

Frottement des plastiques

par **Yukisaburo YAMAGUCHI**

Professor Emeritus, Kogakuin University, Tokyo (Japan)

*Adaptation française par **Michel CHATAIN**, Directeur du traité.*

1. Frottement de glissement	A 3 138 - 2
1.1 Théorie.....	— 2
1.2 Expérimentation fondée sur la théorie du glissement	— 2
2. Influence de la structure des plastiques	— 3
2.1 Structure moléculaire.....	— 3
2.1.1 Arrangement des atomes	— 3
2.1.2 Masse moléculaire.....	— 4
2.2 Super-structure	— 4
2.2.1 Structure cristalline	— 4
2.2.2 Orientation moléculaire	— 4
3. Aspect pratique du frottement	— 6
3.1 Coefficient de frottement	— 6
3.2 Valeurs expérimentales de μ_s et de μ_k	— 7
4. Valeur limite du facteur p_v	— 9
4.1 Considérations théoriques.....	— 9
4.2 Expérimentation et résultats.....	— 9
5. Amélioration des propriétés tribologiques des plastiques	— 11
5.1 Mélanges de polymères.....	— 11
5.2 Composites	— 11
Références bibliographiques	— 12

Le lecteur trouvera dans cet article le frottement de glissement, l'influence de la structure des plastiques, l'aspect pratique du frottement, la valeur limite du facteur p_v et l'amélioration des propriétés tribologiques des plastiques.

Les abréviations des plastiques sont définies dans l'article *Symboles* [A 3 012] du présent traité.

1. Frottement de glissement

On peut considérer plusieurs sortes de frottements : les frottements de glissement et de roulement, le frottement lubrifié par opposition au frottement sec ou solide, les frottements statiques et dynamiques.

Nous examinerons ici le **frottement sec de glissement** qui est le type le plus courant pour les plastiques.

1.1 Théorie

La théorie désignée par **adhérence-cisaillement** (*adhesion-shearing*) [1] [2] et celle fondée sur l'énergie de surface [3] ont été évoquées à propos du frottement de glissement. Conformément à la première théorie, et comme le montre la figure 1, la résistance de frottement (la résistance au mouvement le long de la surface de contact) est la somme de la force destructive de cisaillement F_s et de la résistance à la déformation F_d de la partie en contact :

F = F_s + F_d (1)

En réalité, on peut considérer que $F = F_s$ car F_d , beaucoup plus petit que F_s , peut être négligé et l'on peut écrire :

F = Aτ (2)

où A est l'aire effective de contact (la somme des a_1, a_2, \dots de la figure 1a) et τ la contrainte de cisaillement dans la zone de contact des matériaux.

Cette aire de contact vrai est habituellement représentée par :

A = k Pⁿ (3)

et alors μ = F/P = Aτ/P (4)

- avec μ coefficient de frottement,
- P pression résultant de la charge normale,
- k et n constantes dépendant des matériaux.

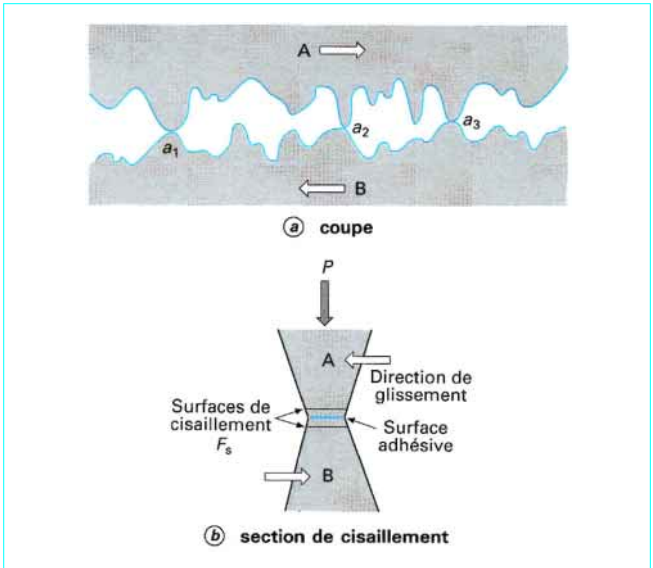


Figure 1 – Vue schématique macroscopique en coupe des surfaces de glissement au contact

La valeur de A peut être obtenue théoriquement en utilisant la **loi de Meyer** concernant la dureté [4] ou la **loi de l'élasticité de Hertz** [5]. C'est la première loi qui a été employée pour la détermination de μ dans cet article.

Ainsi, **Pascoe et Tabor** [6] ont utilisé l'équation (8) pour trouver la surface de contact vrai et le coefficient de frottement. La relation entre la pression P, les diamètres D du pénétrateur et d de son empreinte dans le matériau est alors (figure 2) :

P = a dⁿ (5)

K = a₁ D₁ⁿ⁻² = a₂ D₂ⁿ⁻² = a₃ D₃ⁿ⁻² ... (6)

d'où P = (K/Dⁿ⁻²) dⁿ (7)

et l'aire de contact vrai est :

A = (π/4) d²
= (π/4) (1/K)^{2/n} D^{2(n-2)/n} P^{2/n} (8)

μ = Aτ/P
= (π/4) τ (1/K)^{2/n} D^{2(n-2)/n} P^[(2/n)-1] (9)

1.2 Expérimentation fondée sur la théorie du glissement

On utilise un duromètre Rockwell muni d'une bille d'acier de diamètre D ; elle laisse dans une plaque de plastique ou d'acier, sous une charge F, une empreinte de diamètre d mesurée pour chaque diamètre du pénétrateur.

Les constantes a et n des équations (5) et (6) ont été ainsi obtenues et sont présentées dans le tableau 1.

Les valeurs théoriques de μ (figure 3) sont sensiblement égales aux valeurs expérimentales du tableau 1 quoique ces dernières soient légèrement plus faibles pour les petites charges.

Tableau 1 – Constantes de la loi de Meyer (1)				
Matériau	a	n (moyenne)	K (moyenne)	μ (pour Al)
PF	6,9 à 38	2,76	54,8	0,37
MF	9,5 à 35	2,67	49,1	0,30
PMMA	3,3 à 5,9	2,79	25,4	0,46
PS	4,5 à 4,8	2,75	23,5	0,36
PC	2,3 à 5,9	2,75	19,8	0,56
PA 6	1,8 à 5,1	2,84	15,3	0,44
Acier	47 à 101	2,2	92,8	

(1) diamètre de la bille d'acier : 0,16 et 1,27 cm à 20 °C.

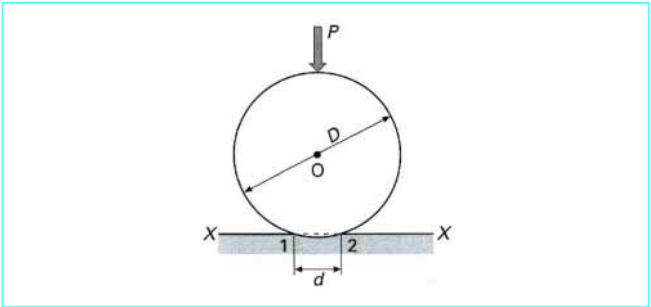
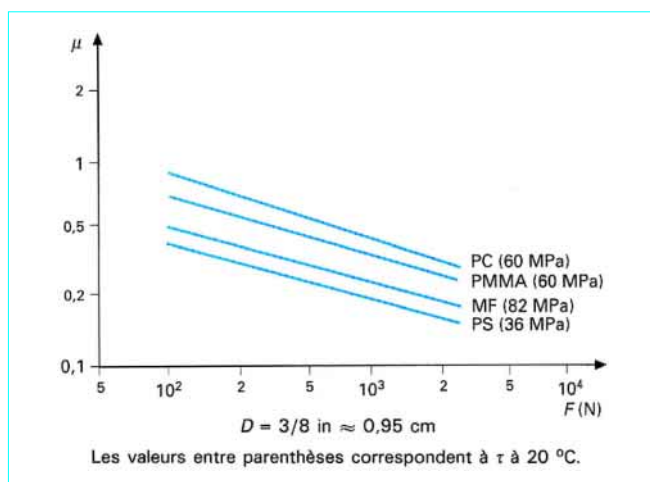


Figure 2 – Pénétration d'une sphère dans un plan



La théorie de l'adhérence-cisaillement semble alors être applicable avec quelques précautions au phénomène de frottement *glissant* des plastiques.

2. Influence de la structure des plastiques

2.1 Structure moléculaire

2.1.1 Arrangement des atomes

Essayons d'analyser les relations qui existent entre la résistance au frottement et les liaisons intermoléculaires (forces de Van der Waals).

