

Notions de tribologie

❑ Surfaces

❑ Pertes par frottement

frottement de glissement

frottements de roulement, visqueux

❑ Usure des surfaces :

adhérence, abrasion, érosion, fatigue et fretting

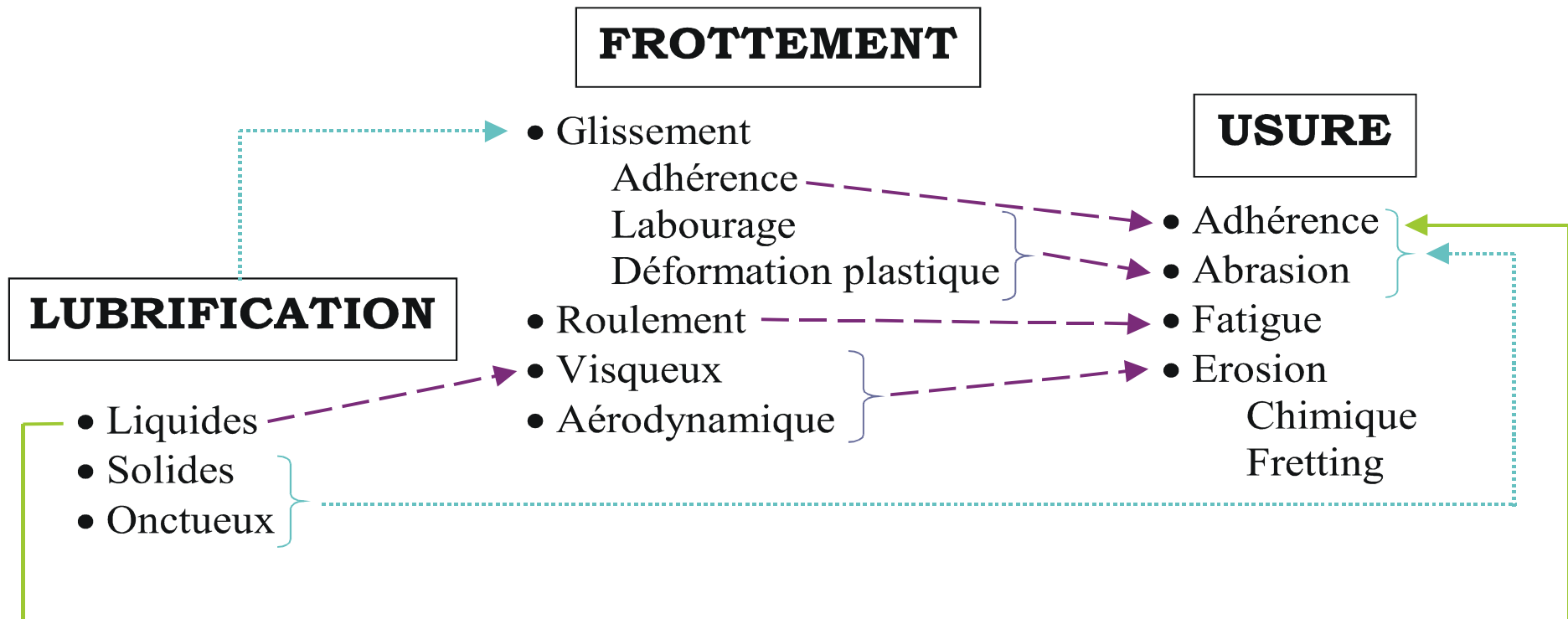
❑ Lubrifiants :

- **Solides** : types et propriétés

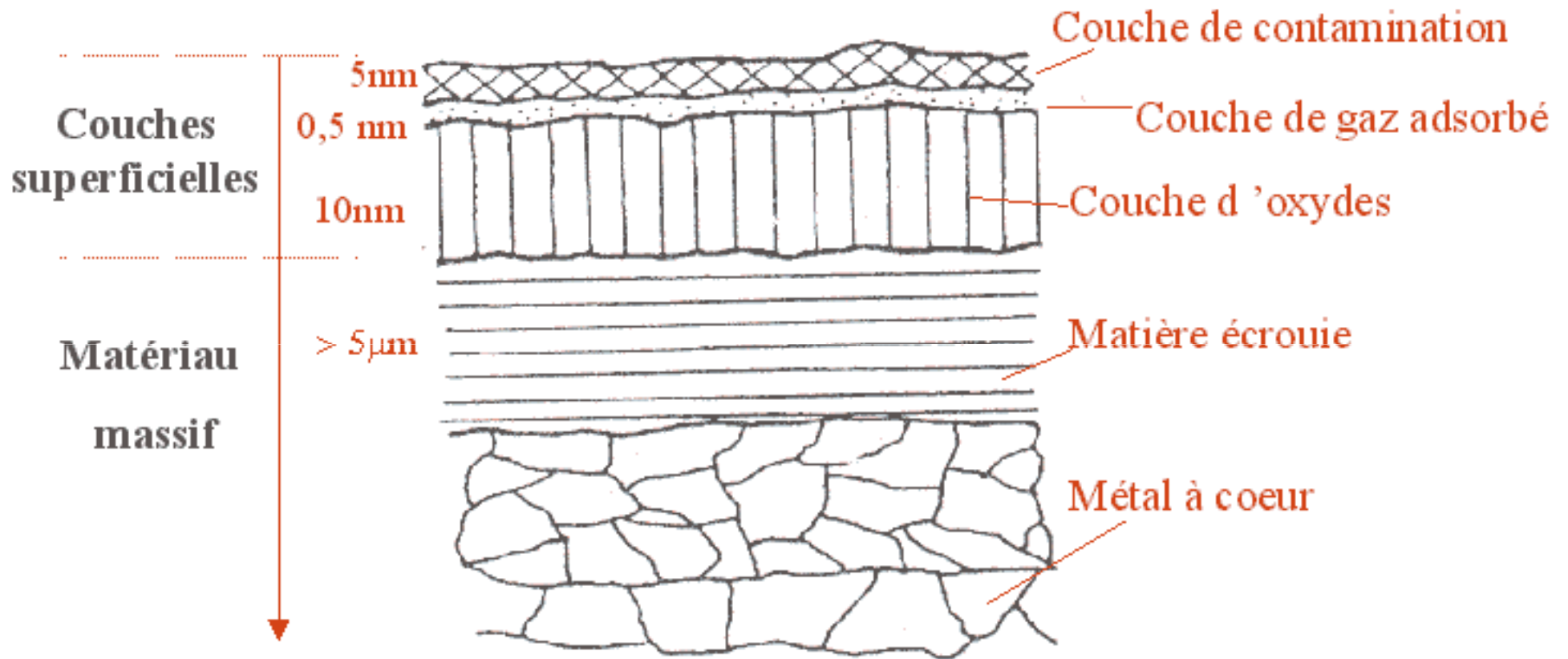
- **Onctueux** : mécanismes d'action, types et propriétés

- **Liquides** (huiles minérales et synthétiques) :

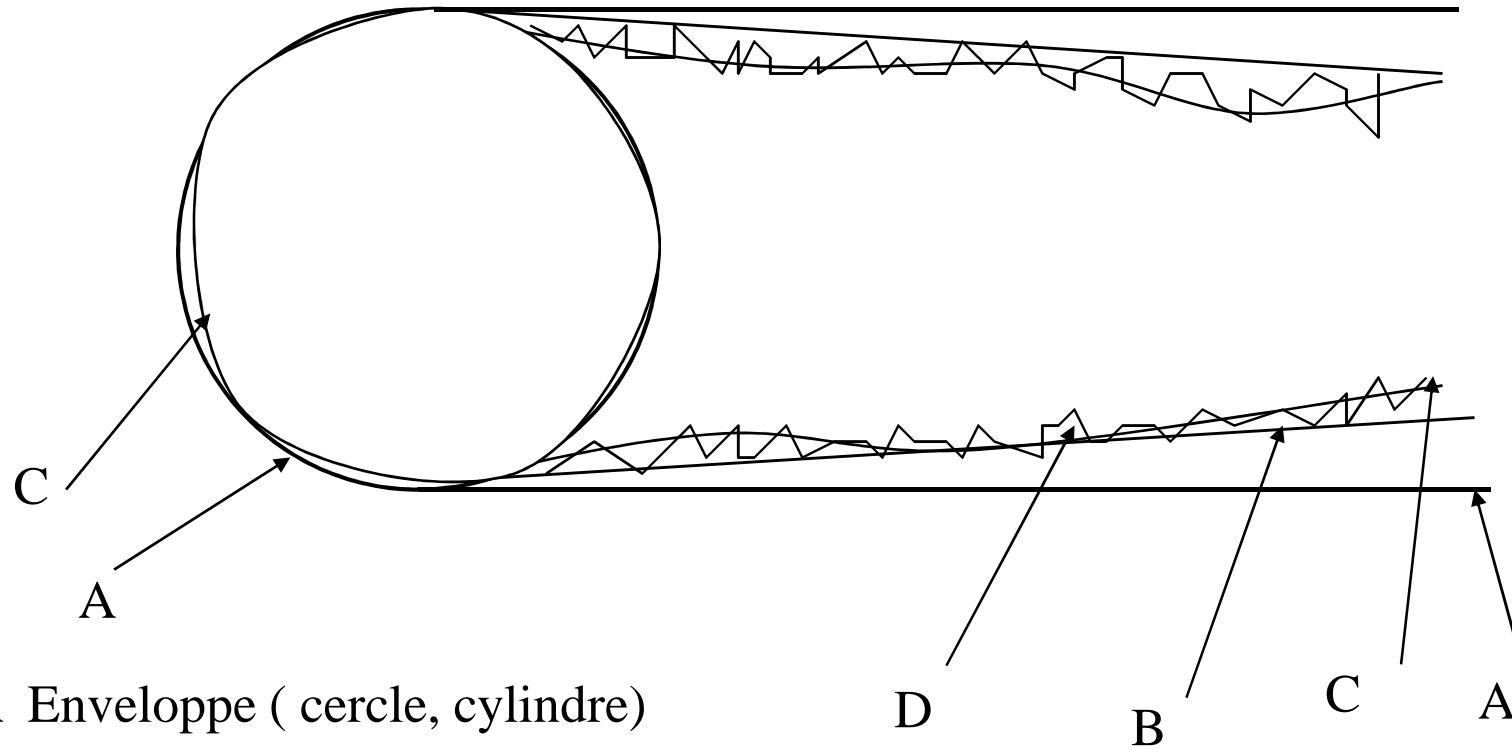
Domaines d'étude de la tribologie



Surface d'un métal



Défauts de surface



A Enveloppe (cercle, cylindre)

B Conicité

C Ondulation

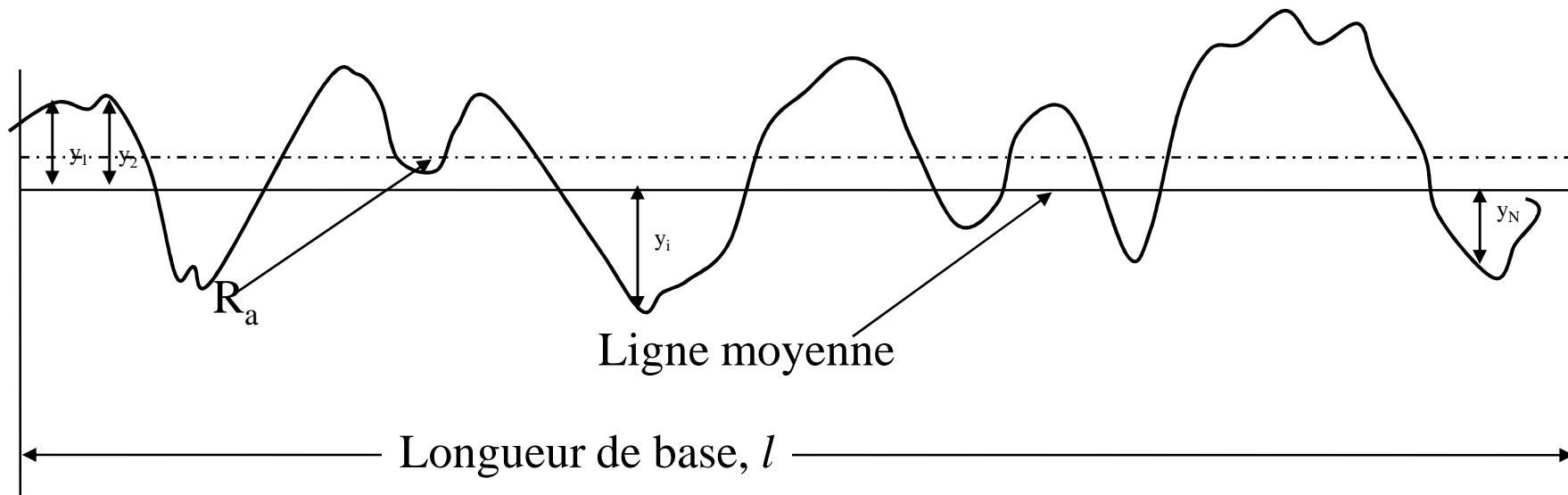
D Rugosité: hauteur de l'ordre de 10^{-6} m

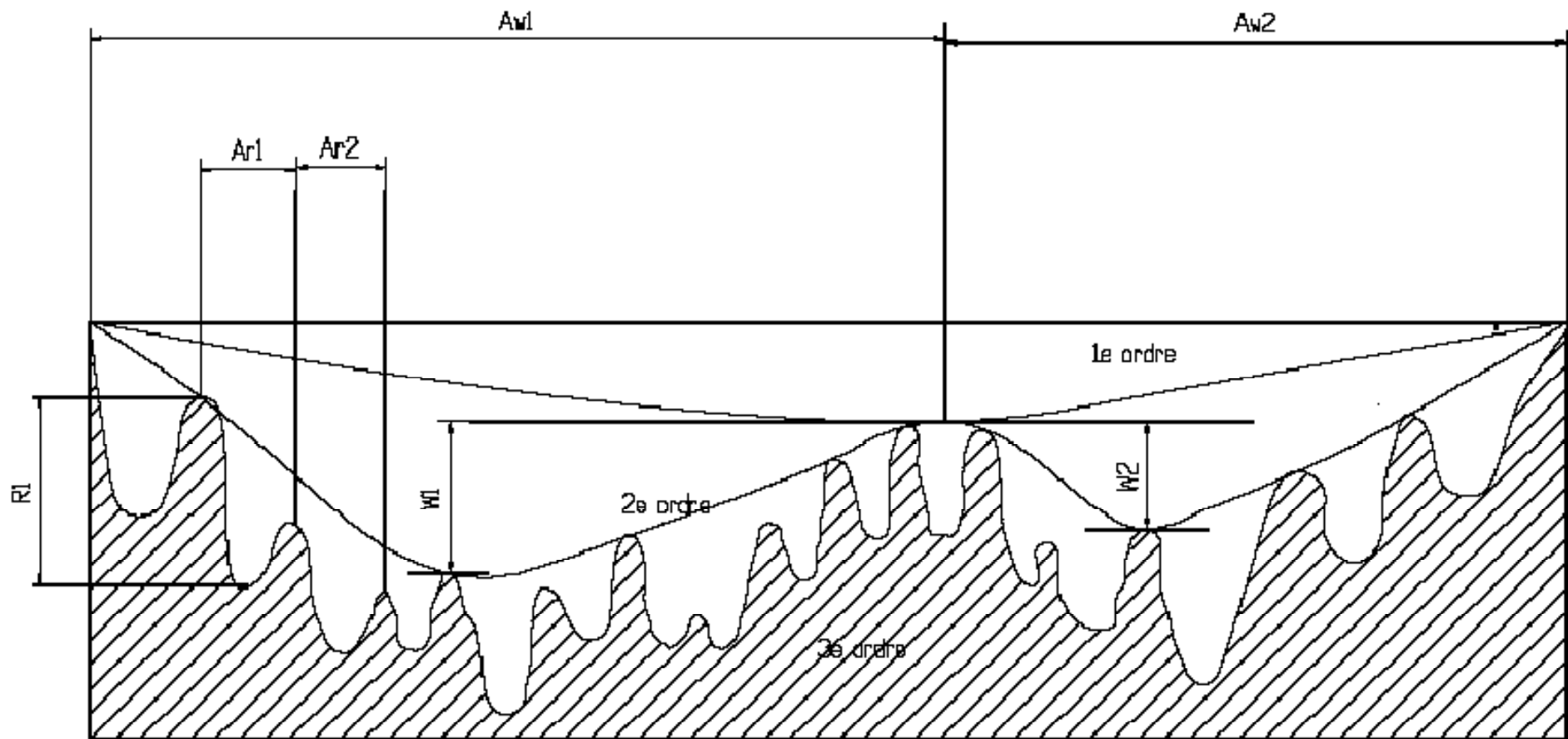
Rugosité d'une surface

□ Écart moyen arithmétique du profil, R_a :

Moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts du profil à l'intérieur de la longueur de base :

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i|$$





- pas moyen

$$A_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (A_w)_i \quad \text{unités en microns.}$$

Critère d'ondulation W (2^{ème} ordre):

- profondeur moyenne

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} W_i$$

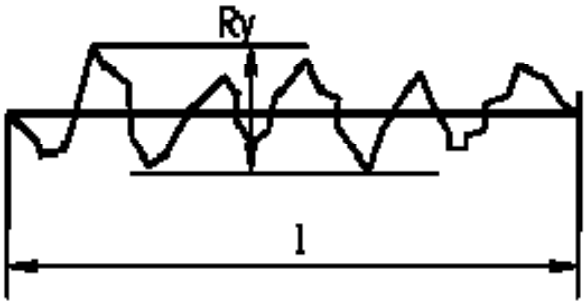
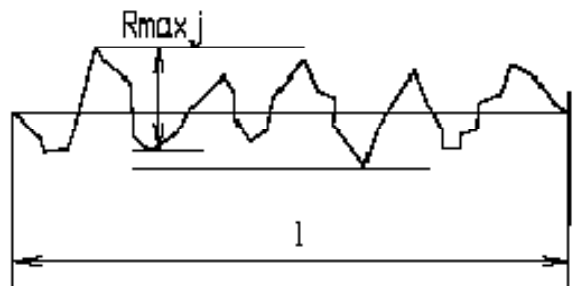
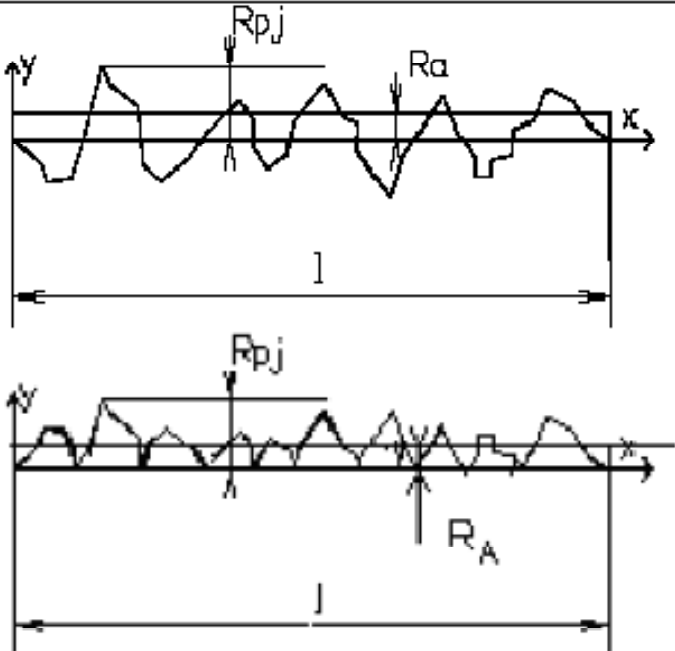
Critère de rugosité R (3^{ème} ordre):

- profondeur moyenne

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} R_i$$

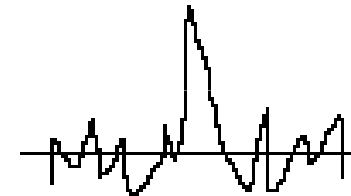
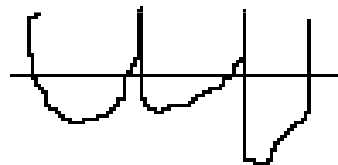
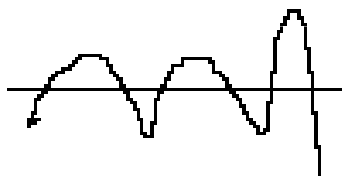
- pas moyen

$$A_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (A_R)_i$$

SYMBOLE	INTITULE ET DEFINITION	ILLUSTRATION
Rt	<p>Hauteur maximale de rugosité : Rt C'est le plus grand des Ry</p> <p>avec Ry : distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux pour une longueur (l).</p>	
Rmax	<p>Maximum de la hauteur des irrégularités du profil : Rmax C'est le plus grand des Rmaxj</p> <p>avec Rmax pris entre une saillie et un creux consécutif.</p>	
Rp	<p>Hauteur moyenne de saillie : Rp</p> $R_p = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{pj}$ <p>avec Rpj, distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (l)</p> <p>Ecart moyen arithmétique du profil : Ra</p> $R_{aj} = \frac{1}{l} \int_0^l y dx$	

Attention

- Profil ayant même Ra,



- Ra ne donne pas une idée physique du profil mesuré,
- Il est préférable d'utiliser des paramètres liés au motif tel que **R** et **W**.

Valeurs de Ra et R recommandées

Ra

R

Diamètre nominal en (mm)	Qualité ISO *				
	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10
1 - 3	0,20 - 0,32	0,32 - 0,63	0,50 - 0,80	0,63 - 1,00	1,25 - 2,00
3 - 6	0,25 - 0,40	0,40 - 0,63	0,63 - 1,00	0,80 - 1,25	1,60 - 2,50
6 - 10	0,32 - 0,50	0,50 - 0,80	0,80 - 1,25	1,00 - 1,00	2 - 3,20
10 - 18	0,40 - 0,63	0,63 - 1,00	1,00 - 1,60	1,25 - 2,00	2,50 - 4,00
18 - 30	0,40 - 0,80	0,80 - 1,25	1,25 - 2,00	1,60 - 2,50	3,20 - 5,00
30 - 50	0,50 - 0,80	1,00 - 1,60	1,25 - 2,00	1,60 - 2,50	4,00 - 5,00
50 - 80	0,63 - 1,00	1,00 - 1,60	1,60 - 2,50	2,00 - 3,20	4,00 - 6,30
80 - 120	0,63 - 1,00	1,25 - 2,00	2,00 - 3,20	2,50 - 4,00	5,00 - 6,30
120 - 180	0,80 - 1,25	1,25 - 2,00	2,50 - 3,20	2,50 - 4,00	6,30 - 8,00
180 - 260	1,00 - 1,60	1,60 - 2,50	2,50 - 4,00	3,20 - 5,00	6,30 - 10,0
260 - 360	1,00 - 1,60	1,60 - 2,50	3,20 - 5,00	3,20 - 5,00	8,00 - 12,5
360 - 500	1,25 - 2,00	2,00 - 3,20	3,20 - 5,00	4,00 - 6,30	10,00 - 12,5

* Le premier nombre correspond à la qualité des arbres, le second à celle des alésages

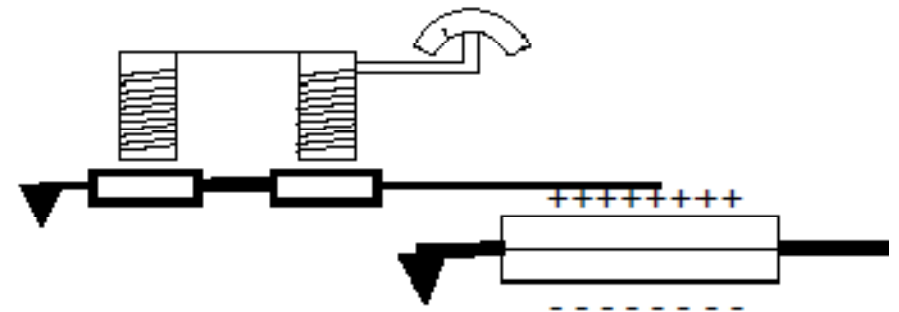
QUALITE ISO *	
< 7	≥ 8
$\frac{IT}{2}$	$\frac{IT}{4}$

Valeurs nominales de « R » en μm		50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1
Ordre de grandeur de la tolérance totale d'usinage la plus serrée en μm		100	60	35	20	14	10	7	5	3	2
P R O C E D E S P O S S I B L E S	D	Grenailage									
	E	Rabotage									
		Sciage									
	R	Oxycoupage									
	E	Fraisage	en bout								
	D		en roulant								
	E	Tournage									
	S	Alésage à l'outil									
		Alésage à l'alésoir									
	P	Perçage au foret									
	O	Rectification	Plane								
	S		Cylindrique								
	S	Rodage									
	I	Electro - érosion									
	B	Meulage fin									
	L	Limage									
E	Pierrage main										
S	Grattage										
	Réalizations usuelles										
	Réalizations exceptionnelles										

Mesure

Différentes technologies existent : Induction

piezo électrique



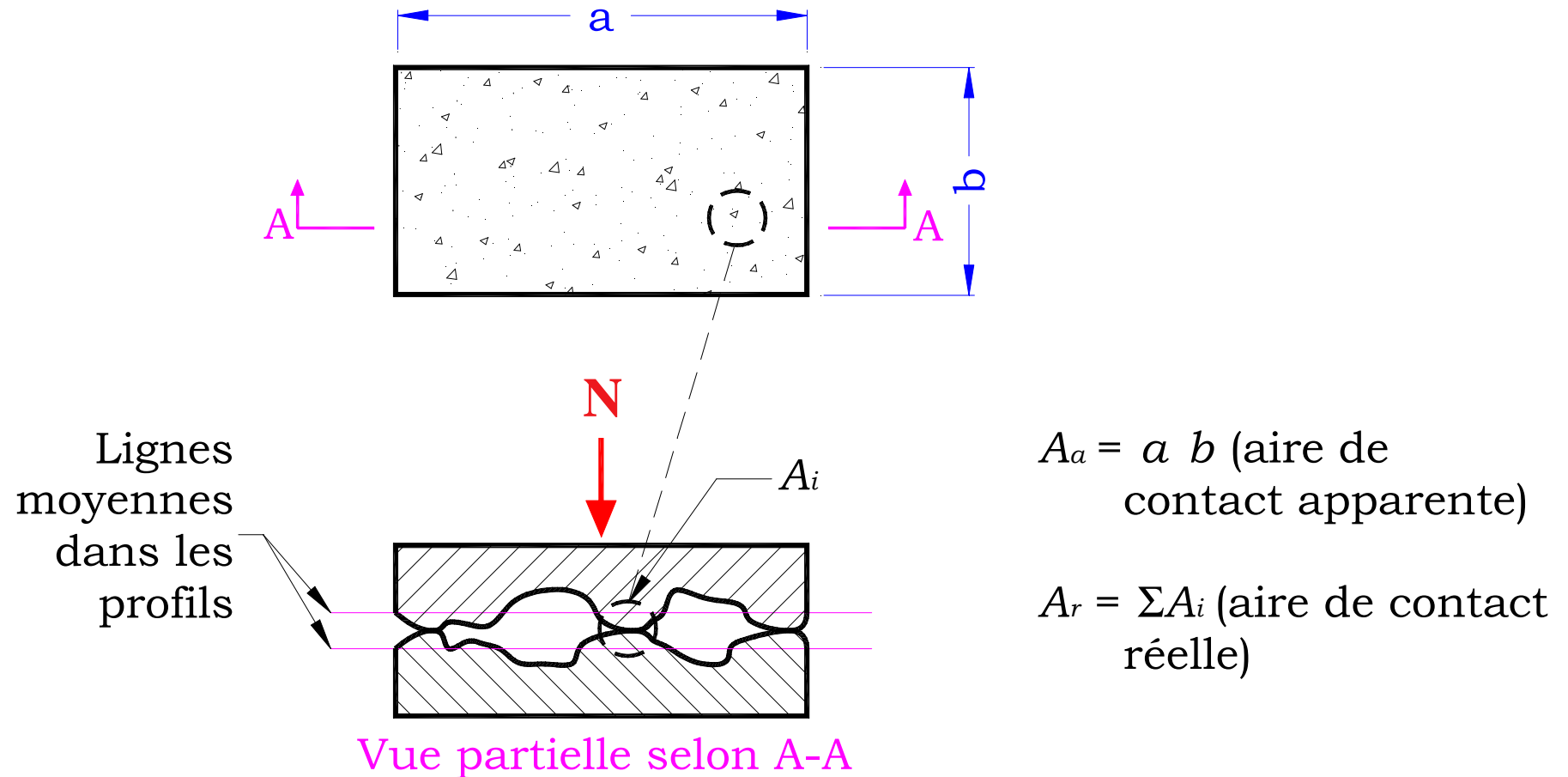
Pour mesurer l'un ou l'autre des défauts, il est nécessaire de filtrer la mesure.

Filtrage mécanique : le patin glisse sur la pièce pour suivre les ondulations (ordre 2), pendant que la pointe pénètre dans les stries (ordre 3 et 4). On ne mesure alors que la rugosité (ordre 3 et 4).



Filtrage électronique avec un filtre passe haut pour mesurer les défauts d'ordre 2, et un filtre passe bas pour mesurer la rugosité.

