

Éléments de Machine
Cours de Construction Mécanique
Première Année
Sections MicroTechnique et Génie Mécanique

14 séances:

1. Introduction
2. Cycle de Vie – Matériaux, Produit et Développement
3. Energie & Puissance
4. Matériaux
5. **Frottement**
6. Guidages
7. Accouplements
8. Transmission de Mouvement et de Couple
9. Transformation de Mouvement
10. Ressorts

5. Frottement

1. Introduction
2. Adhérence / Frottement
3. Types de Frottement
4. Frottement Sec
5. Lubrification
6. Coefficients de Frottement
7. Usure
8. Frottement dans les Mécanismes
9. Résistance au Roulement

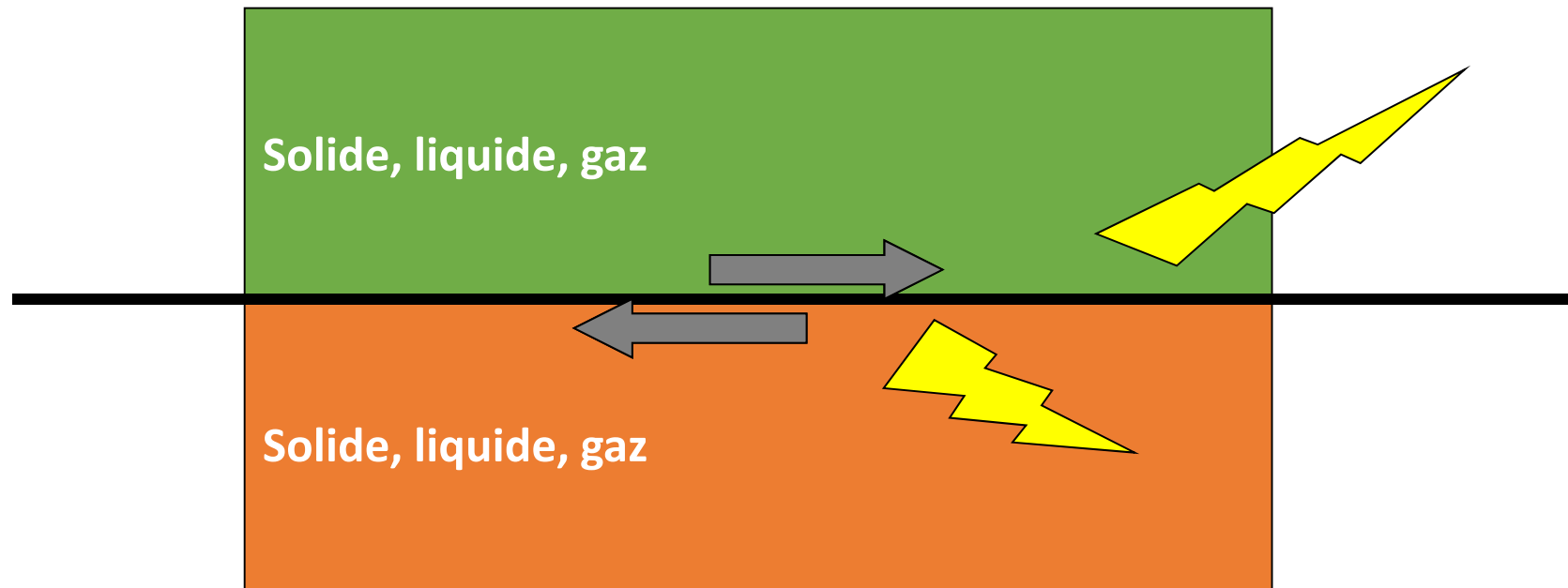


- Joignez vos mains
- Pressez-les l'une contre l'autre
- Essayez de les translater parallèlement à la surface de contact des paumes

Que constatez vous ?

Interaction de 2 éléments en mouvement relatif en une interface engendrant:

- Une force tangentielle à l'interface s'opposant au mouvement
- Une dissipation thermique



Tribologie: Science du frottement

Etude des phénomènes à l'interface:

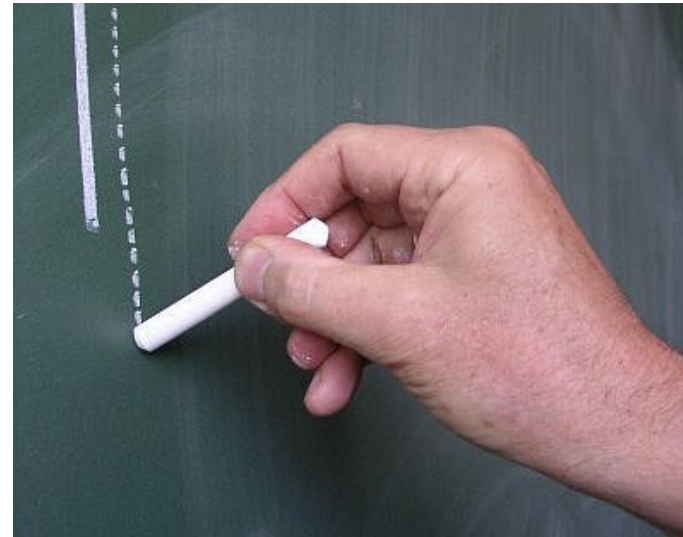
Entre 2 ou plusieurs systèmes en contact

Statiques (immobiles) ou dynamiques (en mouvement)

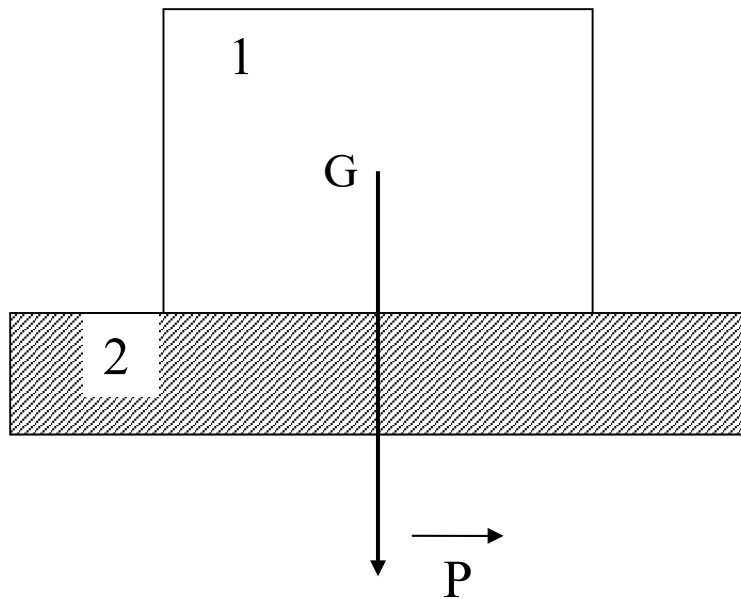
Frottement

Usure

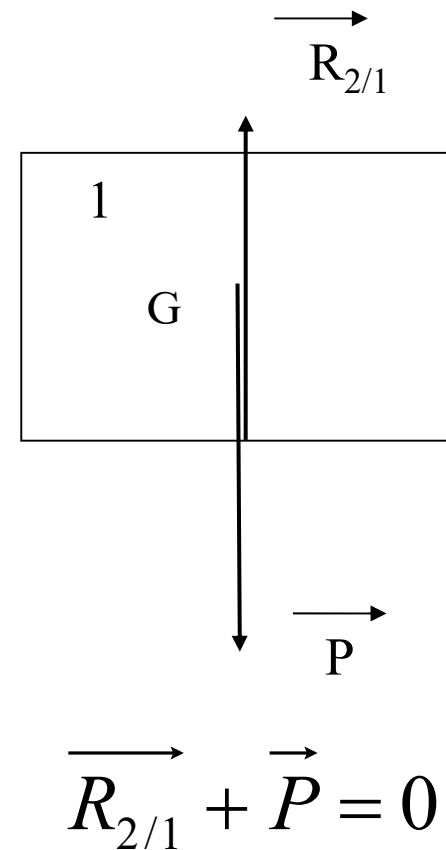
Lubrification



Statique: Corps en équilibre sur un plateau

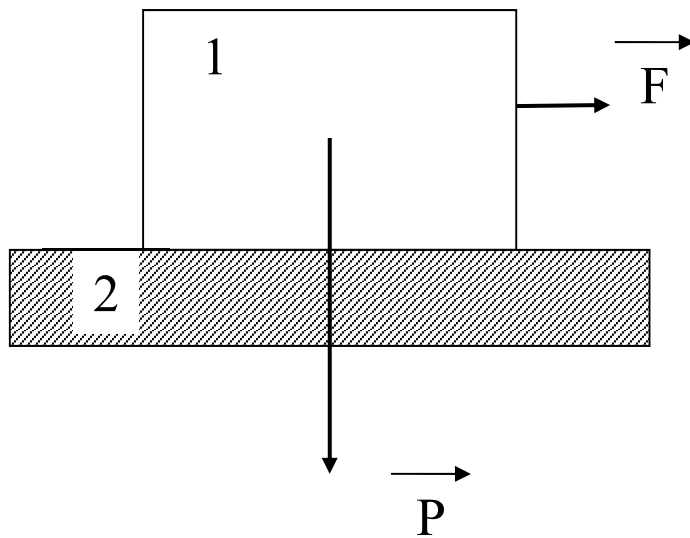


$$\left\{ \overrightarrow{T}_{S2/1} \right\}_G = {}_G \left\{ \begin{array}{c} \overrightarrow{R}_{2/1} \\ \vec{0} \end{array} \right\} = {}_G \left\{ \begin{array}{c} -\overrightarrow{P} \\ \vec{0} \end{array} \right\}$$



$$\overrightarrow{R}_{2/1} + \overrightarrow{P} = \vec{0}$$

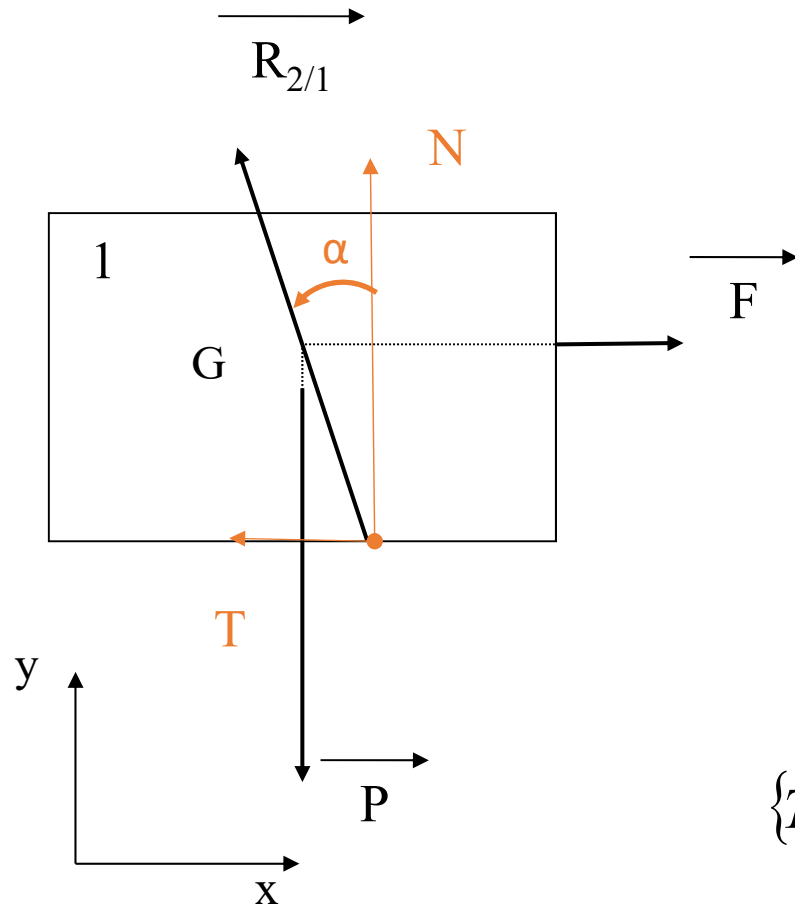
Expérience: tentative de mise en mouvement



$F < F_0$: pas de mouvement

$F > F_0$: mouvement

Equilibre du corps 1: pas de mouvement

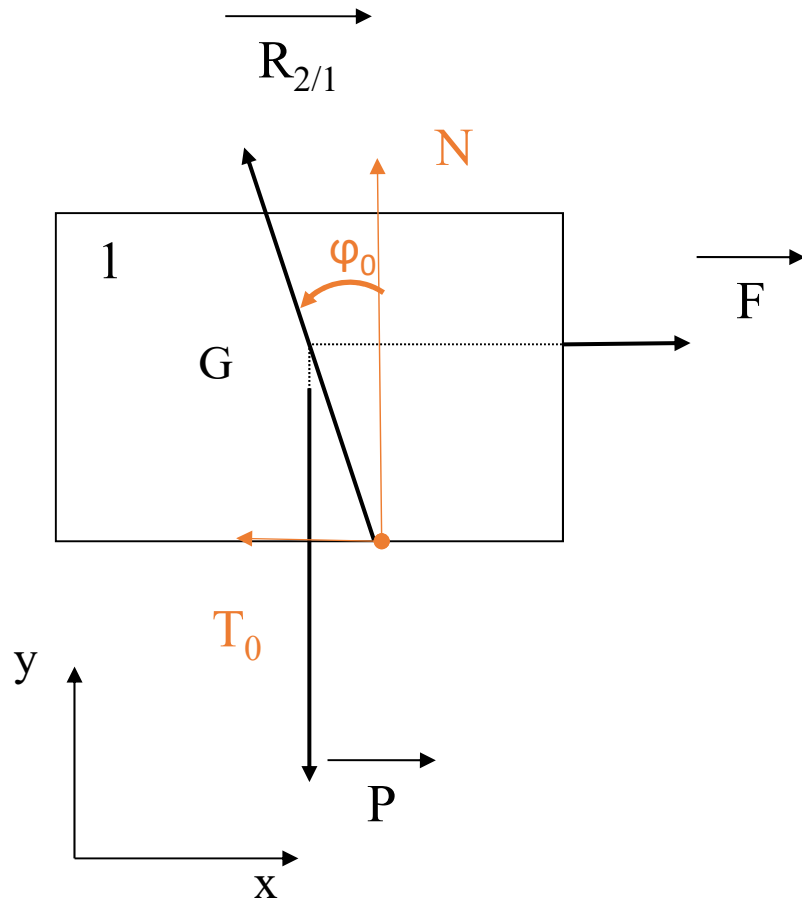


$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{R_{2/1}} + \overline{P} + \overline{F} = 0 \\ \overline{M(R_{2/1})} + \overline{M(P)} + \overline{M(F)} = 0 \end{array} \right\}$$

$$N = \|\vec{P}\| \quad T = -\|\vec{F}\|$$

$$\{T_{S2/1}\}_G = \begin{Bmatrix} \overline{R_{2/1}} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_G = \begin{Bmatrix} -\|\vec{F}\| & 0 \\ +\|\vec{P}\| & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_G$$