La figure 4 montre la variation du **coefficient de frottement de glissement** (ou de **frottement cinétique**) μ_k des plastiques sur l'acier en fonction de :

- l'énergie cohésive spécifique E_{sp} ;
- l'énergie cohésive moléculaire E_m qui correspond à la force de liaison entre les molécules [8] ;
- la résistance au cisaillement τ du plastique.

Les résultats montrent que, pour la plupart des plastiques, μ_k est proportionnel à E_{sp} , à E_m et à τ . On observe cependant quelques exceptions telles que PVC, PA 6-6 et PC.

On peut chercher d'autres corrélations entre l'arrangement des atomes et μ_k . Dans le tableau 2, on trouve les valeurs individuelles de μ_k et les valeurs moyennes calculées pour différents groupes de plastiques étudiés dans certaines conditions de vitesse de glissement ($v = 6,2$ cm/s) et de pression ($P = 0,083$ MPa).

Un appareillage d'essai de frottement-glissement a été utilisé pour étudier les propriétés des surfaces d'extrémités de cylindres de 19 matériaux (six matières thermorigides et treize thermoplastiques amorphes ou semi-cristallins).

Ces plastiques peuvent être classés d'un point de vue morphologique en considérant la symétrie de la répartition des atomes à l'intérieur du motif de base de la molécule.

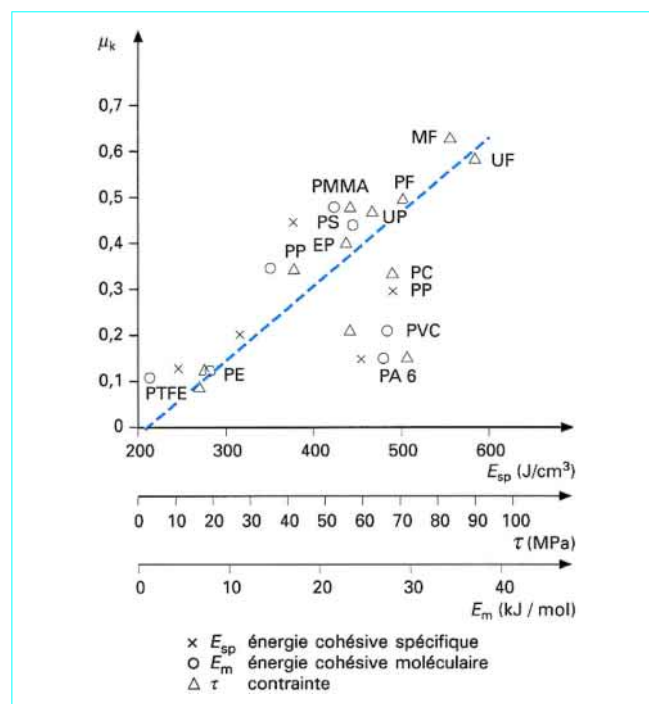


Figure 4 – Variation du coefficient de frottement cinétique sur l'acier en fonction des énergies cohésives (moléculaire et spécifique) et la contrainte

Tableau 2 – Coefficient de frottement cinétique de divers plastiques contre de l'acier ($v = 6,2$ cm/s, $P = 0,083$ MPa)

Matériau			μ_k			
			Valeurs moyennes			
Thermo- durcissables	chargés avec cellulose	PF.....	0,496	0,568 asymétrique	0,504	
		UF.....	0,582			
		MF.....	0,625			
	non chargés	UP.....	0,470	0,446 asymétrique		
		EP.....	0,400			
		PI.....	0,470			
Thermoplastiques	amorphes	PMMA.....	0,476	0,429 asymétrique	0,352	
		PS.....	0,442			
		ABS.....	0,371			
		PVC.....	0,217			0,328 faiblement asymétrique
		PES.....	0,330			
	semi-cristallins	PC.....	0,331	0,285 faiblement symétrique	0,197	
		PPS.....	0,216			
		PP.....	0,308			
		PA 6.....	0,148	0,151 quasi symétrique		
		POM.....	0,184			
		PE.....	0,124	0,116 parfaitement symétrique		
		PTFE.....	0,108			

Les matières plastiques réticulées sont classées parmi les asymétriques. Les hauts polymères amorphes sont généralement asymétriques et sont partagés en deux groupes : asymétriques et hautement asymétriques. Les polymères semi-cristallins sont classés en trois groupes : faiblement symétriques, quasi symétriques et parfaitement symétriques.

Le tableau 2 montre que la valeur de μ_k pour les matières thermorigides asymétriques est généralement élevée (en particulier pour celles contenant des charges de cellulose) et voisines de 0,5.

Pour les matières thermoplastiques, μ_k décroît lorsque la symétrie croît. On peut donc conclure que, dans le frottement des plastiques sur l'acier, la valeur de μ_k n'est pas seulement influencée par leur énergie de cohésion molaire ou leur contrainte de cisaillement, mais aussi grandement affectée par la morphologie et en particulier la symétrie de leurs molécules.

2.1.2 Masse moléculaire

L'effet de la masse moléculaire des hauts polymères sur leur coefficient de frottement a été étudié pour le polyéthylène haute densité. Les échantillons examinés avaient respectivement pour masse moléculaire : 60 000, 90 000 et 150 000 (Sholex® 6120 V, 6040 V et 6002 B de la compagnie japonaise Showadenko).

Les coefficients de frottement de glissement μ_k entre l'acier et les échantillons de plastique moulés par injection ont été mesurés à l'aide d'un tribomètre Suzuki (figure 5) et d'un appareil constitué d'un disque d'acier et d'une plaque de plastique (utilisé par l'Université de Liège).

Le premier appareil a été employé avec une pression de 0,57 MPa et une vitesse de 60 cm/s ; le second avec une charge normale de 10 N et la même vitesse.

La figure 6 montre les relations entre μ_k et la masse moléculaire M .

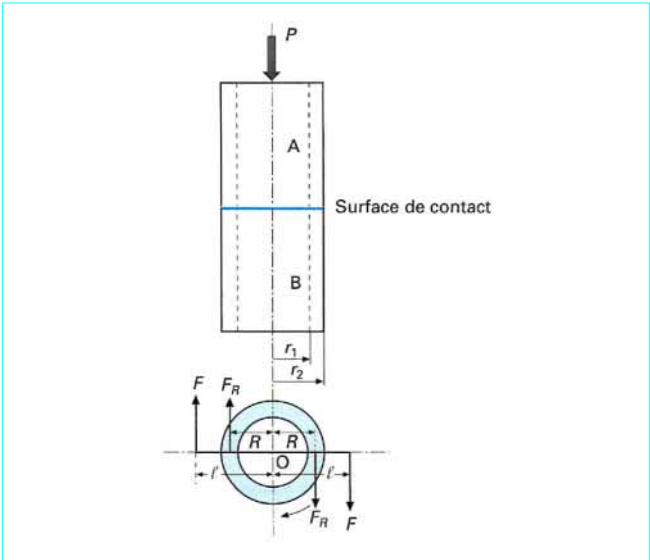


Figure 5 – Contact entre les extrémités de deux tubes cylindriques : tribomètre Suzuki

2.2 Super-structure

2.2.1 Structure cristalline

Comme le montre le tableau 3, les taux de cristallinité du PE et du PET varient respectivement de 47 à 53 % et de 42 à 50 %, suivant qu'ils sont trempés ou recuits après leur moulage par injection.

La figure 7 présentant la relation existant entre μ_k et le taux de cristallinité permet de constater que le coefficient de frottement de ces deux polymères décroît quand le degré de cristallinité croît.

2.2.2 Orientation moléculaire

Des éprouvettes, comme celle présentée sur la figure 8a, ont été étirées dans la direction YY' avec des allongements compris entre 100 et 300 % à température modérée pour obtenir différentes orientations moléculaires. Des échantillons ont ensuite été prélevés dans les éprouvettes étirées (figure 8b) :

- A dans le sens YY' ;
- B dans le sens XX'.