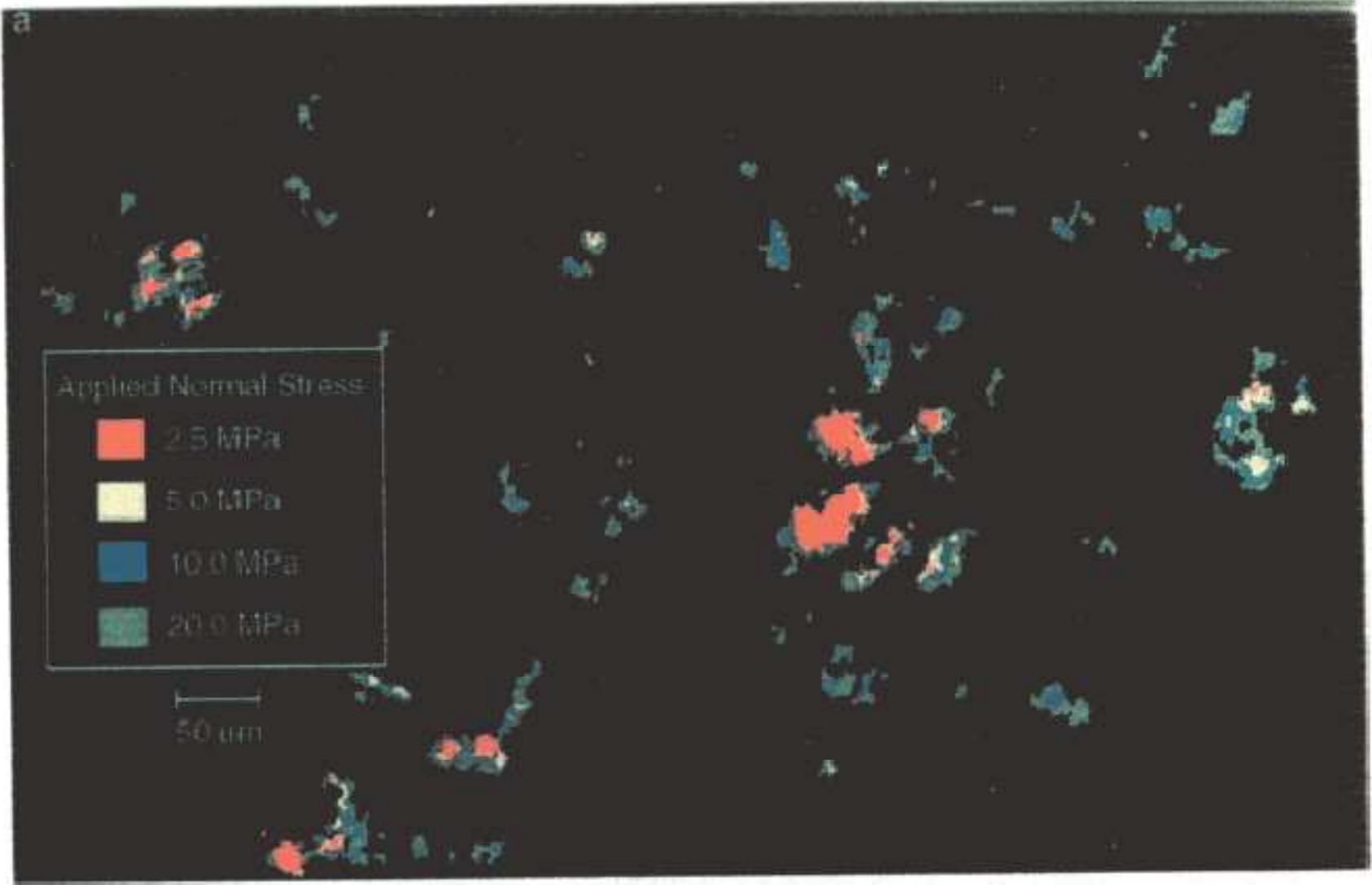
Aires de contact apparente et réelle

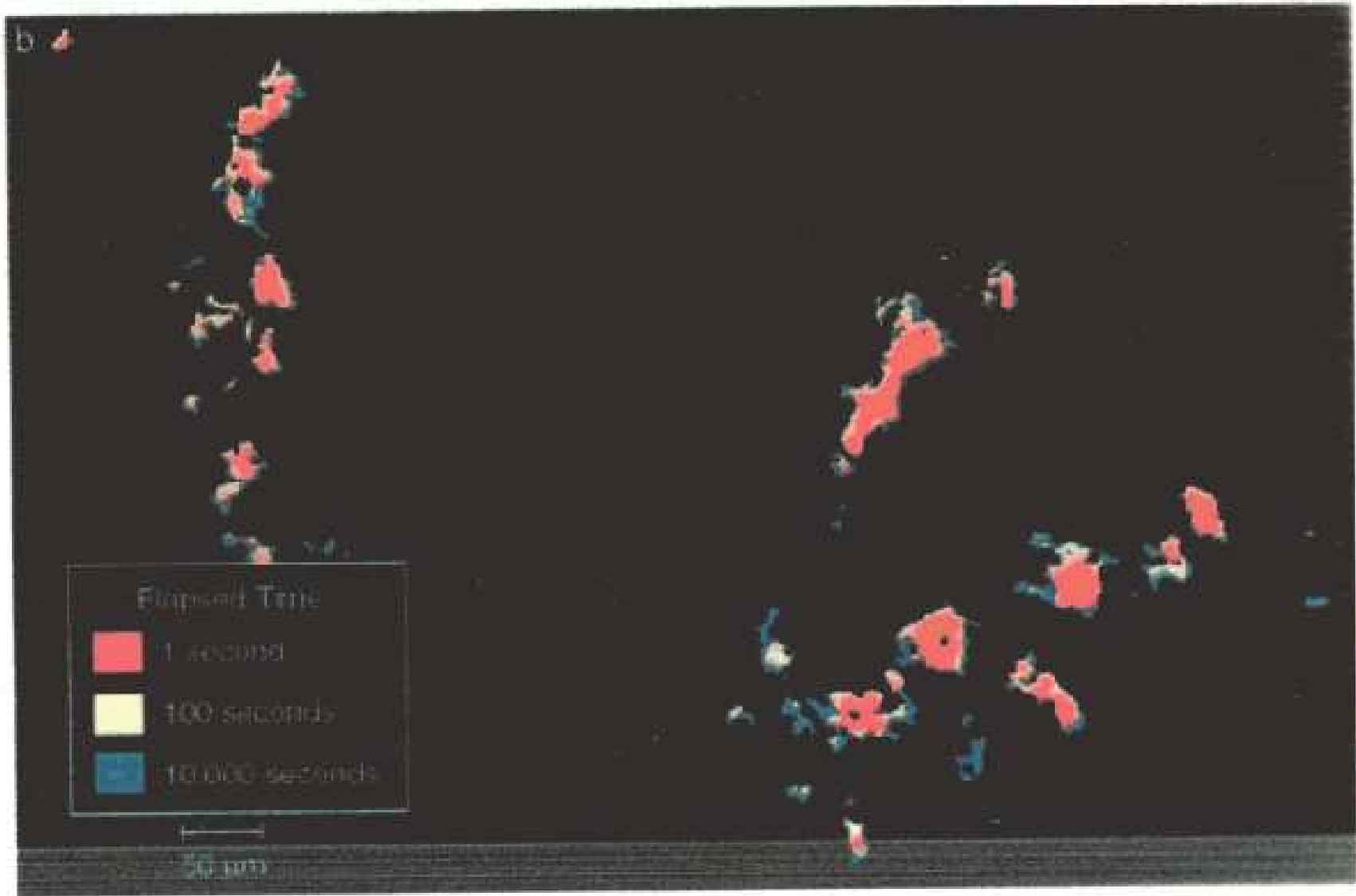


a




50 μm





Frottement de glissement

1. Rugosité :

Aire apparente(A_a) / Aire réelle(A_r) $\cong 10^4$,

$$\sigma = \frac{\sum N_i}{\sum A} = \frac{N}{A} \gg R_e$$

2. Composition des surfaces ($1\mu = 10^{-6}\text{m}$) :

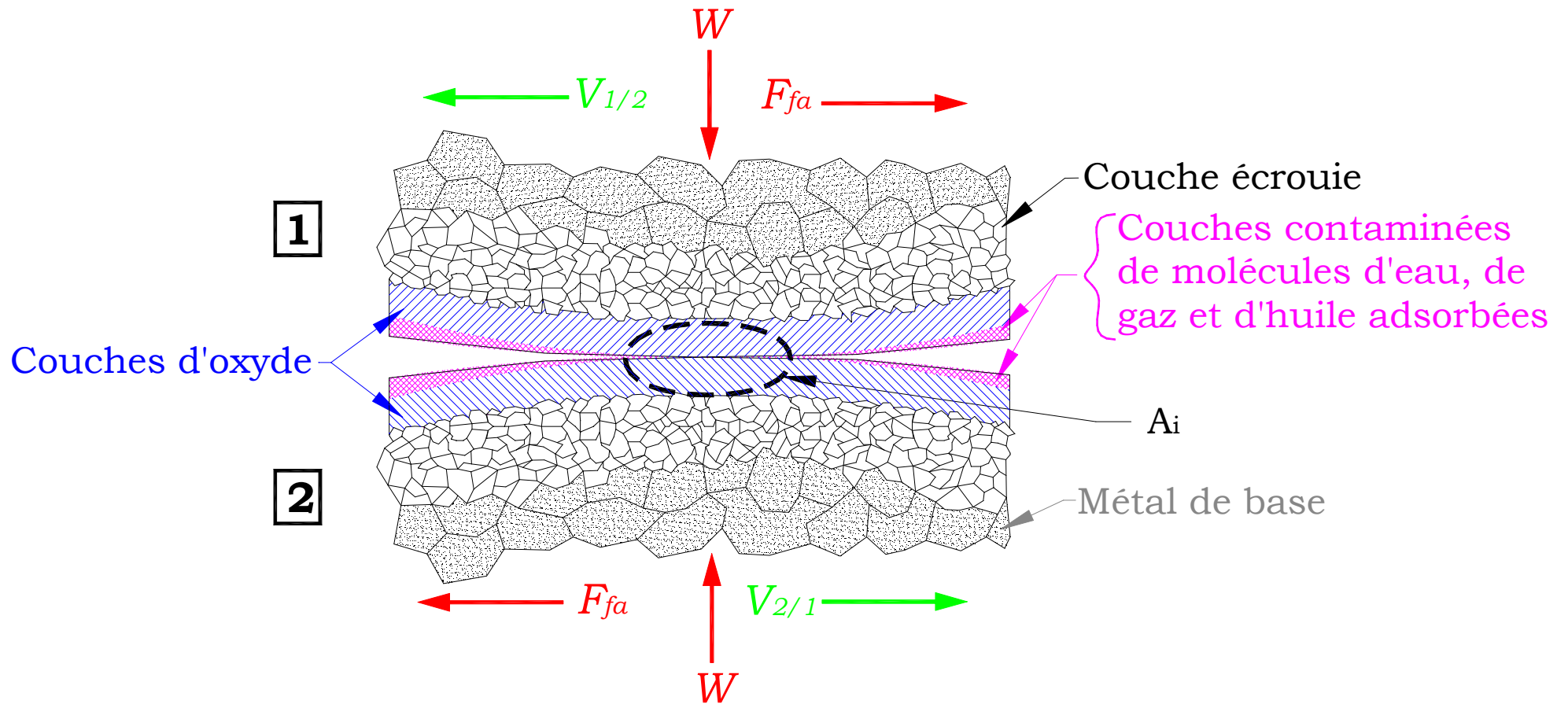
- Couche de gaz, d' H_2O et d'huile adsorbées (0,001 à 0,1 μ)
- Couche d'oxyde (0,01 à 1 μ)
- Couche de matériau de base fortement déformé (0,1 à 100 μ)
- Matériau de base intact

3. Les couches de gaz, d' H_2O et d'huile adsorbés sont minces; les contraintes sur les aspérités sont élevées, donc facilement brisées et pénétrées.

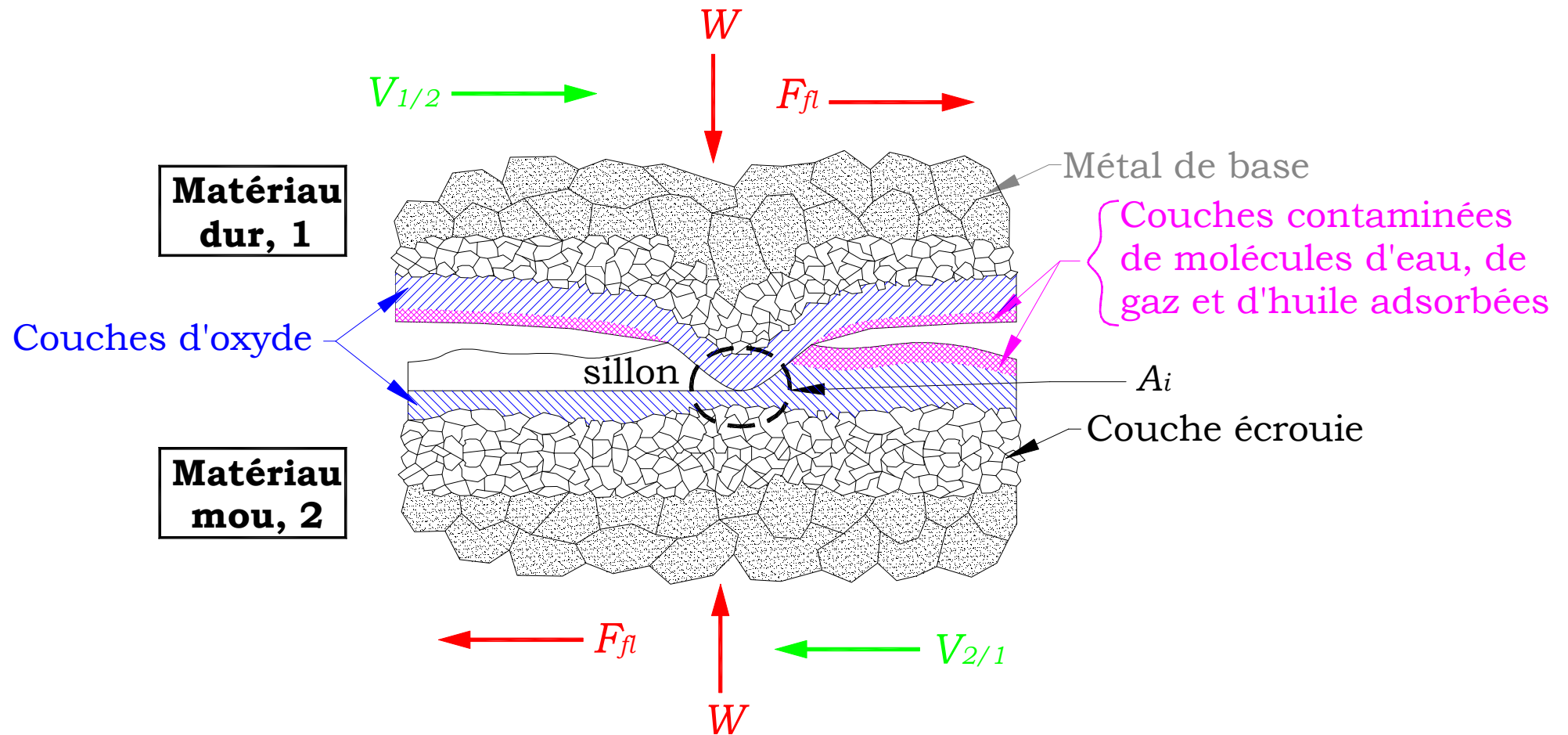
Mécanismes du frottement de glissement sec

- ❑ **Adhérence** : création de lien ioniques, covalents ou de Van der Waals entre les molécules des matériaux de base lorsque les films de surface sont pénétrés
- ❑ **Labourage** : les aspérités du matériau le plus dur pénètrent dans le matériau le plus mou
- ❑ **Déformation plastique** : enchâssement des aspérités et déformations subséquentes de celles-ci dans le mouvement relatif