Limite de l'équilibre du corps 1 au démarrage



$$T_0 = -\|\vec{F}_0\|$$

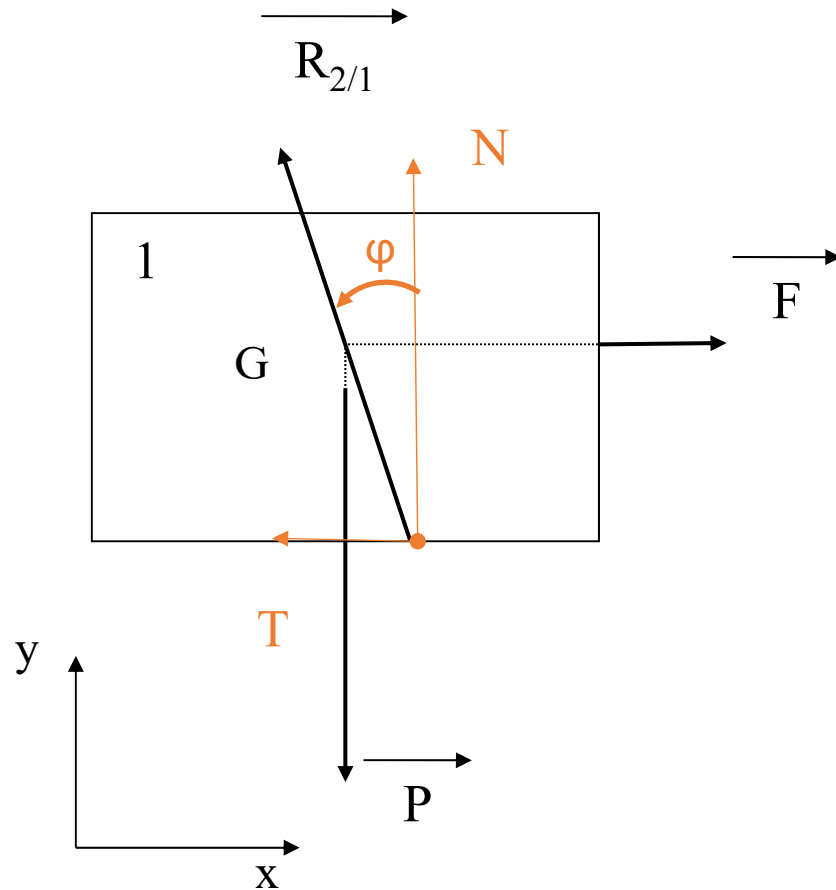
$$N = \|\vec{P}\|$$

$$\frac{T_0}{N} = \tan \varphi_0 = \mu_0$$

$$\alpha = \varphi_0$$

μ_0 = coefficient d'adhérence

Corps 1 en mouvement



$$T = - \|\vec{F}\|$$

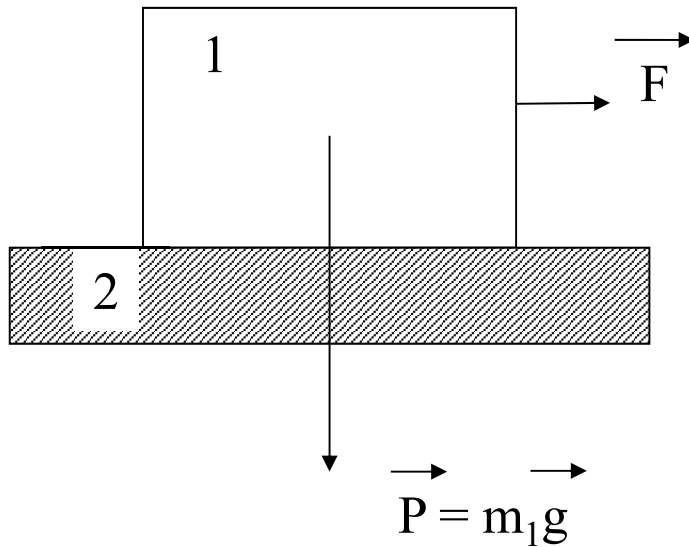
$$N = \|\vec{P}\|$$

$$\frac{T}{N} = \tan \varphi = \mu$$

$$\alpha = \varphi$$

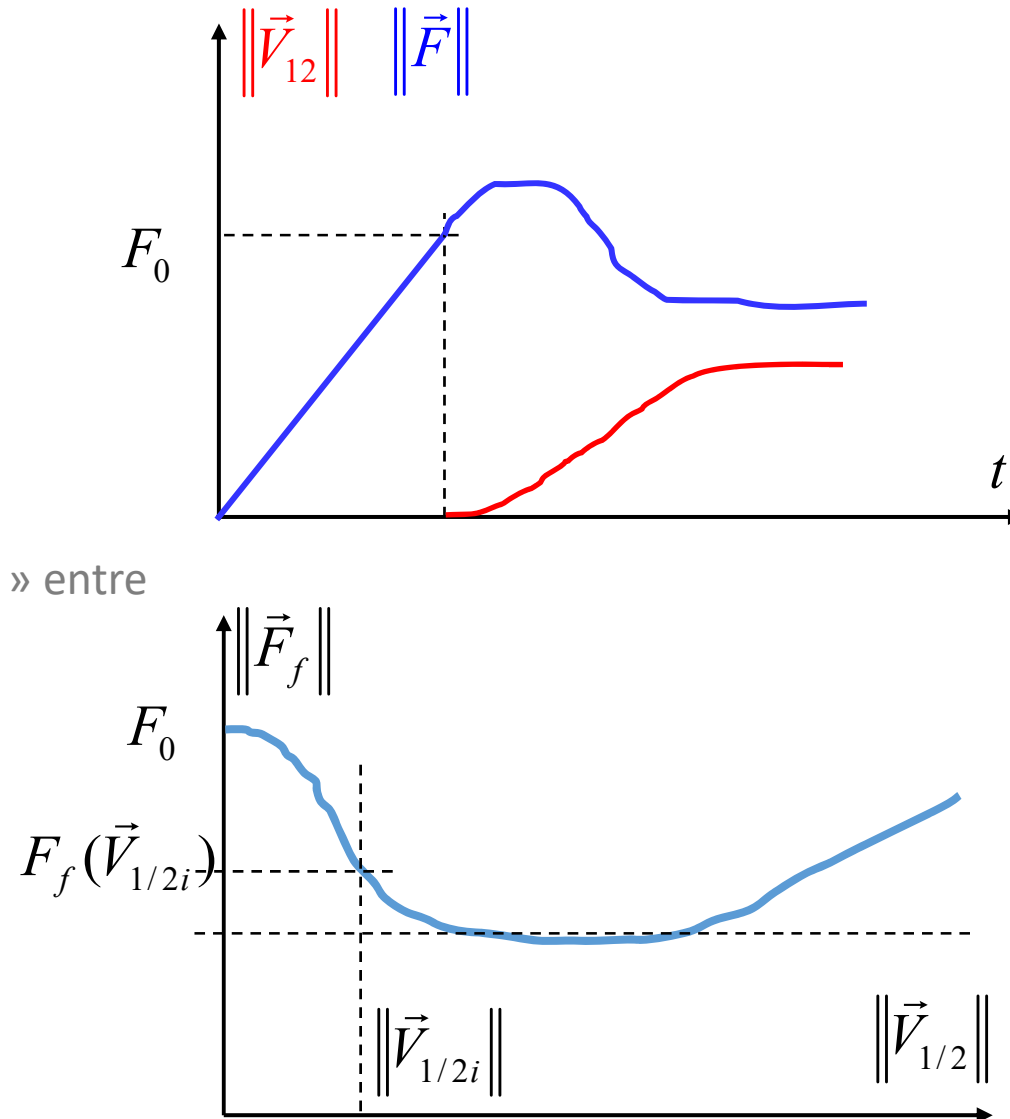
μ = coefficient de frottement

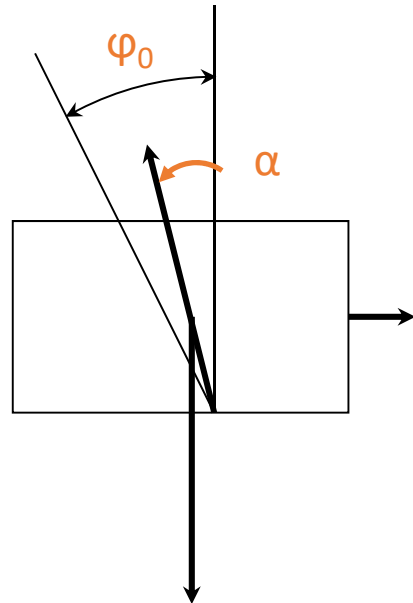
Vitesse et effort appliqués



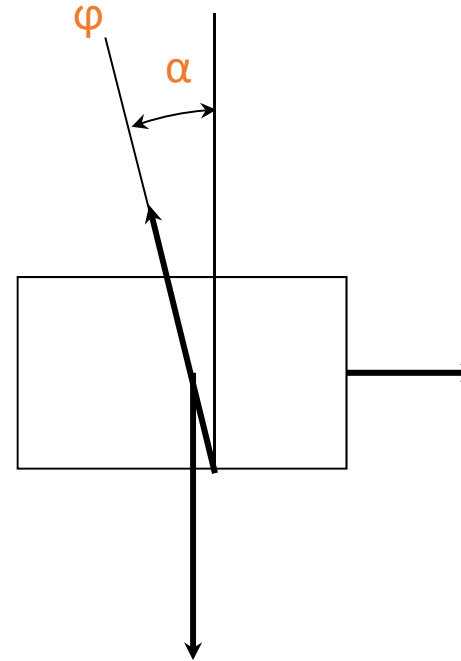
Puissance dissipée:

$$P(\vec{V}_{1/2}) = \vec{F}(\vec{V}_{1/2}) \cdot \vec{V}_{1/2}$$



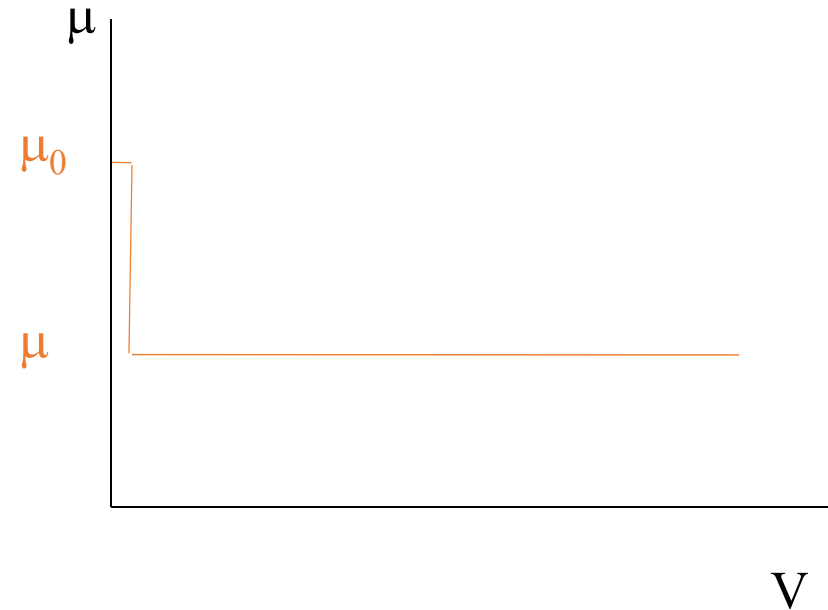
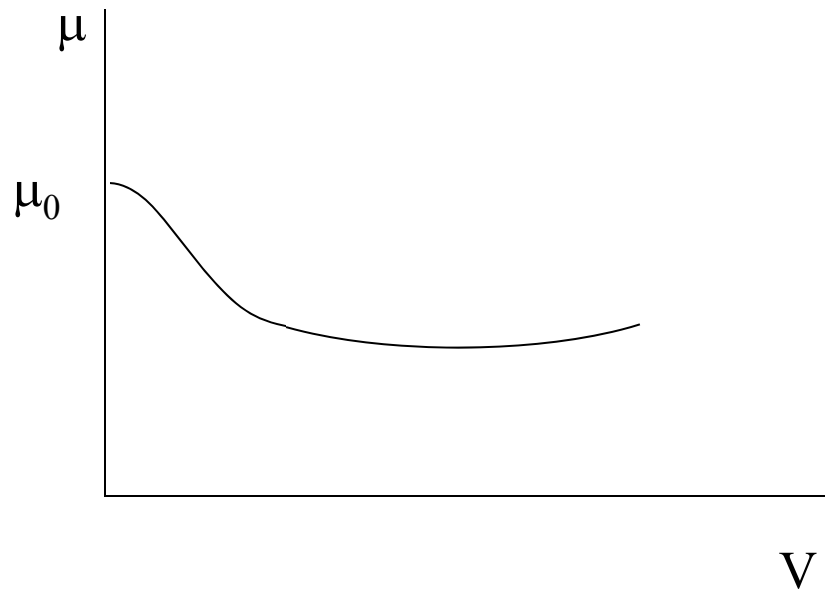


Adhérence : $\alpha \leq \varphi_0$



Glissement : $\alpha = \varphi$

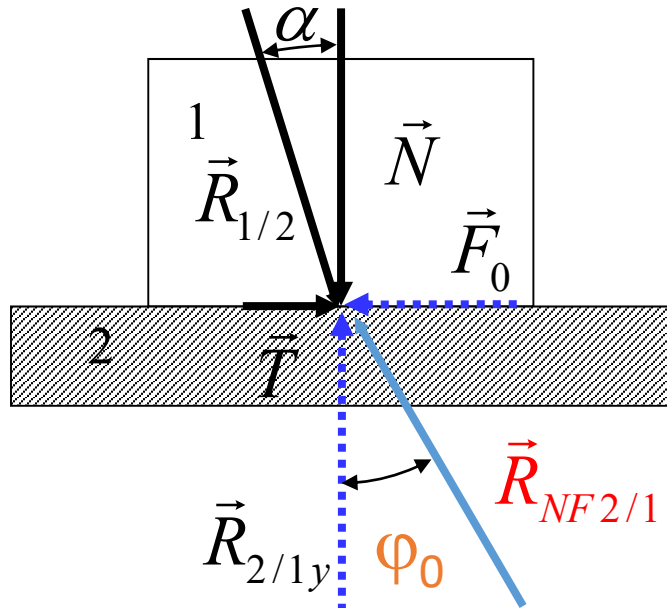
Modélisation des coefficients de frottement



A l'arrêt : adhérence : μ_0

En mouvement : frottement : μ

Condition d'adhérence ou d'arc-boutement



$$T/N = \tan \alpha \rightarrow T = N \tan \alpha$$

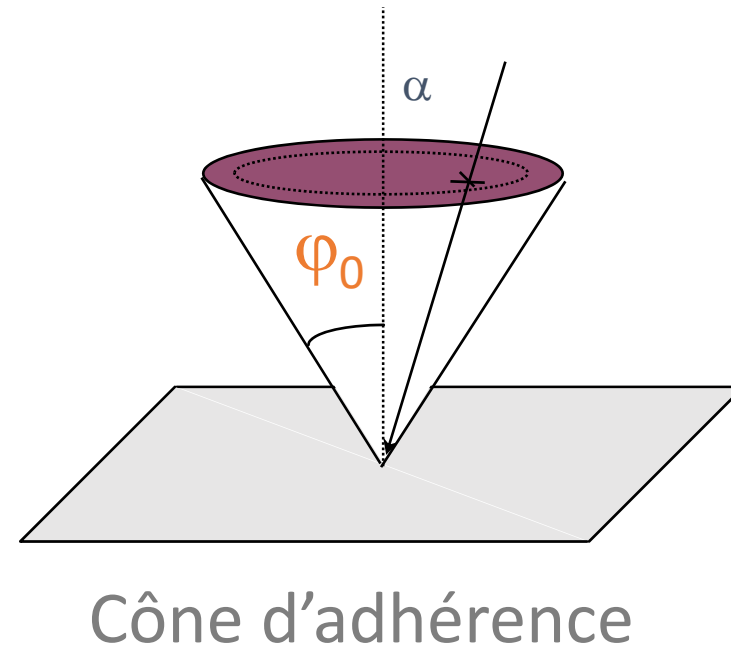
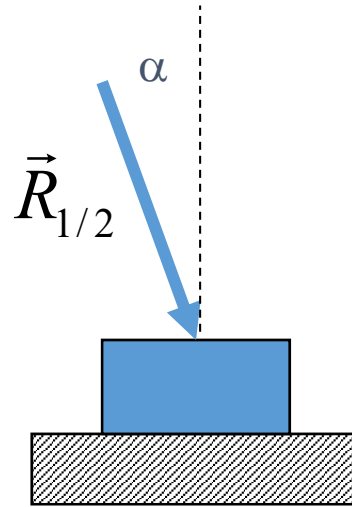
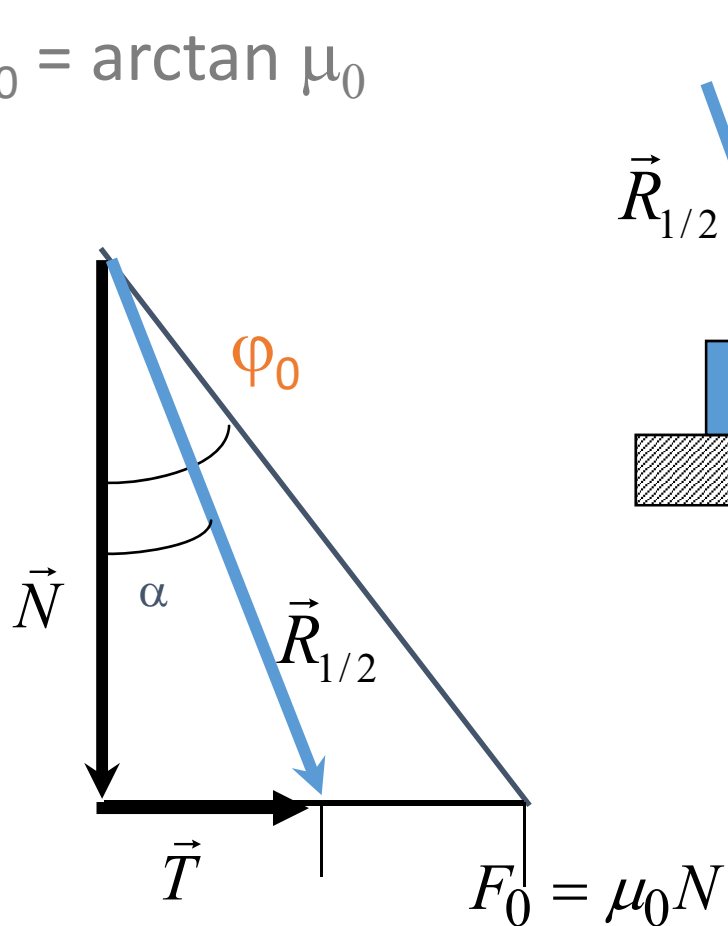
$\varphi_0 = \arctan \mu_0$: angle d'adhérence

