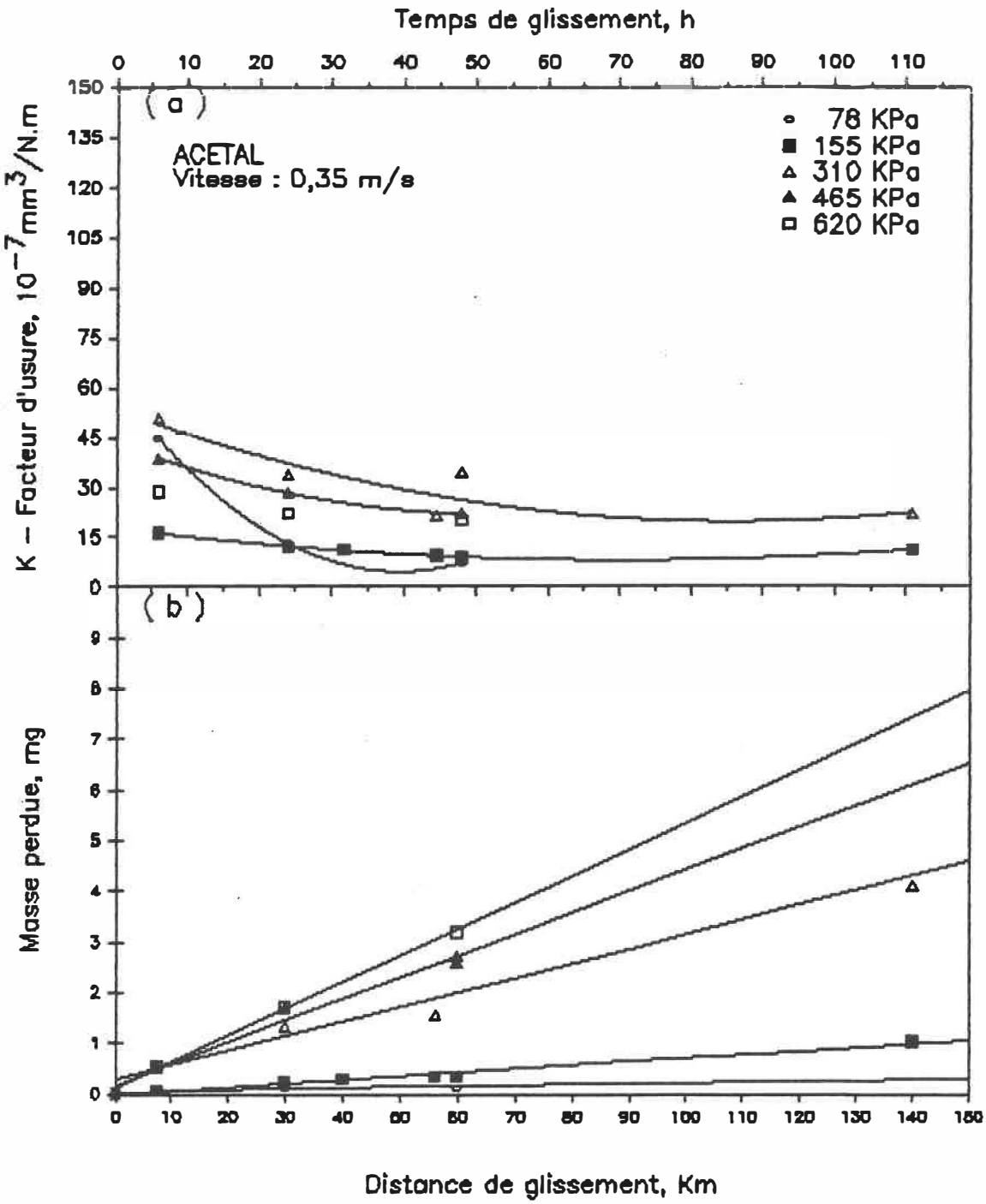


Figure 5.14 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,35 m/s
(Acier: 0,12 μm R_a)

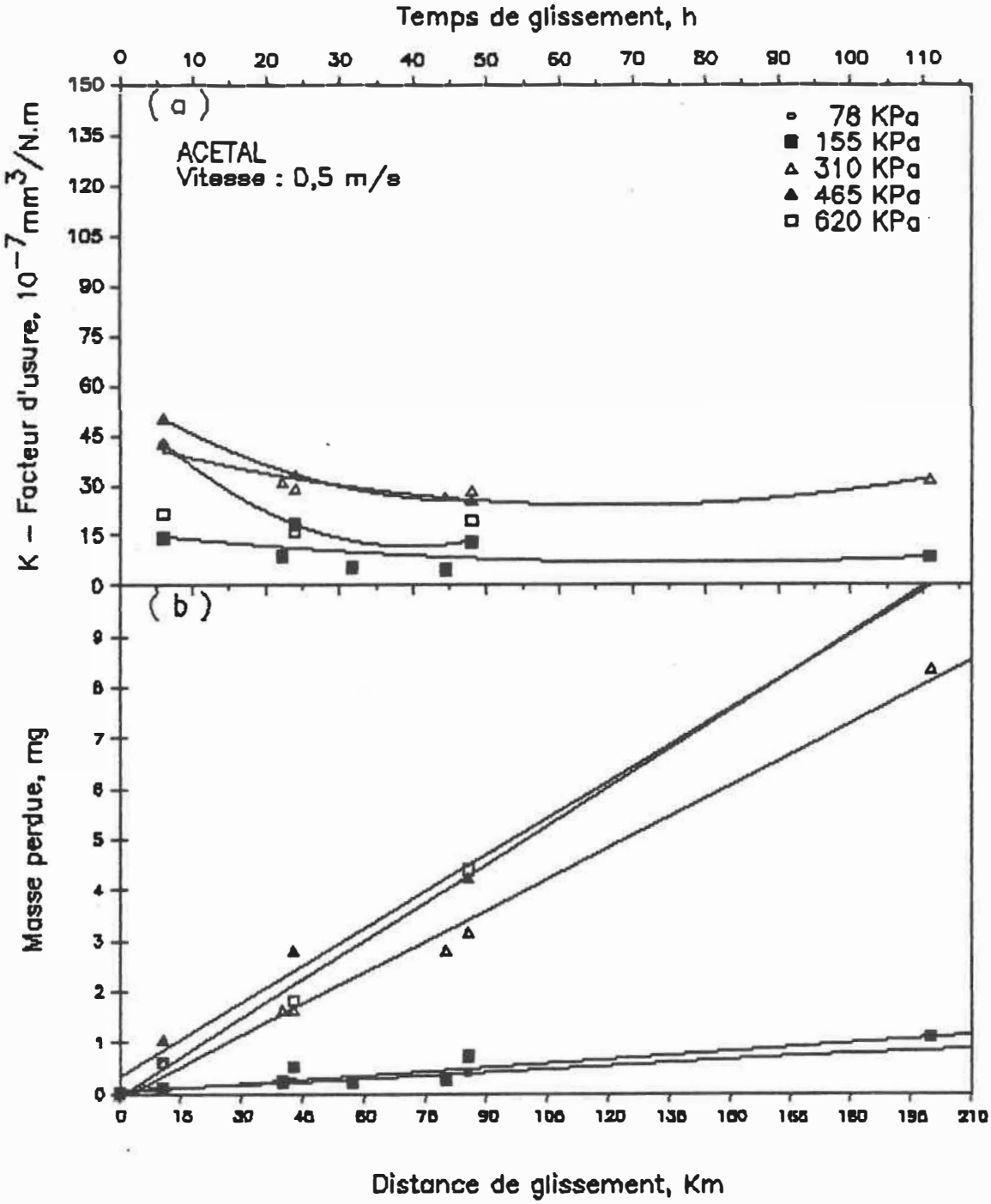


Figure 5.15 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la distance de glissement, pour une vitesse de 0,5 m/s
(Acier: 0,12 μm R_a)

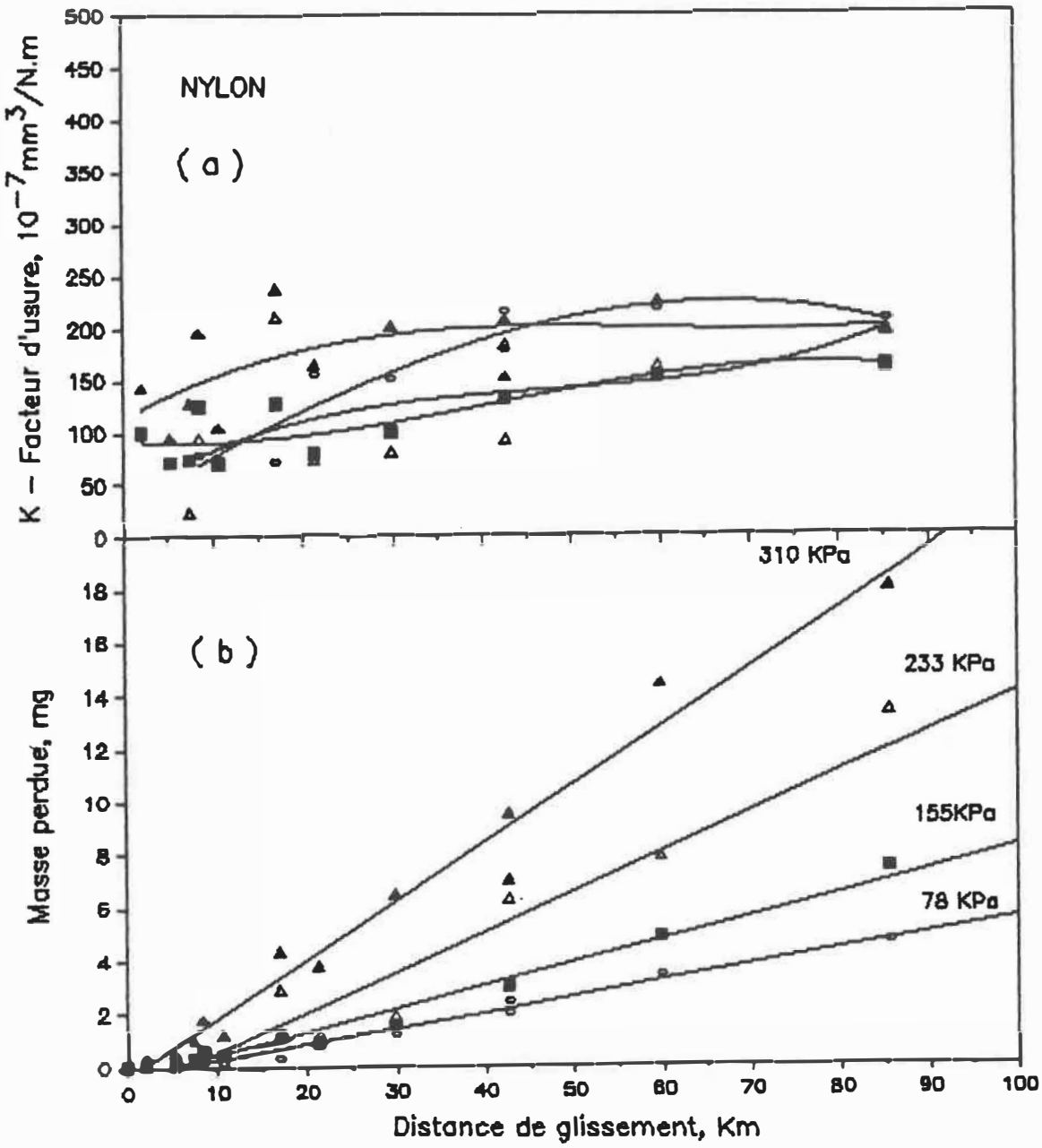


Figure 5.16 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la distance de glissement sans tenir compte de la vitesse (Acier: 0,12 μm R_a)