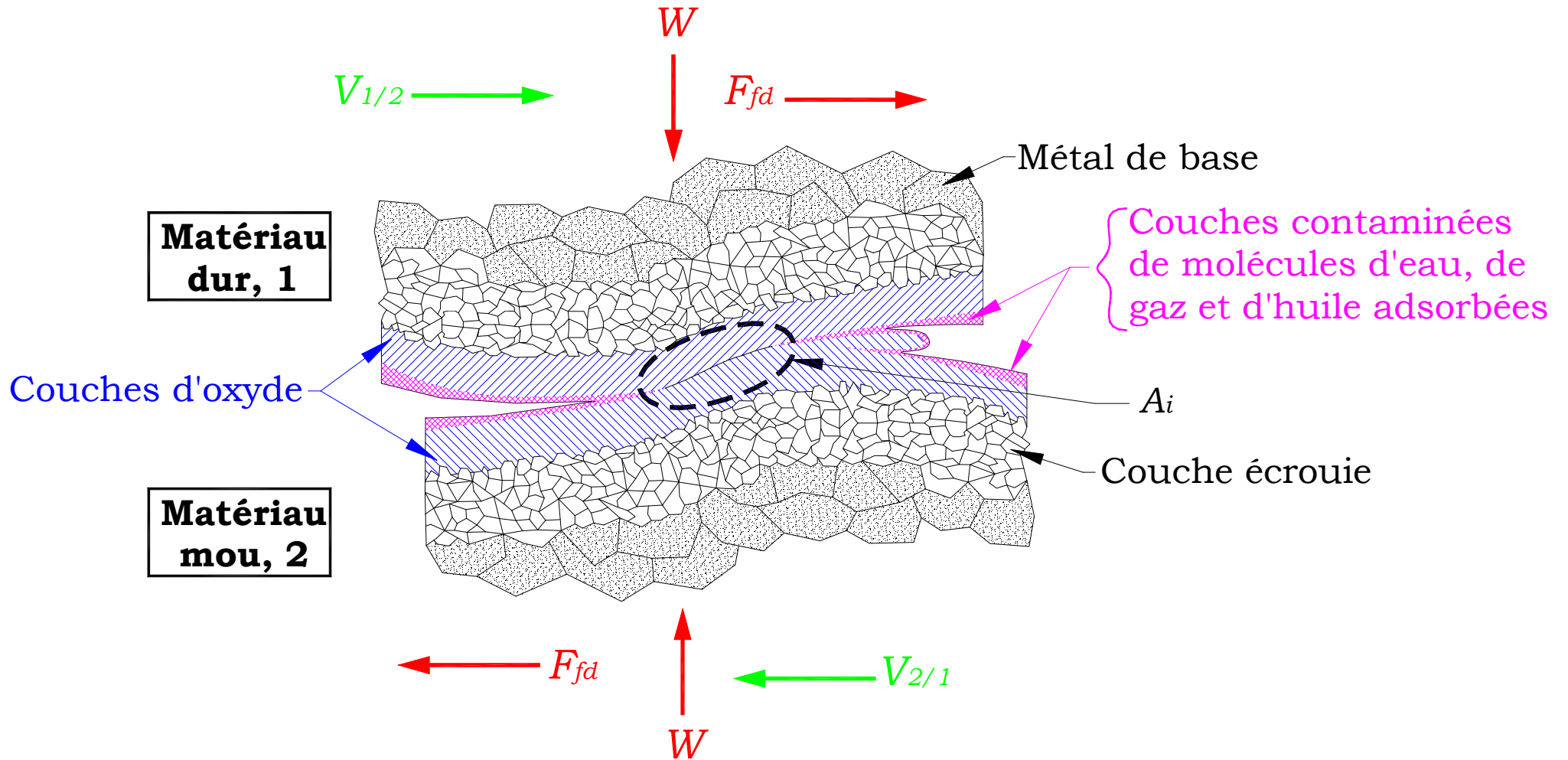
Adhérence



Labourage



Déformation plastique



Valeurs de facteurs de frottement

<i>Matériaux en contact</i>	<i>f'</i>		<i>f</i>	
	<i>sec</i>	<i>lubrifié</i>	<i>sec</i>	<i>lubrifié</i>
Acier cémenté trempé sur acier cémenté trempé	0,2 à 0,3	0,15 à 0,2	0,2	0,12
Acier cémenté trempé sur fonte trempée	0,2	0,12 à 0,2	0,15	0,08
Acier cémenté trempé sur bronze trempé	0,2	0,15 à 0,20	0,25	0,12
Acier inoxydable chromé sur aluminium			0,4	0,1
Acier sur cuivre étamé			0,12	0,09
Acier sur métal fritté		0,1 à 0,18	0,1 à 0,12	0,03 à 0,06
Acier sur « férodo »	0,3 à 0,4		0,25 à 0,35	
Acier sur graphite		0,1		0,09
Acier graphité sur téflon			0,1	0,08
Acier sur palier PTFE	0,08 à 0,4		0,02 à 0,08	0,003 à 0,05
Acier sur polyéthylène			0,3 à 0,8	
Pneu neuf sur route	1		0,5 à 0,6	0,3 à 0,5

Principes pour minimiser le frottement de glissement

➤ Adhérence F_{fa} :

- utiliser des matériaux incompatibles
- favoriser la formation de films de surface à faible cisaillement tels que les films d'oxyde ou des films de matières organiques adsorbés ou à base de matériaux de faible résistance(graphite, PTFE, MoS₂)

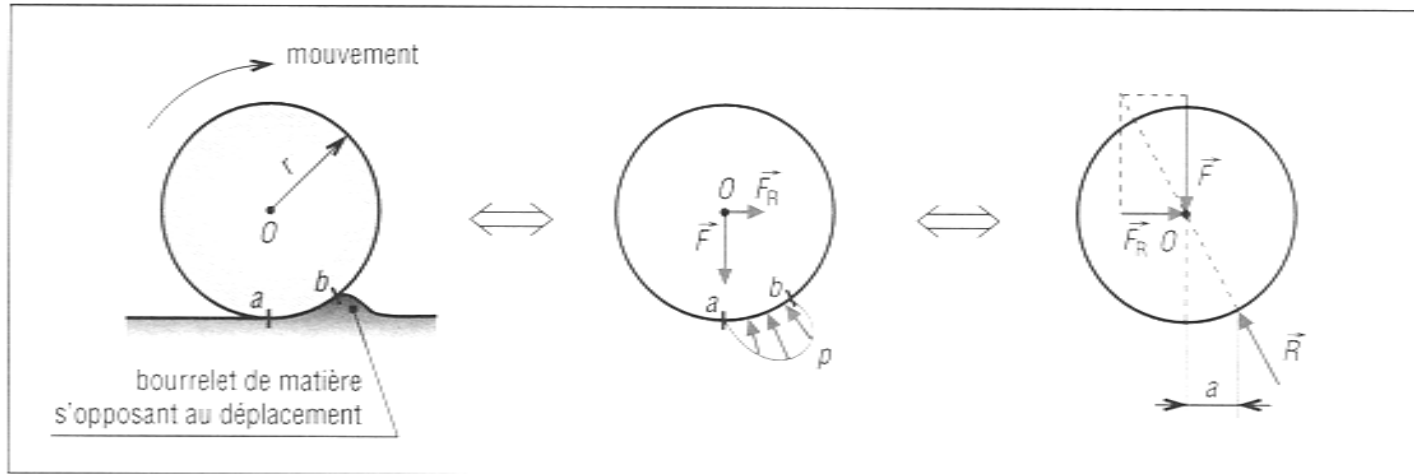
➤ Labourage F_{fl} :

- des surfaces dures préviennent la pénétration des aspérités (traitement de surfaces ou placages durs)

➤ Déformation plastique F_{fd} :

- les surfaces très lisses augmentent A_r et donc F_{fa} ; par contre, les surfaces très rugueuses favorisent l'enchâssement; il existe donc une rugosité optimale

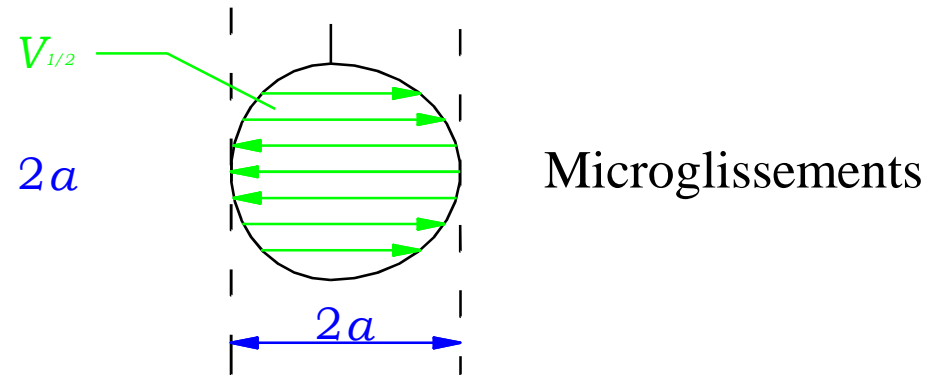
Roulement d'un corps rigide



Aire de contact

Frottement de roulement :

$$F_R = \frac{f_g \cdot a}{r} P$$



$f_R = f_g \cdot a/r$: facteur de frottement de roulement

Valeurs typiques de la résistance au roulement f_R

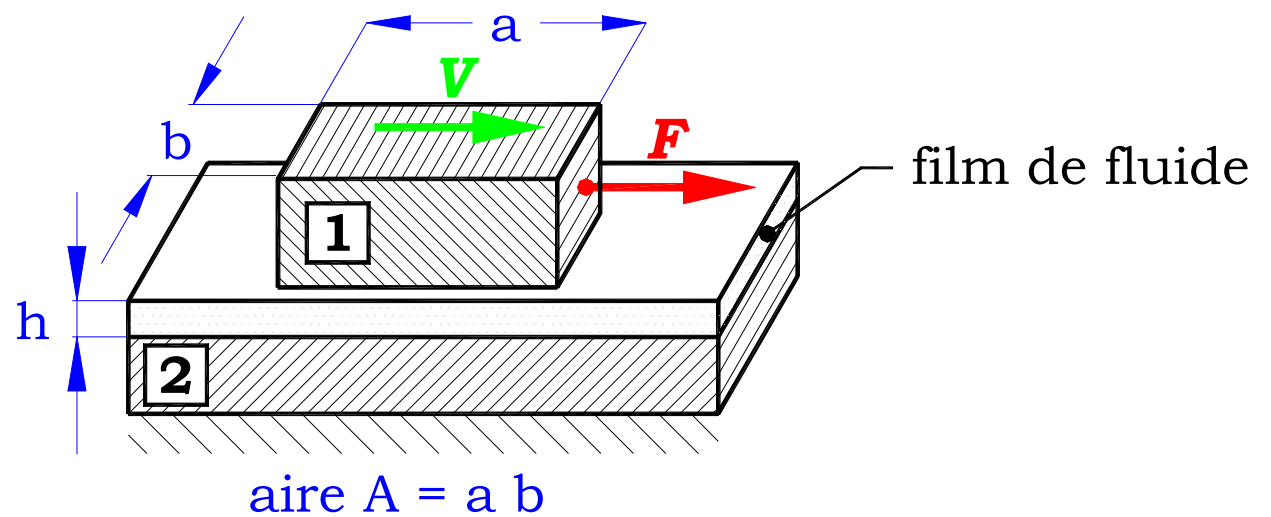
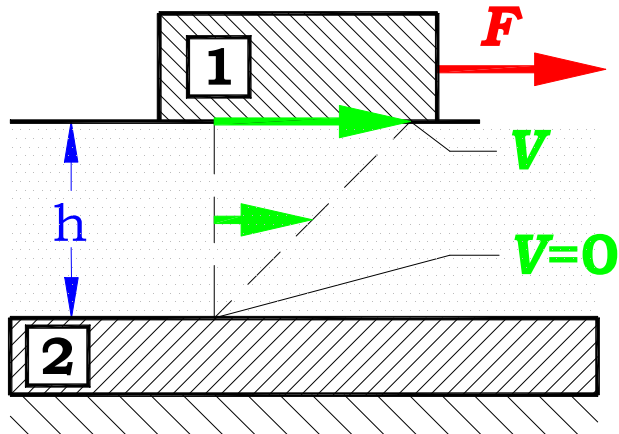
roue de train sur rail (0,001 est le minimum atteignable)	0.001 à 0.0025
pneus tubeless (type Michelin EcoMarathon) sur	0.0015 à 0.0025
roue de tramway sur rails (sales)	0.005
Pneu BMX typique pour véhicules solaires	0.0055
pneu de voiture à faible résistance au roulement / pneus de camion sur bonne route	0.006 à 0.01
pneus ordinaires sur béton	0.010 à 0.015
pneus sur pavés	0.020
pneus sur asphalte	0.030

Minimisation du frottement de roulement

En roulement, il y a toujours du frottement de glissement qui résulte de l'adhérence, sinon, il n'y a pas de roulement.

- Utiliser des éléments roulants de **grand rayon**
- Utiliser des matériaux avec un **grand module de rigidité** (module de Young)

Frottement visqueux



$$\frac{F}{A_a} = \mu \frac{V}{h}$$

A_a : aire apparente (m²)

V : vitesse relative (m.s⁻¹)

h : épaisseur du film (m)

μ : viscosité du fluide (Pa.s)

Exemples de viscosités :

Eau : 0,001 Pa.s

Huiles machines 0,01 à 0,06 Pa.s

Frottement aérodynamique:

Force de frottement aérodynamique

$$F_a = \frac{C_d S_p V^2 \rho}{2}$$

C_d : coefficient de traînée








S_p : Surface projetée

V : Vitesse

ρ : densité (air 1,2 kg.m⁻³)

Objet	C_d
Sphère rugueuse	0,4
Sphère polie	0,1
Demie sphère creuse (creux en amont)	1,42
Demie sphère creuse (creux en aval)	0,38
Demi cylindre creux (creux en aval)	1,2
Demi cylindre creux (creux en amont)	2,3
Plaque carrée à 90°	1,17
Longue plaque 90°	1,98
Aile d'avion (valeur mini)	0,05
Avion de transport	0,012
Avion de chasse supersonique	0,016
Camion semi-remorque	0,7-0,9
Formule 1	0,65-1,10
Hélicoptère	0,4-1,2
Voiture de sport	0,3 -0,4
Pickup	0,5
Homme debout	1,0 - 1,3
Empire State Building	1,3 - 1,5
Tour Eiffel	1,8 - 2,0

Coefficients et puissances de pénétration dans l'air de véhicules de différentes formes

	Coefficient de pénétration dans l'air c_x	Puissance de pénétration dans l'air en kW, valeurs moyennes pour $A = 2 \text{ m}^2$ et différentes vitesses ¹⁾			
		40 km/h	80 km/h	120 km/h	160 km/h
 Cabriolet décapoté	0,5...0,7	1	7,9	27	63
 Limousine	0,5...0,6	0,91	7,2	24	58
 Berline	0,4...0,55	0,78	6,3	21	50
 Coupé ; phares et pare-chocs intégrés dans la coque, roues recouvertes, plancher caréné, circulation optimisée de l'air de refroidissement	0,3...0,4	0,58	4,6	16	37
 Phares et toutes les roues intégrés dans la coque ; plancher caréné	0,2...0,25	0,37	3,0	10	24
 Forme K (faible maître-couple)	0,23	0,38	3,0	10	24
 Forme profilée	0,15...0,20	0,29	2,3	7,8	18
Camions, trains routiers	0,8...1,5	-	-	-	-
Motocyclettes	0,6...0,7	-	-	-	-
Autobus	0,6...0,7	-	-	-	-
Autobus de forme aérodynamique	0,3...0,4	-	-	-	-

¹⁾ Sans vent contraire ($u_0 = 0$).