Mouvement SSI:

$$T > F_0 \rightarrow N \tan \alpha > N \tan \varphi_0 \rightarrow \alpha > \varphi_0$$

Condition d'adhérence ou d'arc-boutement

$$\varphi_0 = \arctan \mu_0$$



3 grandes classes de frottement

Frottement sec :

Contact immédiat des aspérités

Rare en mécanique

Fréquent en microtechnique



Frottement mixte ou onctueux :

Contact immédiat des aspérités

Avec corps interposé :

Lubrifiant ou abrasif (graissage pauvre)



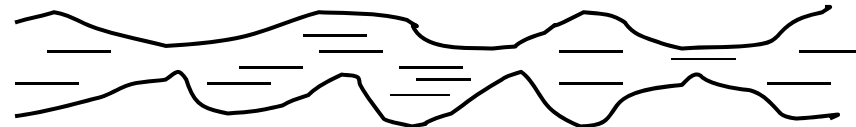
Frottement hydrodynamique:

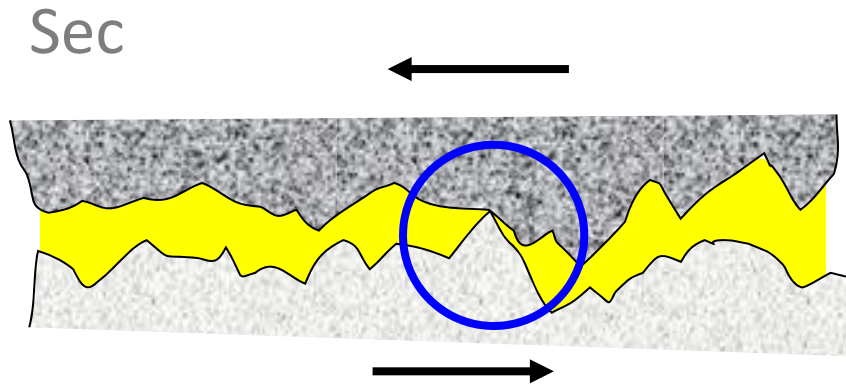
Pas de contact des aspérités

Lubrifiant en couche épaisse

Rare en microtechnique

Fréquent en mécanique

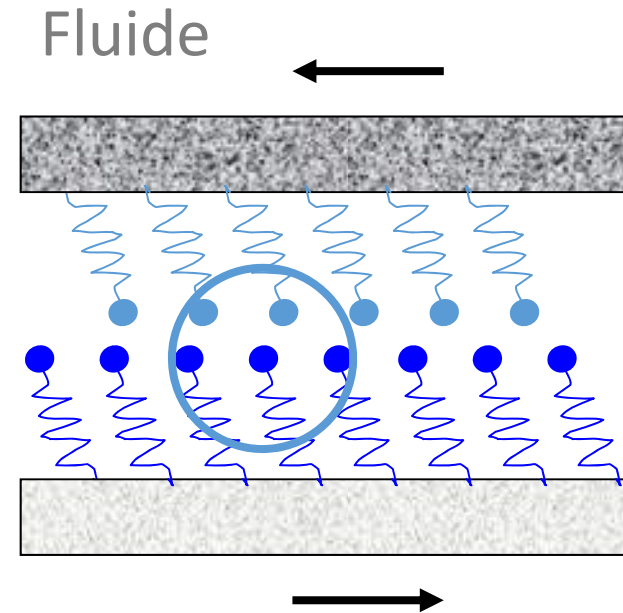




Micro-géométrie des surfaces imparfaites

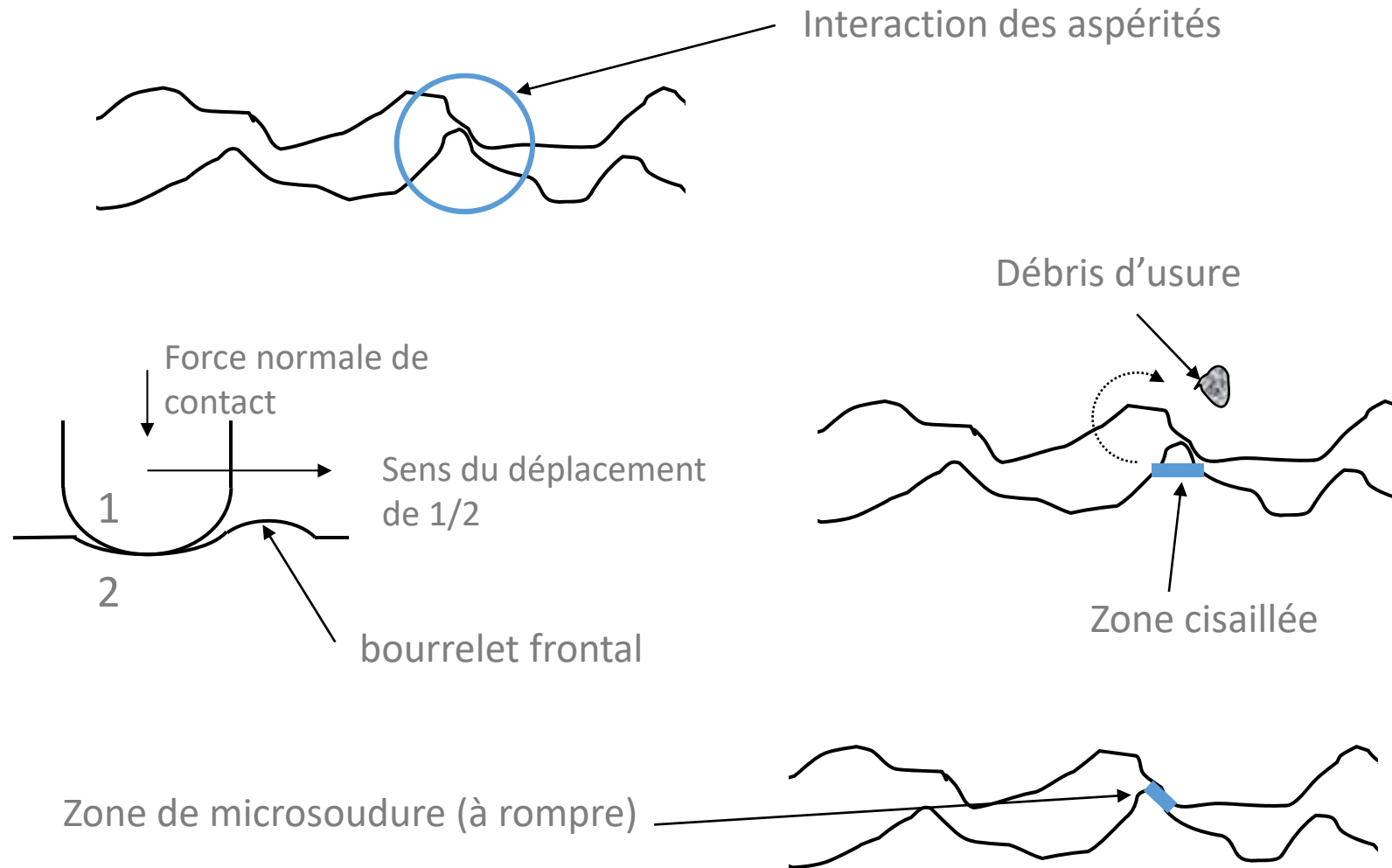
Interaction des aspérités:

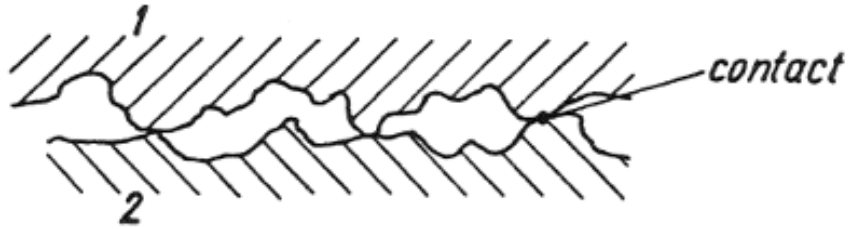
- Microdéformations
- Micro-cisaillements
- Microsoudures



Interactions

- À l'intérieur d'un fluide
- Entre molécules adsorbées sur des surfaces solides





p = pression de contact apparente (MPa=N/mm²)

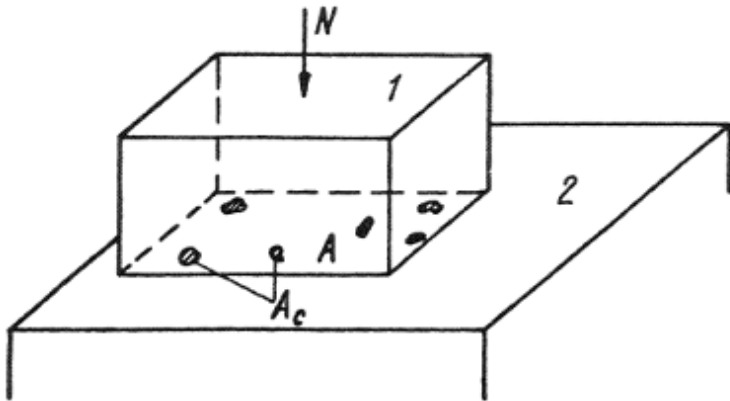
$$p = \frac{N}{A}$$

N = force normale au plan de contact (N)

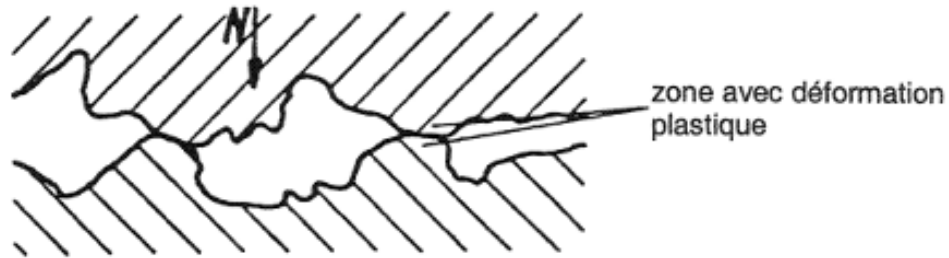
A = surface de contact apparente (mm²)

A_c = Surface de contact réelle (mm²)

p_c = pression de contact réelle (MPa=N/mm²)



$$p_c = \frac{N}{A_c} = p \frac{A}{A_c} = \frac{p}{\frac{A_c}{A}}$$



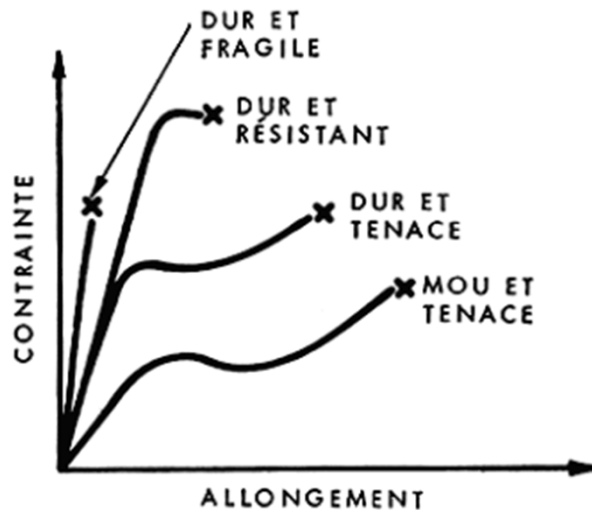
p_0 = pression de rupture de surface (MPa=N/mm²)

≈ Limite élastique

$\frac{A_c}{A}$ augmente avec N mais $p_c \leq p_0$

Expérience: pression de contact = constante = p_0

$$N = p_0 A_c$$



Aire de contact = coussin de matériau déformé plastiquement

Si N = constante:

- Matériau dur : déformations et A_c petites
- Matériau mou : déformations et A_c plus grandes

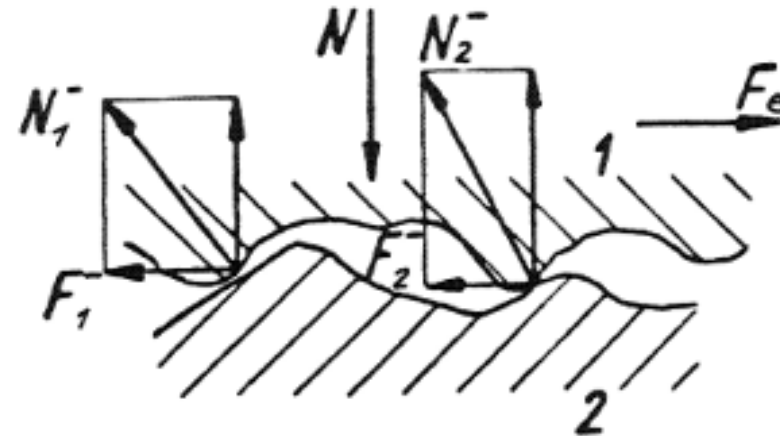
Mécanisme de frottement dans les métaux

- Attraction moléculaire
- Enchevêtrement des aspérités

$$N = N_1 + N_2 + \dots$$

$F_1, F_2, \dots$ s'opposent au glissement

Glissement si $F_e = F_1 + F_2 + \dots$

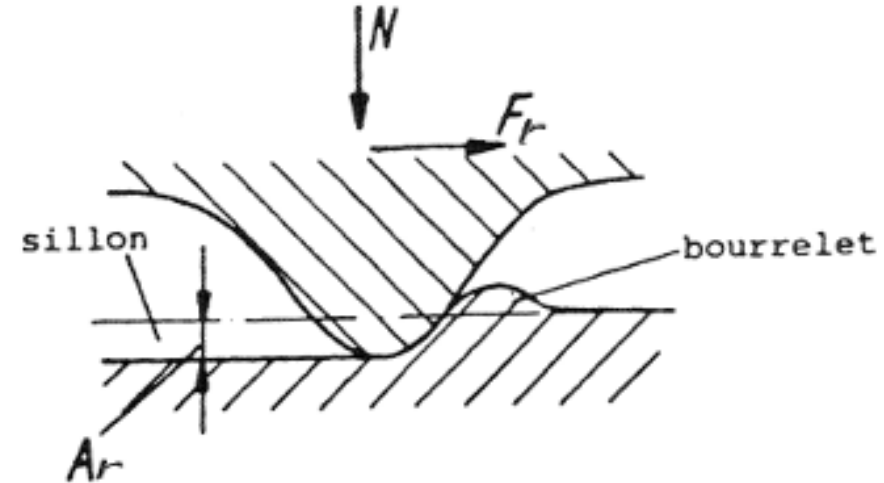


$$F_e = \sum F_i = \tan \varphi \sum N_i = \tan \varphi N$$

Mécanisme de frottement dans les métaux

- Bourrelet frontal ou Rayage

$$F_r = p_0 A_r$$



- Soudures froides: diffusion des matériaux les uns dans les autres par pression
Mouvement si cisaillement des soudures froides

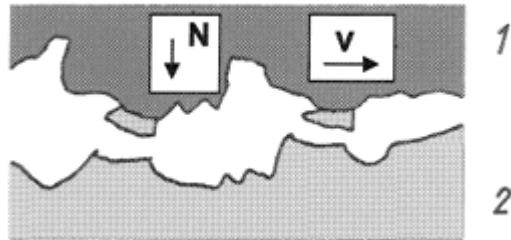
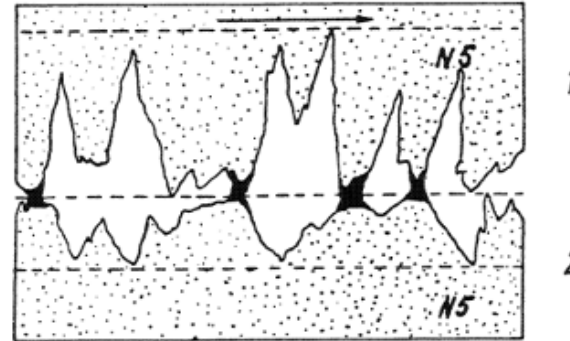
Mécanisme de frottement dans les métaux