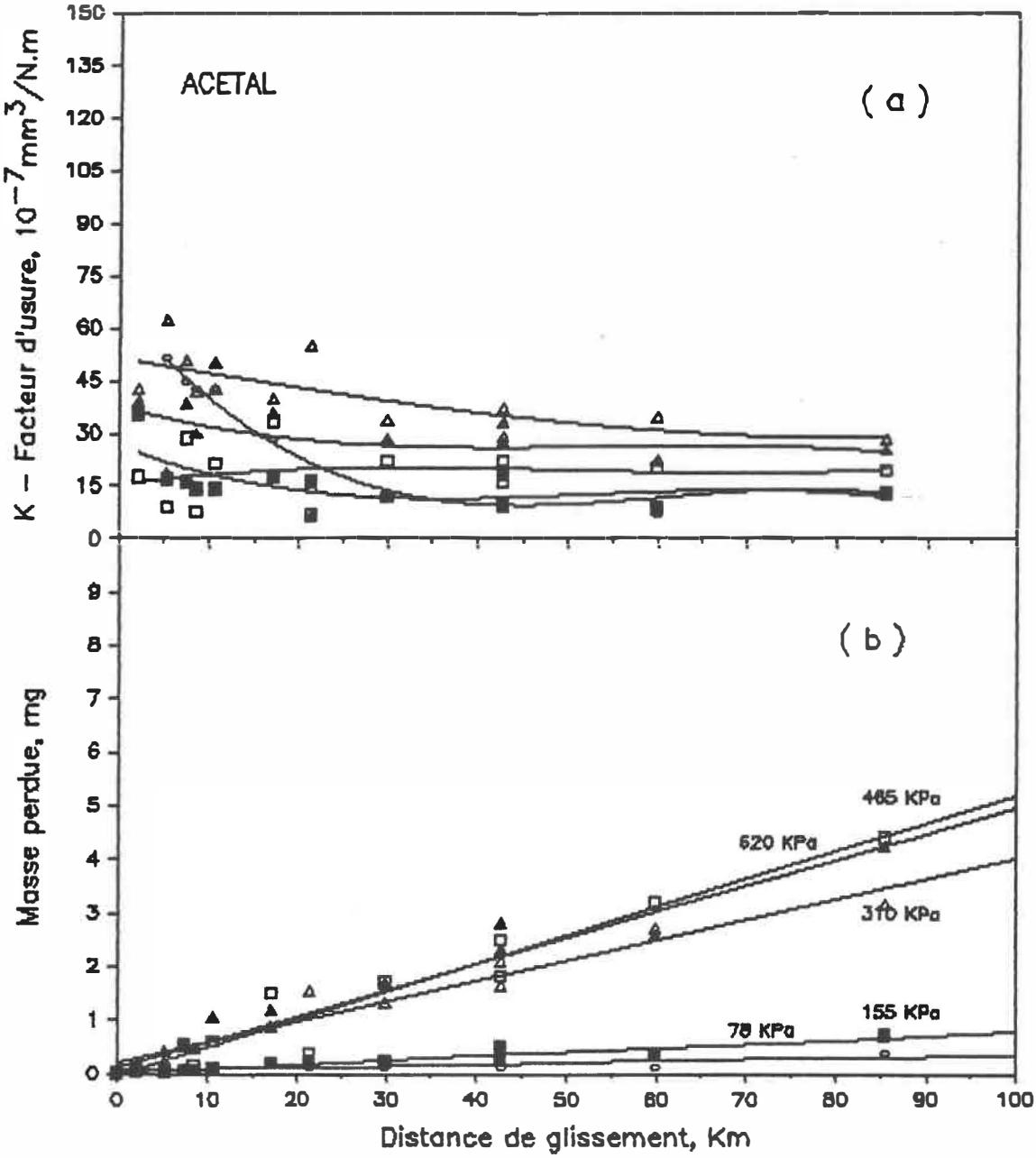


Figure 5.17 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la distance de glissement sans tenir compte de la vitesse (Acier: 0,12 μm R_a)

Le tableau 5.4 nous donne la grille de vitesses et de temps de mesure qui permet d'avoir l'usure d'échantillons ayant tous parcuru 40 km à différentes vitesses. Ceci permet de déterminer l'influence de la vitesse de glissement sur l'usure. Les résultats de ces mesures de la masse perdue par usure sont comparés à des valeurs obtenues par interpolation (ou extrapolation) pour d'autres distances de glissement à la figure 5.18. Cette figure montre bien que les valeurs calculées par interpolation sont représentatives de ce qu'on aurait mesuré expérimentalement, et que leur utilisation est donc possible sans risque élevé d'erreur.

Vitesse de glis.(m/s)	0,1	0,25	0,35	0,5
Duréee de glis.(h)	111,1	44,5	31,75	22,5

Tableau 5.4 - Durées de glissement à différentes vitesses pour glisser 40 km.

Cette technique a été utilisée pour préparer les figures 5.19 à 5.24 qui donnent la variation de la masse perdue par usure ainsi que le facteur d'usure K en fonction de la vitesse de glissement pour différentes pressions de contact après 10, 30 et 50 km. de glissement.

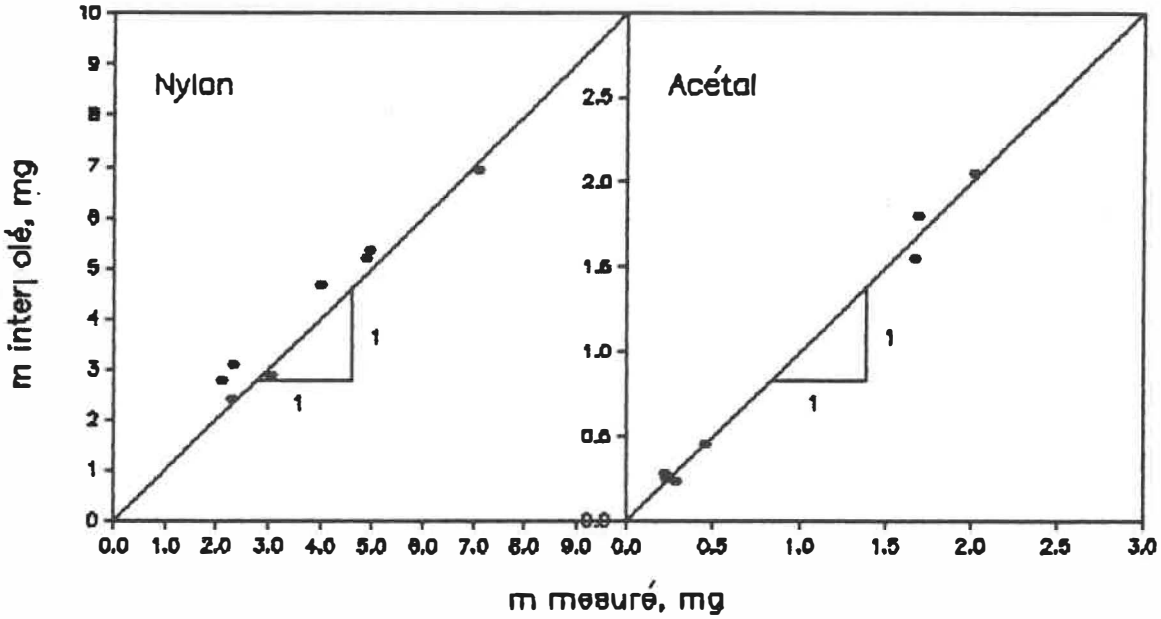


Figure 5.18- Relation entre les valeurs expérimentales et les valeurs obtenues par interpolation.

Les figures 5.19 à 5.24 montrent encore l'effet de la pression sur la perte de masse et on voit, encore une fois, que plus la pression augmente, plus la masse perdue par usure augmente aussi. On ne peut cependant pas discerner de tendance consistante et précise quant à l'influence de la vitesse. En effet, ces figures montrent que pour une pression et une distance de glissement données, la masse perdue est relativement indépendante de la vitesse de glissement. Pour nos conditions d'essais, la vitesse est donc un paramètre qui n'affecte pas l'usure, du moins pas autant que la distance ou la pression de contact. Ces observa-

tions sont d'ailleurs en accord avec une étude de Lancaster [58] sur l'usure des polymères.

Cette faible influence de la vitesse s'explique par le fait que généralement, l'action de la vitesse sur l'usure se fait par l'intermédiaire de l'élévation de température qu'elle occasionne au niveau de la surface [61]. Or dans nos essai, les vitesses de glissement étaient assez faibles et rapprochées les une des autres. La chaleur de frottement générée aux surfaces est donc semblable d'une piste à l'autre et par conséquent, les températures de surface aussi, chose qui a d'ailleurs été confirmée par les mesures expérimentales des températures.

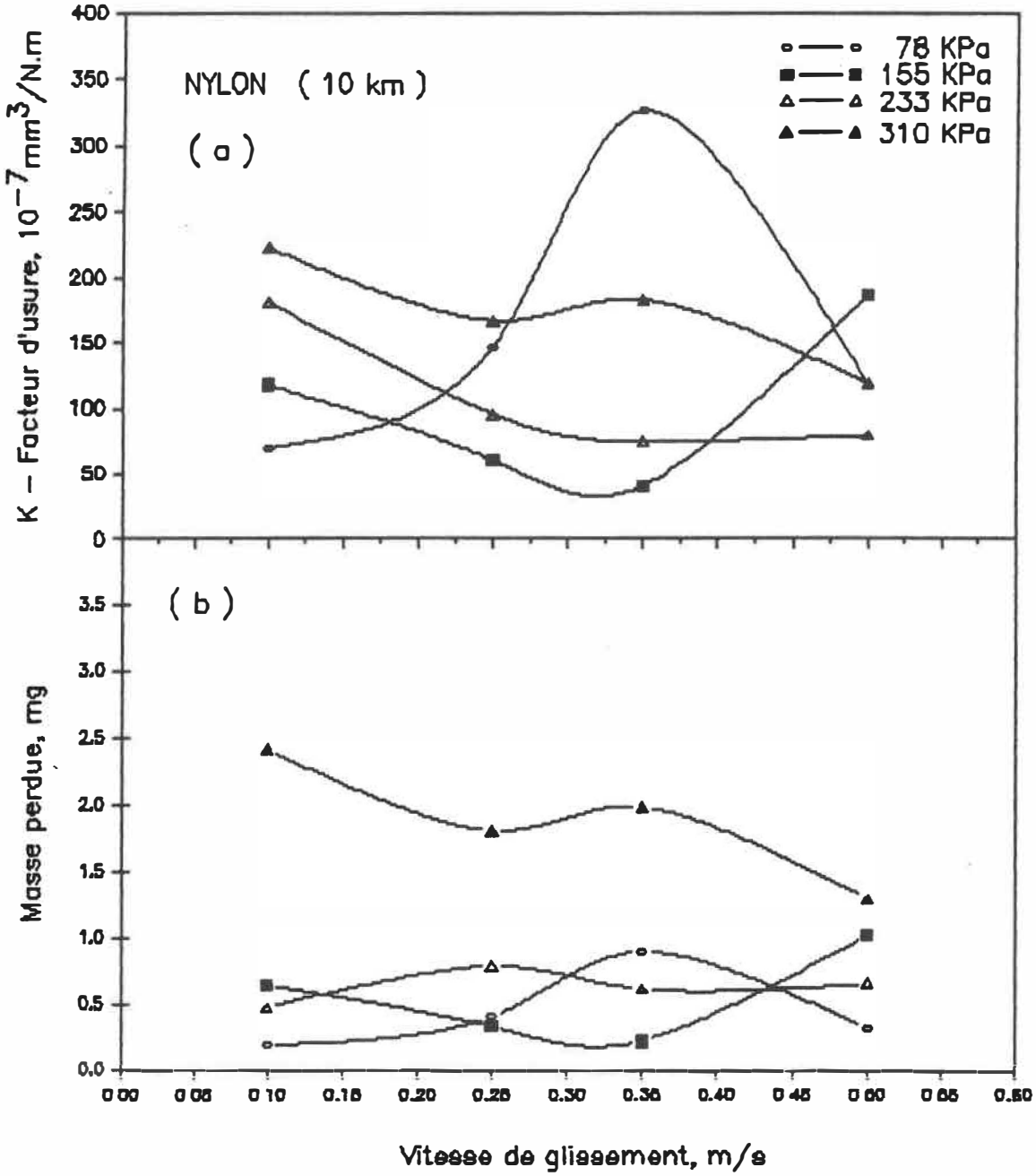


Figure 5.19 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 10 km (Acier: 0,12 μm R_a)

