

ANALYSE DES SYSTÈMES TRIBOLOGIQUES

INTRODUCTION

Définitions
Repères chronologiques
Cadre de l'étude

TRIBOLOGIE : DÉFINITION

- **Tribologie**: discipline regroupant les **Sciences** et **Techniques** qui s'intéressent aux **interactions entre surfaces**.

- L'analyse des systèmes tribologiques permet de décrire les **causes**, de quantifier les **effets** et d'évaluer les **conséquences** des phénomènes interfaciaux.
- ⇒ **amplifier** ou **réduire** les effets selon les situations.

- Phénomènes multiphysiques:
 - Physique-chimie
 - Mécanique des solides et fluides
 - Sciences des matériaux
- Thèmes concernés
 - **Contacts**
 - **Frottement**
 - **Usure**
 - **Lubrification**

Interactions complexes et **non linéaires** entre ces phénomènes

Repères chronologiques

- **Préhistoire**: façonnage d'outils et d'armes par frottement et **usure**.
- **3500 av. J.C.**: invention de la roue en Mésopotamie.
- **3000 av. J.C.**: lubrification de contacts en Egypte pour faciliter le déplacement de charges lourdes.
- **1000 av. J.C.**: invention des engrenages en Mésopotamie.
- **95-55 av J.C.**: Lucrèce s'interroge sur les mécanisme d'usure
- **1452-1519**: L. De Vinci s'intéresse au frottement de glissement, de roulement, invente le roulement à billes...
- **1736-1806**: C.A. Coulomb découvre empiriquement les lois du frottement sec
- **1857-1894**: H.R. Hertz énonce la théorie du contact entre deux sphères déformables (contact hertzien)
- **Années 1950-1960**: la tribologie devient une discipline scientifique reconnue.

SYSTEME TRIBOLOGIQUE

ENSEMBLE COMPOSÉ D'ÉLÉMENTS EN INTERACTION STATIQUE OU DYNAMIQUE ORGANISÉS EN FONCTION D'UN OBJECTIF:

- GUIDAGE (Paliers, Roulements, Butées...)
- TRANSMISSION DE MOUVEMENT (Came, Poussoir, Linguet...)
- TRANSMISSION D'ÉNERGIE (Engrenages, Courroies...)
- ÉTANCHEITE (Joints...)
- PORTANCE (Roues...)
- MISE EN FORME PAR DÉFORMATIONS (Matrices, Filières...)
- USINAGE (Outil/Pièce ...)
- TRAVAUX DES SOLS (outils agricoles...)

ANALYSE DES SYSTEMES TRIBOLOGIQUES

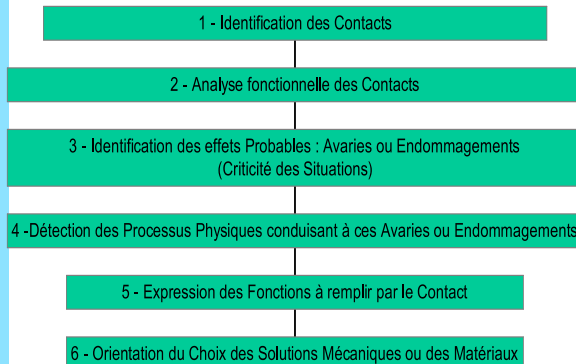
- Complexité des situations et multiplicité des paramètres

Influence variable régie par des lois non linéaires.
Pas de théorie générale complète pour l'instant!

- Orientation du choix des matériaux
Cadre d'analyse ⇒ Prise en compte des **facteurs les plus critiques**

Principaux paramètres ⇒ **effets**
Principaux modes d'usure ⇒ **Endommagement des surfaces**

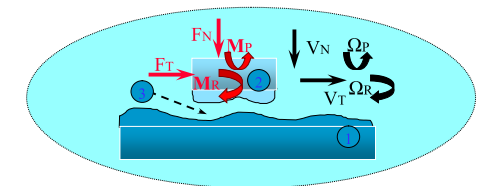
ANALYSE DES SYSTEMES TRIBOLOGIQUES



Utilisation de l'analyse des systèmes tribologiques

- 1 - Dimensionnement/vérification.
- 2 - Expertise d'endommagements ou avaries. subis par des surfaces en contact.
- 3 - Développement d'une simulation expérimentale ou d'une campagne d'essais