Tableau 3 – Influence de la méthode de refroidissement sur le taux de cristallinité

Matériau	Méthode de refroidissement	Taux de cristallinité (%)	Densité
PE	Recuit : 22 h à 129 °C.....	53	0,977
	Refroidissement sur place : 2 h à 120 °C.....	54	0,981
	Refroidissement à l'air froid.....	50	0,961
	Refroidissement à l'eau froide (0 °C)	47	0,950
PET	Recuit : 22 h à 315 °C.....	50	2,172
	Refroidissement à l'air froid.....	46	2,157
	Refroidissement à l'eau froide (0 °C)	42	2,135

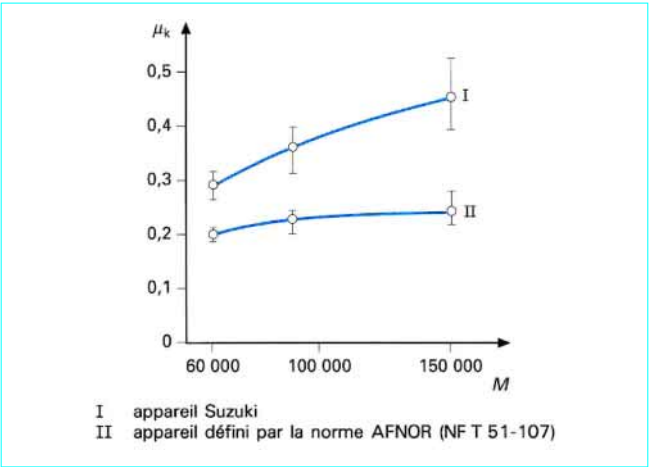


Figure 6 – Effet de la masse moléculaire sur le coefficient de frottement cinétique du polyéthylène (PE)

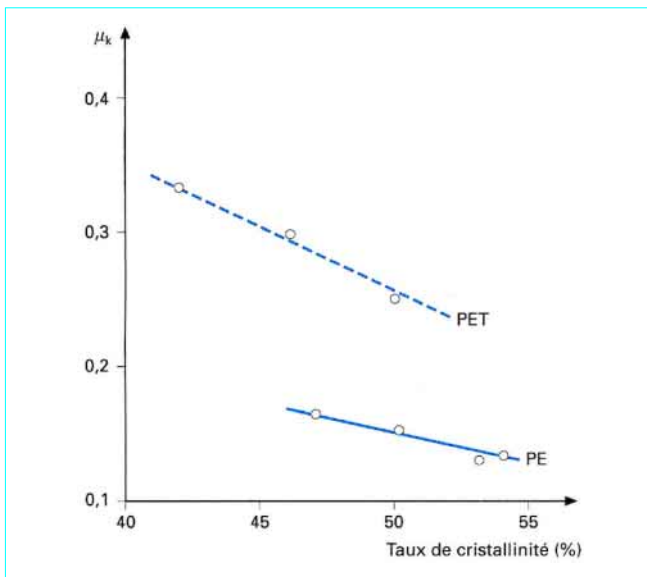


Figure 7 – Variation du coefficient de frottement cinétique avec le taux de cristallinité

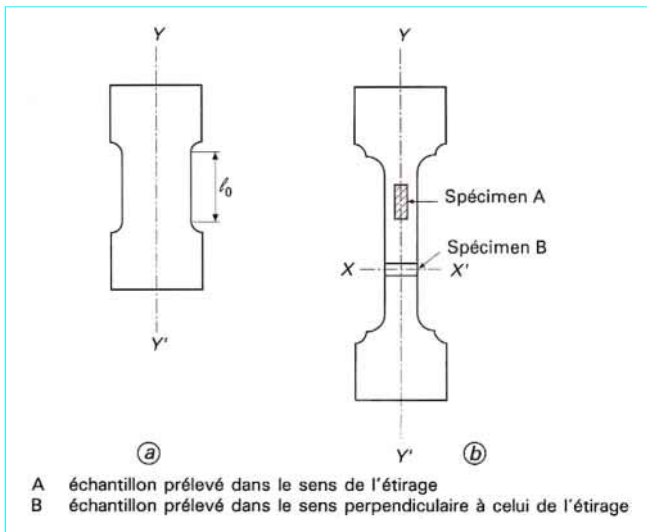


Figure 8 – Échantillon avant et après étirage

L'allongement relatif ϵ , exprimé en pour-cent, est donné par la relation :

$$\epsilon = [(\ell' - \ell_0) / \ell_0] \times 100 \quad (10)$$

où ℓ_0 et ℓ' sont les longueurs de l'échantillon respectivement avant et après étirage.

Le degré d'orientation π (%) des chaînes est obtenu à l'aide d'un microphotomètre, en faisant une détermination densitométrique du cliché de Debye-Scherrer avant et après étirage (figure 9) :

$$\pi = [(180 - \alpha) / 180] \times 100 \quad (11)$$

avec α amplitude (en degrés) à mi-hauteur du diagramme.

La figure 10 montre la relation entre μ_k et le degré d'orientation π (%) ou le degré de cristallinité χ (%) accru par un étirage de 200 % à 100 °C pour la direction d'étirage X' et la direction perpendiculaire Y' .

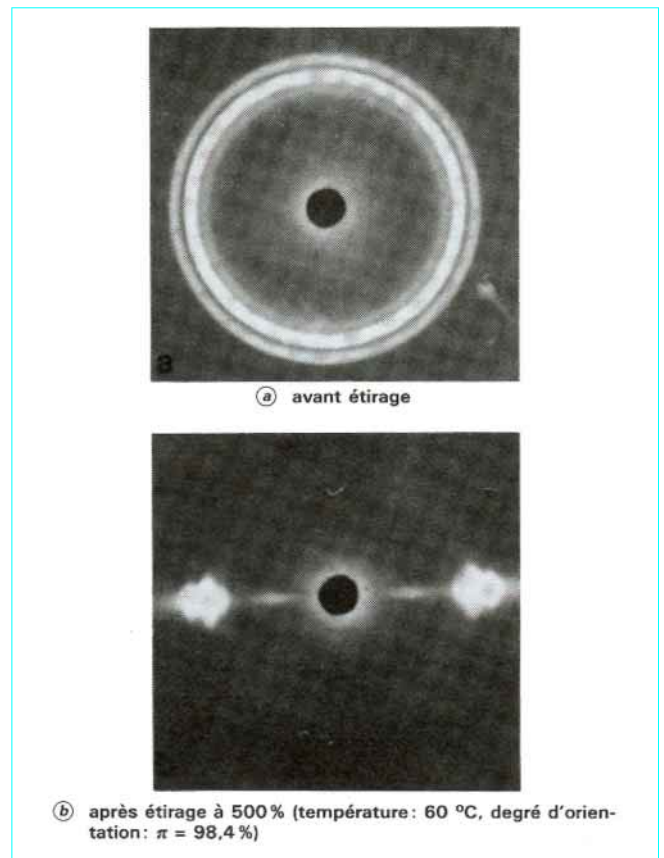


Figure 9 – Cliché de diffraction X avant et après étirage de polyéthylène haute densité

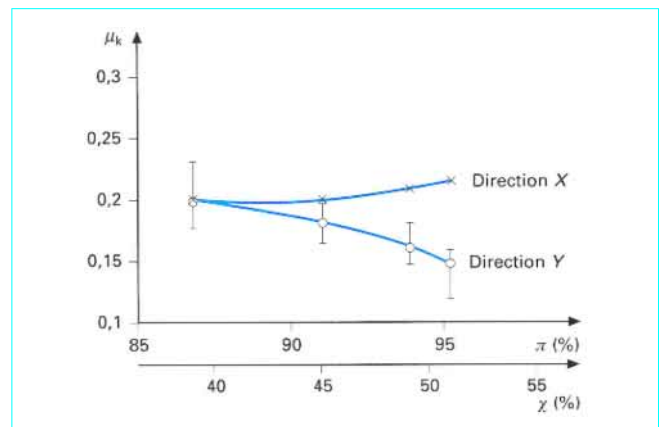


Figure 10 – Variation du coefficient de frottement cinétique avec le degré d'orientation et le degré de cristallinité d'un polyéthylène étiré, suivant la direction de prélèvement des échantillons [(figure (8))]

La figure 11 montre l'effet de l'étirage sur μ_k en considérant les deux directions (parallèle et perpendiculaire à la déformation) et des éprouvettes de PC et de PA 6.

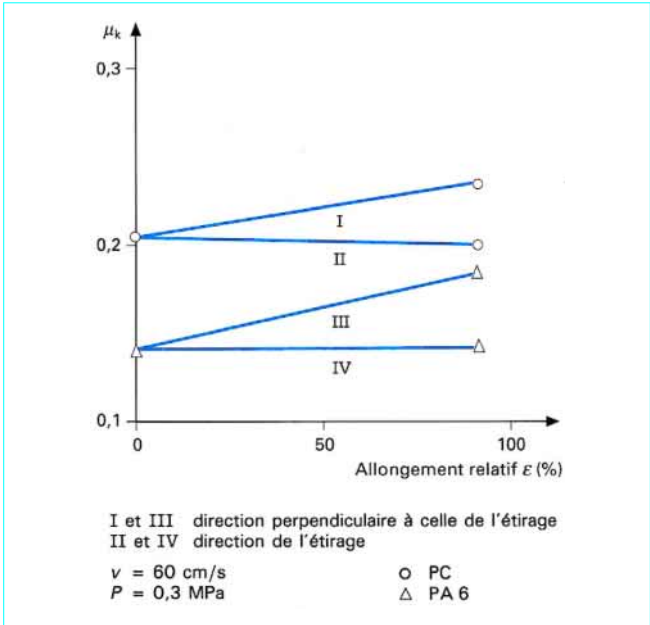


Figure 11 – Effet de l'étirage sur μ_k pour le polycarbonate (courbes I et II) et le polyamide 6 (courbes III et IV)

On voit dans les deux cas que μ_k décroît ou reste constant pour des échantillons prélevés dans le sens de l'étirage et augmente pour la direction perpendiculaire à la déformation quand cette dernière croît.