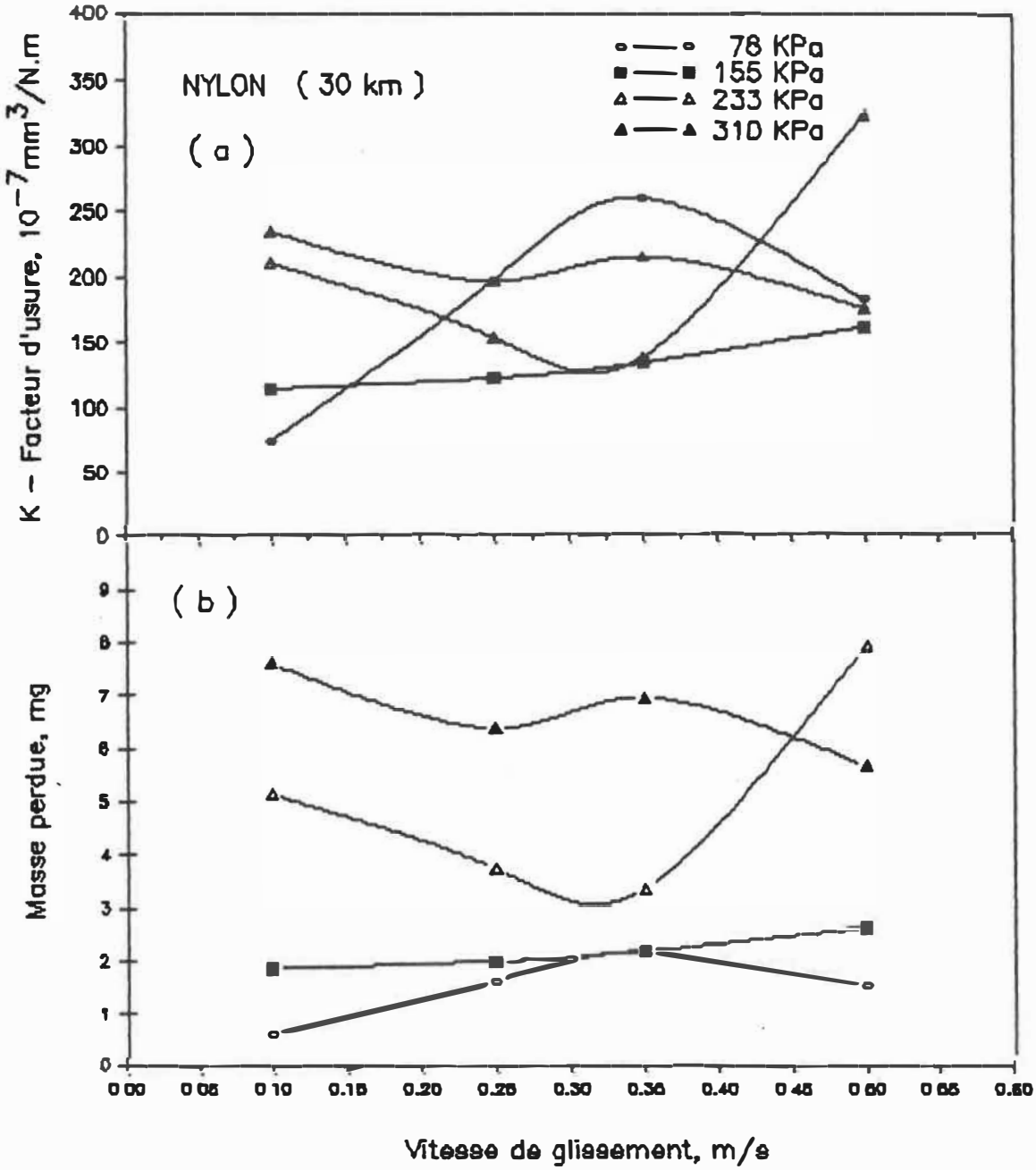


Figure 5.20 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 30 km
(Acier: 0,12 μm R_a)

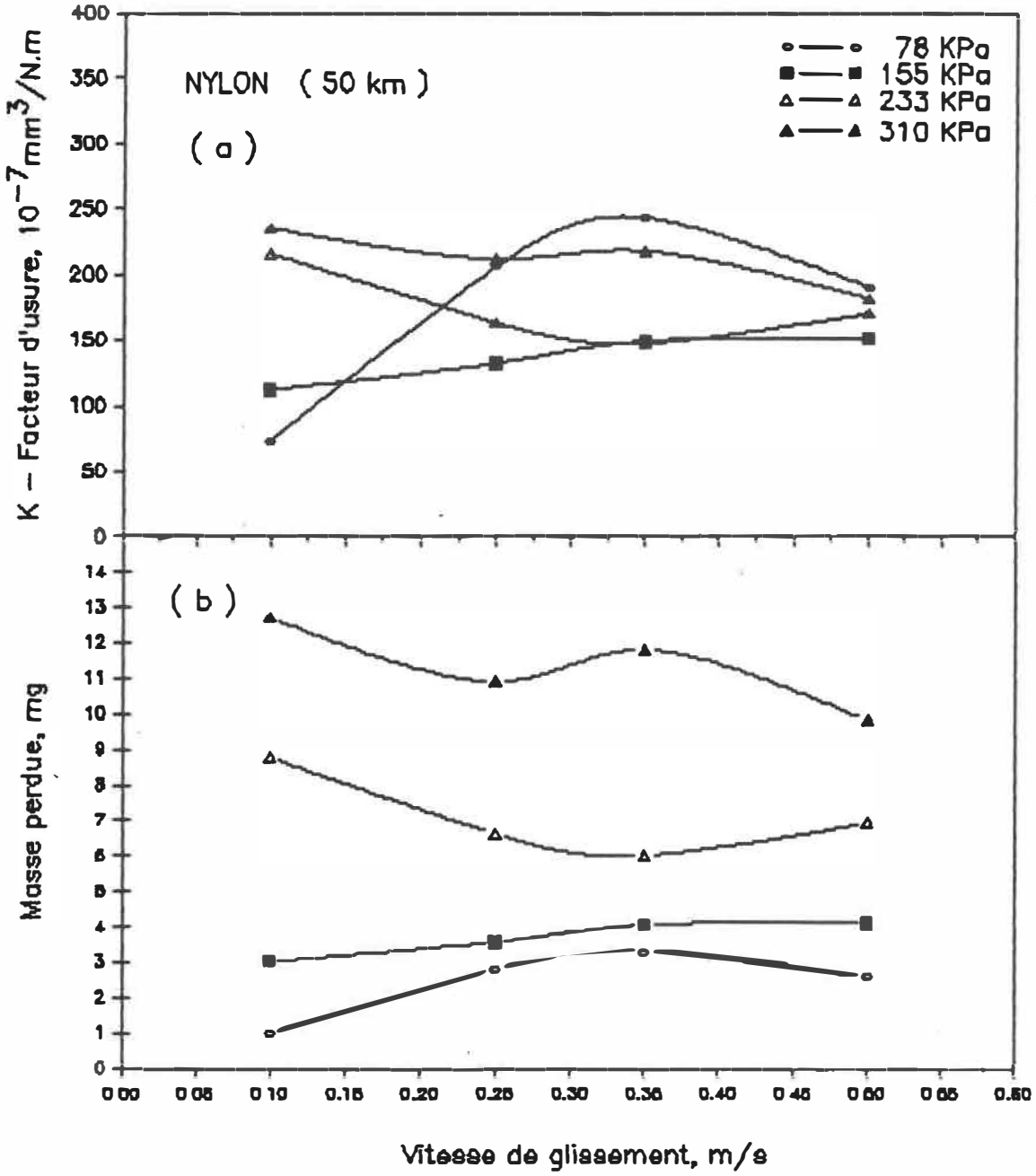


Figure 5.21 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 50 km
(Acier: 0,12 μm R_a)

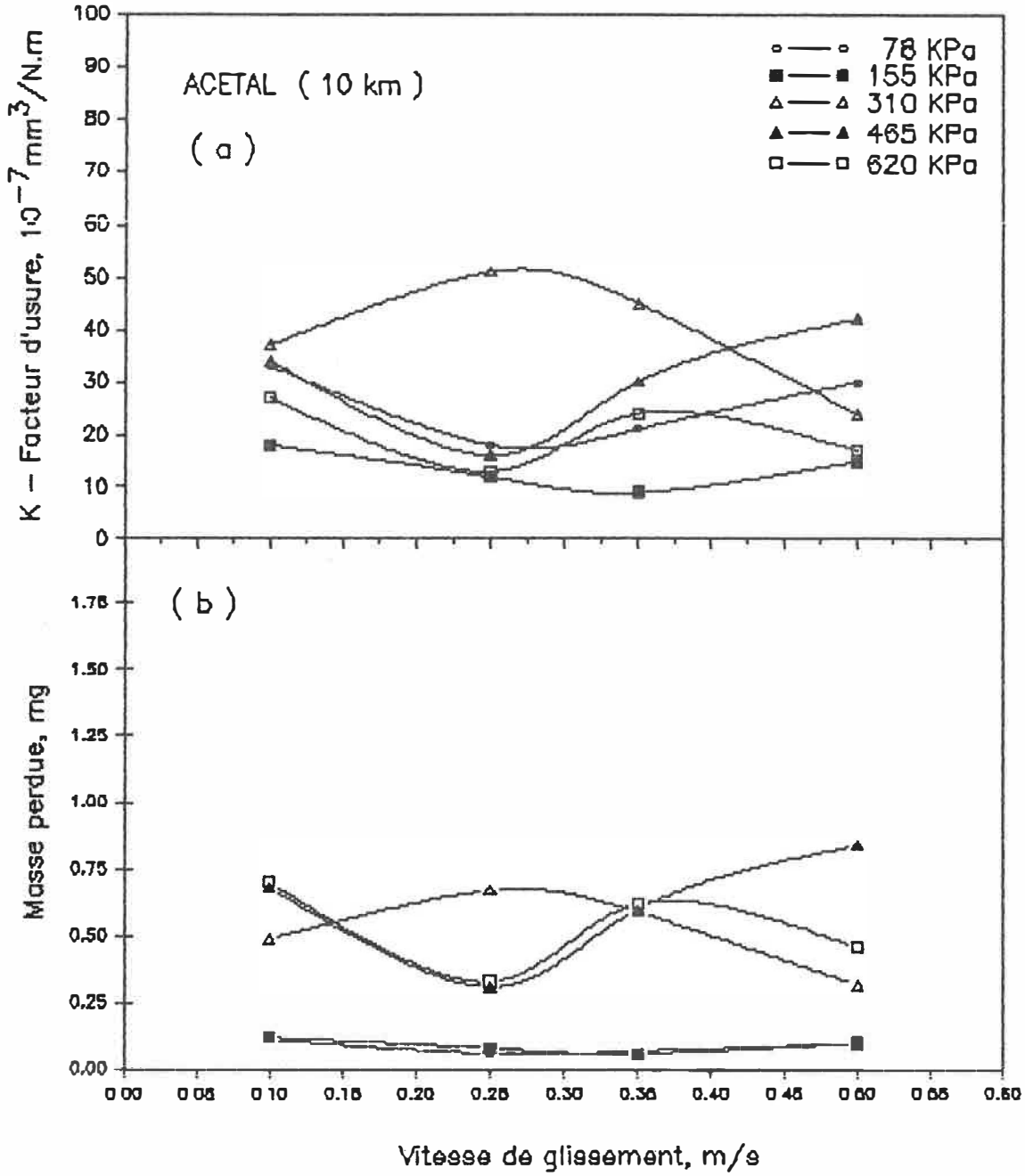


Figure 5.22 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 10 km
(Acier: 0,12 μm R_a)