Usure

L'usure est une conséquence du frottement, et se produit au niveau de la zone de contact.

Les paramètres influençant le taux d'usure sont :

- la force de contact
- la température
- l'aire de contact
- l'état physico-chimique des surfaces frottantes (la rugosité, les couches d'oxydes)
- la structure cristallographique et les propriétés mécaniques des matériaux (la dureté)
- l'absence ou la présence d'un lubrifiant
- la présence d'agents actifs en frottement (additifs anti usure)

Origines de l'usure

- les déformations plastiques
création, déplacement de dislocations
rayures, impacts
- les fissurations
brutale, progressive
initiation, propagation
- les transformations physico-chimiques des surfaces
transformations de phase : amorphisations
- réactions chimiques
- adhésion
transferts à l'échelle atomique
évolution "boule de neige", micro-grippage, grippage

Sévérité de l'usure

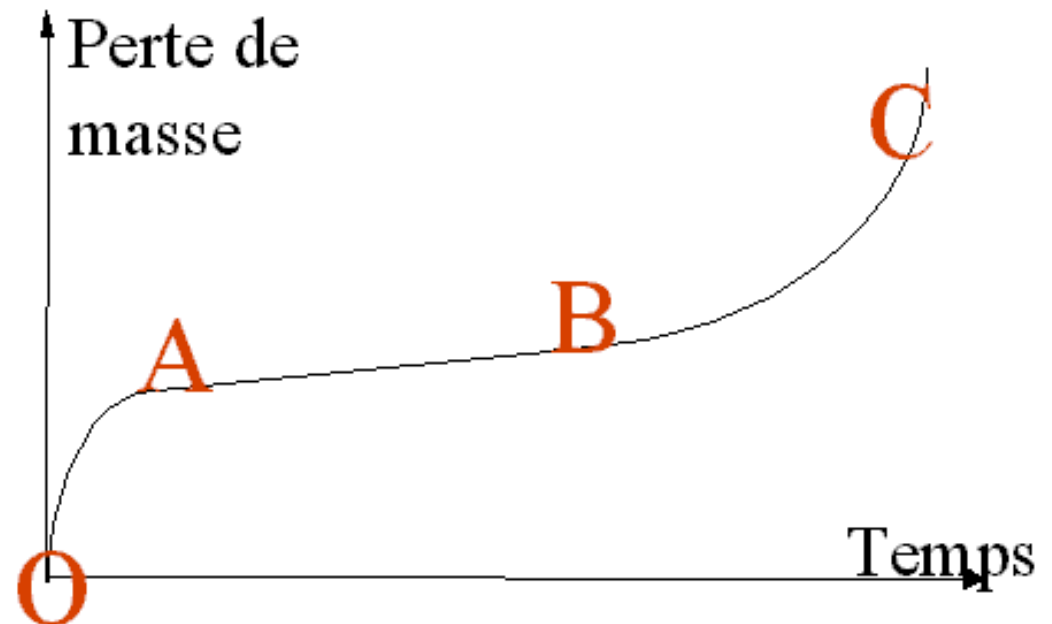
- *usure douce ou ultra-douce* : le système s'use peu. Les surfaces restent lisses et les particules ont une dimension de l'ordre du micromètre.
- *usure sévère* : les surfaces des corps sont modifiées, et la taille des particules dépasse 100 microns.
- *usure catastrophique* : la durée de vie est énormément réduite

Test d'usure :

OA : usure rapide (rodage)

AB : utilisation normale de la machine

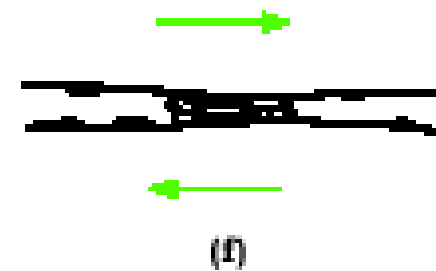
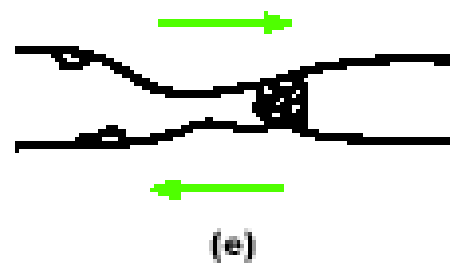
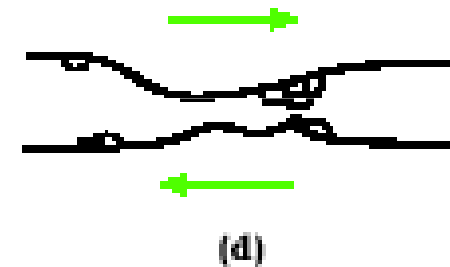
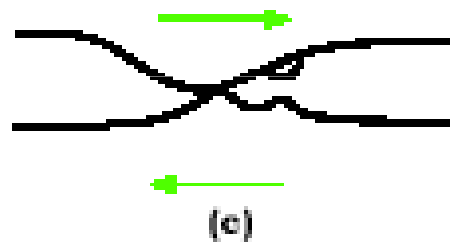
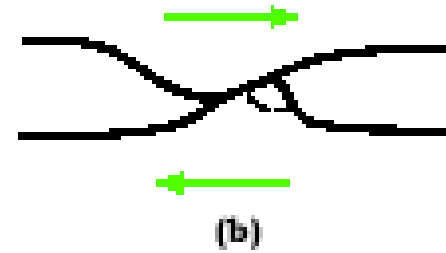
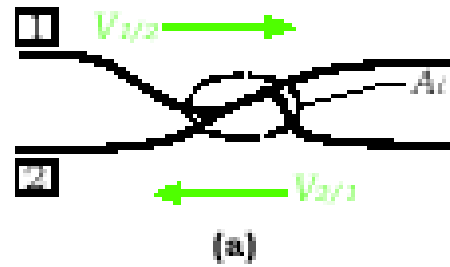
BC : destruction des éléments de la machine







Mécanisme d'usure par adhérence



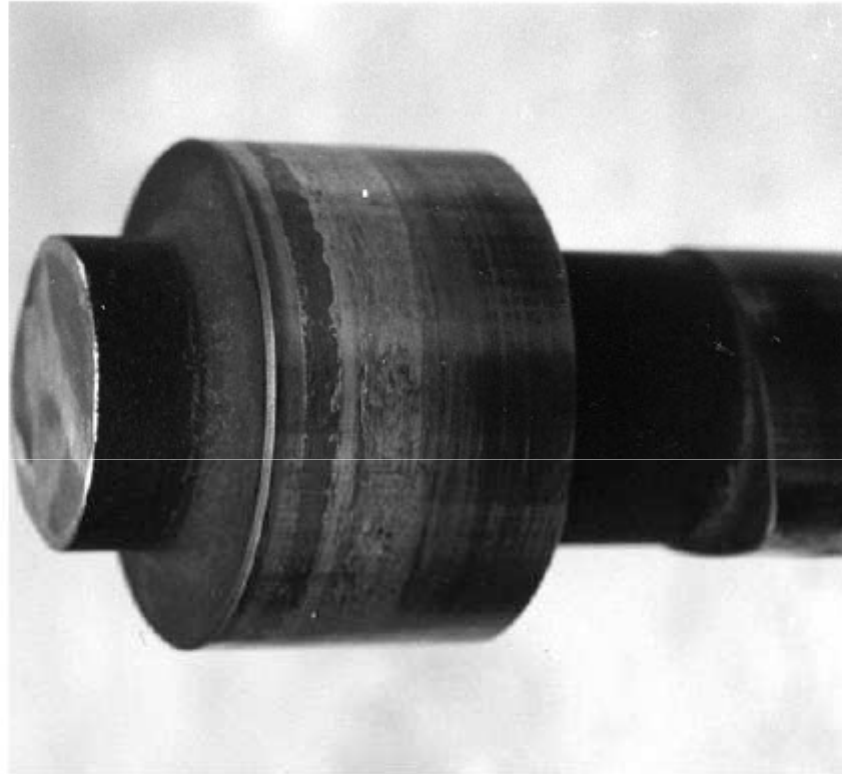
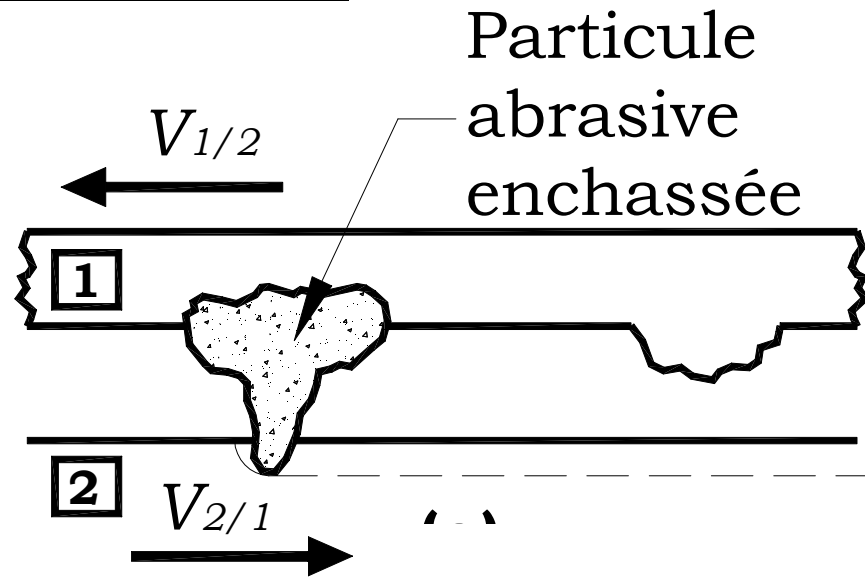


Figure 3 - Transfert consécutif à des liaisons adhésives (portée d'arbre à cames en acier frottant sur carter en alliage d'aluminium)

Usure par abrasion à deux corps



Usure par abrasion à trois corps



Abrasion si particule 15 à 20% plus dure que la surface (sable, oxydes d'Al)



Figure 5 - Usure abrasive à trois corps : arbre en acier nitruré frottant sur coussinet en acier 100 Cr 6, en ambiance d'eau chargée de sable

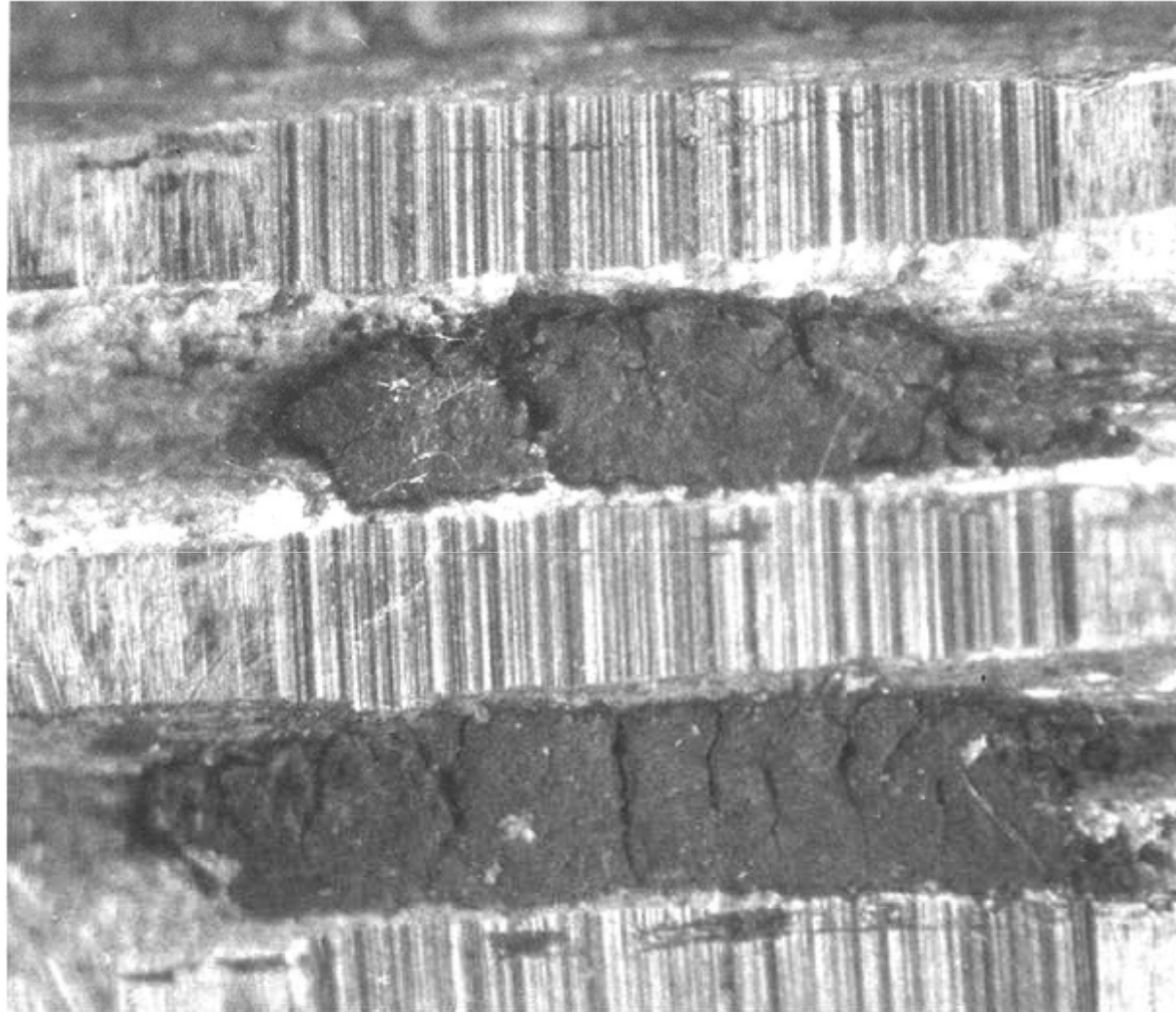
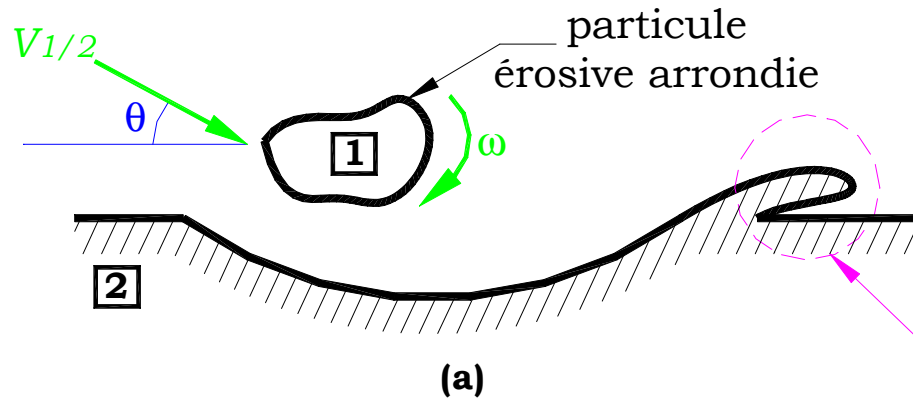