Le lecteur trouvera en bibliographie des résultats de recherches concernant l'effet de la masse moléculaire sur le comportement tribologique [10] [11] et sur l'influence du degré de cristallinité [11] [12] [13] [14].

3. Aspect pratique du frottement

3.1 Coefficient de frottement

Les caractéristiques de frottement sont couramment décrites par deux coefficients de frottement : statique (μ_s) et cinétique (μ_k). C'est le second qui est le plus employé.

De nombreuses études expérimentales du coefficient de frottement des plastiques ont déjà été présentées par différents chercheurs [15] [16] [17] [18] [19] [20].

Le coefficient de frottement dynamique, dans un glissement à sec (sans lubrification), est affecté par un nombre de paramètres plus important que le coefficient de frottement statique et a peu de signification sans une définition précise des conditions de frottement.

Les principaux paramètres qui interviennent sont :

- la structure interne ;
- la pression de contact ;
- la vitesse de glissement ;
- la température et l'humidité ;
- la rugosité de surface ;
- le matériau au contact.

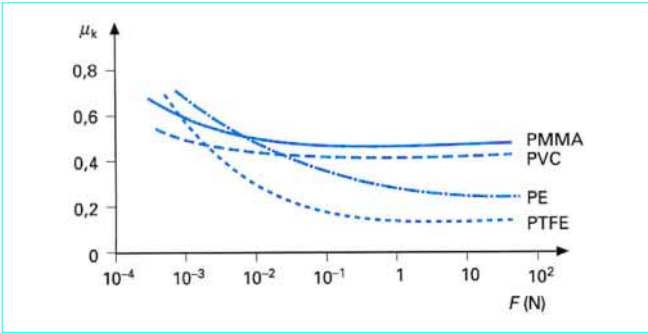


Figure 12 – Variation de μ_k avec la force de contact pour le frottement de divers plastiques sur de l'acier

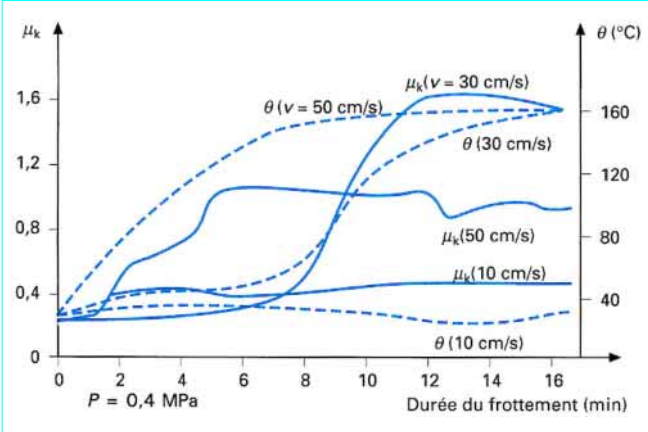


Figure 13 – Variations de μ_k et θ avec la durée de frottement pour un polyamide

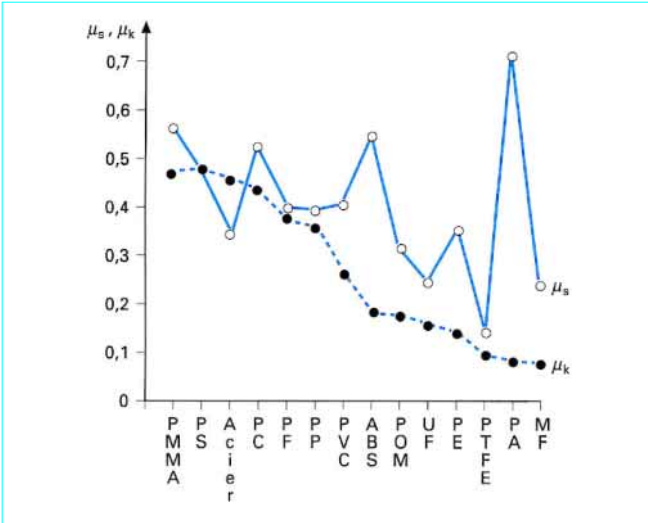


Figure 14 – Comparaison des coefficients μ_s et μ_k pour différents matériaux

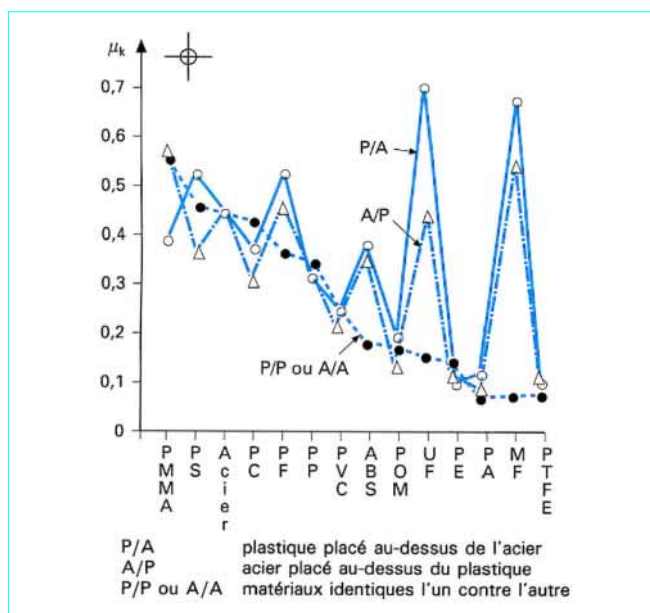


Figure 15 – Comparaison des valeurs du coefficient μ_k pour des essais de frottement métal/plastique, métal/métal et plastique/plastique

L'influence de la structure a déjà été analysée. La dépendance de la pression de contact a donné lieu à un examen théorique au paragraphe 1.1. La figure 12 donne un exemple de la relation entre μ_k et la pression de contact [21]. On voit que la valeur de μ_k décroît lorsque la pression de contact augmente pour tous les plastiques, comme le prévoit la théorie.

La température et la rugosité de surface semblent être affectées par la vitesse de glissement, la pression de contact et la durée du frottement. La figure 13 présente, pour un couple de frottement : polyamide-acier, les relations entre μ_k ou la température θ et la durée de frottement pour chaque vitesse de glissement. On peut voir que μ_k dépend davantage de la température tandis que la durée et la vitesse de glissement interviennent de façon plus complexe à cause de la discontinuité liée à la température de transition vitreuse T_v .

3.2 Valeurs expérimentales de μ_s et de μ_k

Les résultats examinés ici proviennent du laboratoire de l'auteur. Les valeurs de μ_s de différents plastiques ont été obtenues à partir de la mesure de la tangente de l'angle d'inclinaison qui entraîne le glissement entre les matériaux au contact, en faisant croître l'angle à raison de $1,13^\circ$ par seconde sous une pression verticale de 0,3 kPa à 20 °C et 60 % HR (humidité relative).

Les valeurs de μ_k résultent de l'utilisation du tribomètre présenté sur la figure 5 et en faisant appel à la relation suivante :

$$\mu_k = F_R / F = 3F\ell (r_2^2 - r_1^2) / (F(r_2^3 - r_1^3)) \quad (12)$$

Le tableau 4 donne les valeurs de μ_k pour différents couples de matériaux associant 13 types de plastiques à une surface en acier avec une pression de contact de 0,083 MPa, une vitesse de glissement de 6,2 cm/s, une température ambiante de 20 °C et 60 % HR.

La figure 14 compare les valeurs de μ_k et μ_s des mêmes matériaux que ceux du tableau 4, et l'on peut constater que μ_k est généralement plus faible que μ_s et compris entre 0,08 et 0,45.