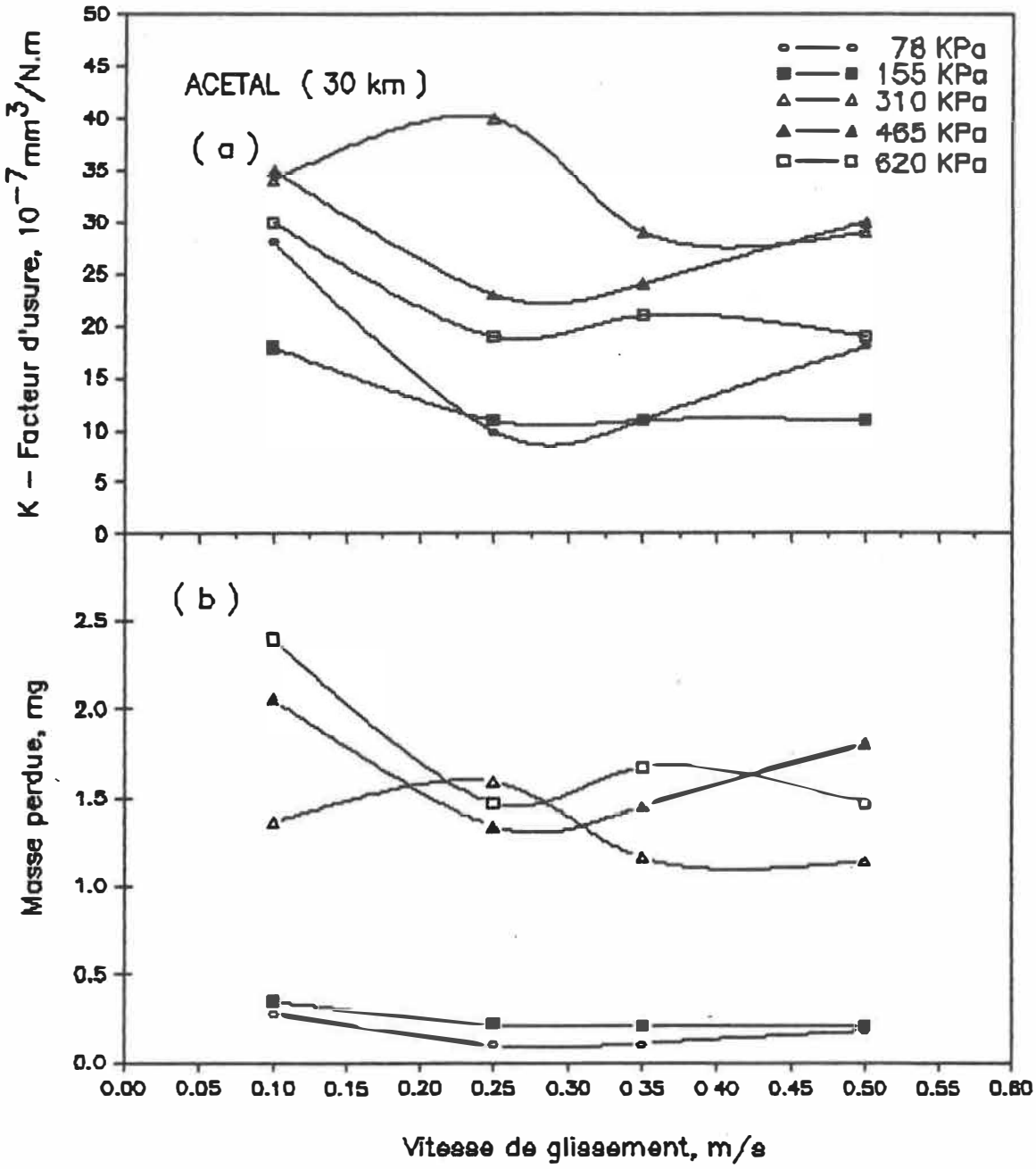


Figure 5.23 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 30 km (Acier: 0,12 μm R_a)

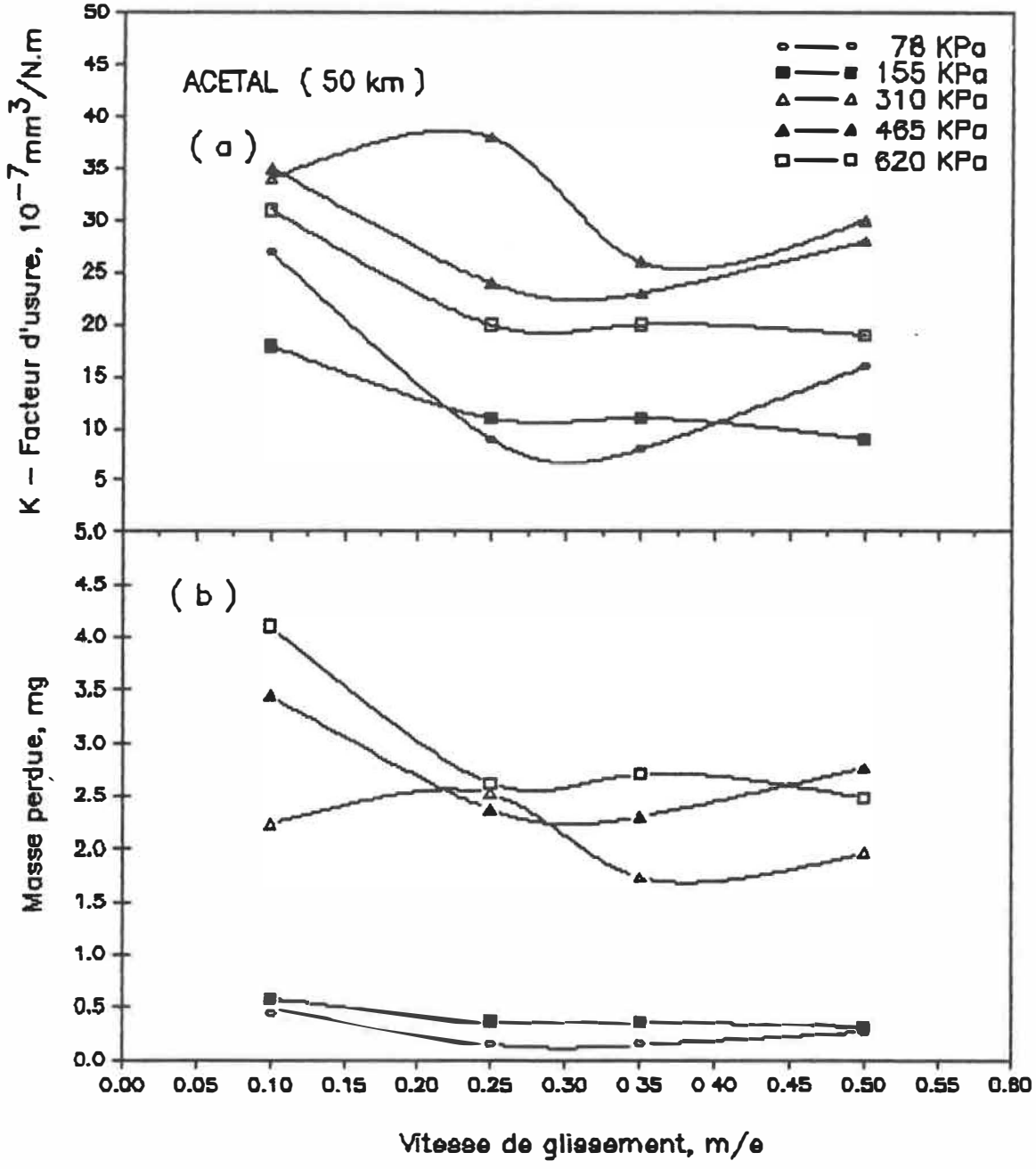


Figure 5.24 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la vitesse pour une distance glissée de 50 km
(Acier: 0,12 μm R_a)

V-5 INFLUENCE DE LA RUGOSITE

La rugosité de la surface d'acier contre laquelle frotte le polymère est un des paramètres évalué dans cette étude. Pour ce faire, des rugosités de 0,12 , 0,76 et 5 μm R_a ont été choisies pour couvrir la gamme de rugosités obtenues à l'aide de la plupart des proçédés couramment utilisés dans la fabrication de pièces mécaniques (figure 3.6).

La rugosité de 0,12 μm R_a a été obtenue par surfaçage à l'aide d'un papier abrasif de 400 mesh. La rugosité de 0,76 μm R_a a été obtenue par rodage à l'aide d'une poudre de carbure de silicone de 320 mesh. L'utilisation d'un sable a permis de finir des surfaces à environ 5 μm R_a.

Les figures 5.25 et 5.26 donnent l'évolution du facteur d'usure et de la masse perdue par usure du nylon et de l'acétal respectivement, en fonction de la rugosité de la surface d'acier et ce, pour les différentes vitesses de glissement. Ces résultats ont été obtenus pour une pression de contact de 155 KPa et après une distance de glissement de 20 kilomètres.

En observant les figures 5.25 et 5.26, on voit d'abords que pour les mêmes conditions, plus la rugosité

est grande, plus l'usure et le facteur d'usure sont importants. Ceci est d'ailleurs en accord avec d'autres recherches mais utilisant des vitesses et des pressions plus élevées [34], et peut s'expliquer par le fait que plus la rugosité de la surface métallique augmente, plus les aspérités sont imposantes et leur volume de déformation et de coupe plus grand. Lorsque les aspérités offrent une plus grande dénivéllation, les contraintes locales s'approchent de la limite élastique du polymère facilitant ainsi l'arrachement du matériau par cisaillement et le bris en fatigue.