- Microsoudures

$$F_S = A_c R_{cm}$$

Résistance au mouvement

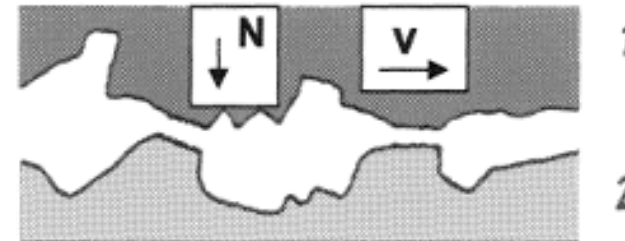
R_{cm} = résistance au cisaillement du métal le plus faible (MPa = N/mm²)



Frottement par soudure

Soudures plus résistantes que 1 et 2

μ élevé



Frottement par cisaillement

Soudures plus fragiles que 1 et 2

μ plus faible - Cas le plus favorable

Mécanisme de frottement dans les métaux

- Résistance au grippage:

Acier	Aluminium Antimoine Argent Cadmium Chrome Cobalt Cuivre Etain Magnésium Manganèse Molybdène Nickel Plomb Tungstène zinc	Mauvais Bon Bon Bon Mauvais Mauvais Passable Bon Passable Mauvais Mauvais Mauvais Bon Mauvais Mauvais
Aluminium	Argent Cadmium Chrome Nickel Zinc	Mauvais Bon Mauvais Mauvais Passable
Cuivre	Aluminium Argent Chrome Etain Molybdène Nickel Plomb Tungstène Zinc	Mauvais Mauvais Passable Mauvais Bon Mauvais Bon Bon Mauvais
Chrome	Argent	Bon

Mécanisme de frottement dans les métaux - Bilan

- Attraction moléculaire: $F_a = aA_c$
- Enchevêtrement des aspérités: $F_e = \tan \varphi N$
- Bourrelet frontal: $F_r = p_0 A_r$
- Soudures froides + Microsoudures: $F_s = A_c R_{cm}$

Force résultante de frottement

$$F = aA_c + \tan \varphi N + p_0 A_r + A_c R_{cm}$$

Avec

$$N = p_0 A_c \quad \text{et} \quad \mu = \frac{F}{N}$$

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{a}{p_0} + \tan \varphi + \frac{A_r}{A_c} + \frac{R_{cm}}{p_0}$$

Mécanisme de frottement dans les métaux - Bilan

En pratique:

1. Attraction moléculaire, enchevêtrement des aspérités, bourrelet frontal << soudures froides & microsoudures

$$\mu = \frac{F}{N} \cong \frac{R_{cm}}{p_0} = \frac{\text{Resistance au Cisaillement}}{\text{Pression de Rupture Plastique}}$$

2. Loi de Coulomb

$$F = \mu N = T$$

Lors d'un mouvement relatif de deux pièces l'une sur l'autre,

Force tangentielle = Force normale x coefficient de frottement



Indiquer:

- 2 applications favorables
- 2 conséquences défavorables

du frottement dans le
fonctionnement d'une moto

Amortissement ↑

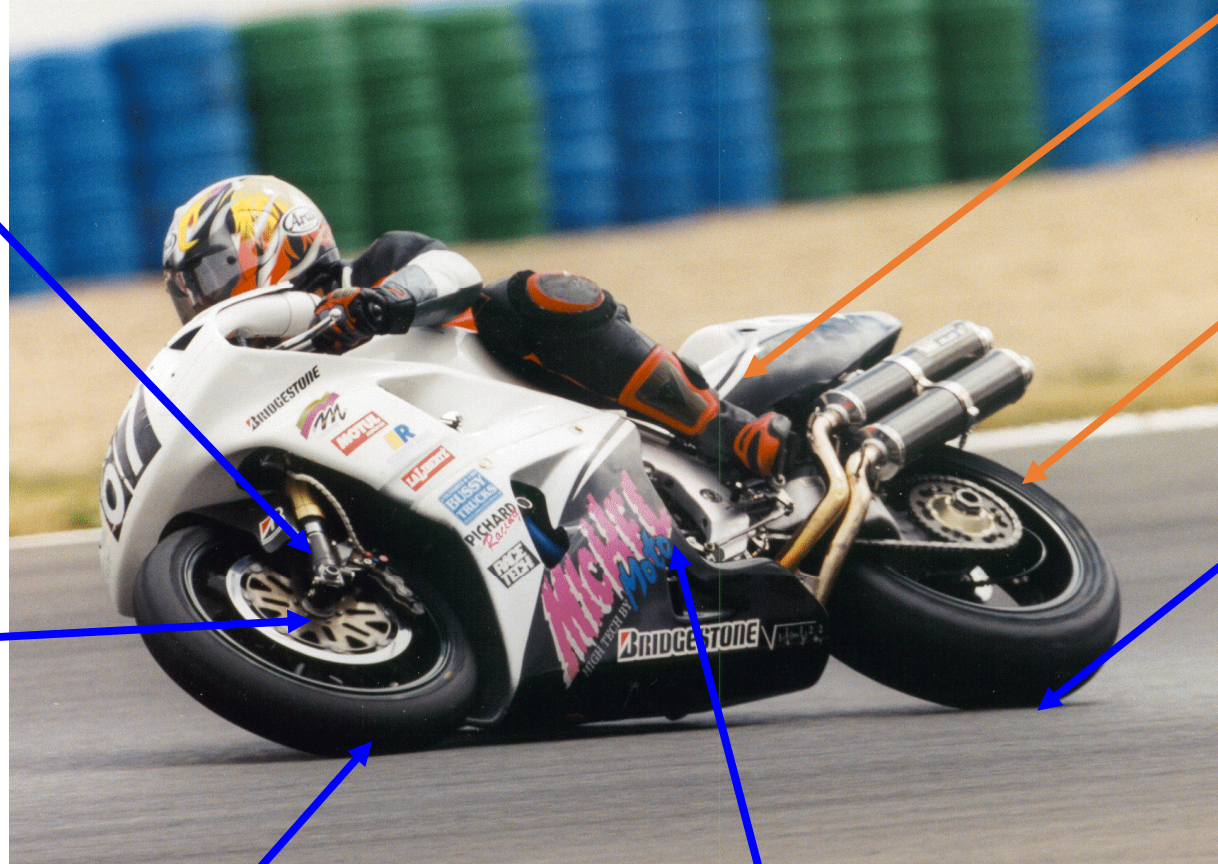
Echauffement ↓

Rendement ↓

Usure ↓

Transmission
d'effort ↑

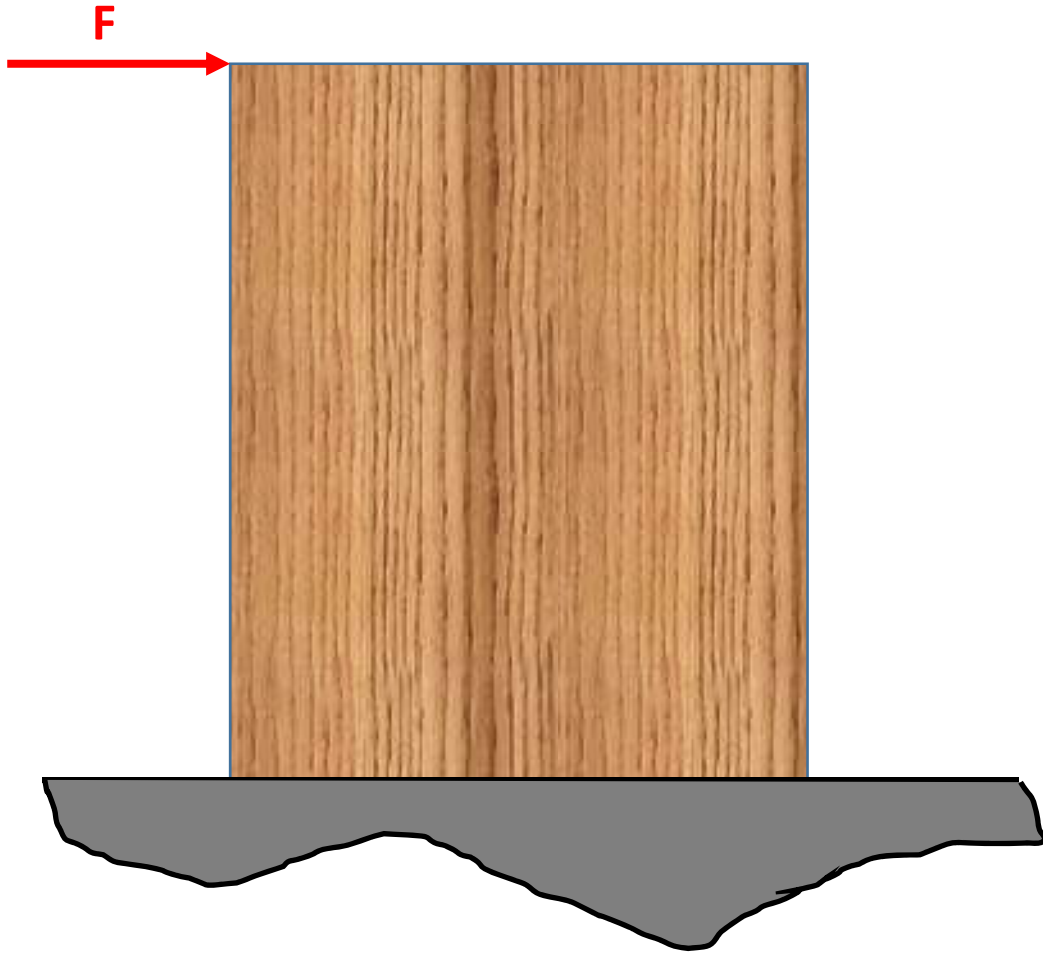
Frein ↑



Adhérence ↑

Embrayage ↑

(Ir)réversibilité ↑↓

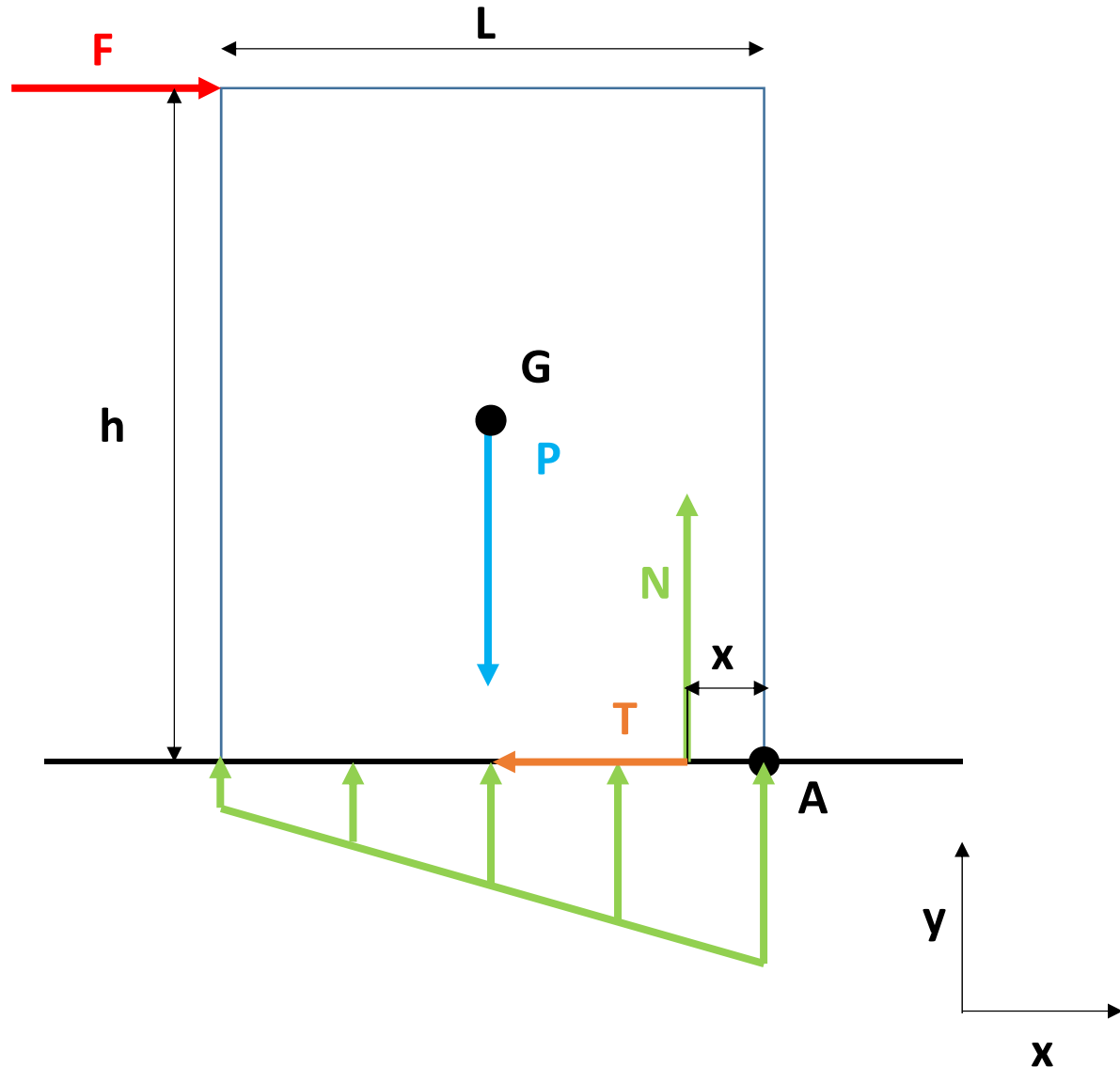


Boite homogène posée sur une table.

Indiquer les conditions pour avoir:

- Glissement
- Basculement

de la boîte.

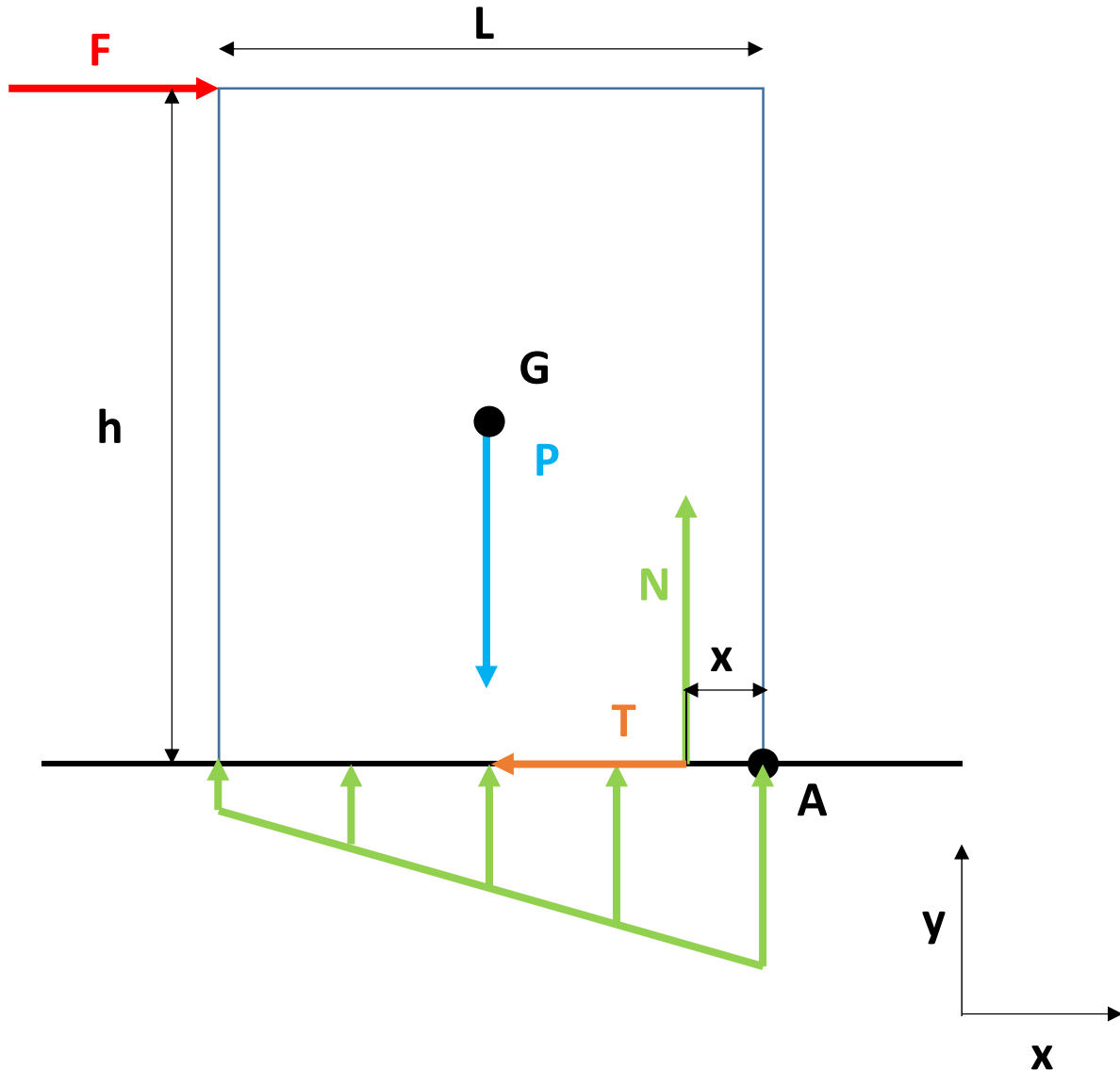


Equations:

$$\sum F_x = F - T$$

$$\sum F_y = N - P$$

$$\sum M_A = P \frac{L}{2} - Fh - Nx$$



Equilibre:

$$F - T = 0$$

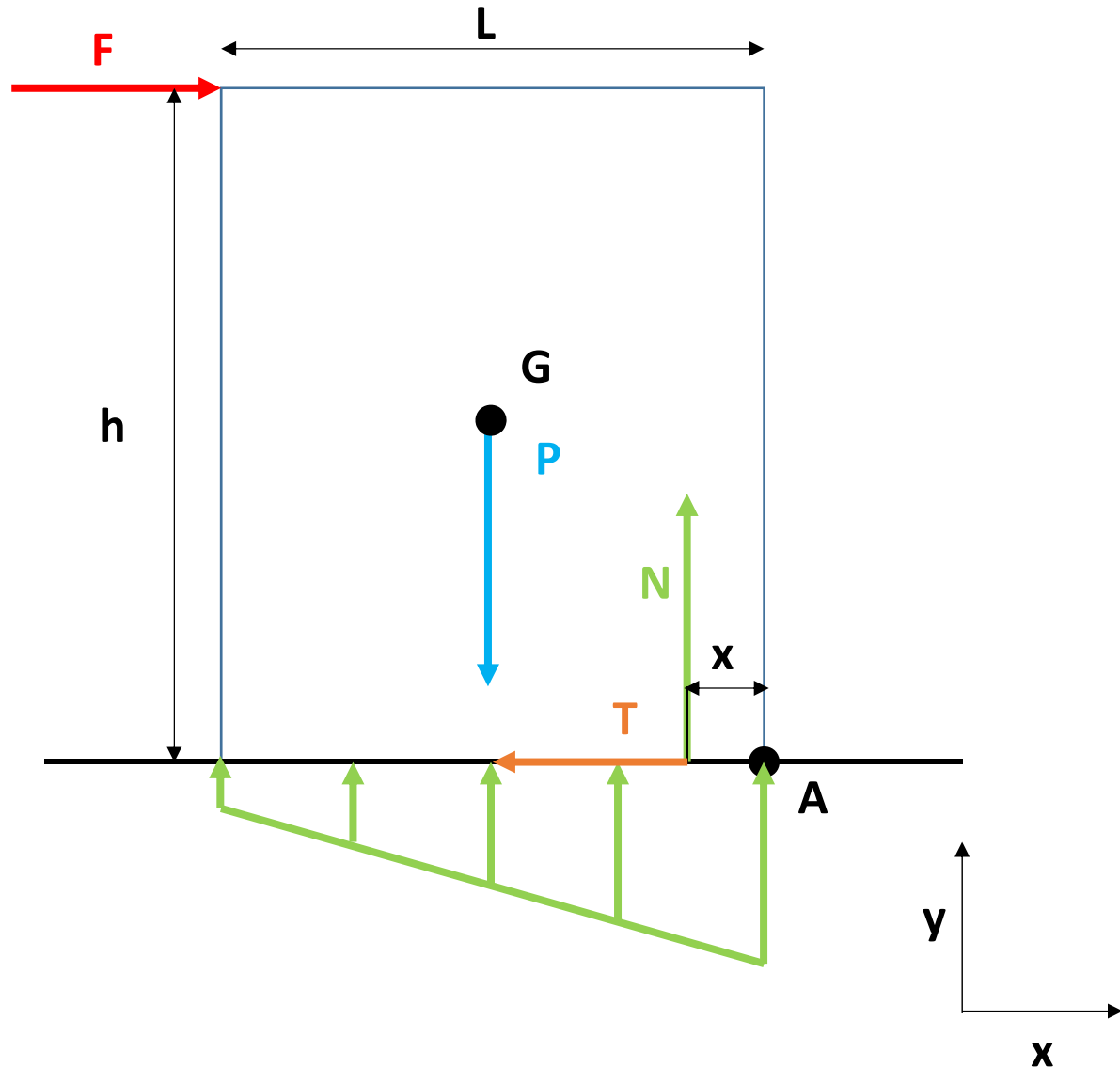
$$N - P = 0$$

$$P \frac{L}{2} - Fh - Nx = 0$$

$$F = T$$

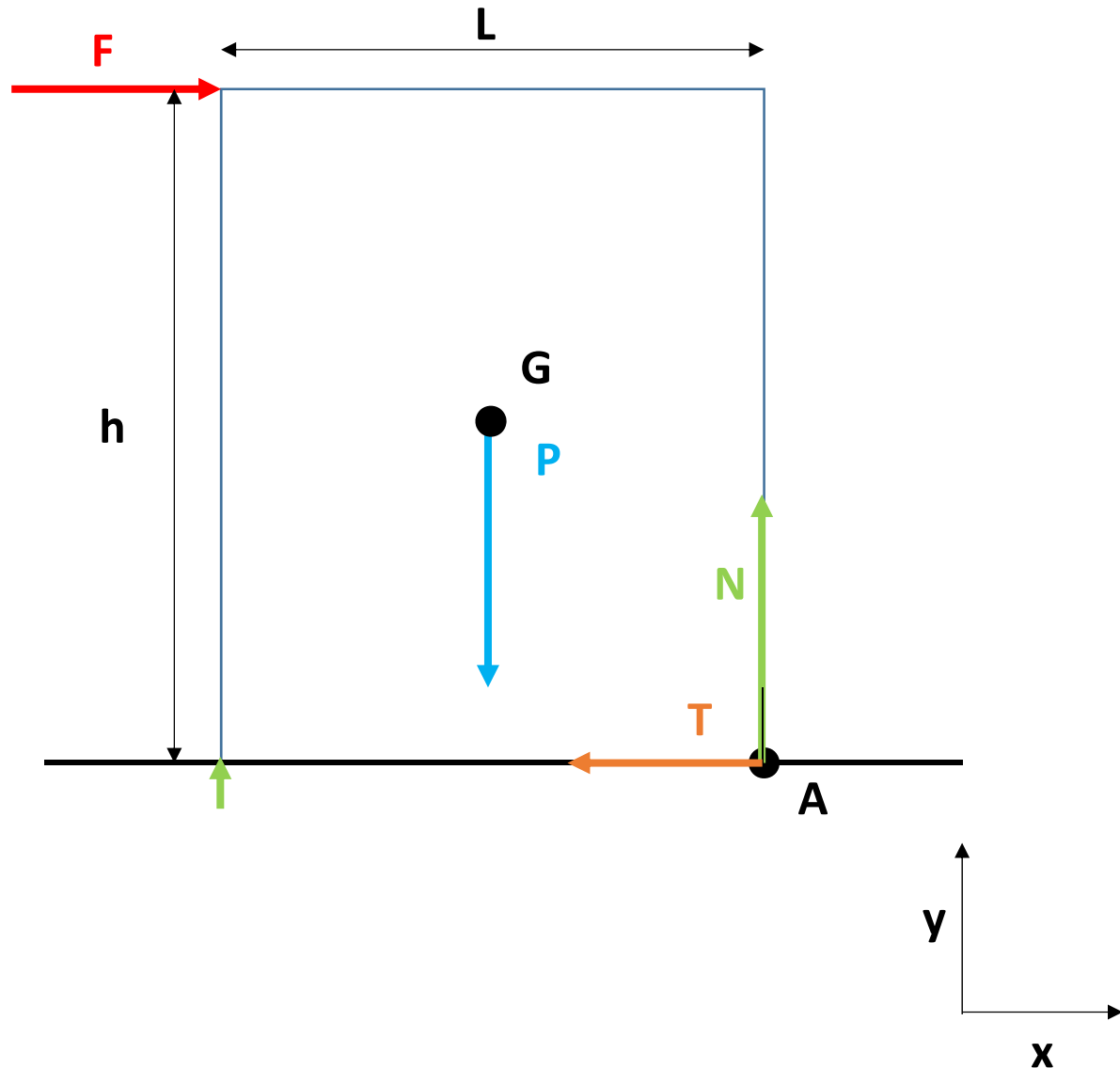
$$N = P$$

$$x = \frac{L}{2} - \frac{F}{P}h$$



Au démarrage du Glissement:

$$F_g = T = N\mu_0 = P\mu_0$$



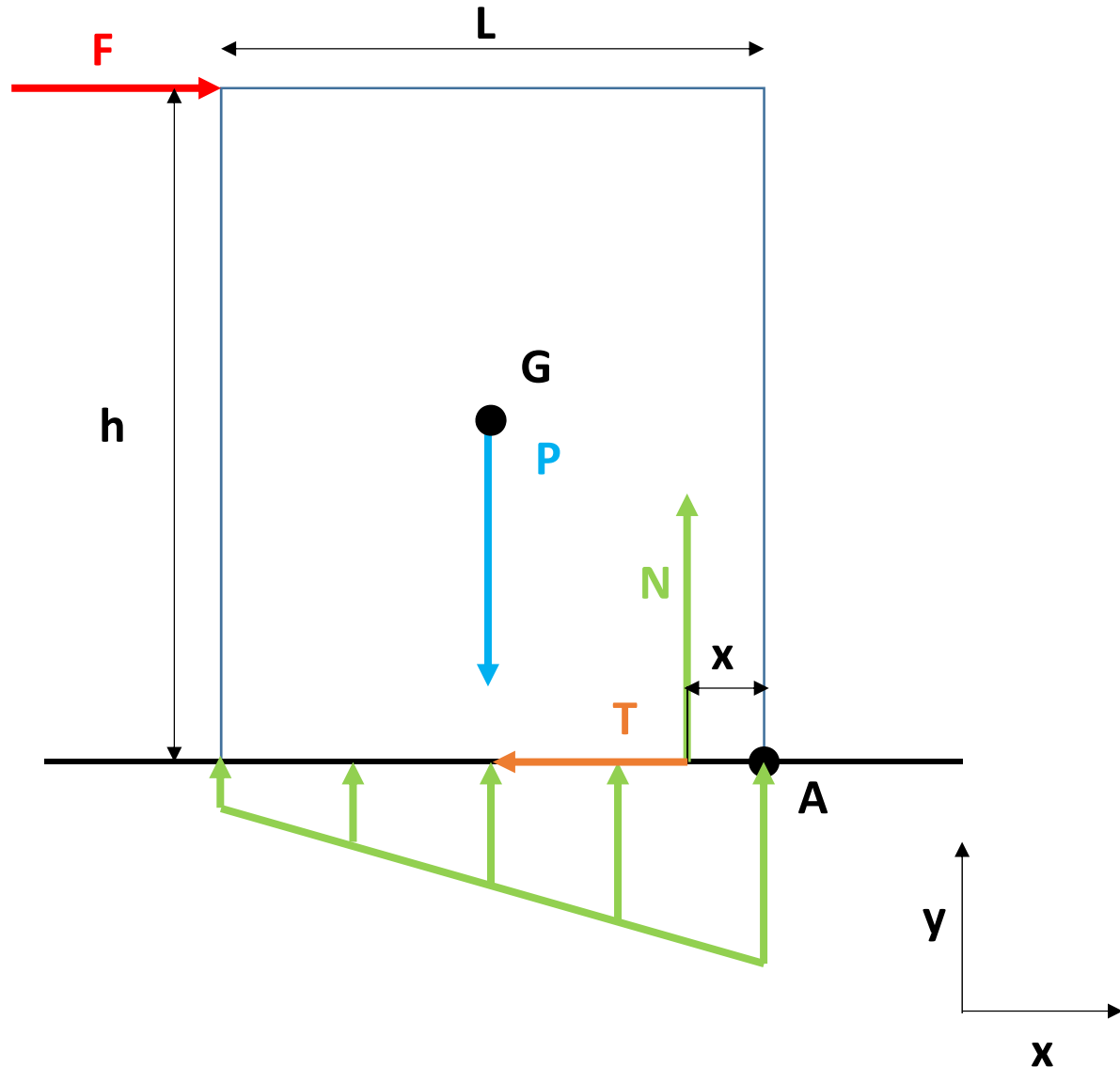
Au démarrage du Basculement:

On cherche F_b

$$x = \frac{L}{2} - \frac{F_b}{P} h = 0$$

Car A est le seul point de contact entre la boîte et le sol

$$F_b = \frac{PL}{2h}$$



Bilan:

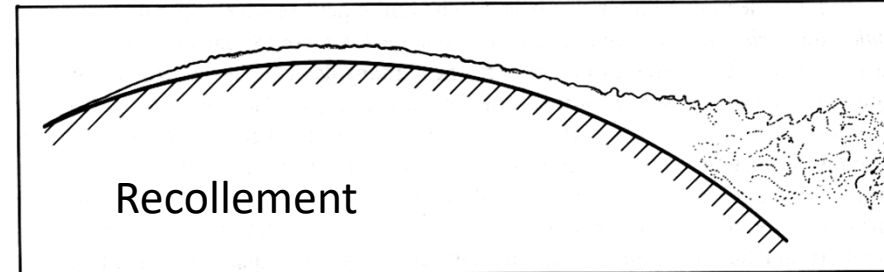
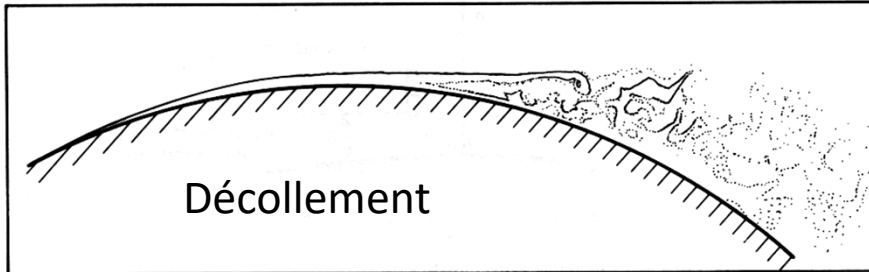
Basculement avant glissement si

$$F_b < F_g$$

$$\frac{PL}{2h} < P\mu_0$$

$$\boxed{\frac{L}{2h} < \mu_0}$$

Interface solide - fluide



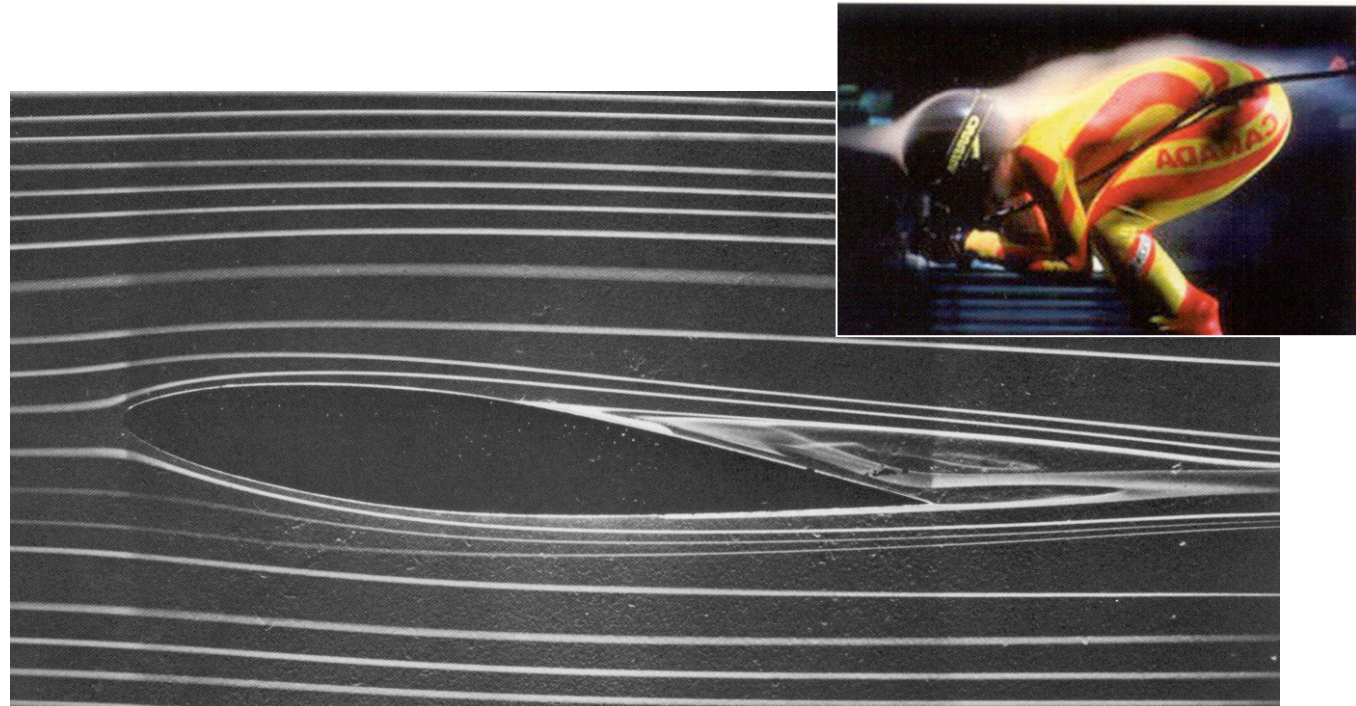
Importance:

Traînée

Portance

Echauffement

Convection



Amortisseur de
moto



Modélisation de la force visqueuse

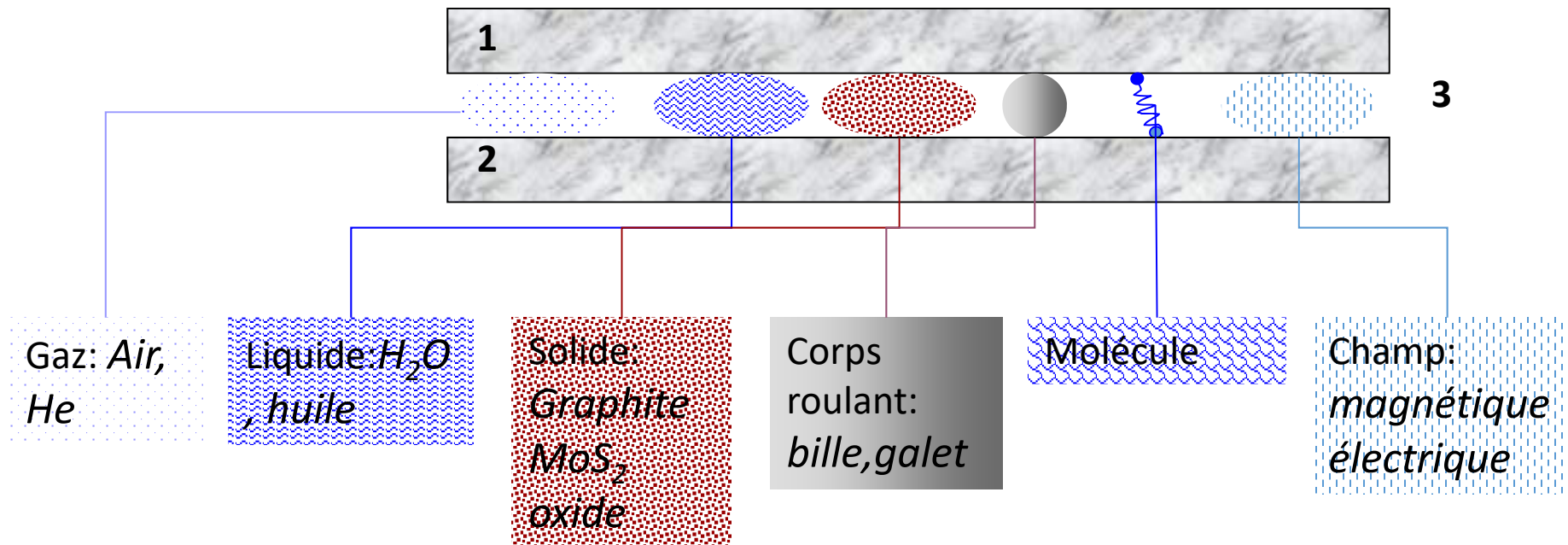
Dans l'analyse dynamique des systèmes mécaniques on modélise souvent la force de frottement visqueux comme:

$$\vec{F} = c\vec{V}$$

avec c le coefficient d'amortissement et $\vec{V}$ la vitesse de déplacement

Principe général:

- Séparer les deux surfaces
- Intercaler un « troisième corps »

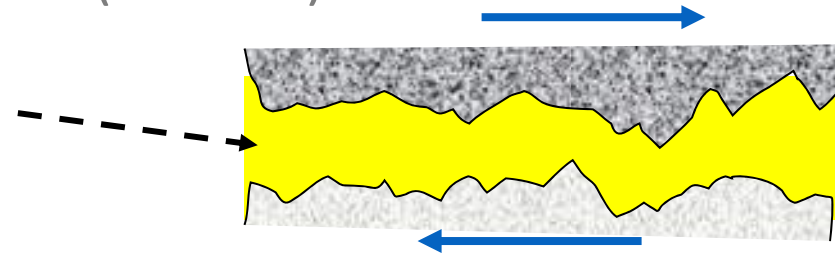


Aux interfaces entre deux corps

Fonctions:

- Diminuer le frottement (effort tangentiel)
- Transmettre un effort normal entre les surface en contact
- Diminuer l'endommagement des surfaces (usure, oxydation...)
- Evacuer l'énergie thermique
- Evacuer les débris (d'usure)

Troisième corps



Gazeux:

- Air, hélium....

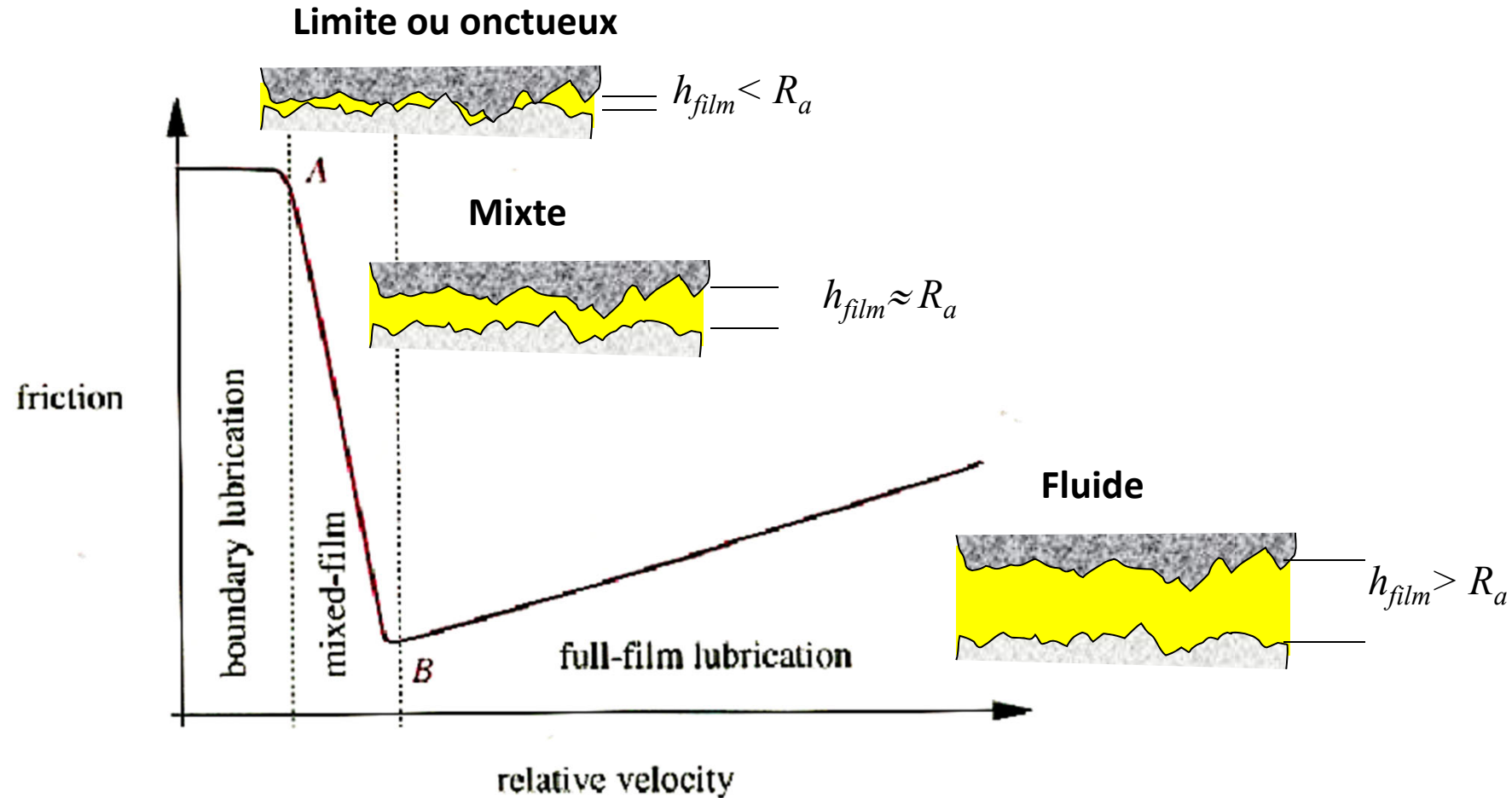
Liquides:

- Huiles minérales, huiles alimentaires, eau, polyglycoles, silicones, chlorofluorocarbone...
- Additifs extrême pression (EP) (souffre, phosphore, ...)

Solides

- Lamellaires: graphite (limite de $T \approx 100^\circ\text{C}$, pas de vide), molybdénite MoS_2 , nitrure de bore BN
- Oxydes, phosphates

Régimes de Lubrification



Coefficients μ_0 et μ

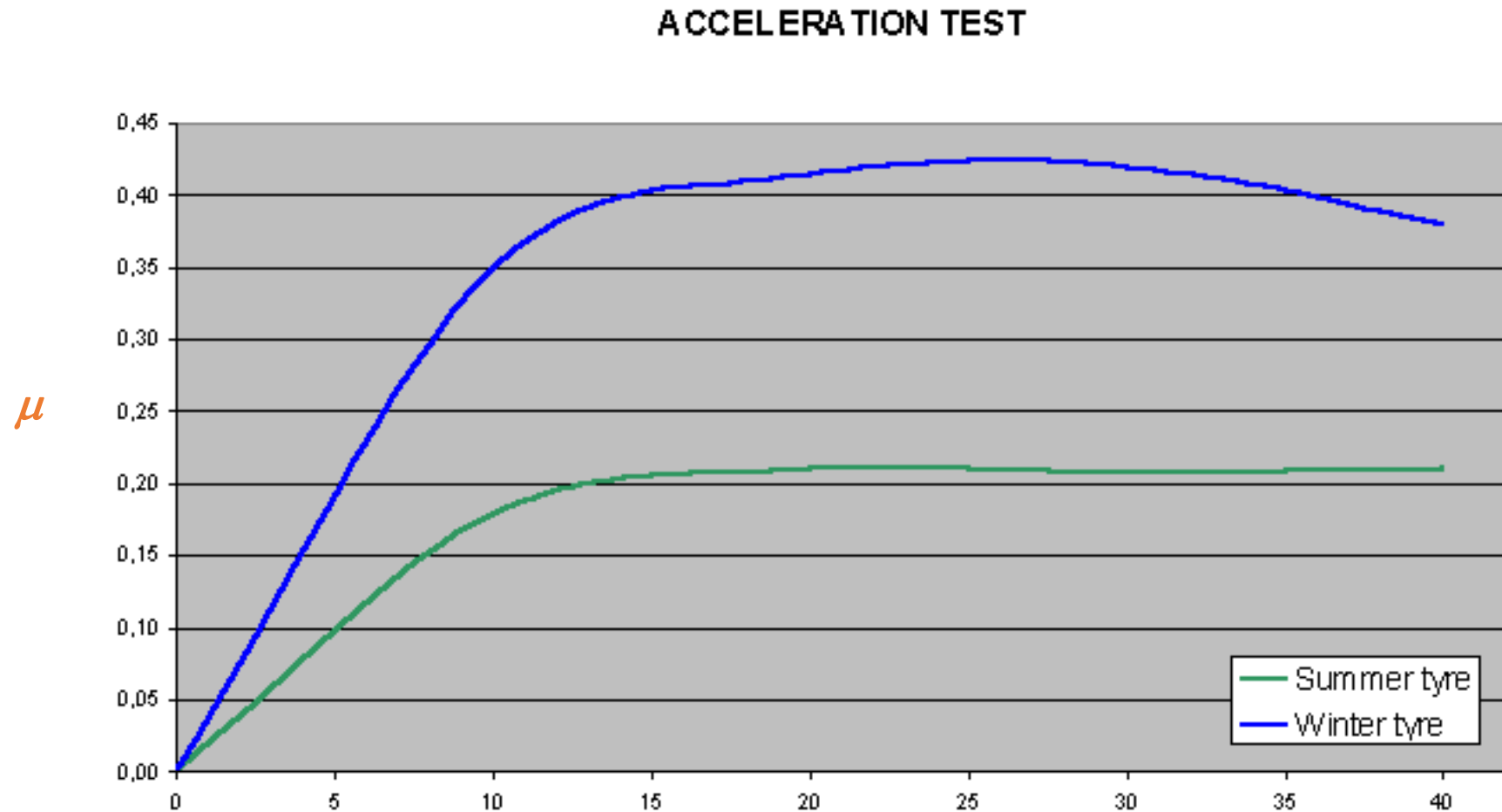
Matériaux en contact	μ_0		μ	
	Sec	Lubr	Sec	Lubr
acier cémenté trempé/acier cémenté trempé	0,2-0,3	0,15-0,2	0,2	0,12
acier cémenté trempé/fonte	0,2	0,12-0,2	0,15	0,08
acier cémenté trempé/bronze trempé	0,2	0,15-0,2	0,25	0,12
acier inoxydable chromé/aluminium			0,4	0,1
acier/graphite		0,1		0,09
acier/PTFE	0,08-0,4		0,02-0,08	0,003-0,05
acier/ferodo	0,3-0,4		0,25-0,35	
pneu neuf/route	1		0,5-0,6	0,3-0,5

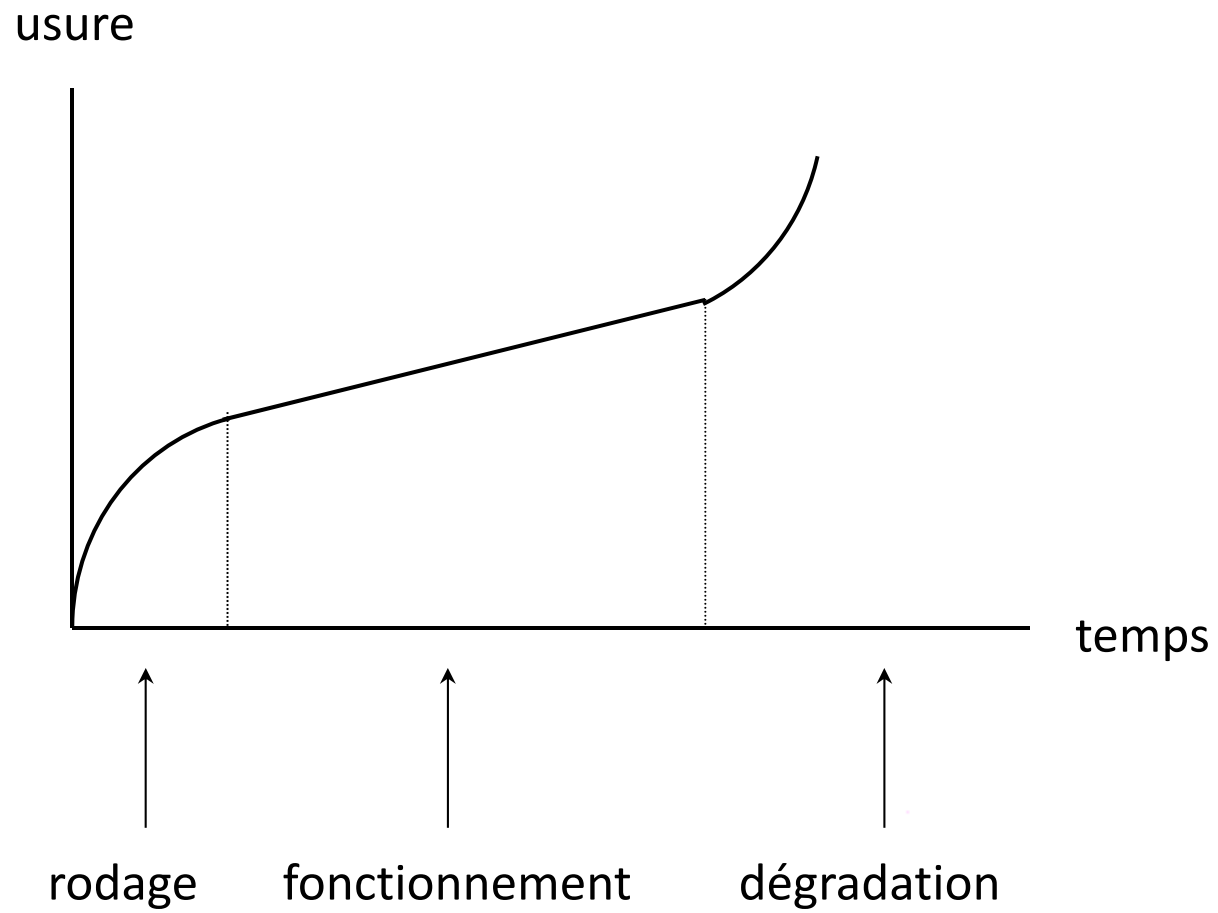
En pratique: μ_0 et μ peuvent être >1 si on a indentation des matériaux. Exemple scratch avec $\mu_0=6$ et $\mu=5.8$.