DÉFINITION D'UN CONTACT



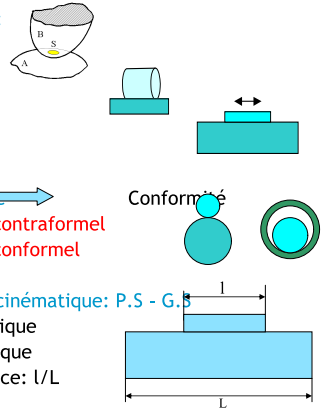
Variables opérationnelles	Phénomènes résultants	Processus de l'usure
Mode de contact	Résistance au déplacement	Adhésion
Etat de surface	Vibrations	Abrasion
Chargement	Phénomènes thermiques	Erosion (cavitation)
Cinématique	Transformations superficielles	Déformation
Ambiance	Transformations structurales	Fatigue de contact (Fretting)
Matériaux	Pertes de matière	Corrosion (tribocorrosion)

ANALYSE DES PARAMETRES FONCTIONNELS

- Mode de contact
- Chargement
- Cinématique
- Pression-Vitesse
- Etats de surfaces
- Ambiance
- Thermique du contact

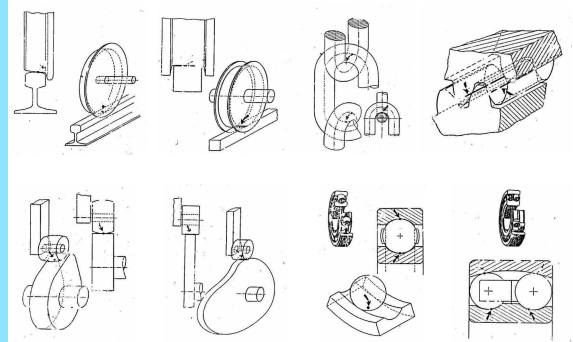
ANALYSE DES PARAMETRES FONCTIONNELS: Mode de contact

- Géométrie du contact:
 - Ponctuel
 - Linéique
 - Surfaccique



- Rayons de courbure:
 - $R_c > 0$ Contact **contraformel**
 - $R_c < 0$ Contact **conformel**
- Notion de surface cinématique: P.S - G.B
- Dissymétrie mécanique
- Dissymétrie thermique
- Fréquence de service: L/L

Exemples de contacts ponctuels ou linéiques



ANALYSE DES PARAMETRES FONCTIONNELS: chargement

Efforts et moments appliqués au contact
Raideurs de liaisons (aspérités) + Géométrie du contact

Contraintes de contact **triaxiales** (1 GPa = 1000 N/mm²)

Résistance mécanique des matériaux (déformations permanentes)

$$\tau < H_B/6 \text{ ou } p < H_B/3$$

Index de Plasticité: $\psi = \frac{E'}{H_R} \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{1/2}$ (Greenwood-Williamson)

- σ = Écart type de la population des sommets d'aspérités
- R = Rayon de courbure moyen des aspérités

$$E' = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}$$

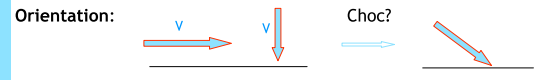
$\psi < 0,6$ Déformation élastique $\psi > 1$ Déformation plastique

Energie dissipée dans le contact: $P = \mu F_N V$ (Watt)

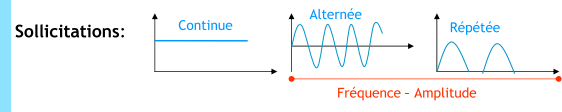
ANALYSE DES PARAMETRES FONCTIONNELS: cinématique

Domaines: 1 $\mu\text{m/s}$ > 100 m/s

Cinématique du mouvement: - Roulement - Glissement - Pivtement



Phases transitoires: **Lubrification ?**



Energie dissipée dans le contact :

Niveau de vitesse agit sur le champ de température:

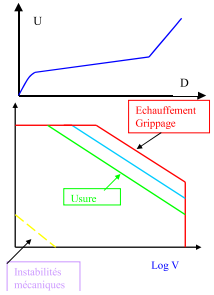
Nombre de PECKET: $P_E = \frac{V a}{\chi}$ avec χ = diffusivité = $\lambda / \rho C$

ANALYSE DES PARAMETRES FONCTIONNELS: interaction pression - vitesse

GLISSEMENT SANS LUBRIFICATION

- Puissance spécifique dépensée** : μPV → Échauffement
 - PV admissibles : Métal/Métal 1 W/mm²
 - Céramique/Céramique 0,4 W/mm²
 - Composites polymères/Métal 2 à 3 W/mm²