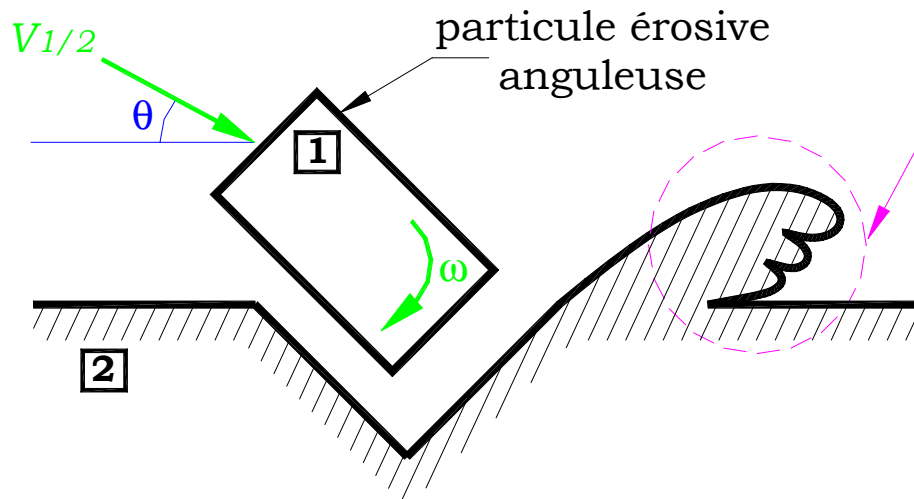
Figure 11 - Rôle des sculptures sur l'évacuation des débris d'usure (grossissement 30)

Erosion



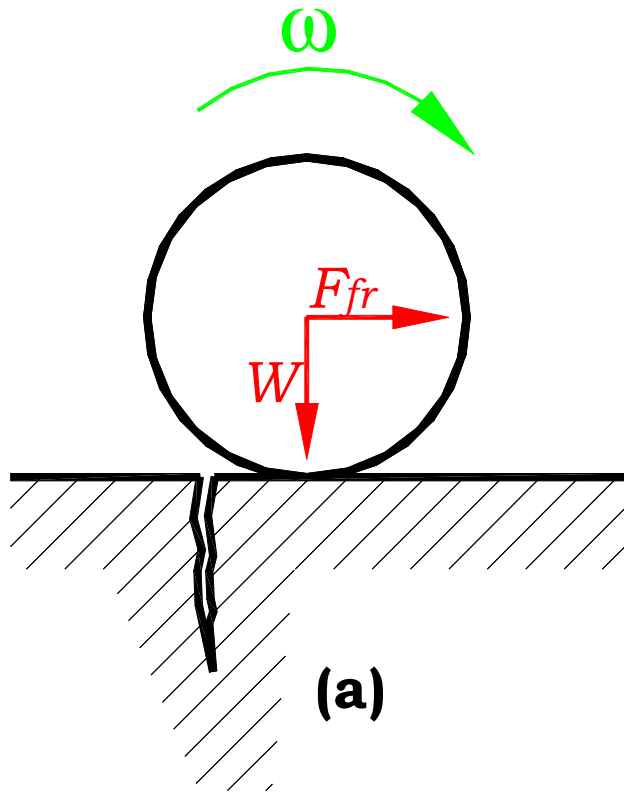
*Labourage par une
particule arrondie*

région très écroûie
qui sera enlevée
comme un fragment
d'usure lors
d'impacts successifs
dans la région

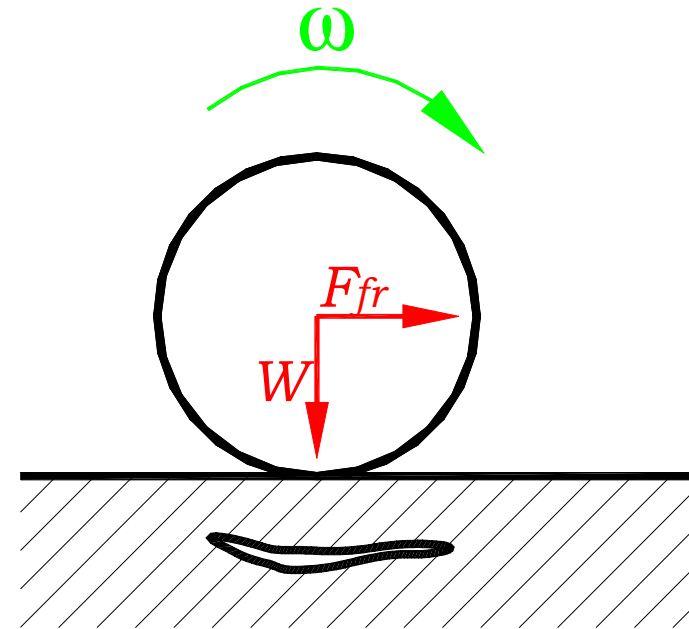


*Usinage par une particule
anguleuse*

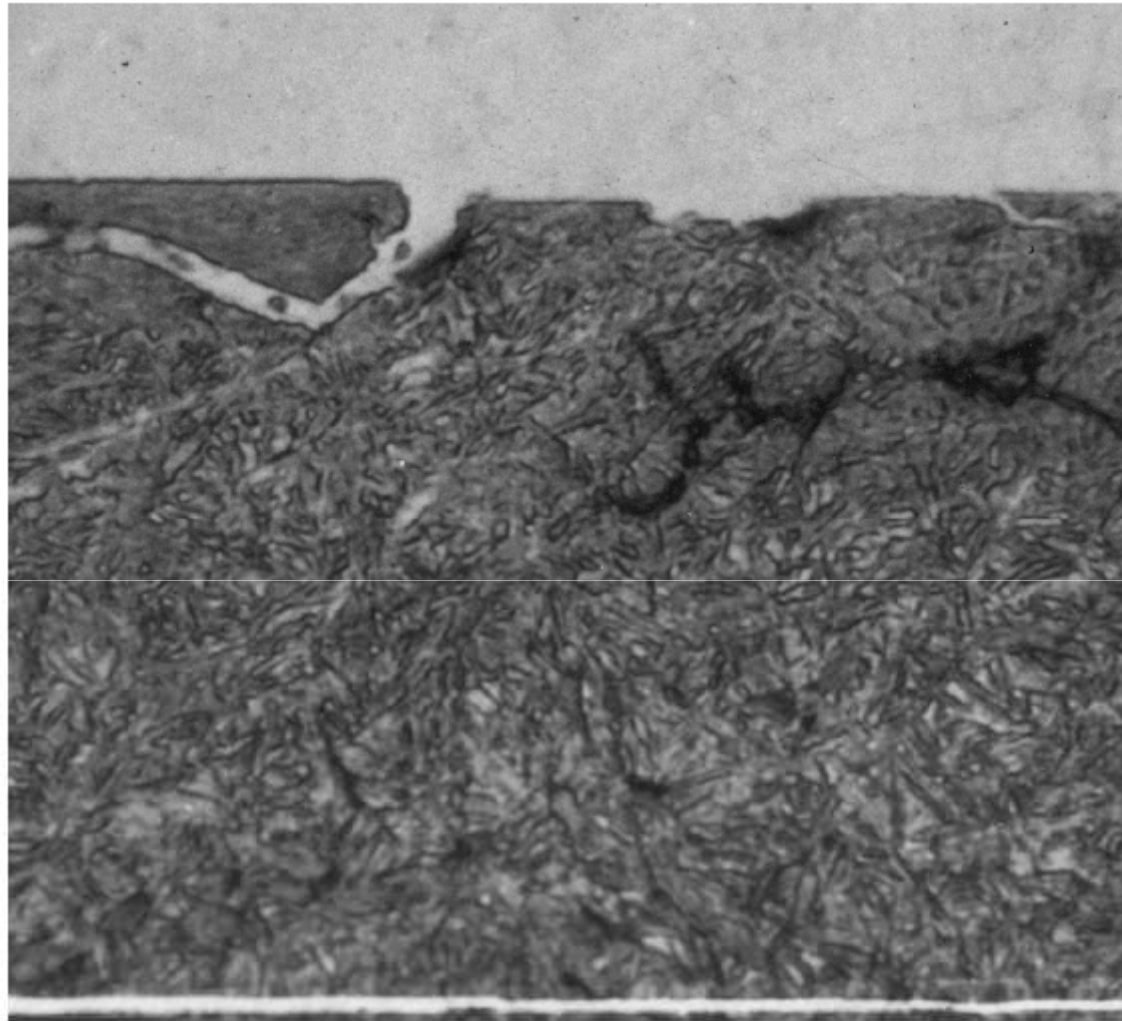
Fissures générées par fatigue : mécanismes



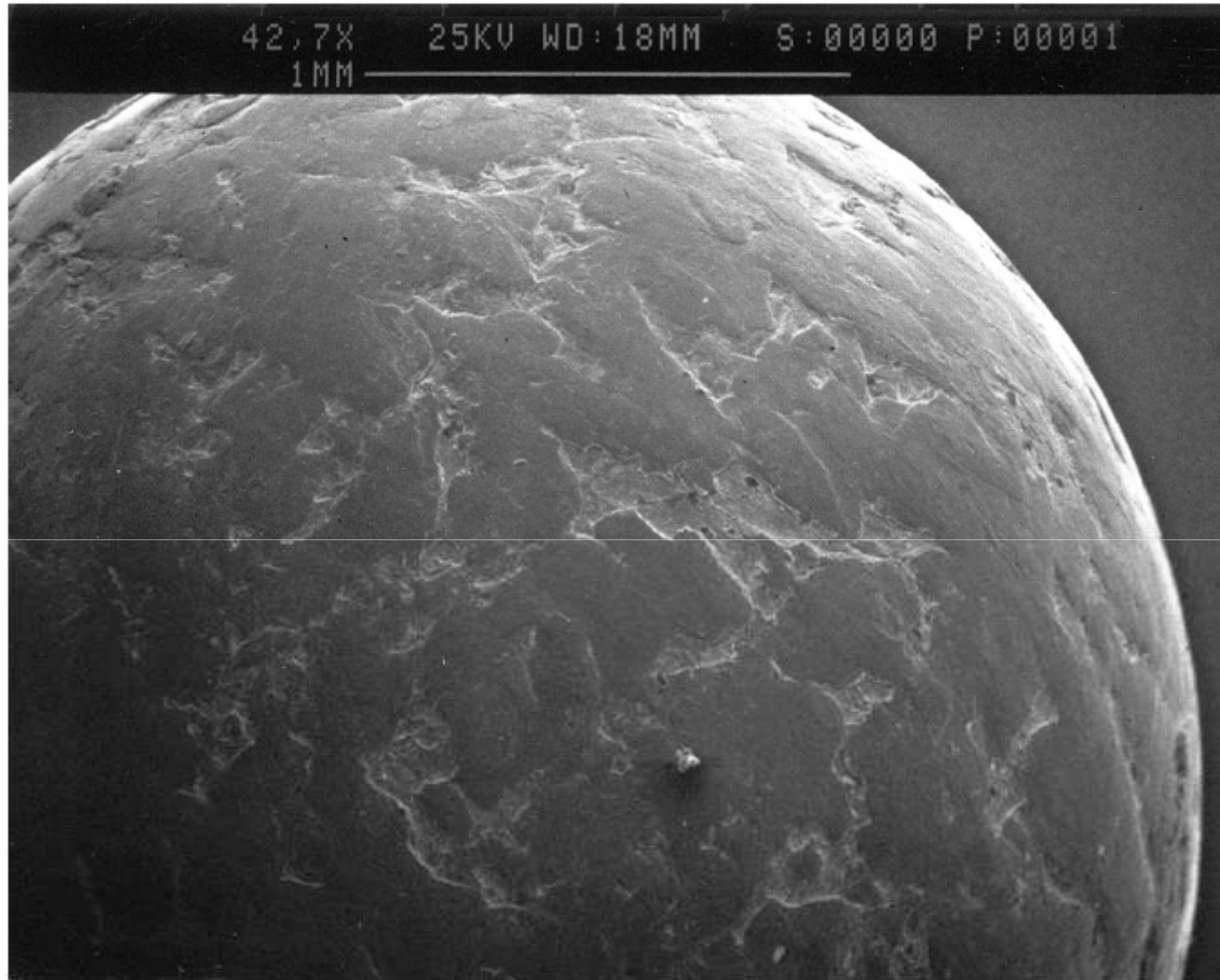
Fissure de surface



Fissure sous la surface



**(b) phénomènes vus en coupe micrographique
(Dent d'engrenage en acier cémenté trempé)
(grossissement 500)**



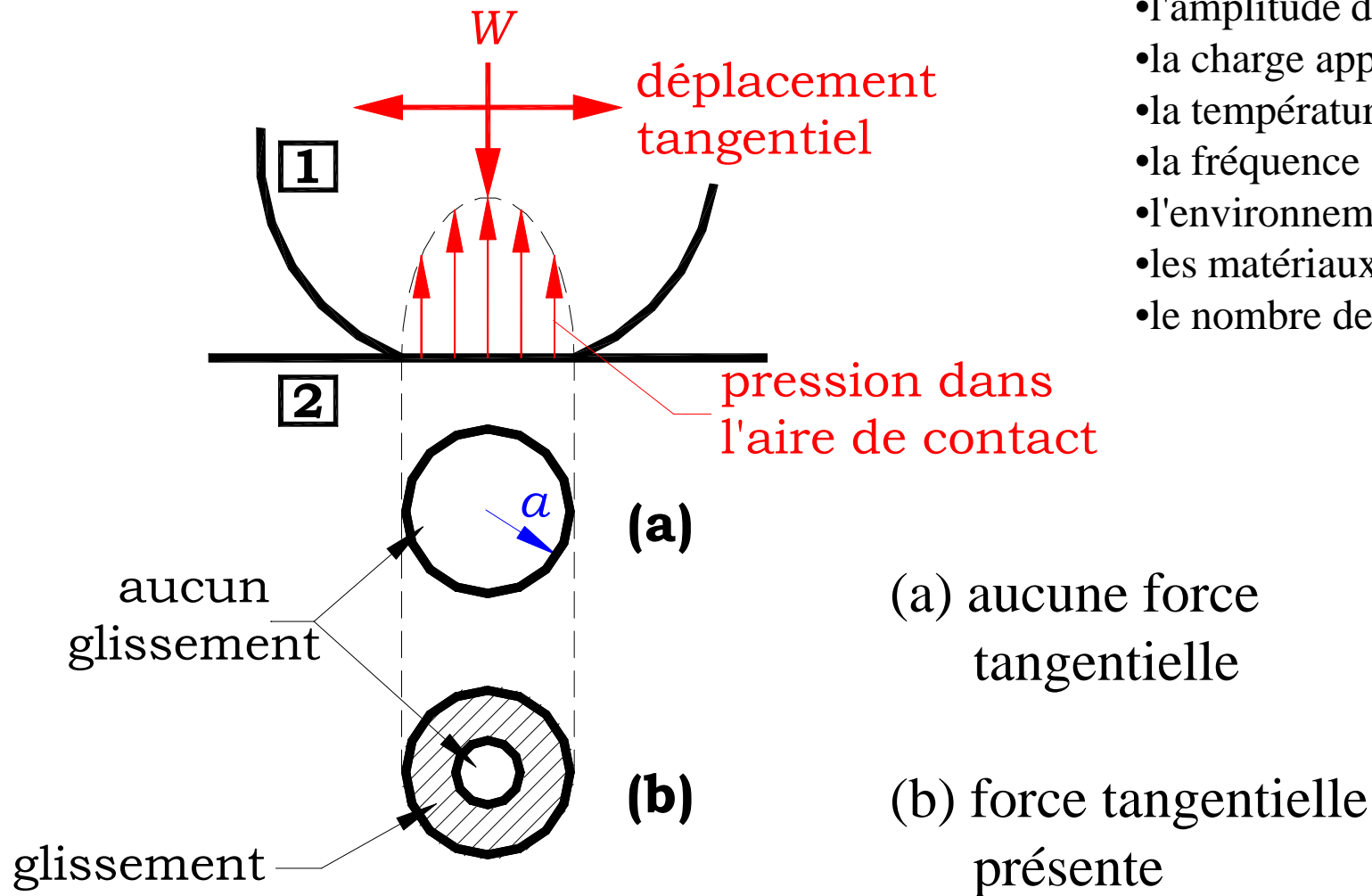
© stade final : écailles (bille de roulement en acier 100 Cr 6)