Coefficients d'adhérence μ_0

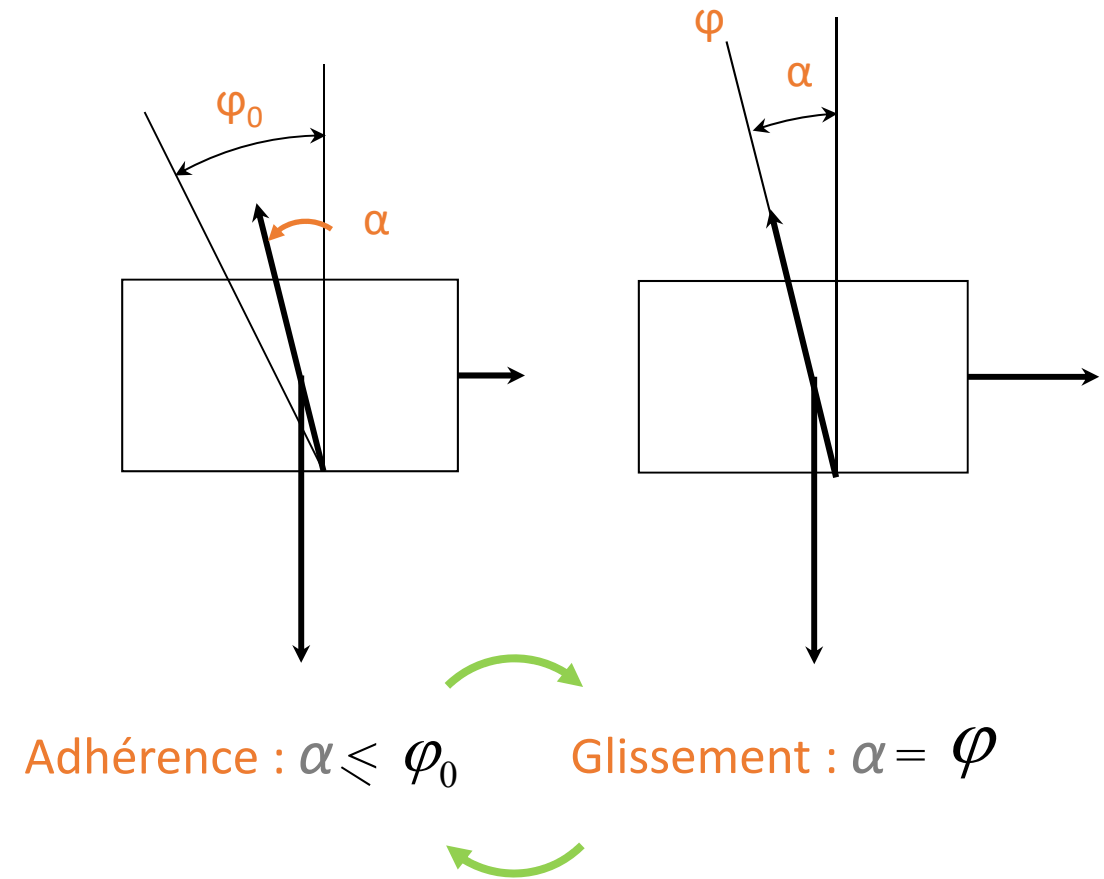
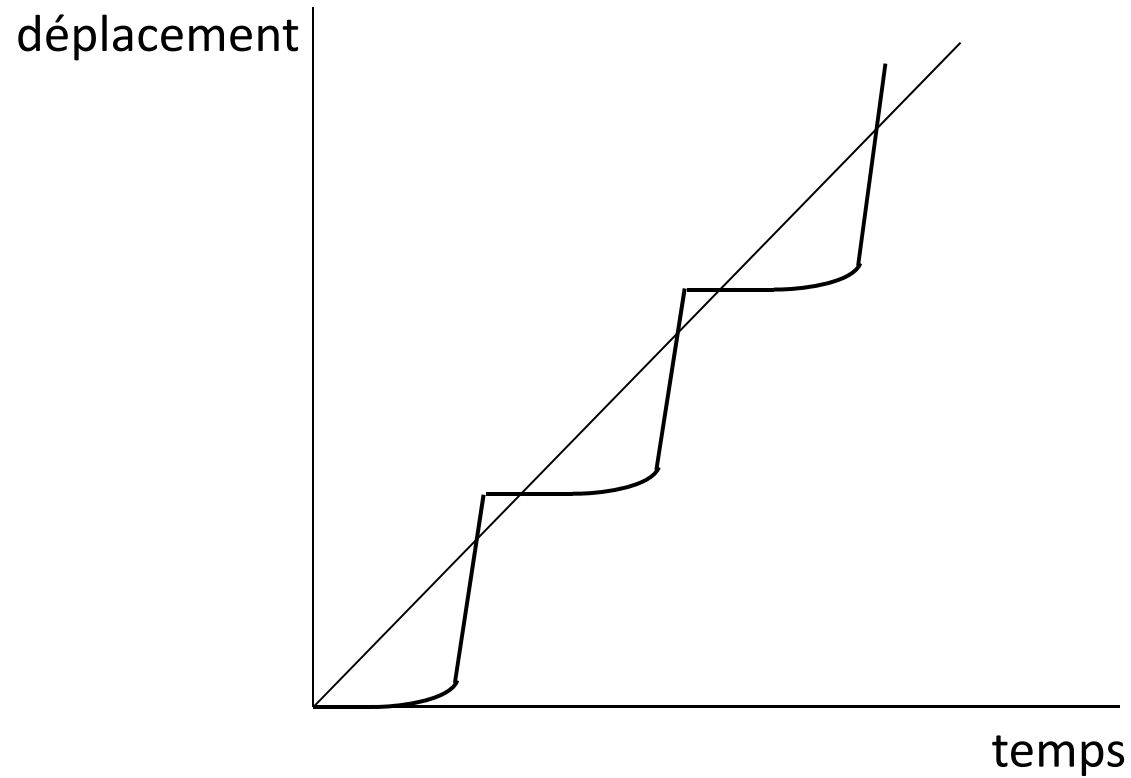
Matériaux en contact	μ_0
Pneu sur verglas	0,08 - 0,15
Pneu neuf sur asphalte mouillé	0,25 - 0,35
Pneu neuf sur asphalte lisse et sec	0,6 - 0,7
Pneu neuf sur béton rugueux	0,8 - 1
Bois ou « ferodo » sur fonte ou acier à sec	0,3 - 0,5
Cuir sur fonte ou acier à sec	0,2 - 0,3

Coefficients μ_0 et μ : Contact pneumatique – sol : neige

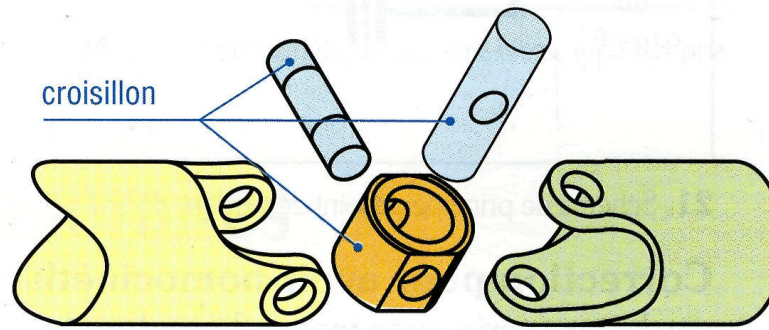
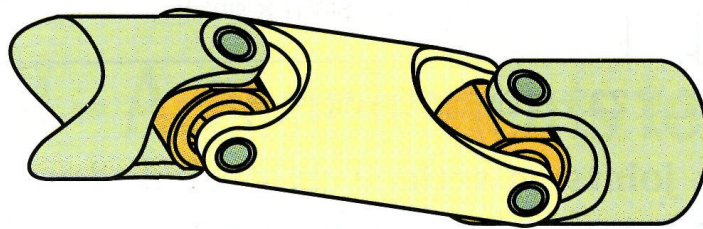
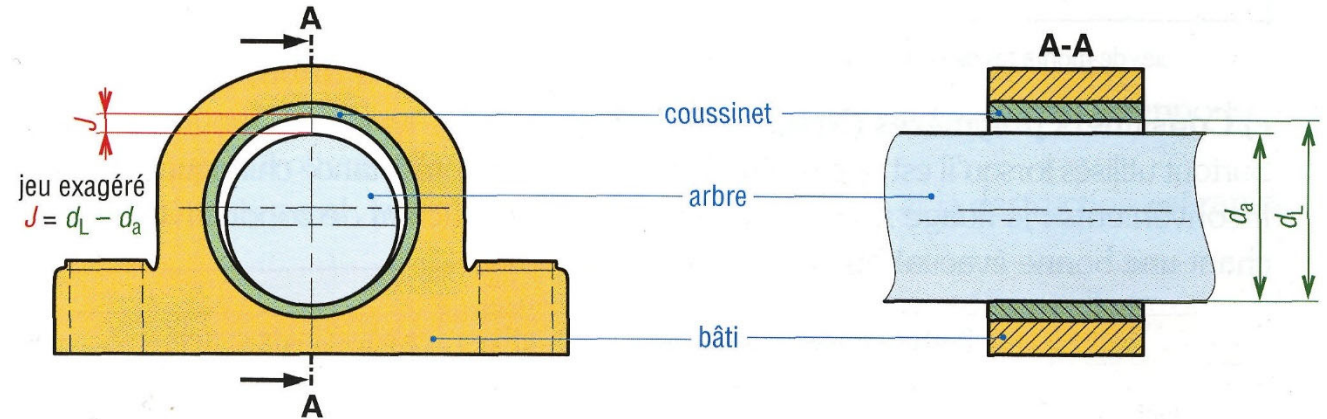
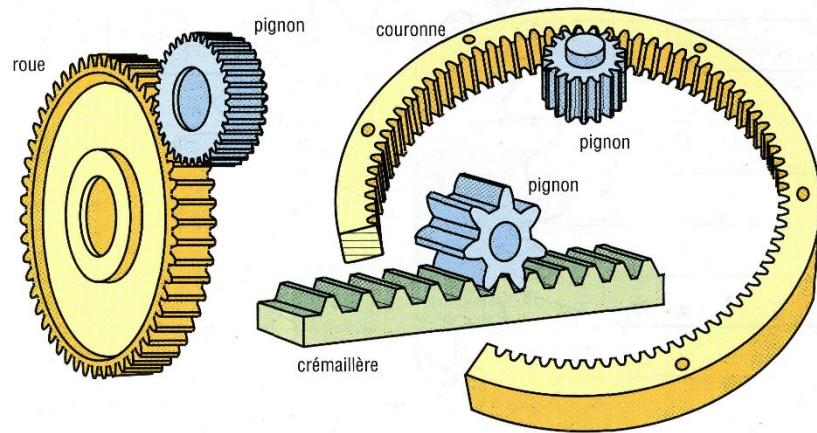




Broutement - « Stick-Slip »)



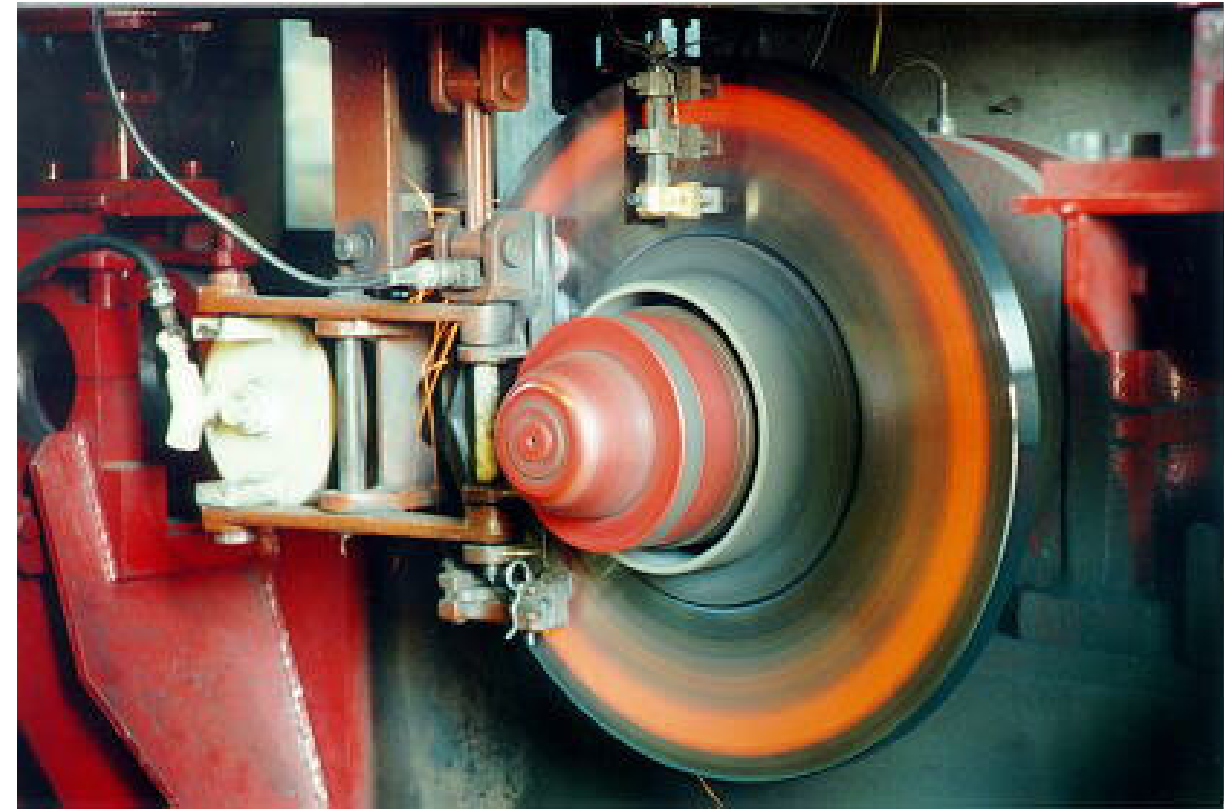
Instabilité de frottement et mouvement saccadé