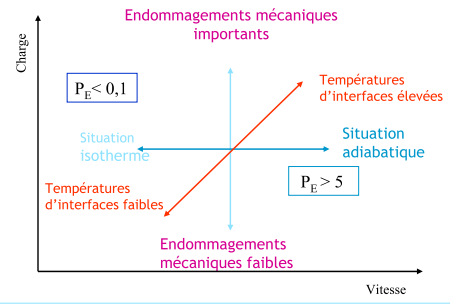
- Usure** : Ex. Loi d'ARCHARD $U = k W D$
 k en mm³/N.m
 $\log U/S = \log P + \log V + \log k$
 $\log P = - \log V + Cte$



- Diagrammes Pression - Vitesse**

ANALYSE DES PARAMETRES FONCTIONNELS: interaction pression - vitesse(2)

Influence combinée charge/vitesse dans le glissement des métaux (HUTCHINGS)



Fatigue thermique - Réactions avec l'environnement - Fusion

ANALYSE DES PARAMETRES FONCTIONNELS: États de surfaces

Aspect microgéométrique :

- Champ de contrainte** : $A_R \approx 1/10$ à $1/100 A_A$
 $p_R \approx 10$ à $100 p_N$
- Lubrification** : Épaisseur de film > Paramètre de rugosité :

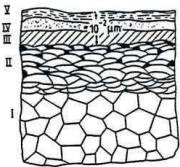
$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}$$
 - $\lambda > 4$ Huile ordinaire
 - $1,5 < \lambda < 4$ Huile + Additif extrême pression
 - $\lambda < 1,5$ Risque d'incident - usure importante

- Rigidité du contact** : Introduction de **non linéarités** dans la réponse vibratoire de la structure

- Echanges thermiques**: les rugosités sont des ponts pour le flux thermique inhomogénéités de température donc de dilatation... contraintes supplémentaires dues à la dilatation différentielle.

ANALYSE DES PARAMETRES FONCTIONNELS: États de surfaces (2)

Aspect physicochimique :



- Couche I : Métal en cours d'écroutissage
- Couche II : Métal écroui (1000 nm)
- Couche III : Film d'oxyde (10 nm)
- Couche IV : Gaz adsorbé (3 nm dont 0.3 nm pour les gaz adsorbés)
- Couche V : film contaminant

Films superficiels:

Les couches superficielles peuvent avoir des propriétés mécaniques et physicochimiques très différentes de celles du substrat

L'action des films de contamination peut être déterminante dans le comportement général du système.

ANALYSE DES PARAMÈTRES FONCTIONNELS: États de surfaces (3)

Aspect énergétique:

L'énergie superficielle (énergie de Dupré) permet d'évaluer l'aptitude à l'adhésion des matériaux: l'énergie gagnée par unité de surface s'écrit :

$$W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (\text{J/m}^2 \text{ ou N/m})$$

Surfaces en contact	Energie superficielle
Métal/métal	1 - 3 J/m ²
Métal/polymère	0,1 - 0,1 J/m ²
Céramique/Céramique	0,1 - 0,5 J/m ²
Céramique/métal	0,2 - 0,4 J/m ²
Polymère/polymère	< 0,1 J/m ²
Polymère/Céramique	0,05 - 0,15 J/m ²

Type de liaison	Energie superficielle
Métallique, covalente	1 à 3 J/m ²
Ionique	0.1 à 0.5 J/m ²
Hydrogène, Van der Waals	0.02 à 0.05 J/m ²

ANALYSE DES PARAMÈTRES FONCTIONNELS: Ambiance

Peut être très variable:

A sec/lubrifié - température - totalement immergé/dans l'air/dans un gaz/dans le vide...

L'ambiance peut avoir une influence déterminante:

- Température, Capacité calorifique, température de vaporisation, mouillabilité...
- Propriétés physicochimiques, réactivité chimique, pH, électronégativité,...
- Son affinité avec les matériaux constituant le contact
- Propriétés mécaniques: Viscosité ...

Contamination : Polluant fluides, gazeux, solides (particules étrangères..)