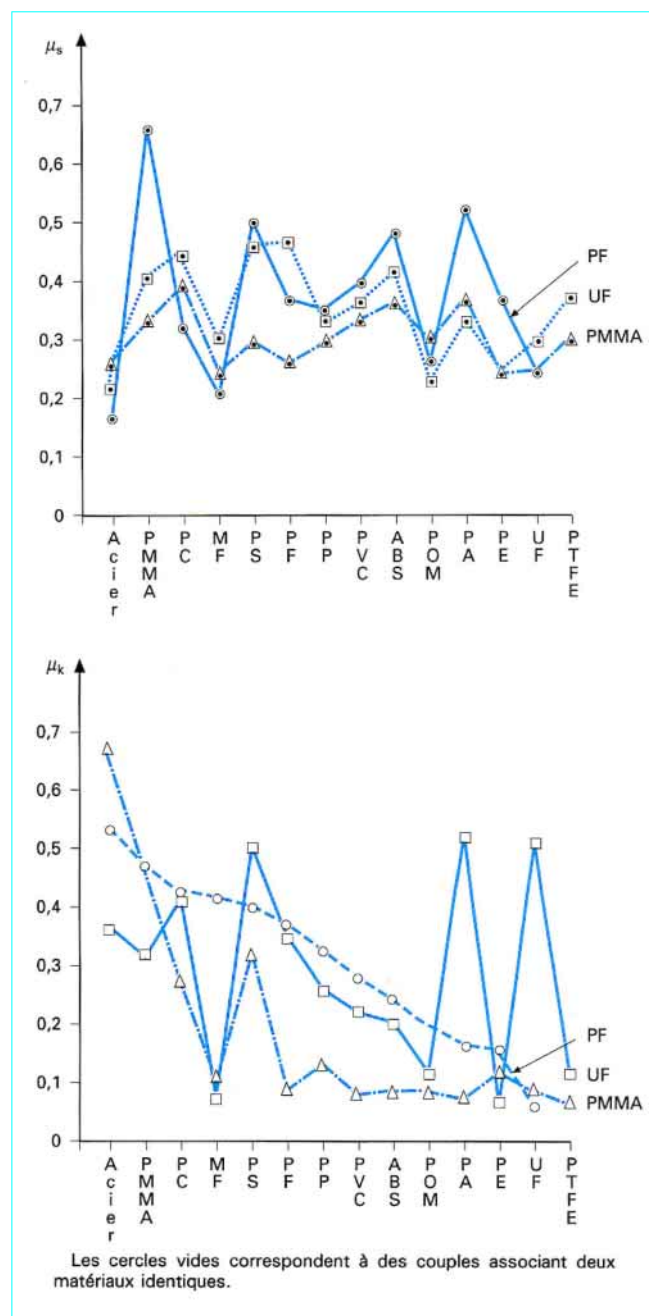


Figure 16 – Coefficients de frottement de plastiques avec d'autres matériaux

La figure 15 établit une comparaison des valeurs de μ_k relatives à des couples acier-plastiques quand ils sont étudiés avec l'un des matériaux du couple au-dessus ou en-dessous de l'autre. On peut constater que la position relative des échantillons entraîne quelques différences.

La figure 16 présente les valeurs de μ_k et de μ_s correspondant à trois types de plastiques associés à divers matériaux. Les cercles vides représentent les résultats obtenus avec des couples associant deux matériaux identiques.

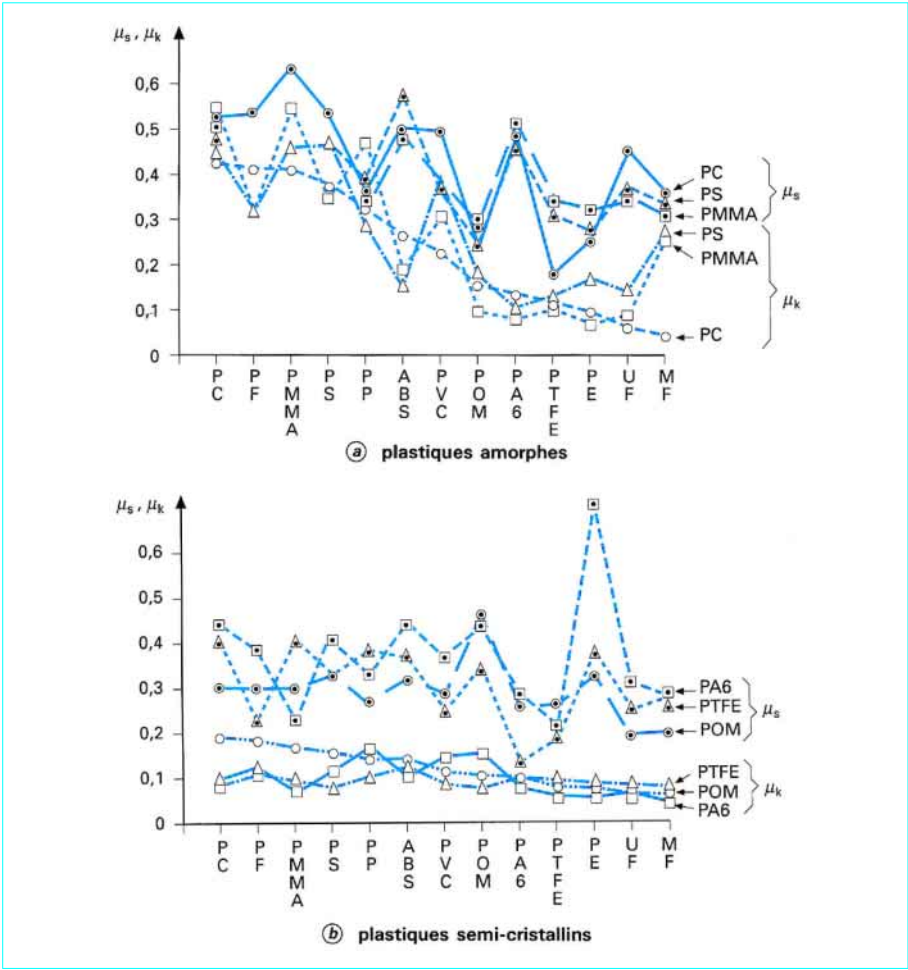


Figure 17 – Coefficients de frottement de quelques plastiques amorphes et semi-cristallins sur différents plastiques

Tableau 4 – Coefficient de frottement cinétique pour différents couples de matériaux (P = 0,083 MPa et v = 6,2 cm/s)																
Dessous		Dessus														
		Acier	PF	MF	UF	PC	PA 6	POM	PMMA	PVC	ABS	PP	PS	PE	PTFE	Moyenne
Acier		0,468	0,524	0,686	0,711	0,362	0,104	0,180	0,385	0,216	0,376	0,316	0,517	0,109	0,100	0,359
Thermo-Durcissables	PF	0,468	0,373	0,083	0,495	0,418	0,514	0,112	0,308	0,200	0,195	0,271	0,503	0,074	0,100	0,261
	MF	0,567	0,397	0,071	0,076	0,028	0,054	0,067	0,260	0,101	0,158	0,065	0,273	0,025	0,082	0,158
	UF	0,453	0,067	0,089	0,153	0,058	0,087	0,071	0,070	0,071	0,282	0,352	0,127	0,075	0,092	0,146
Thermoplastiques	PC	0,302	0,429	0,286	0,486	0,429	0,100	0,195	0,549	0,044	0,487	0,478	0,479	0,088	0,092	0,344
	PA 6	0,192	0,152	0,073	0,101	0,129	0,070	0,074	0,088	0,076	0,191	0,075	0,099	0,066	0,099	0,105
	POM	0,129	0,190	0,090	0,136	0,142	0,092	0,177	0,091	0,124	0,190	0,180	0,161	0,092	0,095	0,134
	PMMA	0,568	0,464	0,470	0,395	0,418	0,168	0,109	0,551	0,386	0,177	0,472	0,452	0,123	0,099	0,436
	PVC	0,219	0,256	0,087	0,110	0,222	0,112	0,143	0,313	0,250	0,216	0,317	0,391	0,088	0,128	0,202
	ABS	0,366	0,229	0,087	0,125	0,269	0,126	0,167	0,185	0,176	0,180	0,213	0,138	0,096	0,100	0,175
	PP	0,300	0,314	0,139	0,308	0,326	0,124	0,188	0,079	0,249	0,316	0,350	0,292	0,133	0,112	0,259
	PS	0,368	0,392	0,310	0,438	0,375	0,171	0,053	0,345	0,333	0,263	0,246	0,467	0,156	0,108	0,274
	PE	0,139	0,147	0,130	0,092	0,090	0,079	0,086	0,068	0,102	0,127	0,122	0,160	0,141	0,106	0,113
	PTFE	0,117	0,075	0,101	0,105	0,094	0,104	0,108	0,097	0,093	0,111	0,106	0,095	0,083	0,092
																0,218
Moyenne		0,331	0,302	0,191	0,264	0,240	0,108	0,190	0,271	0,201	0,232	0,254	0,290	0,104	0,099	0,215

Les figures **17a** et **b** donnent les résultats obtenus de façon similaire, respectivement pour trois types de polymères amorphes et trois types de polymères semi-cristallins.

On peut observer, à partir de ces résultats, que les valeurs de μ_k de matières thermorigides et des polymères amorphes sont en général fortement influencées par la nature du matériau associé, contrairement à celles des polymères semi-cristallins pour lesquels les valeurs sont faibles et comprises entre 0,1 et 0,25. Ces comportements sont en accord avec les observations faites à partir de la structure moléculaire et examinées au paragraphe **2.1**.