Plus la rugosité de la surface métallique augmente, plus l'abrasion et le labourage deviennent les mécanismes prédominant le phénomène d'usure. Les aspérités de la surface métallique s'enfoncent dans la surface du polymère. Lorsque ces deux surfaces se deplacent l'une par rapport à l'autre (figure 2.1-a), ces aspérités labourent un sillon dans la surface du polymère, causant ainsi la déformation plastique d'une partie du matériau, et l'enlèvement par fracture de l'autre partie comme on a vu à la section 3 du chapitre III. Les figures 5.27 et 5.28 confirment assez bien la présence de ce mécanisme. En effet, la figure 5.28 montre la surface active d'un échantillon de nylon avant le test avec un grossissement de 100 fois, et on voit clairement les marques laissées par l'usinage sur le tour.

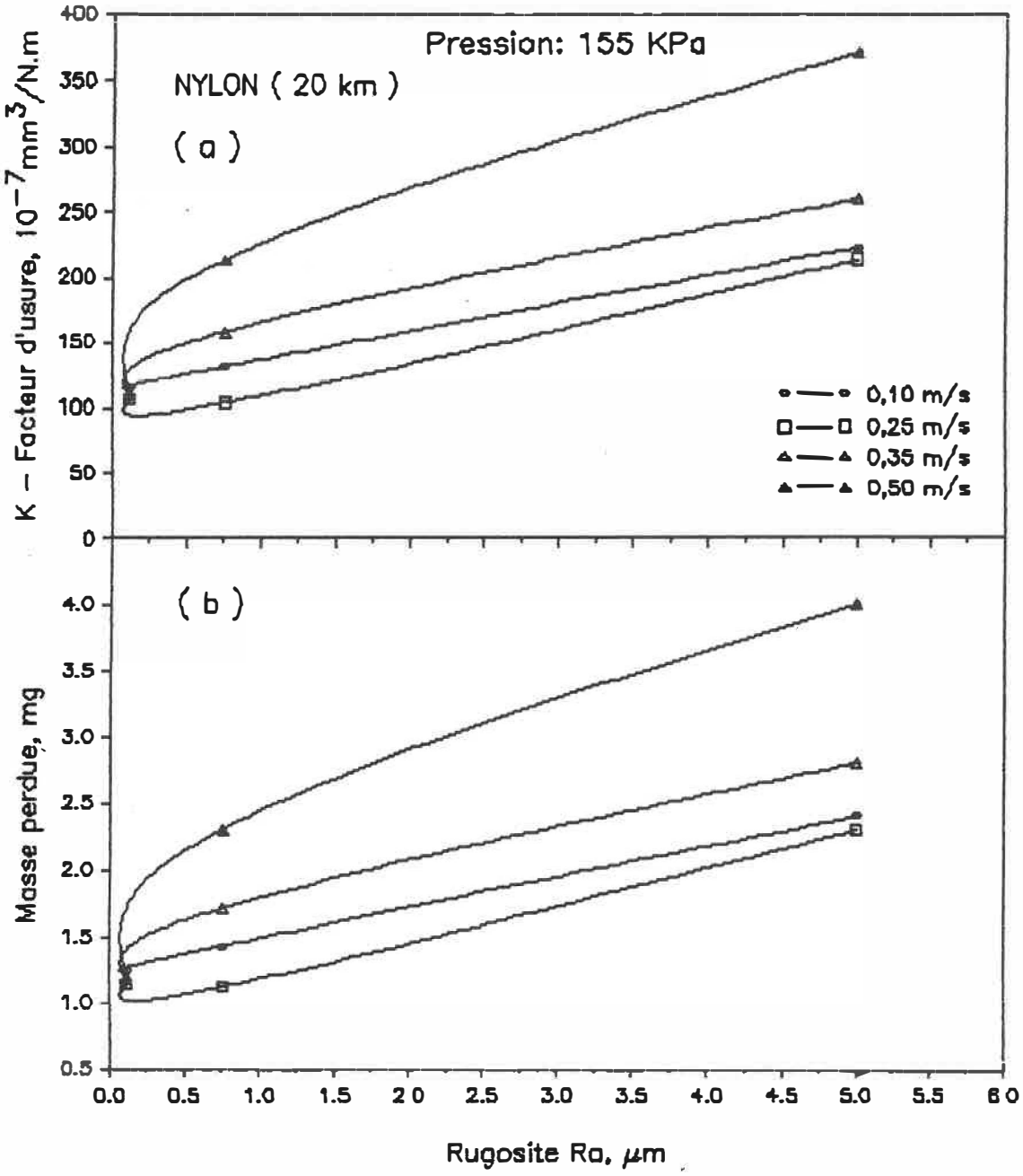


Figure 5.25 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon en fonction de la rugosité de l'acier après une distance de glissement de 20 km

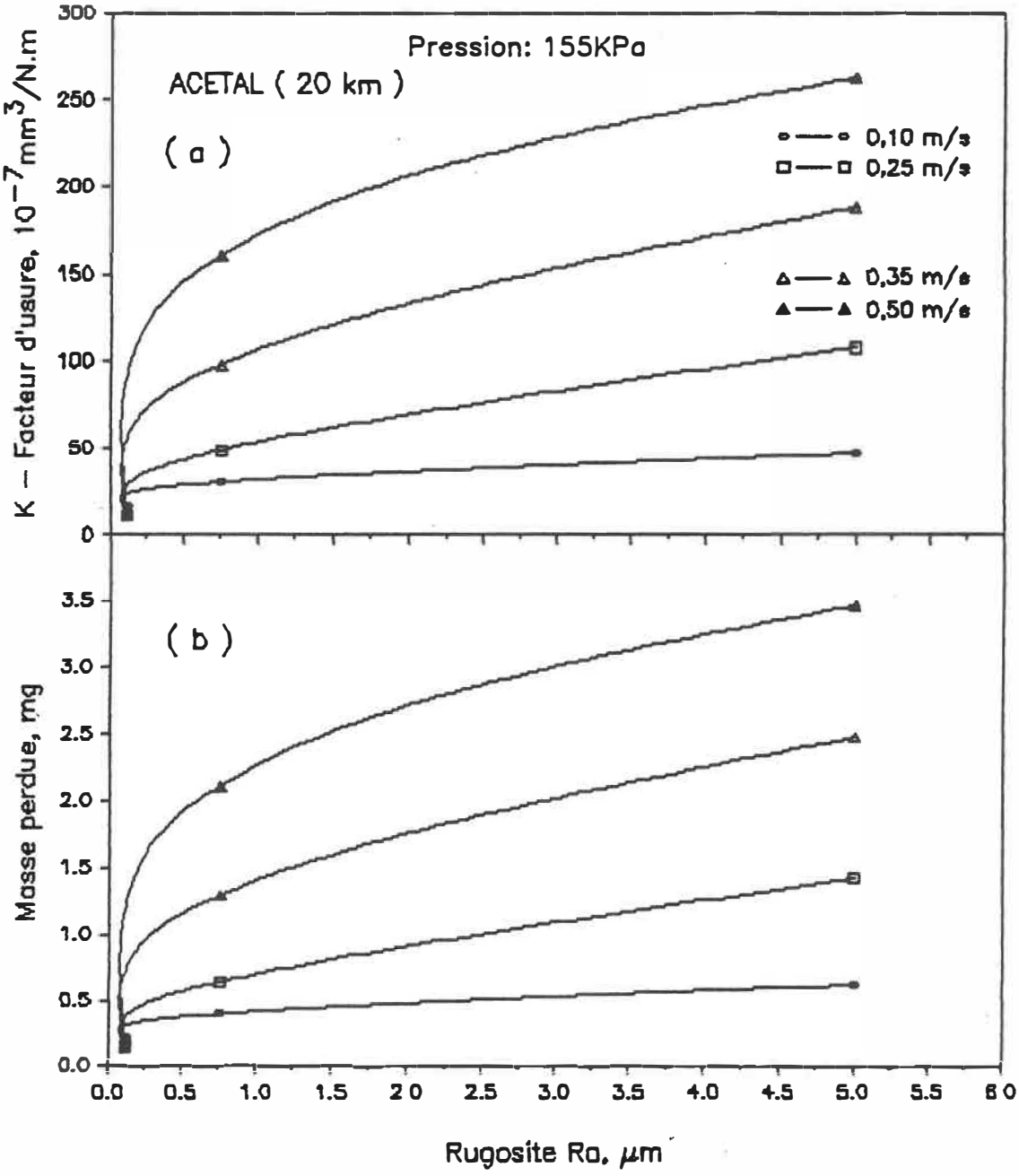


Figure 5.26 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure de l'acétal en fonction de la rugosité de l'acier après une distance de glissement de 20 km

Figure 5.27- Echantillon de nylon avant le test (x 100)

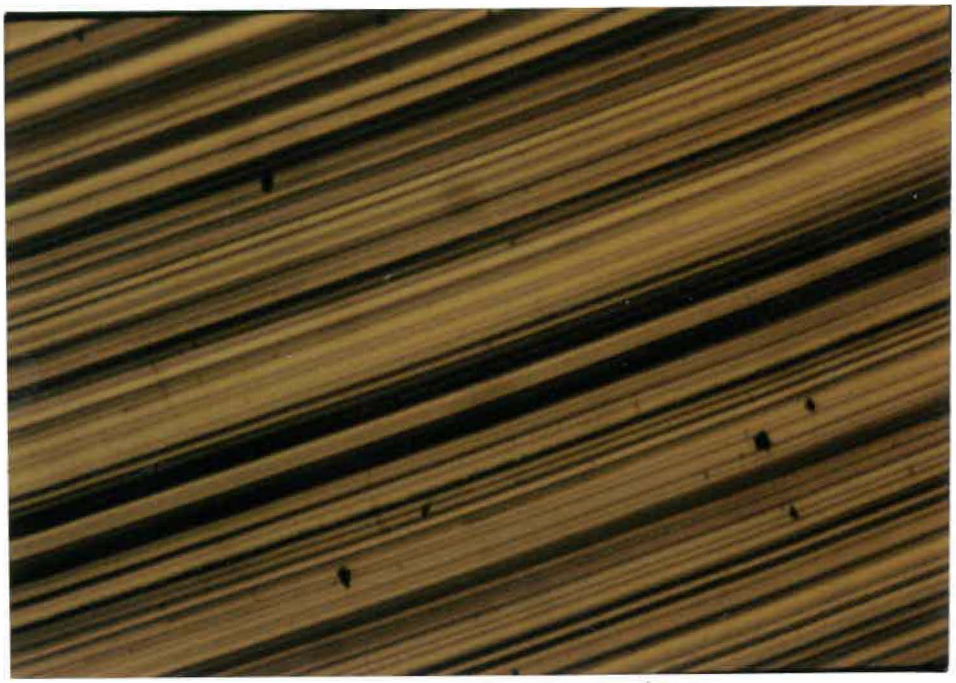


Figure 5.28- Echantillon de nylon après 6 heures de glissement (x 100)

Après quelques heures de fonctionnement, la surface de l'échantillon présente des stries (Figure 5.28) parallèles à la direction du glissement. A long terme, ces stries deviennent moins marquées et la surface paraît alors plus polie et plus brillante.

Une deuxième observation concerne l'influence de la vitesse de glissement sur l'importance de l'usure. En effet, ces figures montrent que pour la rugosité de 0,12 μm R_a et après 20 kilomètres de glissement, on a presque la même quantité d'usure quelque soit la vitesse, pour des finis plus rugueux cependant, la quantité d'usure est nettement différente d'une vitesse à l'autre même si la distance glissée est la même (20 km). Le paramètre vitesse devient donc plus influent lorsque la rugosité de la surface métallique augmente.