THERMIQUE DU CONTACT

- FORCE DE FROTTEMENT \Rightarrow DISSIPATION D'ÉNERGIE

- Déformation
- Usure (Arrachements de débris)
- Énergie vibratoire (Bruits)
- Chaleur (\approx 95%)
- Rayonnement

$$E_T = \mu F_N D \quad \text{Energie totale}$$

$$P_S = \mu P V \quad \text{Puissance spécifique (Flux)}$$

$$T_S = T_0 + \Delta T_m + \Delta T_E$$

- T_S = Température de la surface
- T_0 = Température de l'environnement
- ΔT_m = Échauffement moyen dû au fonctionnement antérieur
- ΔT_E = Température éclair (Flash température)

Facteur de frottement

$$\mu = \mu_{\text{potentiel}} + \mu_{\text{déformation}} + \mu_{\text{adhésion}}$$

Valeurs typiques

Couple de matériaux	μ_{statique}	$\mu_{\text{dynamique}}$
Acier/Acier	0.2-0.6	0.2-0.6
Aluminium/Acier	≥ 0.8	≥ 1
Chrome/Acier dur	0.4	0.4
Garniture de frein/acier	0.3-0.4	0.25-0.35
Graphite/Acier	≈ 0.1 (air)	≈ 0.1 (air)
PTFE/Acier	$\approx 0.05-0.1$	<0.1 (V faible)
Caoutchouc/Métal	≈ 1	$\approx 0.5-1.5$
Caoutchouc/Route	≈ 1	0.5-0.6
Bronze au plomb/Acier	≈ 0.2	0.15-0.2
Polyéthylène/Acier	$\approx 0.15-0.2$	0.1-0.15
Acier austénitique/Acier austénitique	$\approx 0.4-0.8$	0.45-0.6

THERMIQUE DU CONTACT

- Température superficielle.

$$T_S = T_0 + \Delta T_m + \Delta T_E$$

- T_S = Température de la surface
- T_0 = Température de l'environnement
- ΔT_m = Échauffement moyen dû au fonctionnement antérieur
- ΔT_E = Température éclair (Flash température)

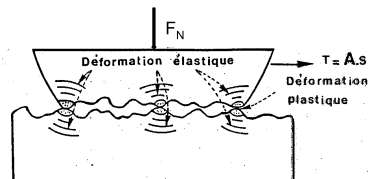
ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE

- Adhésion
- Abrasion
- Erosion
- Tribocorrosion
- Fatigue de contact

ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: Adhésion (1)

Établissement de liaisons entre deux surfaces

- Microjonctions**
- microsoudures
 - Liaisons adhésives
 - Liaisons cohésives



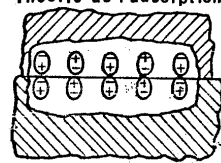
Identification : Transfert de matière Grippage Usure Frottement élevé

ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: Adhésion (2)

MÉCANISMES PHYSIQUES: Théorie de l'adsorption

- **Chimisorption** : Liaisons primaires à courte distance de type métallique, ionique, covalente
 - (BELY - BUCKLEY ...) Métal/Métal
- **Physisorption** : Contact intermoléculaire étroit dû aux forces secondaires à longue distance de type Van der Waals
 - (JOHNSON - KENDALL-ROBERTS)...

Théorie de l'adsorption

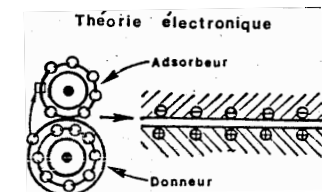


- Céramique/céramique
- Métal/Métal
- Polymère/Métal

ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: Adhésion (3)

MÉCANISMES PHYSIQUES: Théorie électronique

Échanges d'électrons à travers l'interface (DERYAGUINE)
Double couche : \rightarrow forces électrostatiques



Polymère/ Polymère
Polymère/Métal (Métal donneur - polymère récepteur)

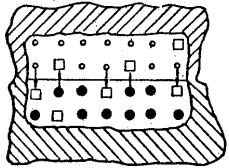
ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: Adhésion (4)

MECANISMES PHYSIQUES: Théorie de la diffusion

Echanges d'atome à l'interface par déformation plastique, par diffusion thermiquement activée, par fluage
(SIKORSKY - RABINOWICZ - GOOZEIT - HUNNICUT...)

Paramètres importants: - Contraintes mécaniques
- Nature et structure des matériaux
- Températures superficielles

Théorie de la diffusion



FONCTION RÉSISTANCE À L'ADHÉSION

Influence des paramètres fonctionnels :

Pression de contact → Déformation

Vitesse → Échauffement

$$T_s = T_a + \Delta T + T_e$$

- Métaux identiques : $T_s < 0,3 \text{ à } 0,4 T_F$
- Métaux différents : $T_s < 0,35 \text{ à } 0,5 T_F$
- Oxydes : $T_s < 0,45 \text{ à } 0,65 T_F$

Influence des matériaux :