4. Valeur limite du facteur pv

Sous la **pression de contact** p , avec la **vitesse de glissement** v et pendant un temps de frottement t , la valeur maximale de pv au-delà de laquelle un plastique ne peut pas continuer de glisser normalement à cause du dégagement de chaleur $pv\mu_k t$ est appelée **valeur limite du facteur pv** ou **pv limite**. Parmi les publications scientifiques concernant cette limite pv des plastiques, on peut citer les références **[22] [23] [24] [25] [26] [27] [28]**.

4.1 Considérations théoriques

Si l'on considère un frottement continu non lubrifié comme dans la figure **18** où les extrémités de deux échantillons cylindriques sous charge constante entraînant une pression p ont une vitesse de frottement v , un coefficient de frottement μ_k et une **aire de glissement** a (cm^2), la chaleur dégagée par seconde est $pv\mu_k a$ (J).

Si la température de la surface de frottement est θ_b ($^{\circ}\text{C}$), la température ambiante ou la température de refroidissement θ_a ($^{\circ}\text{C}$), l'**aire de dissipation de chaleur** A (cm^2) et le coefficient de transfert de chaleur moyen : h ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), la **quantité de chaleur dissipée** devient $hA(\theta_b - \theta_a)$ ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$). Quand l'équilibre thermique est atteint :

$$pv\mu_k a = hA(\theta_b - \theta_a)$$

$$pv = [hA/(\mu_k a)](\theta_b - \theta_a)$$

écrivons que

$$A/a = n$$

alors

$$pv = (hn/\mu_k)(\theta_b - \theta_a) \quad (13)$$

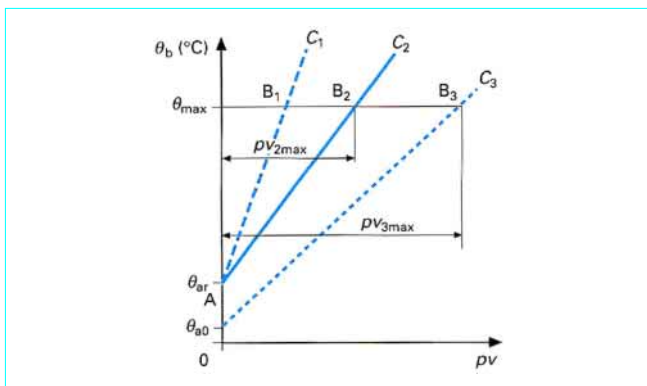


Figure 18 – Variation de la température θ en fonction du produit pv

On peut définir un coefficient C en écrivant :

$$hn/\mu_k = C(\text{MPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$$

l'équation (13) devient alors :

$$pv = C(\theta_b - \theta_a) \quad (14)$$

Cette relation entre pv et θ_b ou $(\theta_b - \theta_a)$ est représentée sur la figure **18**. θ_{ar} est la température ambiante et θ_{a0} celle de l'eau de refroidissement. Si la chaleur peut être dissipée à la température ambiante θ_{ar} avec le coefficient pression-vitesse : $C_2 = hn/\mu_k$, la relation $[pv - (\theta_b - \theta_a)]$ est représentée par la droite AB_2 . La longueur de la ligne horizontale ayant pour ordonnée la température maximale acceptable ou température limite θ_{max} et définie par son extrémité B_2 correspond à pv_{2max} .

Avec une valeur de h ou de n plus petite, ou avec un μ_k plus élevé, C devient $C_1 < C_2$; dans ce cas, la relation ci-dessus est représentée par la ligne AB_1 .

Avec un coefficient de refroidissement plus élevé, fondé sur l'utilisation d'eau à température plus basse que la température ambiante, C devient $C_3 > C_2$; dans ce cas le pv limite est pv_{3max} .

4.2 Expérimentation et résultats

Le tribomètre de la figure **19** est utilisé avec une eau de refroidissement à différentes températures (2, 16 et 50°C) et des métaux (échantillon fixe) possédant des conductivités thermiques différentes [acier (S 45 C), Cu et Zn].

La température est mesurée à l'aide d'un couple thermoélectrique placé dans l'échantillon fixe à 1,5 mm de sa surface. Bien que les températures lues soient inférieures à celles de la surface de frottement d'une quantité dépendant de la conductivité thermique des matériaux utilisés, elles seront considérées comme étant égales à θ_b .

Cinq espèces de plastiques [PF (chargé de farine de bois), ABS, PC, POM et PTFE] ont été utilisées.

Les essais ont porté sur 20 combinaisons :

- **5 paires** : chaque plastique frottant sur lui-même ;
- **15 couples** obtenus avec les cinq plastiques et les trois métaux.

La figure **20** fournit un exemple d'une relation $\theta_b(pv)$ pour le couple POM-acier comme dans la figure **18**.

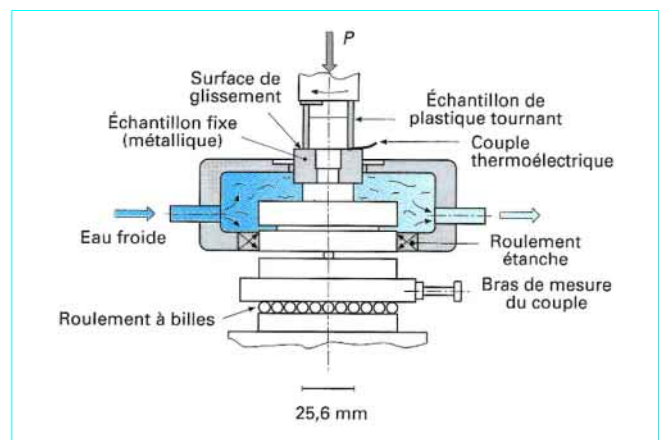


Figure 19 – Tribomètre

Les quatre courbes correspondent à des vitesses de glissement de : 13, 34, 63 et 81 cm/s pour une eau de refroidissement à 2 °C. La droite AB correspond sensiblement à la moyenne de ces quatre courbes.

Les droites moyennes ($p v - \theta_b$) correspondant aux quinze couples précités essayés avec un refroidissement libre sont présentées sur la figure 21. Les croix représentent pour chaque couple la valeur maximale ($p v_{\max}, \theta_{\max}$).

Le tableau 5 donne le coefficient μ_k , θ_{\max} (apparent) et $p v_{\max}$ pour des couples associant les cinq plastiques à eux-mêmes et à des métaux refroidis librement à la température ambiante ou avec de l'eau à 2, 16 et exceptionnellement 50 °C.

La figure 21 et le tableau 5 montrent que l'association du POM et des trois métaux conduit au même θ_{\max} de 100 °C.

Ces résultats sont conformes à la théorie (figure 18). Par contre, avec des matériaux tels que PF, PC et ABS, θ_{\max} n'est pas constant. Quand des plastiques frottent sur eux-mêmes, le θ_{\max} apparent est très bas à cause de la faible déperdition de chaleur.

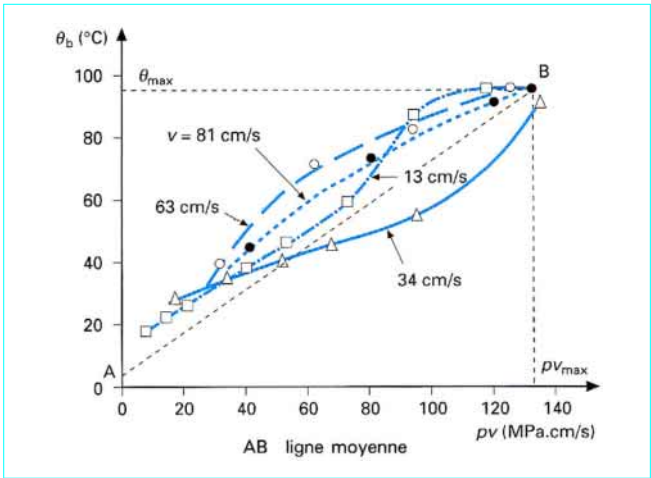


Figure 20 – Variation de θ_b en fonction du produit $p v$ pour le frottement du POM sur de l'acier S 45 C à différentes vitesses de glissement

Le coefficient C du $p v$ limite obtenu à partir des résultats de la figure 21, du tableau 5 et en faisant appel à la relation :

$$C = p v_{\max} / (\theta_b \max - \theta_0)$$

est compris entre 0,1 et 1 MPa · cm · K⁻¹ · s⁻¹ quand le refroidissement se fait à température ambiante.

Pour des frottements sur Cu, Zn et acier S 45 C, les valeurs de C sont plus élevées à cause de la conductivité thermique plus grande du métal.