Cette plus grande influence de la vitesse sur l'usure s'explique par le fait que pour une pression de contact donnée, le nombre d'aspérités en contact est plus petit dans le cas des finis rugueux que dans celui des finis fins (moins de surface réelle de contact). Il en résulte que la charge par aspérité est plus élevée pour les rugosités de 0,76 et 5 μm R_a et que le travail (et donc l'énergie) nécessaire pour produire une particule d'usure est plus grand. Au niveau des contacts entre les

aspérités, ceci se traduirait par un plus grand dégagement de chaleur et donc des températures de surface plus élevées qui peuvent, comme dans notre cas, causer de brusques augmentations de l'usure (passage de 0,12 à 0,76 μm R_a des figures 5.25 et 5.26) suite à la fusion qui se produit au niveau des couches superficielles du polymère. Ce phénomène a d'ailleurs été observé, lors de nos essais, dans le cas de l'acétal frottant sur une surface d'acier de 0,76 μm R_a à une vitesse de 0,5 m/s. La figure 5.29 montre des filaments collés aux bords de la surface frottante de l'échantillon. Observés au microscope, ces filaments avaient l'air produits par fusion du matériau.

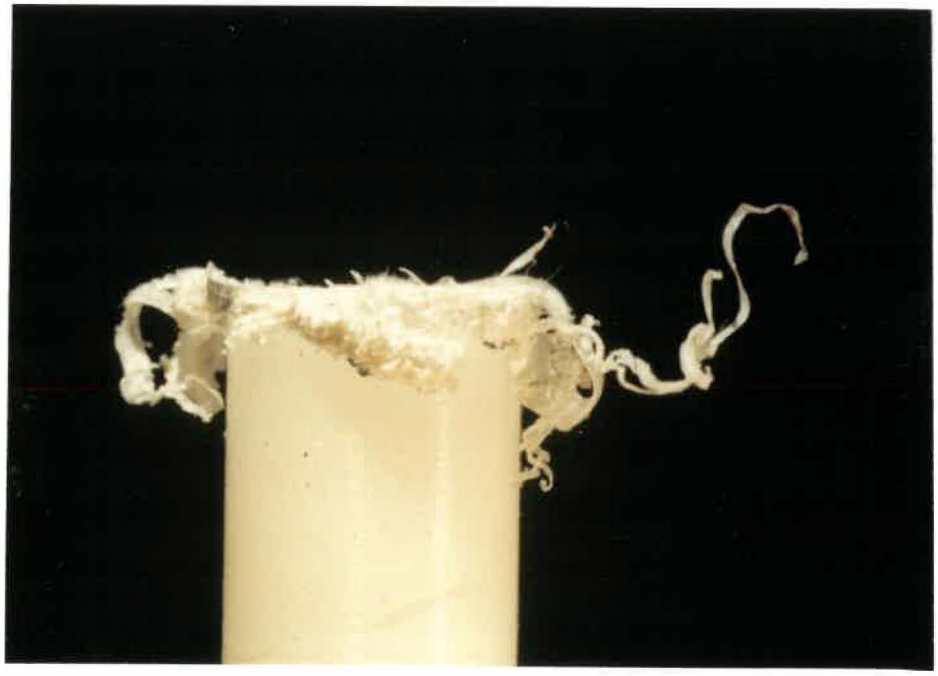


Figure 5.29 - Filaments d'usure
(Acétal, 0,5 m/s, acier: 0,76 μm R_a)

La figure 5.30 donne l'évolution du facteur d'usure et de la masse perdue par usure du nylon et de l'acétal en fonction de la distance de glissement pour les rugosités de 0,76 et 5 μm R_a. On peut alors remarquer que le taux d'usure a tendance à diminuer au cours du glissement avant de se stabiliser. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que dans le cas des finis rugueux, il est probable que la période de rodage soit plus longue et par conséquent, la formation initiale du film de transfert prenne plus de temps. Cette diminution du facteur d'usure serait donc liée aux modifications de la topographie des surfaces frottantes. En effet, lors du glissement, la corrosion aidée par l'abrasion,et la formation du film de transfert atténuent les contraintes locales en remplissant les vallées entres les aspérités de la surface d'acier (donc plus de surface réelle de contact), et par ce fait même, diminuent la profondeur de coupe des aspérités. A cela s'ajoute le léger polissage de la surface métallique (celle du polymère aussi) occasionné par le frottement du plastique, la corrosion et l'abrasion des poussières contaminantes. Des mesures de la rugosité des surfaces metalliques après 48 heures de glissement ont d'ailleurs montré une légère baisse de celle-çi.

Les observations microscopiques de la surface métallique n'ont pu montrer le phénomène de transfert qu'après une

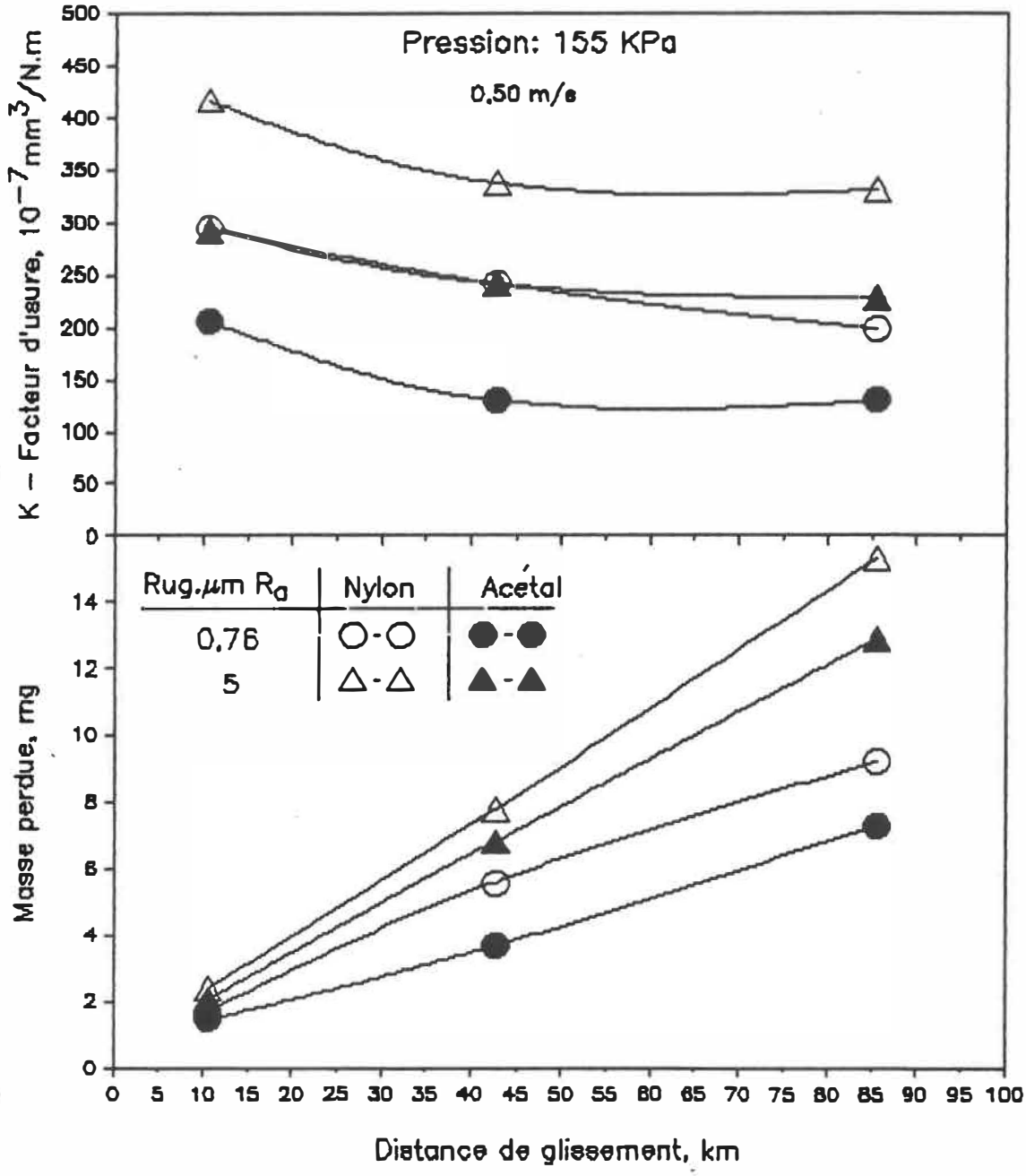


Figure 5.30 - Variation du facteur d'usure (a) et de la masse perdue (b) par usure du nylon et de l'acétal en fonction de la distance de glissement pour 0,76 et 5 µm R_a

longue période de glissement, et il a été noté que le film transféré ne se déposait pas uniformément sur la piste d'usure. On a plutôt remarqué plus de transfert au centre de la piste, probablement dû au meilleur contact qu'il y a à ce niveau et à la section ronde de l'échantillon qui met les aspérités du milieu de la piste en contact avec plus de matière plastique (plus longtemps) à chaque révolution du disque.

Lorsque formés, une partie des debris d'usure est écartée sur les bords à l'aide du front d'attaque circulaire de l'échantillon et on se retrouve à long terme, avec une sorte de poudre plastique déposée des deux bords de la piste comme le montre la figure 5.31. L'autre partie des debris est prise entre les deux surfaces en mouvement et est condensée, étirée et applatie contre la surface métallique.

On peut donc conclure ici, qu'en plus des variables opératoires qu'on a déjà discutées, à savoir la pression, la vitesse et la distance de glissement, la rugosité de la surface contre laquelle le polymère glisse est d'une grande importance dans le comportement en usure de celui-çi, surtout lorsque cette surface est plus dure. Dans le cas de notre étude, la rugosité et donc la topographie de la surface d'acier est peut être le paramètre ayant le plus

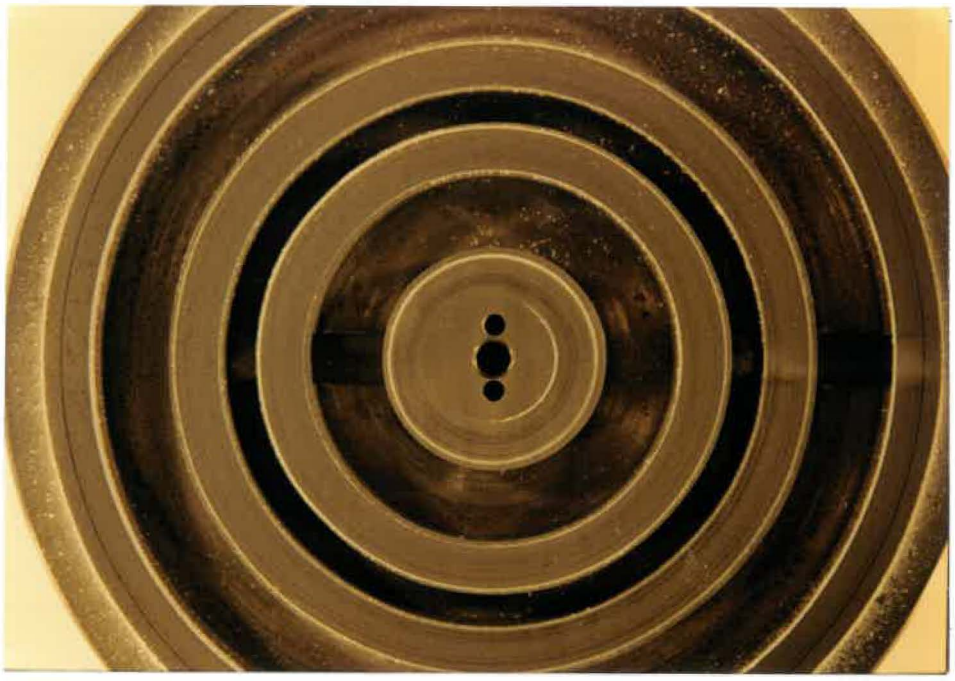


Figure 5.31- Dépôt de plastique aux bords des pistes d'usure

d'influence sur la grandeur du facteur d'usure K. Ainsi, à long terme, le taux d'usure de l'acétal est multiplié par dix lorsqu'on passe d'une rugosité de 0,12 μm à 0,76 μm R_a et il y a presque vingt fois plus d'usure lorsque le fini est 5 μm.