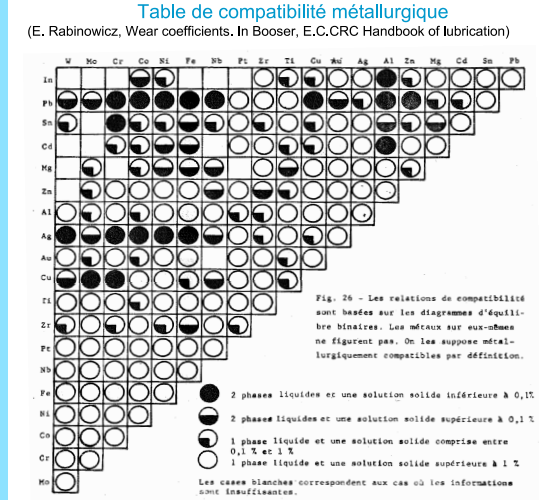
- Réseau cristallin: Cubiques Adhésion réseaux cubiques > Hexagonaux

- Énergie superficielle : Index d'adhésion $\alpha = \frac{E' \sigma_f^2}{W_{12} R^2} \alpha < 5$: Adhésion

- Matériaux incompatibles métallurgiquement (Insolubles)

Favoriser les films interfaciaux facilement cisailables :

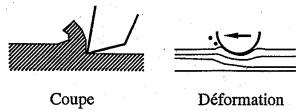
Épaisseur peut être faible (Cissions supportées par le substrat.)



ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: Usure abrasive (1)

Déplacement de matière d'une surface sous l'action de particules dures

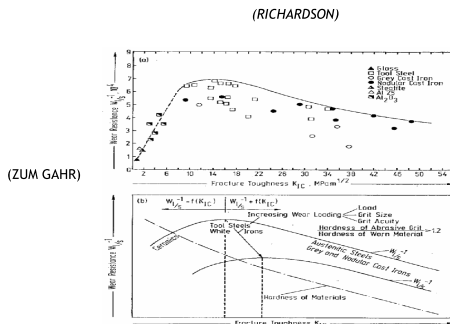
- liées à l'une des surfaces: abrasion à 2 corps
- libres entre les surfaces: abrasion à 3 corps



Identification : Stries et rayures

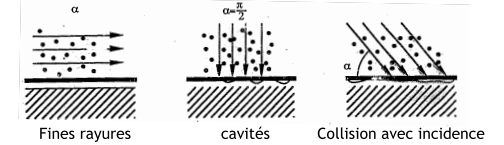
Paramètres : Taille des particules: $dU/dl \rightarrow \phi$
Charge : $dU/dl \rightarrow W$
Vitesse : $dU/dl \rightarrow V$
Ambiance
Matériaux : Dureté - ténacité
(RICHARDSON)

ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: Usure abrasive (2)



ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: Usure érosive (1)

Déplacement de matière d'une surface sous l'action de particules (Solides, liquides, gazeuses) déplacées par un fluide en mouvement. (Impacts multiples)

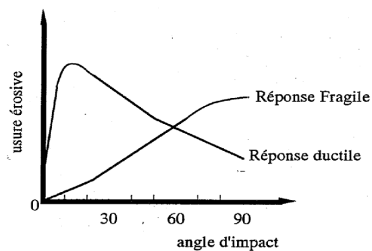


Identification : Stries ou rayures

Paramètres :

- Angles d'impact
- Matériaux fragiles : Sensibles à l'impact normal
- Matériaux ductiles : Sensibles aux faibles incidences
- Taille et nature des particules
- Énergie d'impact
- Matériaux : Dureté - Ténacité

ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: Usure érosive (2)

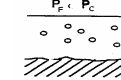


ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: Érosion - Cavitation

Contact : LIQUIDE/SOLIDE
Implosion près d'une paroi de bulles de vapeur et de liquide

1- Formation de bulles de vapeur

$P_{fluide} < \text{tension critique de vapeur } P_c$



2- Grossissement des bulles (gaz dissous)

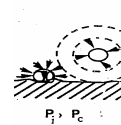


3- Implosion des bulles

Impact de liquide + Ondes de choc

$$P > 1000 \text{ bars}$$

$$f \approx 1000 \text{ Hz}$$



Paramètres importants: - Dureté des matériaux
- Structure des matériaux
- Contraintes résiduelles

Assurer la fonction résistance aux contraintes mécaniques

- **Choix de dureté approprié** : Grande surface cinématique dure et lisse
Dureté < 3Pm ou 6T
- **Éviter les surcontraintes locales** : géométrie : arrondis, chanfreins
Index de plasticité < 0.6
Rainures orifices d'admission de lubrifiant ou d'évacuation des débris petite surface cinématique
- **Mise en œuvre de traitements de durcissement superficiel** : épaisseur compatible avec le champ de contrainte

ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: réactions tribochimiques

Environnement réactif (O₂)
+
Energie de frottement

Composés Oxydes (tribooxydation)

2 voies : Formation d'un film superficiel

Adhérent → protection

Non adhérent → Cycles → Formation → Débris/ usure
Destruction

Oxydation des débris (générés par adhésion)

Débris oxydes

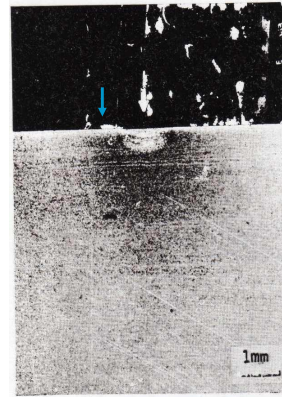
Composés ductiles
(ex Fe O)

Action favorable éventuelle

Composés durs
(ex Fe₂O₃ - Fe₃O₄)

Usure abrasive

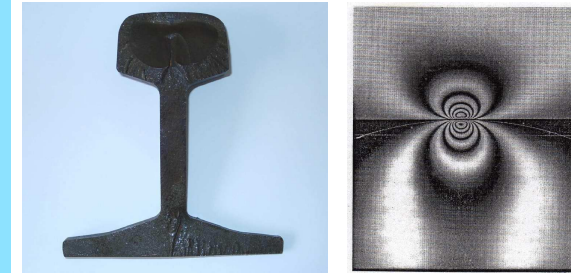
Muro Tsushima Wear 15 (1970) p 309-330



• La flèche indique la zone de contact...

R. Gras illustrations

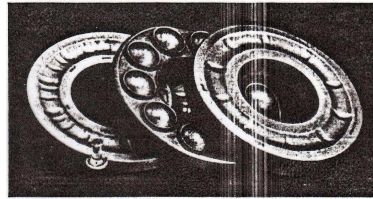
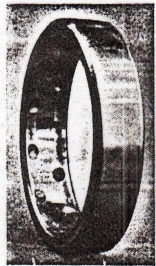
Endommagement et état de contraintes Dans un rail



• Les contraintes de contact sont maximales sous la surface (fonctionnement en roulement sans glissement)

R. Gras illustrations

Roulements paliers - brinellage



Cavités et empreintes

R. Gras illustrations

ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: fatigue de contact

• Application répétée de contraintes sur les zones de contact

- Systèmes de transmission d'énergie
- Système de guidage



- Transformations structurales
- Décohésion (piqûres, fissures, écaillage)
 - Fatigue profonde (zone de cisssion maximale)
 - Fatigue superficielle (délamination)

Nombre de cycles avant amorçage

Lieu d'amorçage

Orientation des fissures

régis par

Champ de contrainte
Matériau

ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: Fatigue thermique

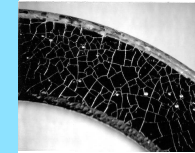
Contact à vitesse élevée → Flux thermique important