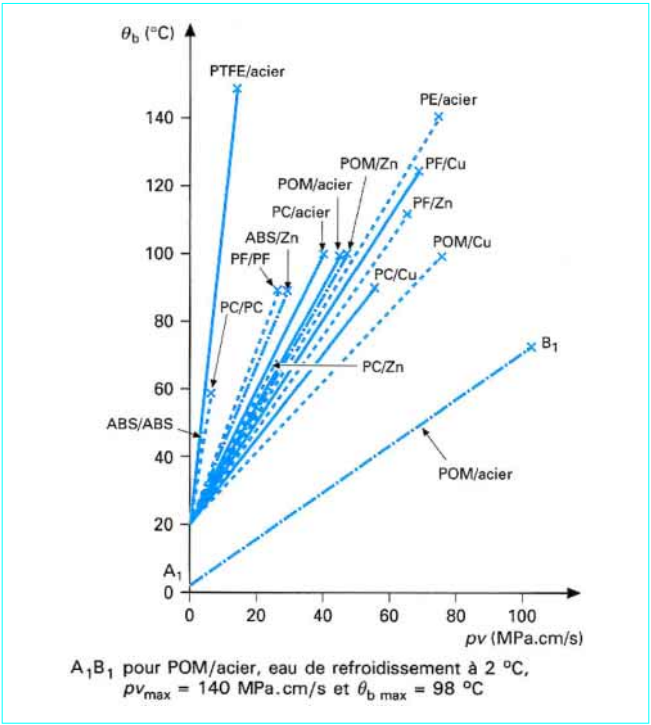


Figure 21 – Variation de θ_b en fonction du produit $p v$ pour divers couples de matériaux à température ambiante

Tableau 5 – Valeurs de $p v_{\max}$, θ_{\max} et μ_k et pour différents couples de matériaux												
Matériau	Matériau											
	Plastique sur lui-même			Métaux								
				Acier			Cu			Zn		
	$p v_{\max}$ (MPa · cm/s)	θ_{\max} (°C)	μ_k	$p v_{\max}$ (MPa · cm/s)	θ_{\max} (°C)	μ_k	$p v_{\max}$ (MPa · cm/s)	θ_{\max} (°C)	μ_k	$p v_{\max}$ (MPa · cm/s)	θ_{\max} (°C)	μ_k
PTFE	1,2 à 1,9	–	0,1 à 0,2	23 °C : 1,0 à 1,35	100 à 150	0,2 à 0,28	1,2 à 1,6	120	0,12 à 0,38	0,96 à 1,35	110 à 140	0,11 à 0,34
PF (chargés de tissus)	22	90	0,1 à 0,3	(1) 2 °C : 85 23 °C : 75 (1) 50 °C : 31	140 140 140	0,16 à 0,33	85	105	0,12 à 0,28	63	110	0,13 à 0,32
POM	5	55	0,2 à 0,28	(1) 2 °C : 140 (1) 16 °C : 82 23 °C : 56 (1) 50 °C : 24	95 100 100 100	0,14 à 0,4	100 70	105 110	0,18 à 0,3	38	105	0,1 à 0,4
PC	4,6	60	0,1 à 0,6	23 °C : 46	100	0,17 à 0,35	58	90	0,18 à 0,3	30	75	0,14 à 0,5
ABS	3,5	45	0,22 à 0,6	23 °C : 50	85	0,2 à 0,4	55	90	0,23 à 0,4	36	90	0,3 à 0,45

(1) Refroidissement à l'eau.

Comme le montre la figure 21, lorsque le refroidissement est assuré par de l'eau à 2 °C, la combinaison POM-S 45 C conduit à une valeur de C égale à environ 1,4, sensiblement 2,3 fois plus grande que celle résultant d'un refroidissement libre : 0,6 MPa · cm/(s · K) et par là même à un $p v_{\max}$ sensiblement augmenté.

La résine thermorigide PF a un $p v_{\max}$ relativement grand, à cause de son θ_{\max} élevé, bien que C ne soit pas particulièrement grand.

5. Amélioration des propriétés tribologiques des plastiques

On peut améliorer les propriétés frottantes des plastiques de trois façons différentes :

- en modifiant leur structure moléculaire ou leur super-structure ;
- en faisant appel à des mélanges avec d'autres polymères ;
- en ajoutant certaines charges aux polymères.

Nous ne considérons ici que les deux dernières possibilités.

5.1 Mélanges de polymères

Le premier exemple [29] montre les effets du mélange ternaire : PS, SAN et PB sur les caractéristiques tribologiques. La figure 22 traduit les relations entre μ_s ou μ_k pour des mélanges PS + PB ou PS + SAN aux taux de 10, 20 et 30 % de PB (en masse).

On peut voir que μ_s décroît faiblement quand le taux de PB augmente, tandis que μ_k décroît brutalement jusqu'à une valeur minimale atteinte pour environ 10 % de PB. D'autre part, le taux d'usure spécifique V_s ($\text{cm}^3 \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$) décroît aussi d'une façon notable avec la teneur en polybutadiène.

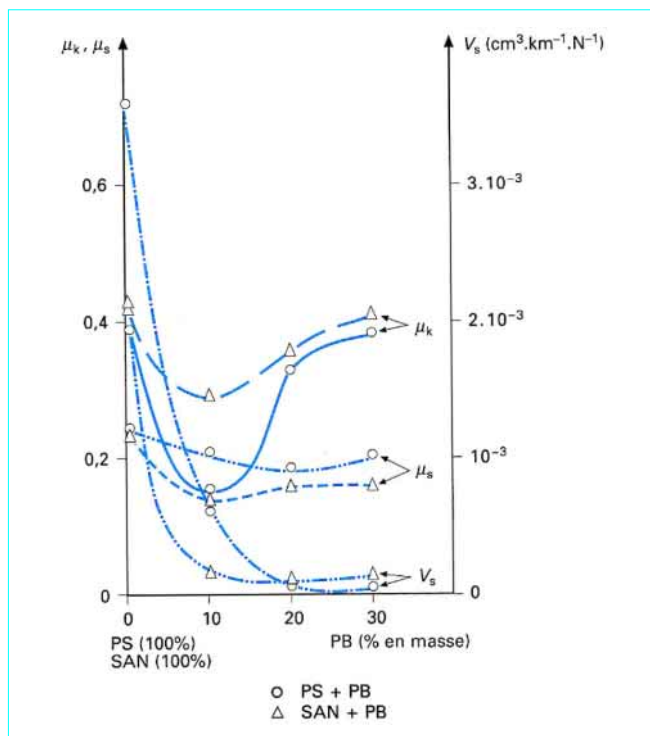


Figure 22 – Variations de μ_k , μ_s et V_s dans des mélanges PS + PB et SAN + PB

Le second exemple [30] est celui du mélange de PA 6 avec le PTFE ou le PB. La figure 23 représente la variation de μ_k avec la pression de contact p pour 100 % de PA et pour le mélange avec 10 % de PB ou 20 % de PTFE. On peut noter que les valeurs de μ_k décroissent lorsque le PA est mélangé avec le PTFE ou le PB et qu'à la vitesse de frottement de 80 cm/s la pression limite est 0,48 MPa pour le PA pur et 1,1 MPa pour les deux mélanges, de sorte que les valeurs de $p v_{\text{limite}}$ sont respectivement 46,4 et 88,0 MPa · cm/s.

On voit donc l'influence de ces mélanges sur μ_k et sur $p v_{\max}$.

5.2 Composites

Les polymères et les charges utilisables pour des applications tribologiques sont nombreux et le choix de leur combinaison optimale pour une application donnée est loin d'être simple. Nous nous limiterons ici à deux exemples de composites dont la matrice est du PI (polyimide) ou du PPS [poly(sulfure de phénylène)].

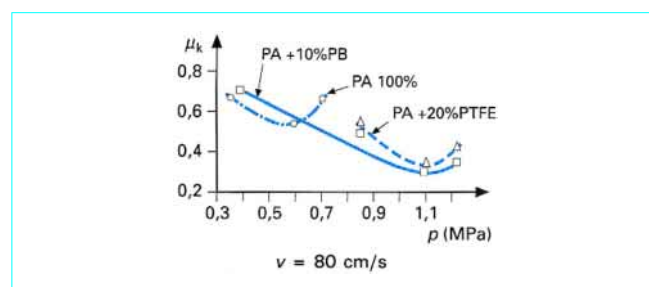


Figure 23 – Variation du coefficient μ_k en fonction de la pression de contact p pour le polyamide et des mélanges PA + PB ou PA + PTFE

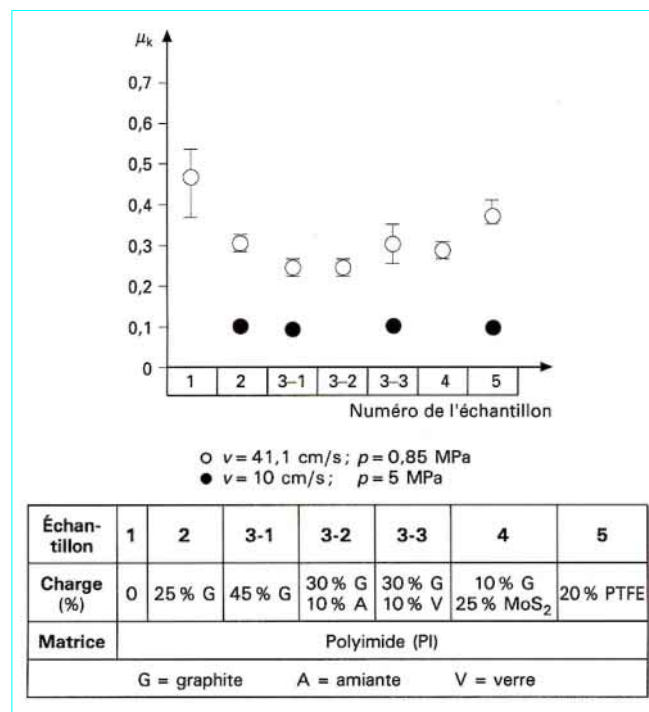


Figure 24 – Valeur du coefficient μ_k de composites à matrice polyimide dans des essais de frottement sur de l'acier, pour différentes valeurs de p et v

Le premier exemple [31] est celui d'un PI chargé de fibres de verre (F), de graphite (G), d'amiante (A), de disulfure de molybdène (MoS₂) et de PTFE.