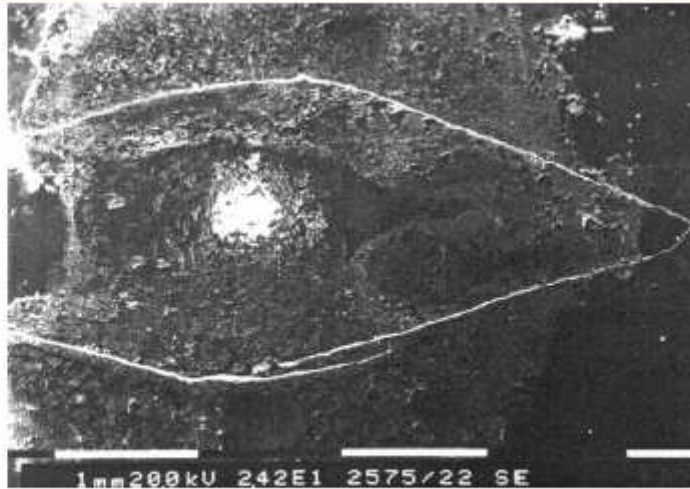


Fretting

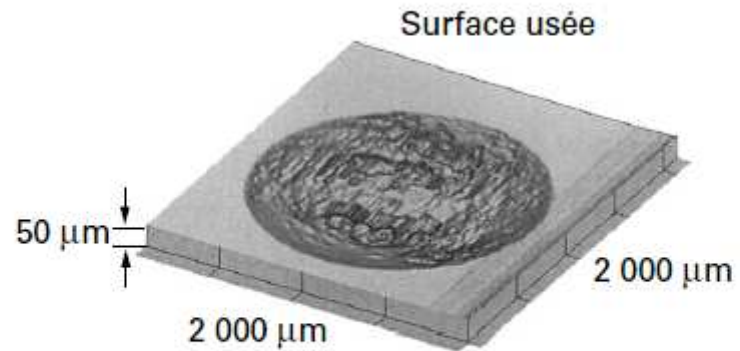
Paramètres :

- l'amplitude de débattement
- la charge appliquée
- la température au contact
- la fréquence
- l'environnement
- les matériaux en contact
- le nombre de cycles





(a) image d'une trace d'usure avec des fissures autour de la zone de contact (microscope électronique à balayage)

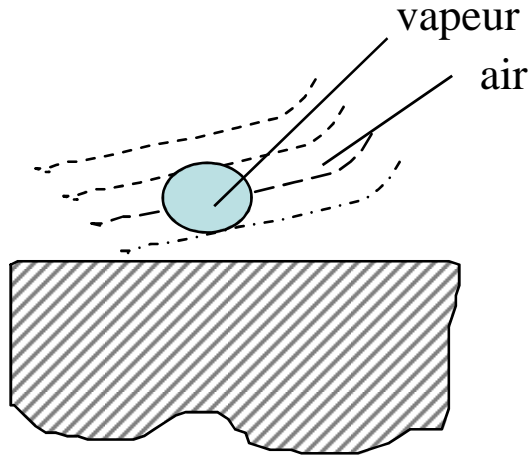


(b) relevé topographique d'une trace avec perte de matière dans la zone de contact

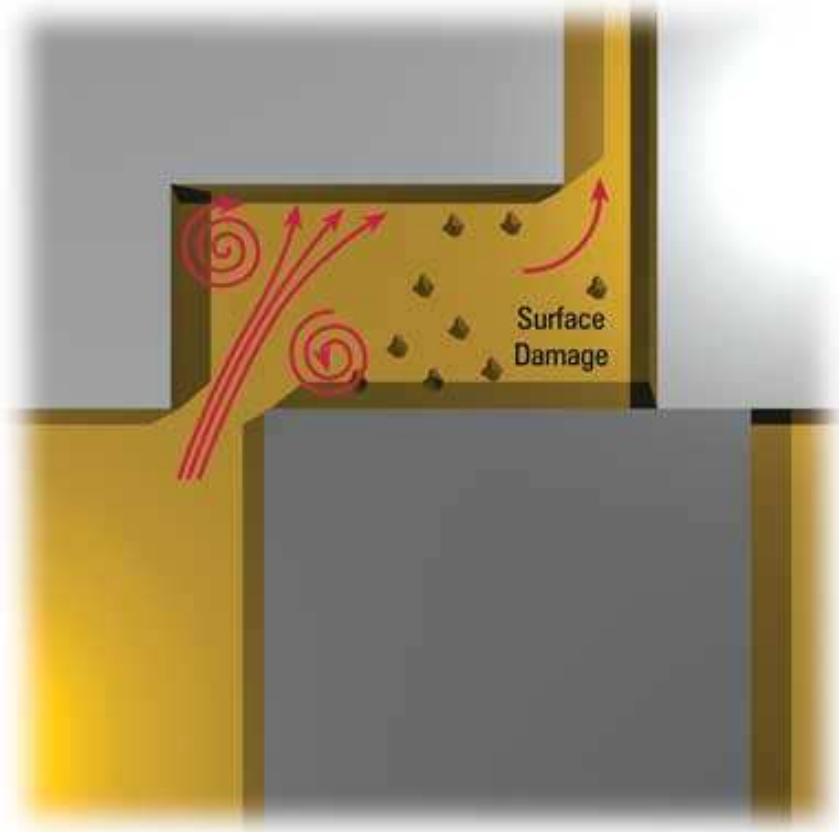
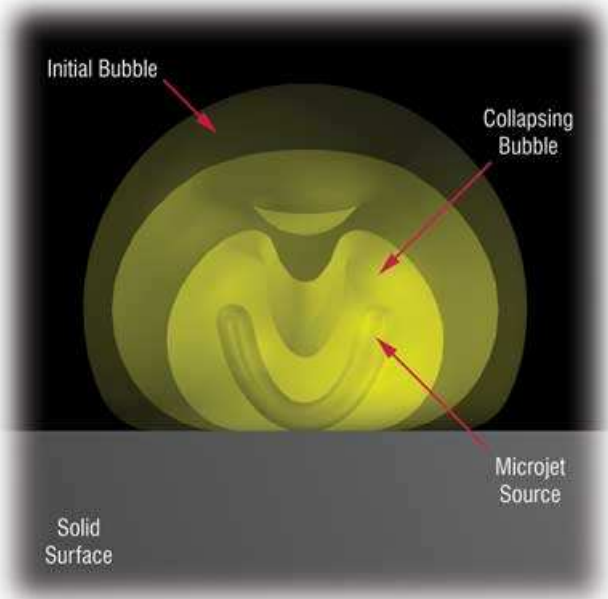
Figure 11 - Cicatrices d'usure typiques en fretting



Cavitation



implosion -> érosion



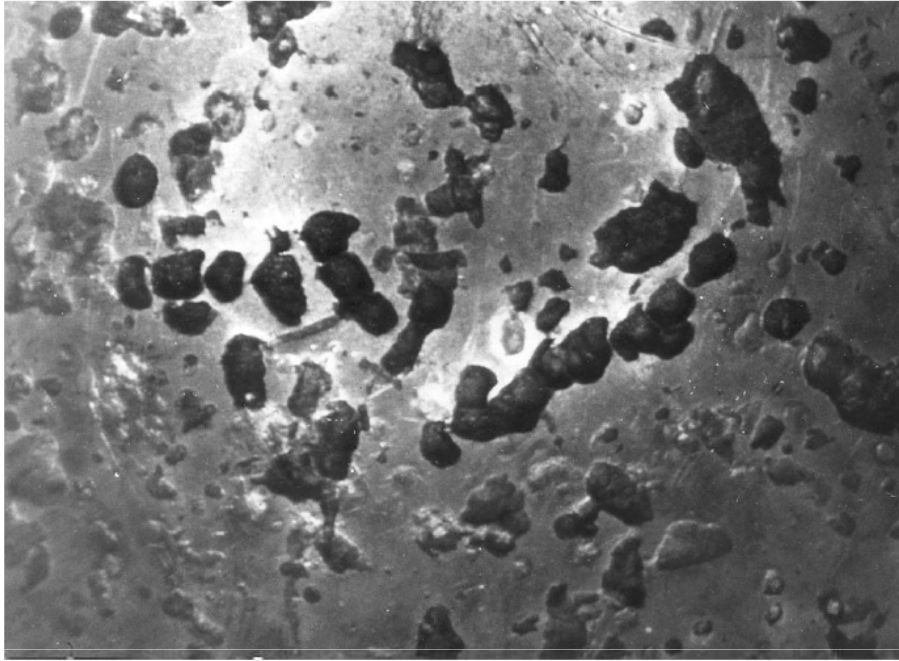


Figure 14 – Usure par cavitation. Patin de pompe hydraulique à pistons



Minimisation de l'usure

■ Adhérence

- métaux, polymères:
 - matériaux tribologiquement compatibles
 - fini de surface doux
- céramiques :
 - charge faible ou topographie de surface

■ Érosion, abrasion

- dureté de la surface
- angle d'incidence
- rapport $H_{\text{surface}}/H_{\text{abrasif}} > 1,2$

■ Fretting

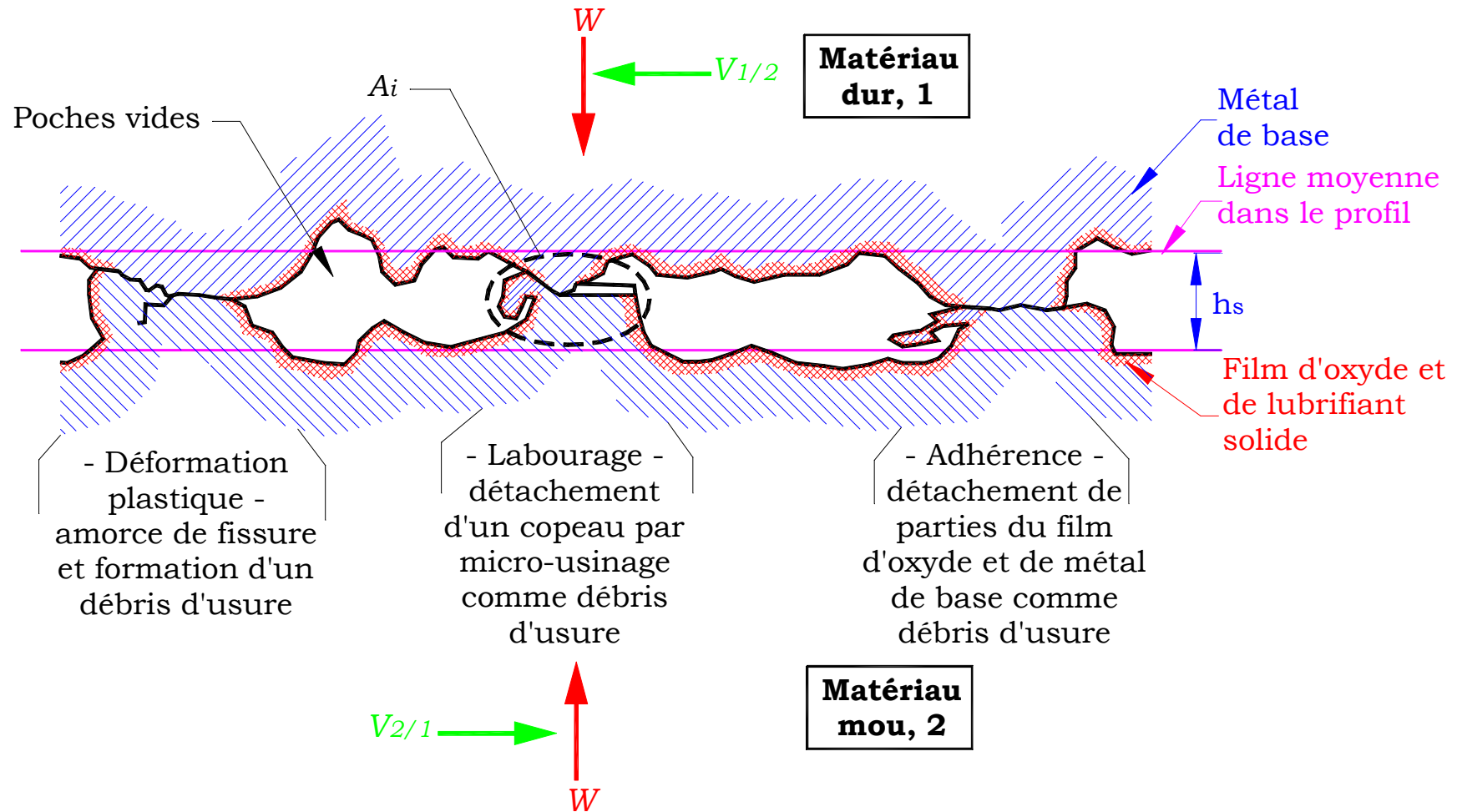
- lubrifiant solide dans le contact
- augmenter le serrage

- **Fatigue** : pas beaucoup de remèdes, sauf de réduire le nombre des défauts de surface, les inclusions ainsi que les efforts

Lubrifiant solide

- Diminue l'adhérence, le labourage et la déformation plastique en s'interposant entre les aspérités
- Préviend le grippage tant qu'il est présent en évitant le contact des matériaux de base
- Diminue la température en diminuant la force de frottement, mais n'évacue pas la chaleur
- S'use et ne se renouvelle pas, sauf via les débris d'usure
- Principales propriétés :
 - bien adhérer aux surfaces
 - avoir une faible résistance au cisaillement