V-6 VALEURS DES FACTEURS D'USURE ET DE LA LIMITE Pv

Les valeurs des facteurs d'usure à l'équilibre pour les conditions de glissement étudiées sont présentées au tableau 5.5. Pour le même fini de surface (0,12μm R_a), les valeurs des facteurs d'usure varient de 120 à 237

Vitesse	0,1 m/s		0,25 m/s		0,35 m/s		0,5 m/s	
Plast.	Nyl.	Acé.	Nyl.	Acé.	Nyl.	Acé.	Nyl.	Acé.
KPa. ↓								
78	120	28	215	9	217	7	204	14
155	127	18	130	10	152	9	162	13
	165[a]	31[a]	-	-	-	-	200[a]	130[a]
	309[b]	46[b]	-	-	-	-	332[b]	229[b]
233	211	-	183	-	163	-	193	-
310	237	40	207	37	223	34	196	28
465	-	36	-	27	-	22	-	25
620	-	33	-	22	-	20	-	19

a: Fini acier 0,76 μm Ra
b: Fini Acier 5 μm Ra

Tableau 5.5- Facteurs d'usure à l'équilibre pour le nylon et l'acétal (Acier: 0,12 μm R_a)

($10^{-7}mm^3/N.m$) pour une moyenne de 184 ($10^{-7}mm^3/N.m$) sur toutes les conditions de pression et de vitesse dans le cas du nylon, et de 7 à 40 ($10^{-7}mm^3/N.m$) dans le cas de l'acétal avec une moyenne de 22 ($10^{-7}mm^3/N.m$). Ces valeurs sont repportées sur le tableau 5.6, où on donne aussi quelques valeurs retrouvés dans la littérature, du facteur d'usure K. On remarque alors que ces valeurs varient dépendemment des conditions dans lesquelles ces paramètres ont été calculés ou mesurés. Il faut aussi mentionner que les machines d'essais utilisées sont souvent différentes d'une étude à l'autre et ceci ne fait qu'agrandir l'écart entre ces différentes valeurs.

Nylon	Acétal	Vitesse (m/s)	Rugosité (μm R_a)	Référence
—	10,6	0,26	0,2 - 0,3	[62]
—	15,4	0,013	0,2 - 0,3	[62]
65,8	—	0,018	0,01	[63]
10	10	—	—	[64]
40,3	13,1	0,25	0,4	[60]
40	—	—	0,6	[65]
184 ± 53	22 ± 18	0,1 - 0,5	0,12	Nos essais
165	31	0,1	0,76	Nos essais
200	130	0,5	0,76	Nos essais
309	46	0,1	5	Nos essais
332	229	0,5	5	Nos essais

Tableau 5.6 - Valeurs du facteur d'usure K
(10^{-7} $mm^3/N.m$)

On remarque aussi que dans le cas de l'acétal, les valeurs typique et expérimentale du taux d'usure sont comparables dans le cas de la rugosité de 0,12 μm R_a. Pour les finis plus rugueux, la différence est cependant plus marquée. Dans le cas du nylon, il y a une nette différence entre les valeurs expérimentales et celles retrouvées dans la littérature technique. Ces variantes sont principale-

ment dues à la différence de rugosité entre les essais. La forte influence du paramètre rugosité sur l'ampleur de l'usure et donc sur ce facteur d'usure K, a déjà été confirmée (aussi visible au tableau 5.6). Une légère variation de celui-çi peut causer une augmentation appréciable de l'usure. Ces variantes sont aussi attribuables à la différence de certaines conditions dans lesquelles les paramètres K ont été mesurés ou calculés (ex:la pression de contact) et aussi aux conditions opératoires différentes entre nos expériences et celles qu'on retrouve dans la littérature comme la dureté de l'acier, les caractéristiques légèrement différentes des échantillons, leurs géométries et finalement le type de mouvement.

La figure 5.32 donne la zône des pressions et des vitesses à l'intérieur de laquelle l'usure est dite acceptable dans le cas de l'acétal [27]. Il faut bien mentionner que ces valeurs sont valables uniquement pour les conditions opératoires indiquées. Comme dans le cas du facteur d'usure, n'importe quelle variation de rugosité ou de dureté de la surface métallique par exemple, pourrait produire des résultats assez différents. Ceci est d'ailleurs visible sur le tableau 5.7 où on donne différentes valeurs du Pv limite retrouvées dans la littérature, ainsi que celles de nos essais.

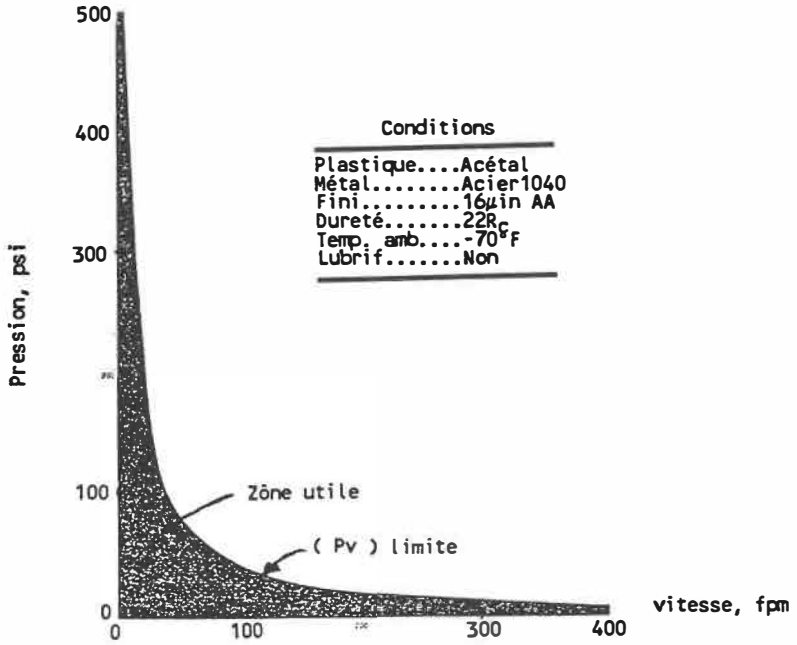


Figure 5.32 - Zône utile de pressions et de vitesses (de [27]).

On peut alors noter que les $Pv|_{max}$ expérimentaux correspondant aux conditions extrêmes de pressions et de vitesses de nos essais, sont supérieurs aux valeurs des (Pv) limites retrouvées dans la littérature. Si nous n'avons pas observé d'augmentation exagérée de l'usure pendant nos expériences, c'est en partie parce que la rugosité de la surface métallique utilisée pour faire nos tests est petite comparée à celles correspondant aux valeurs de Pv du tableau 5.7. Ceci a pour effet de décaler la courbe délimitant la zône utile (figure 5.32) vers l'intérieur permettant ainsi, de plus grandes pressions et vitesses d'utilisation.

Nylon	Acétal	Vitesse (m/s)	Rugosité (μm R_a)	Référence
105	--	0,05	0,6	[65]
88	--	0,5	0,6	[65]
88	--	5	0,6	[65]
140	105	0,5	--	[64]
87,6	122,6	0,5	0,4	[60]
105	140	0,05	0,4	[60]
--	158	0,05	0,4	[27]
155	310	0,5	0,12	Nos essais*

* : $Pv|_{max} = P_{max} \times v_{max}$

Tableau 5.7 - Valeurs du Pv limite retrouvées dans la littérature (KPa.m/s)

Compte tenu de l'état actuel des recherches dans le domaine de l'usure, l'utilisation des facteurs d'usure moyens pour des conditions proches des notres est un outil commode de calcul d'usure et de sélection de matériaux plastiques. Ceci n'est pas sans comporter de risques d'erreurs surtout lorsque certaines conditions sont visiblement différentes. La multitude des conditions opératoires et des systèmes frottants justifie bien le besoin et la nécéssité de beaucoup plus de recherches dans le domaine de l'usure. En attendant, il faut bien y aller de façon empirique et utiliser des valeurs correspondant à des condi-

tions les plus semblables possibles à celles du système tribologique étudié.

En conclusion générale, on peut dire que dans le cas des contacts entre des corps durs et des corps mous (plastique/métal), la rugosité de la surface dure est très importante dans le comportement en usure du matériau le plus mou. Il est donc nécessaire de tenir compte de ce paramétre et de ne pas oublier de le mentionner dans une étude donnée comme c'est malheureusement souvent le cas. Il est évident qu'il est difficile de caractériser la topographie d'une surface d'une façon juste et représentative. Une analyse quantitative complète est nécessaire pour relier tous les paramètres pertinents dans une étude de l'usure à savoir, la rugosité moyenne, les déviations moyennes et standard et la distribution de la hauteur des aspérités, les rayons de courbure et les pentes des aspérités. A celà s'ajouteraient les paramètres plus macroscopiques caractérisant les défauts de formes et d'ondulations. Ce genre d'analyse est certes long et coûteux mais sera un premier pas vers une meilleure façon de relier topographie et usure.

CHAPITRE VI

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les objectifs de ce projet tels que présentés au chapitre I ont été atteints. En effet, on a défini et classé l'usure dans le cas particulier des contacts plastiques/métal. Les théories existantes traitant de ce sujet ont été présentées et discutées et la notion de facteur d'usure adoptée pour caracteriser la résistance à l'usure des polymères étudiés.

Une machine d'essai a aussi été réalisée pour produire de l'usure en laboratoire et étudier l'influence des paramètres de fonctionnement suivants:

D'une part:

- la pression de contact (78 KPa à 620 KPa).
- la vitesse de glissement (0,1 m/s à 0,5 m/s).
- la distance de glissement (2 km à 200 km).

d'autre part,

- la rugosité de la surface d'acier (0,12; 0,76 et 5 μm R_a).
- le type de matériaux (nylon et acétal).

Dans le cas de la rugosité de la surface d'acier de 0,12 μm R_a, les résultats expérimentaux nous permettent de faire les conclusions suivantes:

- Le nylon s'use plus que l'acétal. En effet, après 200 km de glissement à 310 KPa et à 0,5 m/s:

  . le nylon a perdu 4% en poids.

  . l'acétal a perdu 0,6 % en poids.

- L'usure augmente avec la pression de contact.

- L'usure augmente avec la distance de glissement.

- L'usure est indépendante de la vitesse de glissement.

- Le facteur d'usure K tel que défini par l'équation 3.26 pour la gamme de pressions et de vitesses de nos essais varie de:

$$120 < K_{Nylon} < 240 \qquad (10^{-3}\,mm^3/N.m)$$

$$7 < K_{Acétal} < 40 \qquad (10^{-3}\,mm^3/N.m)$$

et est un moyen commode pour caractériser l'usure des matériaux plastiques.