Gradient de température répétés

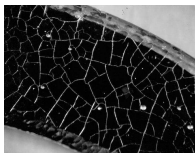
Contraintes mécaniques

Fissuration

Faiencage

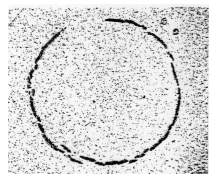


1 mm

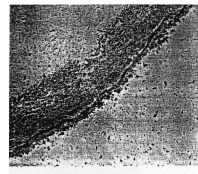


1 mm

Fatigue de contact Essai bille / plan - fissuration

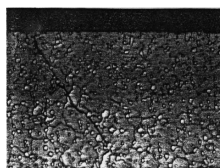


×36

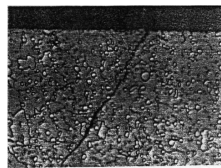


×150

Surface



×1000

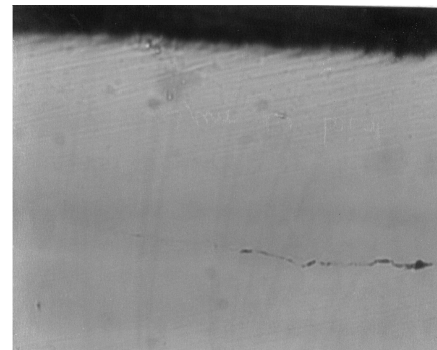


×1000

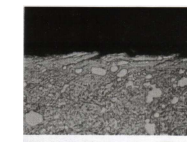
Volume

R. Gras illustrations

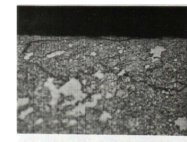
Fatigue de contact – Roulement pur



Fatigue de contact Roulements cryotechniques – bagues Fissurations -Ecroûssage



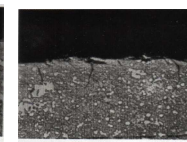
× 1000



× 1000



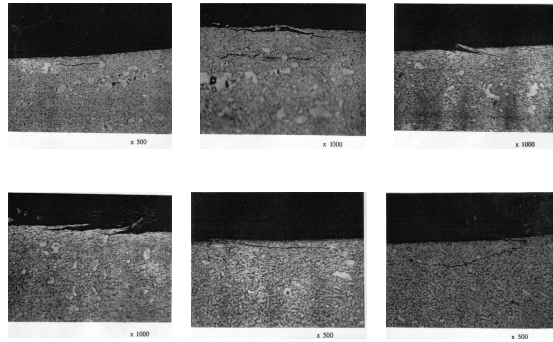
× 1000



× 1000

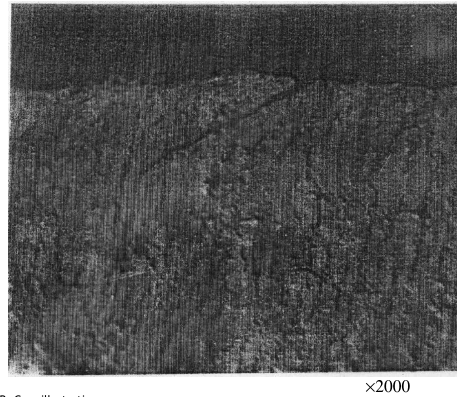
R. Gras illustrations

Fatigue de contact Roulements cryotechniques Fissurations parallèles



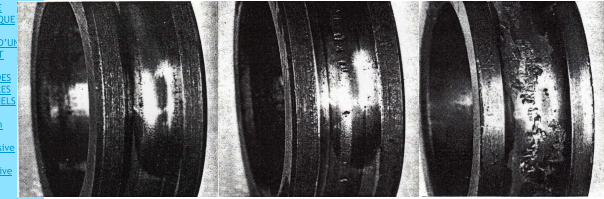
R. Gras illustrations

Fissuration dans les cannelures de la turbopompe LH2



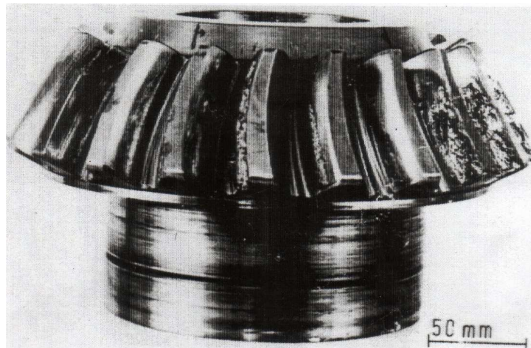
R. Gras illustrations

Évolution de l'écaillage en lubrification défectueuse : étapes successives



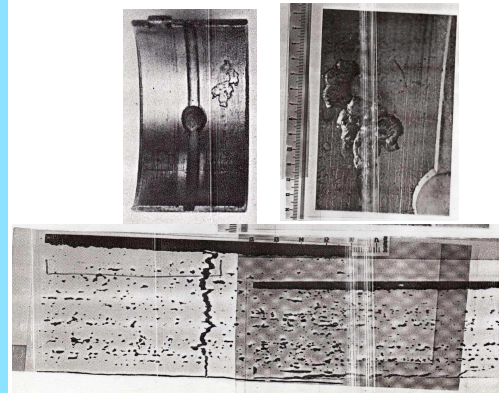
R. Gras illustrations

Engrenage conique : moulin à blé 6 mois de service



R. Gras illustrations

Écaillage d'un coussinet



R. Gras illustrations

ANALYSE DES PROCESSUS DE L'USURE: Fretting fatigue

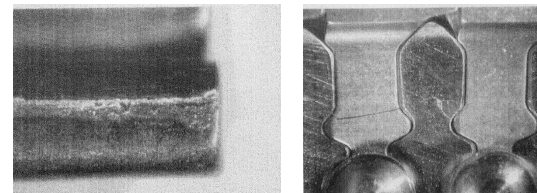
- **Fretting** : Processus de dégradation superficielle qui apparaît entre 2 surfaces en contact animées d'un mouvement oscillatoire de faible amplitude.

- **Fretting fatigue** : Fissuration
- **Fretting usure** : Usure par adhésion, abrasion, fatigue
- **Fretting corrosion** : + Environnement réactif.