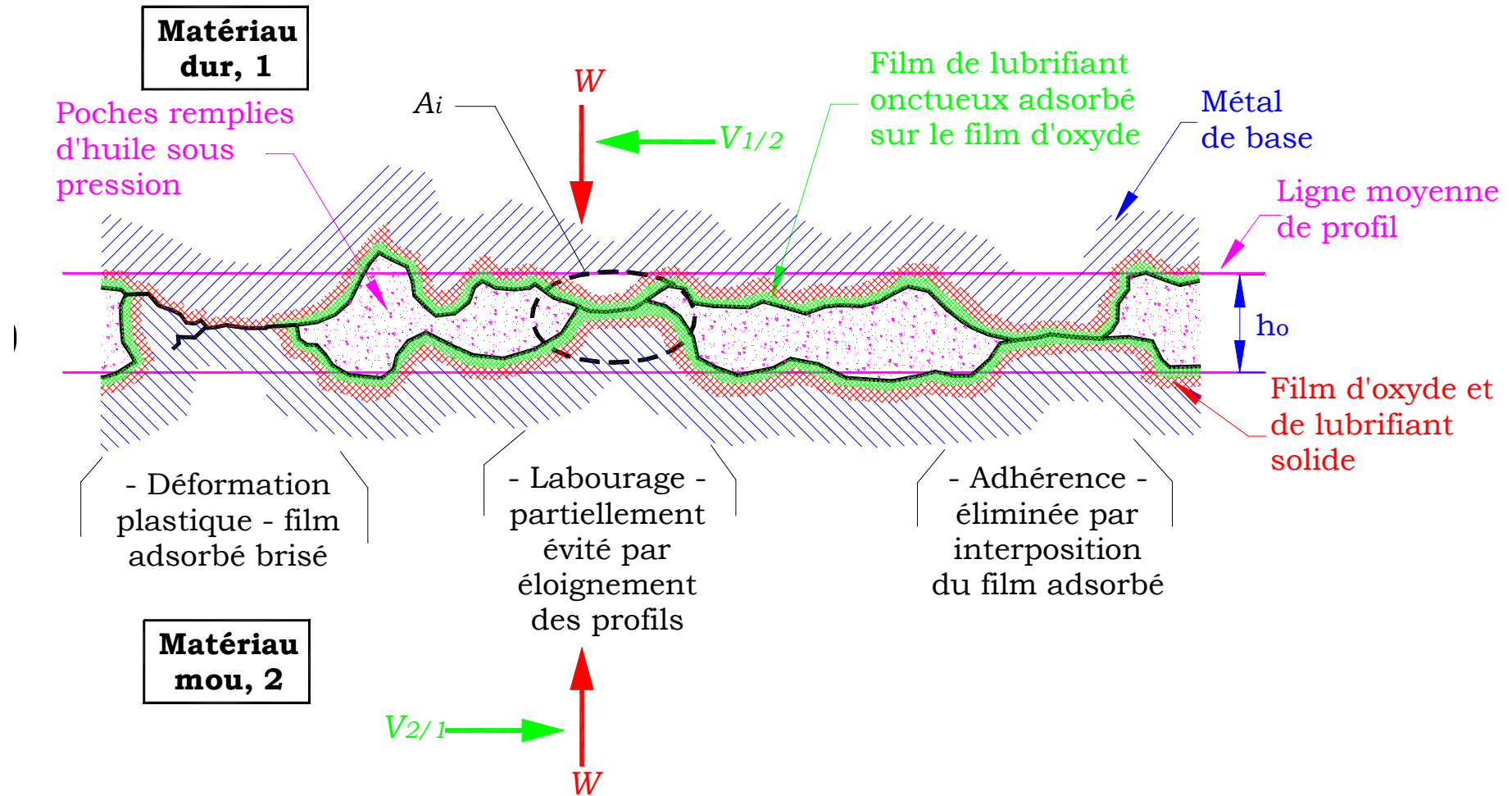
Lubrifiants solides : mode d'action



Lubrifiants onctueux

- Diminuent l'adhérence, le labourage et les déformations plastiques en s'interposant entre les aspérités et en les séparant
- Diminuent la pression sur les aspérités en formant des poches de lubrifiant sous pression entre les aspérités
- Abaissent la température en diminuant la force de frottement, mais n'évacuent pas le chaleur
- Étant de nature organique, ils *fondent* (déadsorbent) à des températures de l'ordre de 100 à 200°C
- S'usent, mais se renouvellent tant qu'ils sont présents
- Principales propriétés des graisses :
 - réagir chimiquement avec les surfaces(chimisorbtion)
 - fondre à une température élevée

Lubrifiants onctueux adsorbés : mode d'action



Composition des graisses

- **Fluide lubrifiant** (80 à 90 % en masse)
 - une huile minérale
 - une huile synthétique
 - PAO(Poly Alpha Oléfine) C_nH_{2n+2}
 - esters
$$\begin{array}{c} O \\ | \\ R-C-O-R' \end{array}$$
 - Polyglycols
$$\begin{array}{c} R-CH-CH-R' \\ | \quad | \\ OH \quad OH \end{array}$$
- **Épaississeur** (5 à 20 % en masse)
 - savons métalliques (Ca et Li en majorité; Al, Ba et Na moins utilisés)
 - gels de silice ou d'argile
- **Additifs** (le reste de la composition)
 - anti-oxydants, anti-usure, anti-rouille, anti-corrosion

Caractéristiques des principales graisses

Nom	Graisse au:					
	Lithium Savon Li		Sodium Savon Na	Calcium Savon Ca	Aluminium Savon Al	Bentone, Gel de silice
Huile de base	minérale	diester	minérale	minérale	minérale	minérale
Point de goutte, °C	170 à 190	170 à 190	150 à 180	80 à 280	70 à 90	> 250
Gamme de température d'application, °C	-30 à +130	-50 à +130	-20 à +130	-20 à +150	-10 à +80	-10 à +130
Formation du film EHD ⁽¹⁾	B	B	B à E	B	M	B
Comportement en présence d'eau	B	B	M	E	B	B
Applications	La plus utilisée (tous types de roulements) Pour roulements à rouleaux	Basses températures Bonne résistance à l'usure	Charges élevées à basse vitesse	Milieus humides Usage général (tous types de roulements)	Milieus où il y a des vibrations importantes	Hautes températures

⁽¹⁾ E = excellent ; B = bon ; M = médiocre

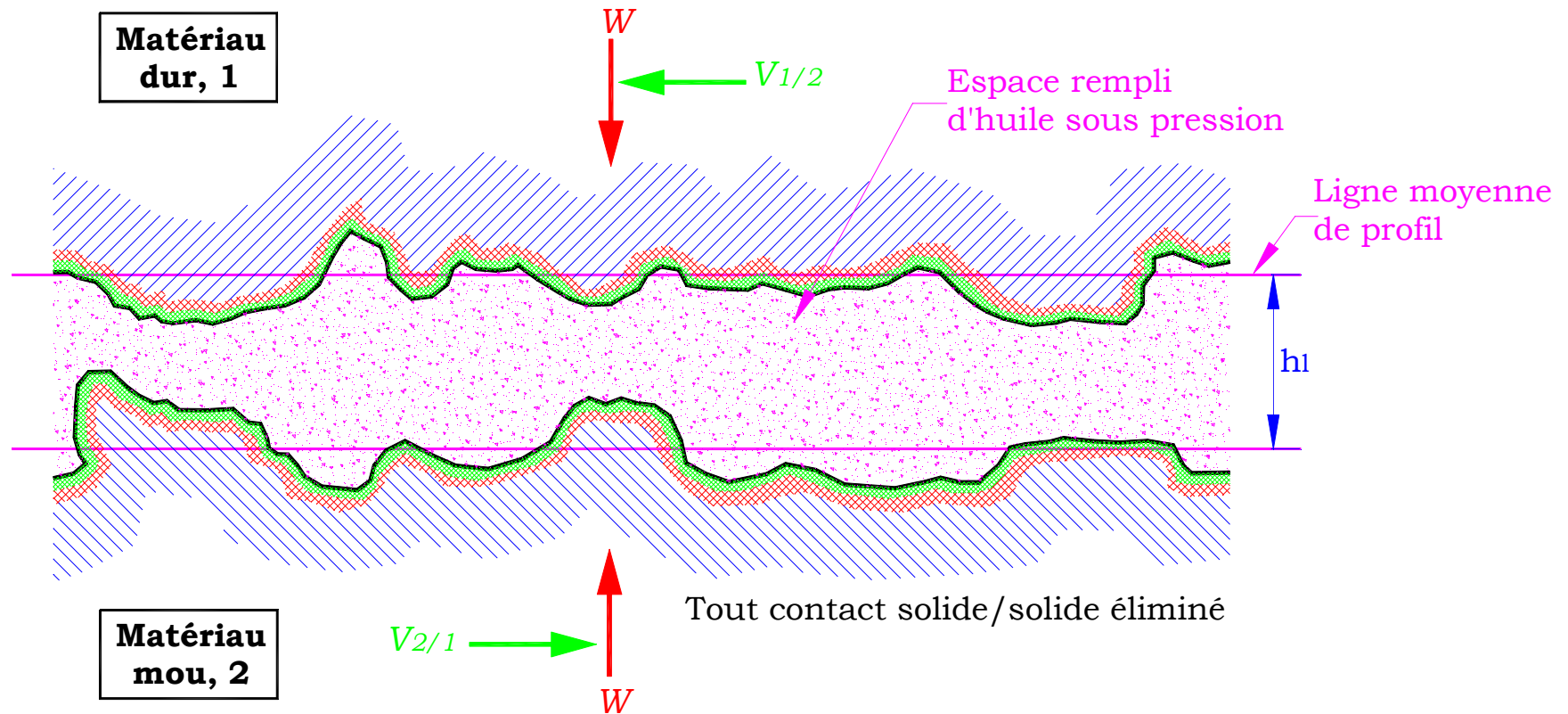
Lubrifiants liquides

Préviennent toute forme d'usure (sauf la fatigue) en éliminant tout contact solide-solide entre les aspérités. Diminuent et éliminent la chaleur générée par frottement.

Principales propriétés :

- propriété fondamentale : ***viscosité***
- conservation de la viscosité avec la température et le temps

Lubrifiants liquides : mode d'action



Huiles minérales

Huiles brutes :

- *Aromatiques* : grande proportion de chaînes cycliques
- *Naphténiques* : proportion modérée de chaînes cycliques et des chaînes droites et ramifiées
- *Paraffines* : surtout des chaînes droites et ramifiées et des paraffines
- *mixtes* (le plus courant) : un mélange des trois précédentes huiles

Facilement disponibles, peu chères, grande gamme de viscosité

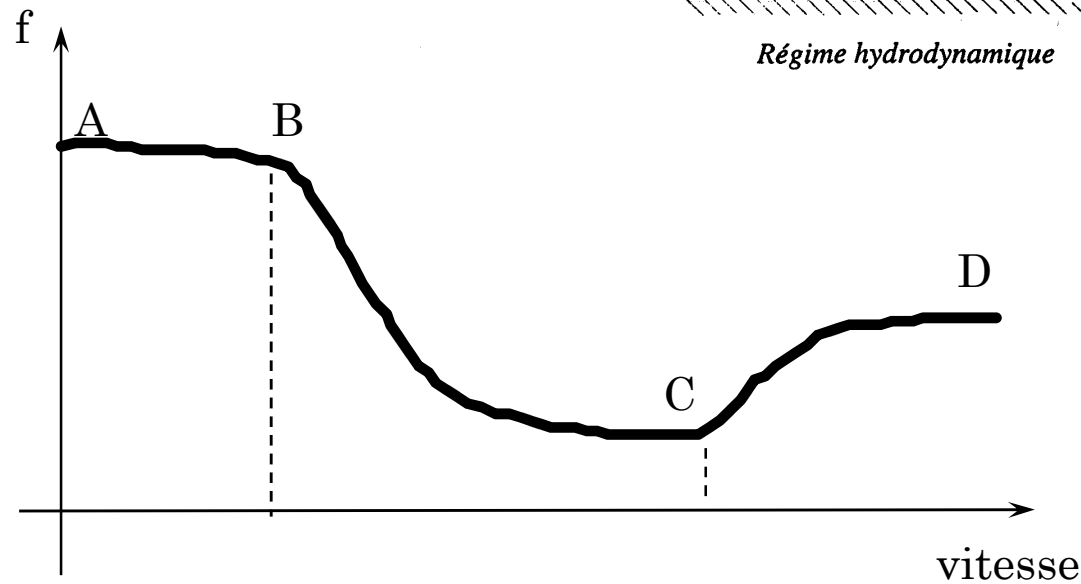
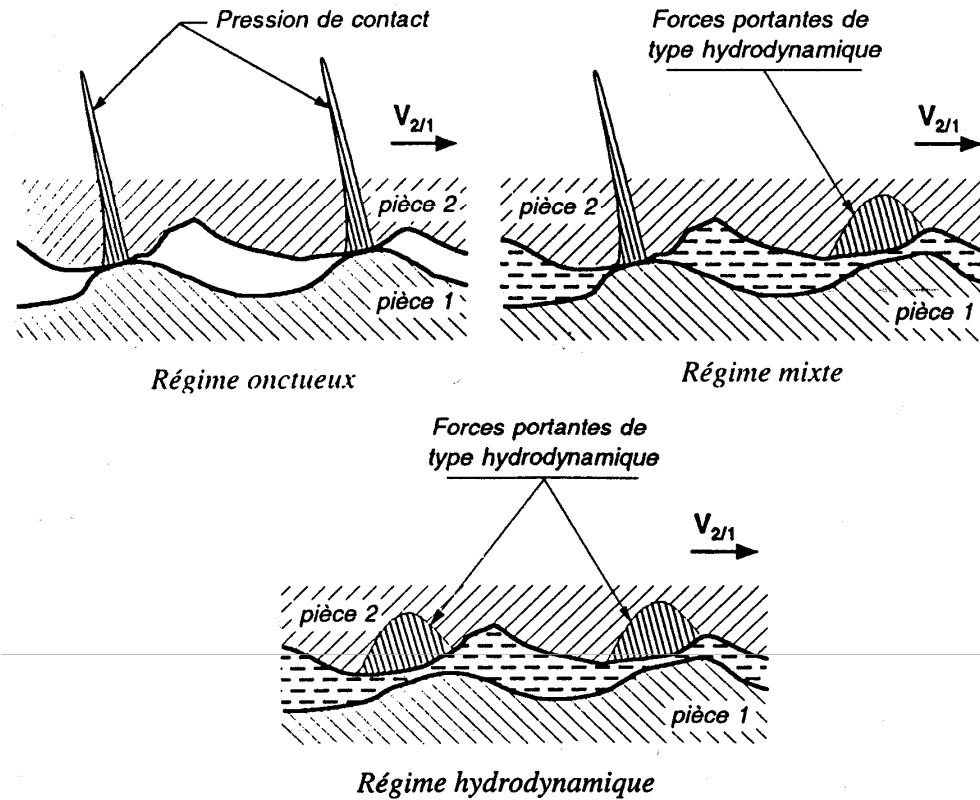
Huiles raffinées, contenant :

- des impuretés (N_2 , O_2 , des chaînes non saturées instables)
- grande variété de chaînes en longueur et en nature

Pas de contrôle sur la nature des chaînes

Huiles synthétiques

- Chaînes polymérisées à partir de monomères de base
- Bon contrôle de la longueur des chaînes et de leur nature
- Ne contiennent pas d'impuretés, ni de chaînes non saturées
- Fabriquées à partir de monomères connus pour obtenir des caractéristiques constantes
- Chères, mais facilement disponibles



AB : faible couche de lubrifiant
Régime onctueux

BC : Création d'un film
Régime Mixte

CD : **Régime hydrodynamique**

□ Ordre de grandeur du coefficient de frottement