- Les élevations de températures de surfaces pour les conditions opératoire de nos essais, mesurées à l'aide d'un montage à RTD (Resistance temperatue detector), étaient modestes.

L'usure augmente de façon appréciable avec la rugosité de la surface d'acier contre laquelle frotte le polymère. Dans le cas des rugosités de 0,76 et 5 μm R_a, la masse perdue par usure ainsi que le facteur d'usure K augmentent rapidement avec la pression de contact et la distance de glissement. Et contrairement au cas du fini fin (0,12 μm R_a), l'usure est fortement influencée par la vitesse de glissement.

La rugosité de la surface métallique est définitivement un paramètre important dans la détérmination de la résistance à l'usure d'un polymère. C'est aussi une des raisons pour laquelle, les différentes valeurs de paramètre caractérisant la résistance à l'usure des polymères comme le facteur d'usure K ou la limite Pv retrouvées dans la littérature, varient souvent d'une référence à l'autre et que l'utilisation de telles données devient inadéquate si la rugosité de la surface contre laquelle glisse le polymère n'est pas indiquée.

Les recommandations qui peuvent être faites quant aux travaux futurs pouvant éventuellement compléter cette étude sont les suivantes:

a- Déterminer les facteurs d'usure et les Pv limites pour une large gamme de rugosités de la surface métallique. L'utilisation de ces valeurs sera alors plus adéquate car elles se rapporteront à un fini de surface bien spécifique.

b- Déterminer la limite de rugosité à partir de laquelle la vitesse commence à influencer fortement l'usure.

c- Déterminer l'influence de la rugosité sur la période de rodage et sur la formation du film de tansfert.

BIBLIOGRAPHIE

[1] BOWDEN, F.P. and D., Tabor, "Friction and Lubrication of Solids", Part I (1954) and Part II (1964). Claredon Press, Oxford.

[2] MOORE, D.S., "Principles and Applications of Tribology". Pergamon Press, Oxford (1975).

[3] CZICHOS, H., "Tribology", Elsevier, Amsterdam (1978).

[4] Glaeser, D.A., "Fundamentals of Friction and Wear of Materials", ASM, Metals Park, OH (1981).

[5] SUH, N.P., "Tribophysics", Prentice-Hall (1986).

[6] KRAGELSKY, I.V. and V.V. Alisin, "Friction Wear Lubrication", Pergamon Press.

[7] NRCC Associate Committee on Tribology, "A Strategy for Tribology in Canada", National Research Council Canada, NRCC Publication Number 26556 (1986).

[8] DAWSON, D., J.R. ATKINSON and K. BROWN, "The Wear of HMWP with Particular Reference to its Use in Artificial Human Joints", Advances in Polymer Friction and Wear, v:5B, Lieng-Huang Lee, New York, p. 533.

[9] BARTENEV, G.M. and V.V. Lavrentev, "Friction and Wear of Polymers, Elsevier, Amsterdam (1981).

[10] LEE, L.H., "Advances in Polymer Friction and Wear", Plenum Press, New York (1974).

[11] FRIEDRICH, K., "Friction and Wear of Polymer Composites", Elsevier (1986).

[12] DOWSON, D., M. Godet and C.M. Taylor, "The Wear of Non-Metallic Materials", Mechanical Engineering Publication, London (1976).

[13] "Glossary of Terms and Definitions in the Field of Friction, Wear and Lubrication", Tribology, OECD (1969).

[14] PETERSON, M.B., " Wear Testing Objectives and Approaches", Selection and Use of Wear Tests for Metals, ASTM STP 615, R.G. Bayer, Ed., ASTM, pp. 3-11 (1976).

[15] PETERSON, M.B., "Mechanisms of Wear", Boundary Lubrication, An Appraisal of World Literature, ASME (1969).

[16] ARCHARD, J.F. and W. HIRST, "The Wear of Metals under Unlubricated Conditions", Proc. Roy. Soc. A236, p.397 (1956).

[17] TABOR, D., "Proc. Int. conf. Wear Mater", ASME, New York, p. 1 (1979).

[18] BURWELL, J.T., "Survey of Possible Wear Mechanisms", Wear, vol. 1, p. 119 (1957/58).

[19] YELLE, H., Design of Thermoplastic Gears with an Involute Tooth Profile. University of Waterloo, Thesis for Ph.D. (1977).

[20] JAIN, V.K. and BAHADUR, S., Developpement of a Wear Equation for Polymer-metal Sliding in Terms of the Fatigue and Topography of The Sliding Surfaces, Wear, vol. 60, p. 237, (1980).

[21] "Friction and Wear Devices", American Society of Lubrication Engineers, Park Ridge, ILL (1976).

[22] HOLM, R., "Electric Contacts", Stockholm: H. Gerbers (1946).

[23] BURWELL, J.T. and C.D., STRANG, "On the Empiricallau of Adhesive Wear", 1952b J. Appl. Phys. 23, p. 18.

[24] ARCHARD, J.F., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces", J. Appl. Phys. 24, p. 981 (1953).

[25] RABINOWICZ, E., Proc. Phys. Soc. B66, p. 929 (1953).

[26] SUH, N.P., "The Delamination Theoric of Wear", Wear, vol. 25, pp. 111-124 (1973).

[27] LEWIS, R.B., "Predicting the Wear of Sliding Plastic Surfaces", Mec. Eng., vol. 86, p. 32 (1964).

[28] MERCHANT, M.E., "The Mecanism of Stalic Friction", Journal of Applied Physics, vol. 11, p. 230 (1940).

[29] ERNST, H. and M.E., MERCHANT, "Surface Finish of Clean Metal a Basic Factor in the Metal Cutting Process", Friction and Surface Finish, MIT Report n. 15, pp. 76-101 (1940).

[30] RABINOWICZ, E., "Friction and Wear of Materials", Wiley, New York (1965).

[31] VOYUTSKI, S.S., "Autoadhesion and Adhesion of High Polymers", John Wiley and Sons, New York (1963).

[32] BOWERS, R.C., W.C., CLINTON and W.A., ZISMAN, Lubr. Eng., Aug., vol. 9, p. 204 (1953).

[33] BOWERS, R.C., W.C., CLINTON and A., ZISMAN, "Frictional Properties of Plastics", Modern Plastics, p. 131 (1954).

[34] HOLLANDER, E.A. and J.K., LANCASTER, "An Application of Topographical Analysis to the Wear of Polymers", Wear, vol. 25, p. 155 (1973).

[35] CLERICO, M., "A Study of the friction and Wear of Nylon Against Metal", Wear, vol. 13, p. 183 (1969).

[36] LANCASTER, J.K., "Relationships Between the Wear of Polymers and their Mechanical Properties", Proc. Inst. Mech. Engrs, 183 (3p), 98 (1969).

[37] POOLEY, C.M. and D., TABOR, "Friction and Molecular Structure: the Behavior of Some Thermoplastics", Proc. Roy. Soc. Ser. A, 329, 251 (1972).

[38] STEIJN, R.P., "The Sliding Surface of PTFE, on Investigation with Electron Microscope", Wear, vol. 8, p. 193 (1968).

[39] SVIRIDYONOK, A.I. et al., "A Study of Transfert in Frictional Interaction of Polymers", Wear, vol. 25, p. 301 (1973).

[40] TANAKA, K., "Transfer of Semicrystalline Polymers Sliding against a Smooth Steel Surface", Wear, vol. 75, p. 183 (1982).

[41] TANAKA, K. and T., MIYATA, Wear, vol. 41, p. 383 (1977).

[42] RHEE, S.H. and K.C., LUDEMA, "Mechanisms of Formation of Polymeric Transfert Films", Wear, vol. 46, p. 231 (1978).

[43] KAR, M.K. and S. BAHADUR, Wear, vol. 46, p. 189 (1978).

[44] EISS, Jr.N.S. and K.A., SMYTH, "The Wear of Polymers Sliding on Polymeric Films Deposited on Rough Surfaces", vol. 103, p. 266 (1981).

[45] TANAKA, K., Y., UCHIYAMA and TOYOOKA, S, "The Mecanism of Wear of PTFE", Wear, vol. 23, p. 153 (1977).

[46] BRAINARD, W.A. and D.H., BUCKLEY, Wear, vol. 26, p. 75 (1973).

[47] BAYER, R.C., W.C., CLINTON, C.W., NELSON and R.A., SCHUMACHER, "Engineering Model for Wear", Wear, vol. 5, p. 378 (1962).

[48] CLINTON, W.C., T.C., KU and R.A., SCHUMACHER, "Extension of the Engineering Model for Wear to Plastics, Sintered Metals and Plastics", Wear, vol. 7, p. 354 (1964).

[49] GREENWOOD, J.A. and WILLIAMSON, J.B.P., Proc. Roy. Soc., A295, p. 300, London (1966).

[50] WHITEHOUSE, D.J. and J.F., ARCHARD, Proc. Roy. Soc. A316, 97 (1970).

[51] BHUSHAN, B.,"Analysis of the Real Area of Contact Between a Polymeric Magnetic Medium and a Rigid Surface", Trans.of the ASME, Vol. 106, p. 26 (1984).

[52] LANCASTER, J.K., "Abrasive Wear of Polymers", Wear, vol. 14, p. 223 (1969).

[53] RATMER, S.B., "Abrasion of Rubber", D.I. James, ed. p. 23, Mac Laren (1967).

[54] RATNER, S.B. and I.I., FARBEROVA, "Mechanical Testing of Plastics - Wear", D.I. James, ed. p. 297, Mac Laren.

[55] Eléments de Machines, Ed. Ecole polytechnique de Montréal, 1986.

[56] RABINOWICZ, E., "The Wear Coefficient-Magnitude, Scatter, Uses", Transactions of the ASME, vol. 103, p. 188 (1981).

[57] JAEGER, J.C., Jour. & Proc. Roy. Soc. N.S.W. 76, 203 (1942).

[58] LANCASTER, J.K., "Estimation of the Limiting PV Relationchips for Thermoplastics Bearing Materials", Tri-

bology, 4 (2), p.82 (1971).

[59] BENABDALLAH, M., Etude du Frottement de Glissement Alternatif Thermoplastique-Métal en Contact Plan sur Plan. Thèse Ph.D, Ecole polythectique de Montréal, (1987).

[60] Modern Plastics Encyclopedia, Vol.53, # 10A, McGraw-Hill, NY (1976-77).

[61] ANDERSON, J.C., "Wear of Commercially Available Plastic Materials", Tribology international, p. 255 (Oct.1982).

[62] ANDERSON, J.C., and ROBBINS, E.J., "The Influence of Temperature Generation on the Wear of Some Polymers" Proc. of the 3rd Leeds-Lyon symposium on tribology, p. 94 (1976).

[63] FURBER, K et al. "Wear Mecanisms for Nylon 6-6", Proc. of the 3rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology, p. 25 (1976).

[64] BOWER, J.R., What Engineers Should Know About Self Lubricating Plastics, Métal Progress, v.3, p. 106 (1965).

[65] FRIEDRICH, K., "Wear of Reinforced Polymers by Different Abrasive Counterparts", Friction and Wear of Polymer Composites, ELSEVIER (1986)

[66] DRUMMOND McCALL CATALOGUE, 5205 Fairway, C.P. 900, Montréal, Québec H8S 4E9.

[67] POLYMER POLYPENCO CORPORATION, P.O. Box 422, Reading, PA 19603.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00290822 4