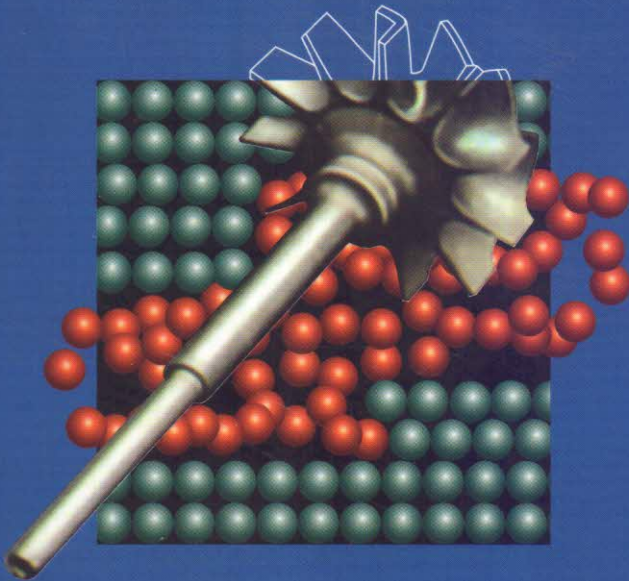


Sciences
et techniques
de l'ingénieur

JEAN-MARIE GEORGES

Frottement, usure et lubrification

La tribologie
ou science des surfaces



SOMMAIRE

Chapitre I – Introduction générale	1
I.1. Qu'évoque le mot tribologie ?	1
I.2. Impacts sur la société	2
I.3. Aspects scientifiques de la tribologie	5
I.4. Organisation de l'ouvrage	6
I.5. Conclusion	9
I.6. Bibliographie	10
I.7. Unités	10
I.7.1. Grandeurs	11
I.7.2. Constantes fondamentales	11
I.7.3. Conversion depuis CGS vers SI	11
I.8. Symboles	12
Chapitre II – Mécanique du contact statique non adhésif	15
II.1. Introduction	15
II.2. Caractéristiques mécaniques des matériaux solides	16
II.2.1. Élasticité	16
II.2.2. Déformations uniformes	18
II.2.3. Cisaillement	20
II.2.4. Essai de traction	23
II.2.5. Modules élastiques des matériaux	25
II.2.6. Comportement	27
II.2.7. Propriétés plastiques	28
II.2.8. Fragilité	30
II.3. Mécanique du contact	36
II.4. Théories élastiques	36
II.4.1. Hypothèses	36
II.4.2. Force ponctuelle sur demi-espace élastique	37

II.4.3. Distribution de la pression de contact	37
II.4.4. Équations du contact	38
II.4.5. Contact circulaire ponctuel	39
II.4.6. Contact linéaire	41
II.4.7. Contact elliptique.....	42
II.4.8. Contraintes dans les solides en contact : cas du contact linéaire	42
II.4.9. Distribution des contraintes dans un contact ponctuel.....	45
II.4.10. Contrainte maximale de cisaillement dans un contact elliptique...	45
II.4.11. Poinçon à base plane	45
II.5. Théories plastiques	46
II.5.1. Seuil de plasticité pour un contact de cylindres.....	46
II.5.2. Seuil de plasticité pour un contact sphère/plan.....	47
II.5.3. Étude expérimentale de la dureté plastique	48
II.5.4. Influence de l'élasticité sur le mode de déformation plastique.....	51
II.5.5. Comportement des matériaux	53
II.6. Les surfaces rugueuses	54
II.6.1. Ordres géométriques	54
II.6.2. Appareils de rugosité du laboratoire	54
II.6.3. Caractéristiques des surfaces rugueuses	55
II.6.4. Portance d'une surface rugueuse	59
II.6.5. Contacts de deux surfaces rugueuses et planes (modèle Greenwood et Williamson 1966).....	60
II.6.6. Surfaces anisotropes.....	63
II.6.7. Contacts élasto-plastiques de surfaces courbes.....	64
II.7. Étude des couches	66
II.7.1. Pourquoi étudier les couches ?	66
II.7.2. Couche élastique (cas du matelas)	67
II.7.3. Couche élastique sur substrat élastique.....	68
II.7.4. Couches plastiques.....	69
II.7.5. Rôle de l'adhérence des couches	71
II.8. Vibrations de contact et résonance non linéaire	75
II.9. Bibliographie	78

Chapitre III – Frottement et usure : aspects macroscopiques	81
III.1. Introduction	81
III.2. Historique	82
III.3. Frottement statique et dynamique	84
III.3.1. Définitions	84
III.3.2. Théorie de Mindlin (1952)	85
III.3.3. Modèle de Bowden et Tabor (1950)	91
III.3.4. Frottement dynamique	94
III.3.5. Températures de frottement	99
III.4. Lois macroscopiques de l'usure	107
III.4.1. Théorie d'Archard	107
III.4.2. Longueurs cinématiques	109
III.4.3. Abrasion	113
III.4.4. Effet de rochet (selon Kapoor, Johnson et Williams 1995)	124
III.4.5. Analyse du « troisième corps » (Godet et Berthier, 1985)	129
III.5. Bibliographie	131
Chapitre IV – Surfaces et interfaces	133
IV.1. Introduction	133
IV.2. Les surfaces	134
IV.3. Énergie de surface et adhésion	137
IV.3.1. Tension superficielle d'un liquide	137
IV.3.2. Adhésion	142
IV.4. Le mouillage	148
IV.4.1. Angles de contact	148
IV.4.2. Équation de Young-Dupré	150
IV.4.3. Coefficient d'étalement	151
IV.4.4. Épaisseur critique	152
IV.4.5. Mesure des tensions de surface	152
IV.4.6. Tension critique de mouillage pour un solide	155
IV.4.7. Relation de Fowkes	157
IV.4.8. Dynamique de mouillage	160