La figure 24 présente les valeurs de μ_k de chaque composite frottant sur de l'acier avec $v = 41$ cm/s et $p = 0,85$ MPa, ou $v = 10$ cm/s et $p = 5$ MPa. Ces courbes indiquent que les valeurs de μ_k des composites sont plus faibles que celles des polyimides non chargés et plus petites pour les valeurs de p élevées que pour les basses.

Le deuxième exemple [32] concerne les composites réalisés avec du PPS et différentes charges. La figure 25 montre la relation existant entre μ_k et la température de surface pour trois types de composites : A, B et C. On peut voir que la valeur de μ_k qui présente un maximum pour une température voisine de 180 °C est comparativement faible entre 50 et 100 °C. On peut noter, en particulier, que pour le composite C, elle est voisine de 0,09.

Le tableau 6 donne les valeurs de μ_k , celles du p limite.

Tableau 6 – Coefficients de frottement et p limite de divers composites			
Matériau (PPS + charge) (1)	μ_s (sur l'acier)	μ_k	p limite (MPa · cm/s)
Non chargé	0,333		
G : 40 %	0,311	0,2 à 1,10	47,8
G : 40 % ; PTFE : 10 %		0,14 à 0,47	84,3
V : 30 % ; PTFE : 15 %		0,24 à 0,72	84,7
G : 10 % ; A : 40 %			103,7
C _f : 30 % ; PTFE : 15 %		0,15 à 0,61	92,5
M : 33 % ; S : 27 %		0,25 à 0,90	63,0
M : 17 % ; S : 20 % ; C _f : 18 %		0,09 à 0,8	91,3
M : 20 % ; S : 17 % ; V : 20 %		0,31 à 0,80	35,4

(1) A = amiante ; C_f = fibre de carbone ;
G = graphite ; V = fibre de verre ; M = MoS₂ ; S = Sb₂O₃.

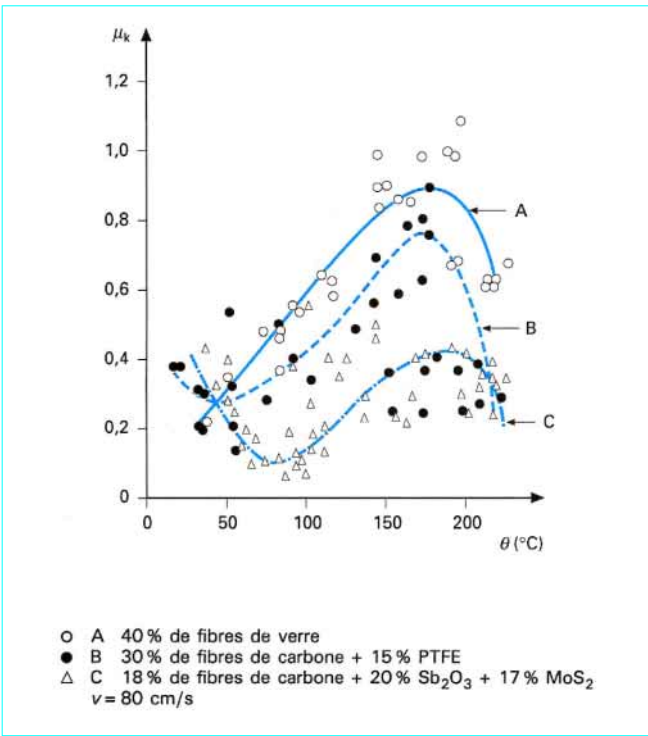


Figure 25 – Variation du coefficient μ_k en fonction de la température pour divers composites

Références bibliographiques

[1] BOWDEN (F.P.) et TABOR (D.). – *The Friction and Lubrication of Solids*. Part II. Oxford Clarendon Press, p. 214-241 (1964).

[2] TABOR (D.). – *Advances in Polymer Friction and Wear*. Vol. 5A, Plenum Press, p. 5-30 (1974).

[3] LEE (L.H.). – *Advances in Polymer Friction and Wear*. Vol. 5A, Plenum Press, p. 31-68 (1974). LEE (L.H.) Poly. Sci. Tech. 5A, p. 33 (1974).

[4] MEYER (E.). – VDI 52, p. 649 (1899).

[5] HERTZ (H.). – *Reine Angew. Math.* 92, p. 156 (1881).

[6] PASCOE (M.W.) et TABOR (D.). – *Proc. Phys. Soc.* A235, p. 210 (1956).

[7] *Materials and Testing*. Soc. Mat. Sci. Jap., p. 23 (1975).

[8] KWAI (R.). – *Kobunshi* 6, p. 348 (1957).

[9] YAMAGUCHI (Y.). – *Tribology of Plastic Materials*. Elsevier, p. 44 (1990).

[10] TANAKA (K.) et UCHIYAMA (Y.). – *J. JSLE* 19, p. 828 (1974).

[11] PRATT (G.C.) et BRAITHWAITE (E.P.) (ed.). – *Lubrication and Lubricant*. Elsevier Amsterdam, p. 377 (1967).

[12] LONTZ (J.F.) et KUMICK (M.C.). – *ASLE Trans.* 6, p. 276 (1963).

[13] BELY (V.A.) et SAVKIN (V.G.) SVIRIDYONOK (A.I.). – *Wear* 18, p. 11 (1971).

[14] TANAKA (K.) et UCHIYAMA (Y.). – *Wear* 23, p. 153 (1973).

[15] SHOOTER (K.V.) et RABINOWICZ. – *Proc. Phys. Soc. B65*, p. 671 (1952).

[16] MATSUBARA (K.). – *Report of Kikaishikensho* 52 (1963).

[17] SADA (T.) et MIZUNO (M.). – *Report of Kaken* 33, p. 54 (1957).

[18] TANAKA (K.). – *JSLE* 12, p. 31 (1967) et 14, p. 33 (1969).

[19] FLOM (D.G.) et PORILE (N.T.). – *J. Appl. Phys.* 26, p. 1 088 (1955).

[20] SIELGOFF (G.L.) et KUUSMA (M.E.). – *J. Appl. Phys.* 34, p. 342 (1963).

[21] SHOOTER (K.V.). – *Proc. Roy. Soc.* 212 (1952).

[22] LOMAX (J.Y.) et O'ROURKE (J.T.). – *Machine Design* 23 (1966).

[23] AWAYA (J.) et KIMURA (R.). – *Trans. JSME* 34 (260), p. 569 (1968).

[24] TAKANO (K.), KWANISHI (T.) et OKADA (T.). – *Plastics*. 20 (3), p. 37 (1969).

[25] LEWIS (R.B.). – *J. Amer. Soc. Lub. Eng.* 356 (1969).

[26] YAMAGUCHI (Y.) et SEKIGUCHI (I.). – *Goseijushi* 17 (9), p. 49 (1971).

[27] MIYAKE (S.) et KATAYAMA (Y.). – *J. JSLE* 18, p. 404 (1973).

[28] YAMAGUCHI (Y.) et KASHIWAGI (K.). – *Poly. Eng. Sci.* 22, p. 248 (1982).

[29] YAMAGUCHI (Y.). – *Lubrication of Plastic Materials*. Nikkan Kogyo Press Co., p. 38-39 (1981).

[30] YAMAGUCHI (Y.) et SEKIGUCHI (I.). – *Proceedings of 3rd int. Solid Lub. Conf. of ASLE*, p. 187 (1984).

[31] YAMAGUCHI (Y.) et SEKIGUCHI (I.). – *JSLE* 22, p. 58 (1977).

[32] YAMAGUCHI (Y.), SEKIGUCHI (I.), TAKANE (S.) et SHIBATA (M.). – *J. JSLE* 25, p. 49 (1980).