Limiter les risques Fretting fatigue

- **Limiter le niveau des contraintes:**
 - Géométrie de contact appropriée limitant les concentrations de contraintes
 - Abaissement du facteur de frottement
 - Mise en œuvre de revêtements permettant d'accommoder les faibles débattements (Cu-Ni-In ou Si)
- **Réduire l'influence des contraintes**
 - Mise en œuvre de matériaux ayant des propriétés mécaniques suffisantes (σ_f , E...)
 - Introduction de contraintes résiduelles de compression par des traitements de surface thermiques ou mécaniques

Aubes de turbine

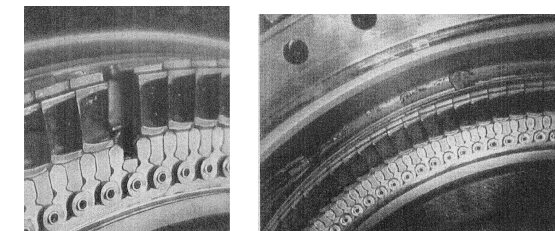


Fretting en pied d'aube

Fissures sur 2 aubes adjacentes et sur le rotor

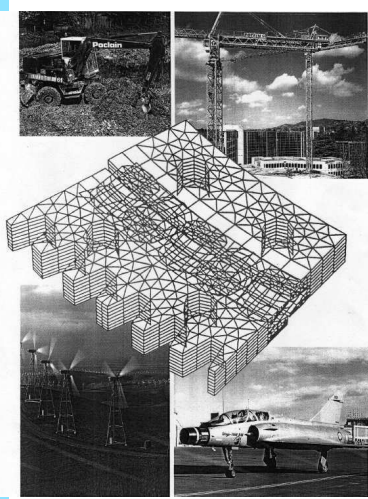
R. Gras illustrations

Aubes de turbine



Rupture en pied d'aube

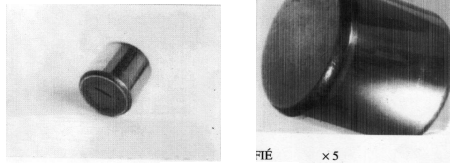
R. Gras illustrations



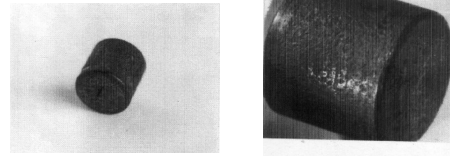
Couronnes d'orientation

R. Gras illustrations

Méto automatique Couronnes d'orientation : rouleaux



Contact lubrifié



Contact sec

R. Gras illustrations

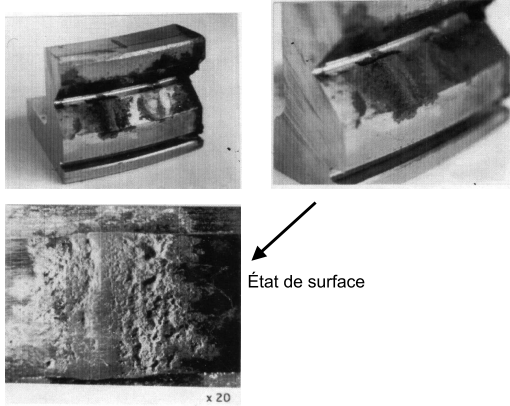
Fretting fatigue

Rouleaux couronnes d'orientation d'aliénages



R. Gras illustrations

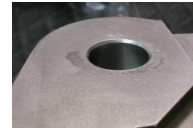
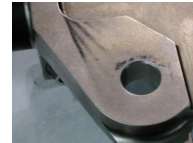
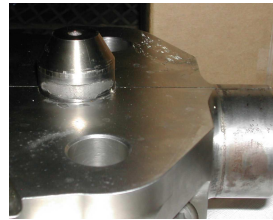
Méto automatique Couronnes d'orientation - bagues



R. Gras illustrations



Axe de liaison réacteur – aile A340



Rotules de mât réacteur fretting usure

Processus d'usure	Schémas	Aspects de l'endommagement	Importances Economiques	Ordre de grande des variations dimensionnelle
Adhésion		transfert	15%	10 ⁻² mm / an
Abrasion		rayures	50%	10 mm / an
Erosion		éclats, trous, copeaux	8%	1 mm / an
Déformation		délamination, écaillages, poudre rouge		10
Fatigue { glissement, roulement, fretting		fissures, empreinte	8%	
Corrosion chimique			5%	