IV.5.	Pression de disjonction	162
IV.5.1.	Définition	162
IV.5.2.	Les interactions de van der Waals	167
IV.6.	Adhérence et contacts adhésifs	172
IV.6.1.	Taux de restitution de l'énergie	173
IV.6.2.	Le pelage	176
IV.6.3.	Le test de clivage	177
IV.6.4.	Dynamique de l'adhésion	179
IV.6.5.	Forces d'adhésion entre une sphère et un plan	182
IV.6.6.	La rugosité réduit l'adhérence des solides	186
IV.6.7.	Forces d'adhérence visqueuses	187
IV.7.	Méthodes de mesure des forces de surfaces	190
IV.7.1.	Introduction	190
IV.7.2.	Les différents appareillages	190
IV.7.3.	Microscope à force	190
IV.7.4.	Forces de surface SFA	191
IV.7.5.	La machine à forces de surface ECL	192
IV.7.6.	Comportements observés avec un SFA	193
IV.7.7.	Exemples d'études de SFA	198
IV.7.8.	Rôle des micro-ménisques, condensation capillaire	205
IV.8.	Bibliographie	208
Chapitre V – Les lubrifiants		211
V.1.	Introduction	211
V.2.	Une huile lubrifiante	212
V.2.1.	Les bases	212
V.2.2.	Les bases minérales	212
V.2.3.	Les bases synthétiques	214
V.2.4.	Les additifs	215
V.3.	Les graisses	222
V.4.	Les lubrifiants solides	223
V.5.	Le phénomène colloïdal	224
V.6.	Les tensioactifs	225

V.7.	Caractérisation physique d'un polymère	227
	V.7.1. Masses moléculaires.....	228
	V.7.2. La chaîne idéale : la solution diluée	229
	V.7.3. Déviations par rapport à la chaîne idéale	230
V.8.	Les lubrifiants et les surfaces	230
	V.8.1. Vitesse d'adsorption	230
	V.8.2. Énergie d'adsorption	232
	V.8.3. Isothermes d'adsorption	233
	V.8.4. Polymères aux interfaces	235
	V.8.5. Stabilisation stérique dans un lubrifiant	239
V.9.	Bibliographie	243
Chapitre VI – Les films fluides.....		245
VI.1.	Introduction	245
VI.2.	Éléments de rhéologie	246
	VI.2.1. Les viscosités	246
	VI.2.2. Mesures de viscosité	254
	VI.2.3. Viscosité des liquides purs	254
	VI.2.4. Viscosité des suspensions	263
	VI.2.5. Viscosité des polymères en solution.....	269
VI.3.	La lubrification hydrodynamique	272
	VI.3.1. Principes physiques	272
	VI.3.2. Équation de Reynolds	290
	VI.3.3. Extrusion des films minces	292
VI.4.	Lubrification élastohydrodynamique EHD	302
	VI.4.1. Introduction et historique	302
	VI.4.2. Mesures de l'épaisseur des films	304
	VI.4.3. Tribomètre EHD	305
	VI.4.4. Résultats numériques.....	310
	VI.4.5. La sous alimentation.....	312
	VI.4.6. Rôle de la formulation du lubrifiant et des surfaces sur les films EHD	318
	VI.4.7. Courbes de traction	320
	VI.4.8. Glissement dans le contact	324

VI.5. Lubrification mixte	326
VI.5.1. La courbe de Stribeck	326
VI.5.2. Frottements hydrodynamiques	327
VI.6. Plasto-hydrodynamique d'un convergent	337
VI.6.1. Modèle rhéologique du lubrifiant	337
VI.6.2. Relation entre gradient de pression et flux de retour	338
VI.6.3. La zone du convergent	340
VI.7. Bibliographie	343
Chapitre VII – Lubrifications moléculaires	345
VII.1. Présentation	345
VII.2. Lubrification limite	346
VII.2.1. Définitions	346
VII.2.2. Les tribomètres d'études	347
VII.2.3. Le contrôle et la réduction du frottement	349
VII.2.4. La réduction de l'usure	359
VII.2.5. Les conditions extrêmes de contact	368
VII.3. Processus fondamentaux.....	375
VII.3.1. Les trois phénomènes	375
VII.3.2. Les paramètres fondamentaux	376
VII.3.3. La bande de cisaillement	378
VII.4. Frottements limites	384
VII.4.1. Contacts contrôlés par les forces adhésives	385
VII.4.2. Contacts contrôlés par les forces extérieures	395
VII.4.3. Mesures des propriétés mécaniques des films.....	399
VII.5. Dissipations énergétiques et usures	405
VII.5.1. Ordres de grandeur	405
VII.5.2. Processus abrasifs	407
VII.5.3. L'usure corrosive.....	409
VII.5.4. La décomposition moléculaire	410
VII.5.5. Le cisaillement moléculaire	412
VII.5.6. Compétition entre arrachement mécanique et chimique	413
VII.5.7. L'usure par substitution.....	415
VII.5.8. Conclusions.....	416
VII.6. Bibliographie	417