Transmissions
Frottement minimum



Transmissions
Frottement Maximum

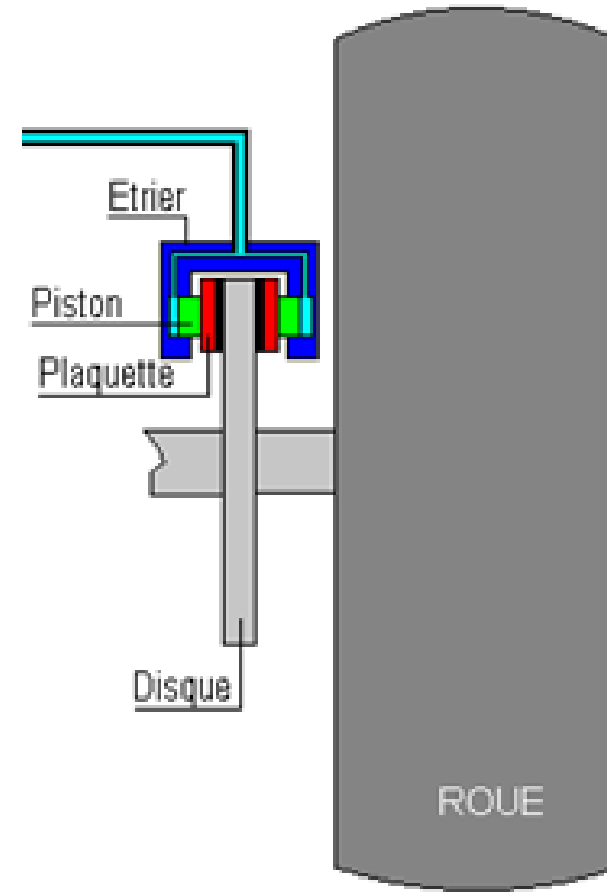


Freinage
Frottement Maximum

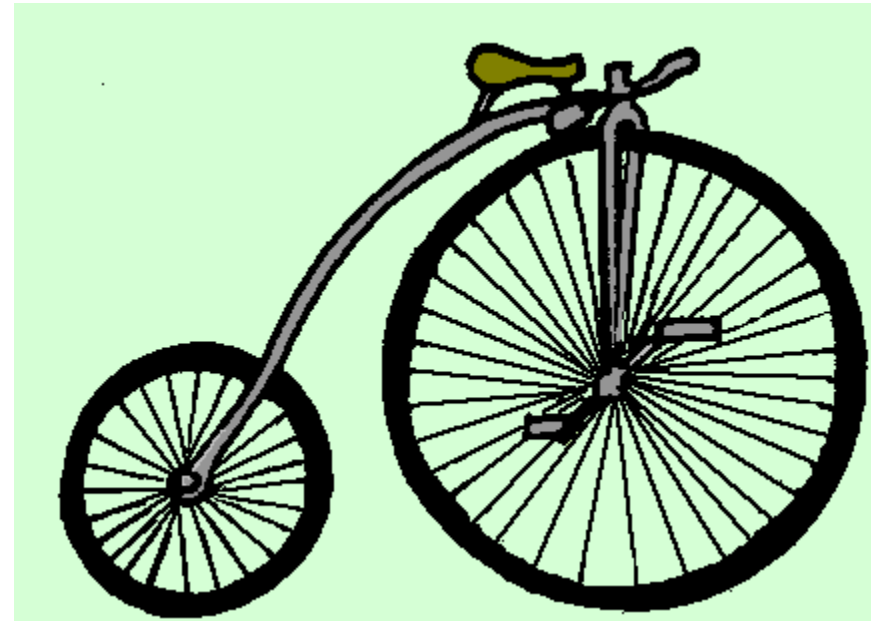
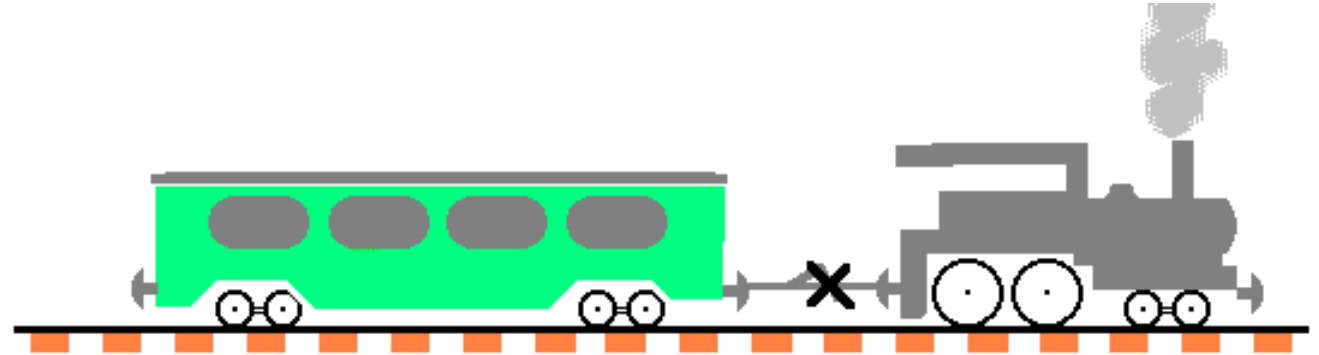


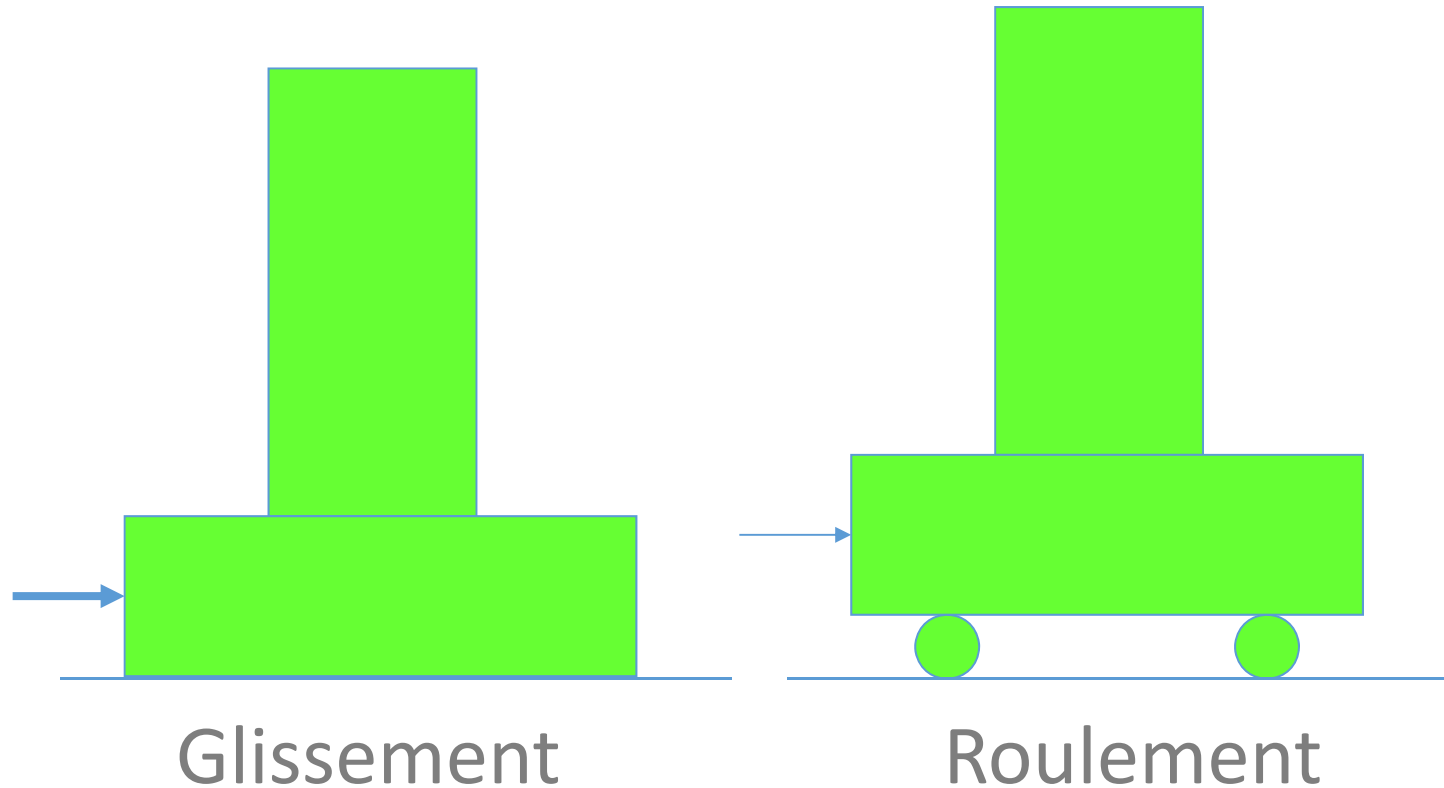
disque

plaquette



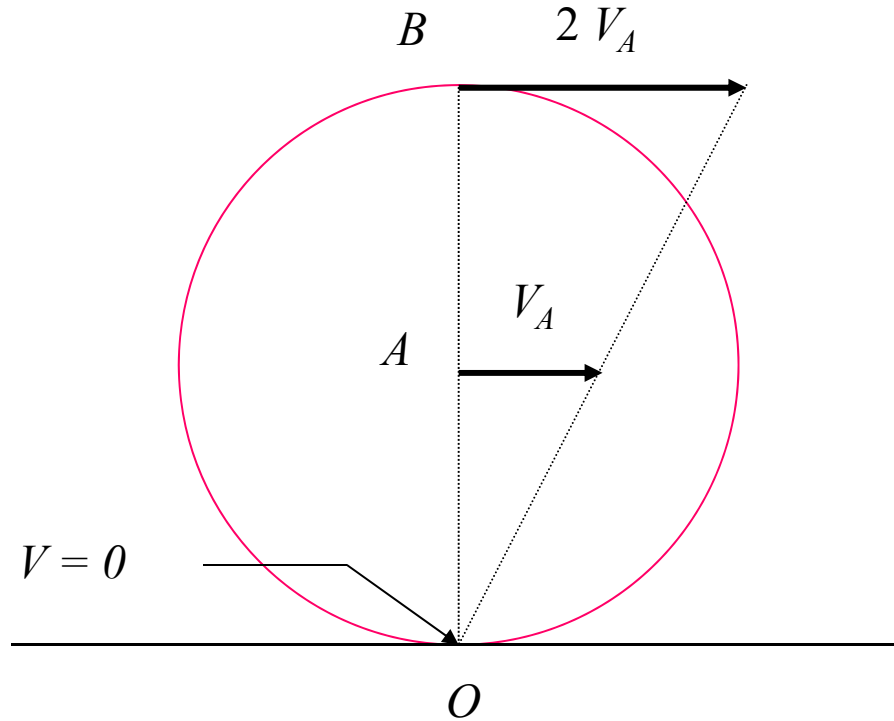
Freinage
Frottement maximum





Cinématique du roulement

Vitesse dans le cercle sans glissement



O = Centre instantané de rotation (CIR)

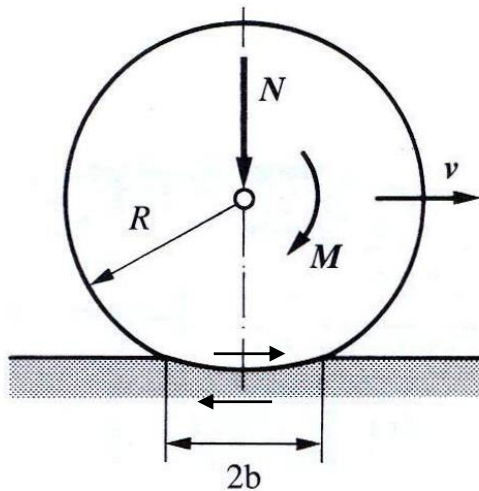
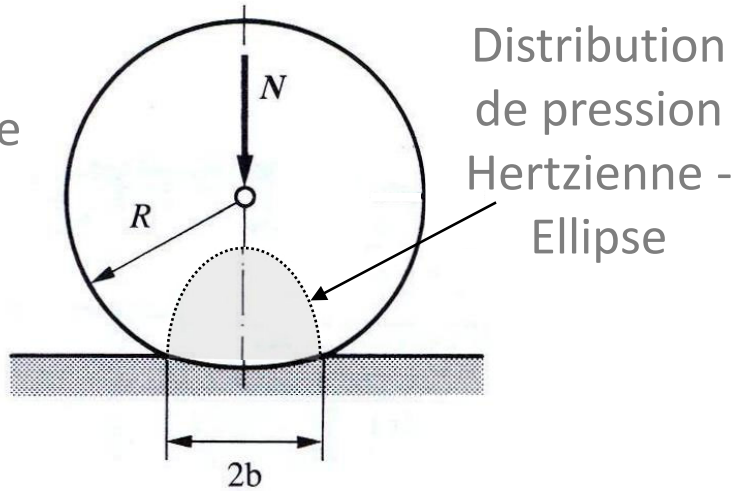
$$\overrightarrow{V}_{1/2}(O) = 0$$

$$\overrightarrow{V}_{1/2}(M) = \overrightarrow{OM} \wedge \vec{\omega}$$

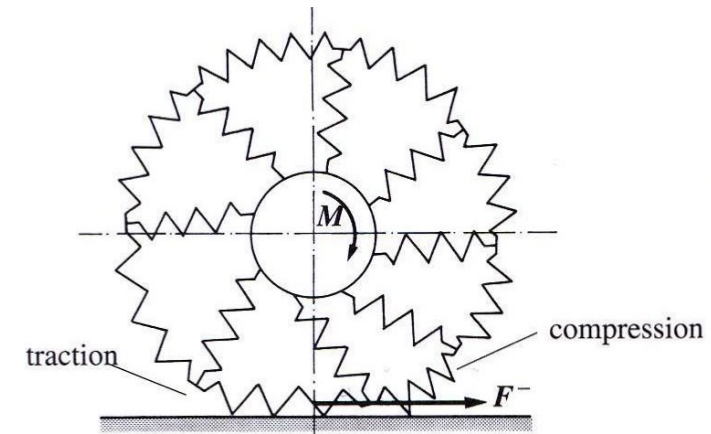
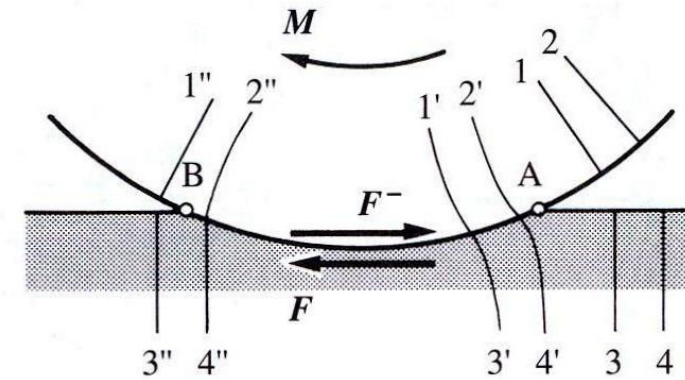
$$\overrightarrow{V}_{1/2}(B) = 2\overrightarrow{V}_{1/2}(A)$$

Déformations: Contact Surfaccique

Charge N , zone déformée $2b$



Charge N , zone déformée, moment M , force de frottement F , vitesse v

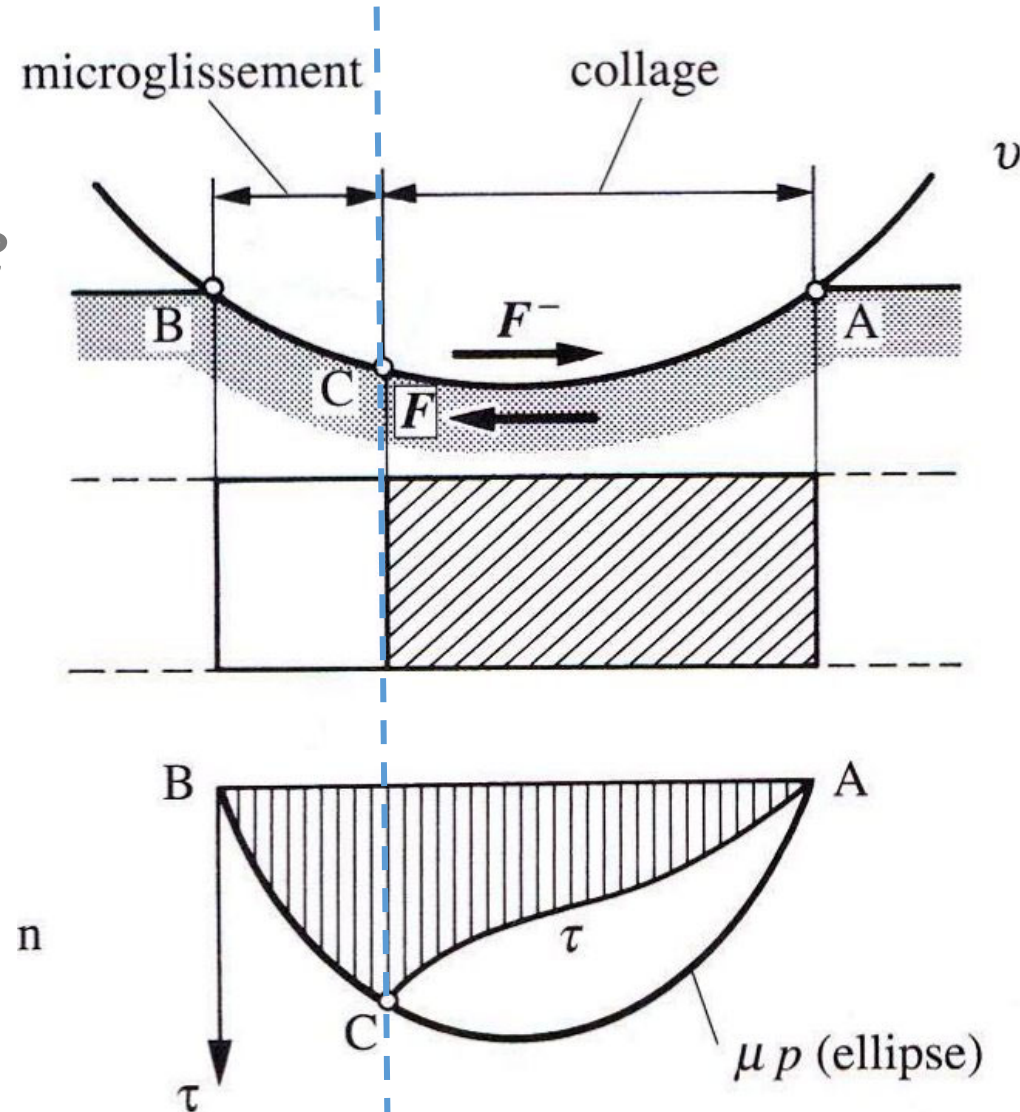


Microglissement:

De A à C,
 $\tau < \mu_0 p$ collage/adherence

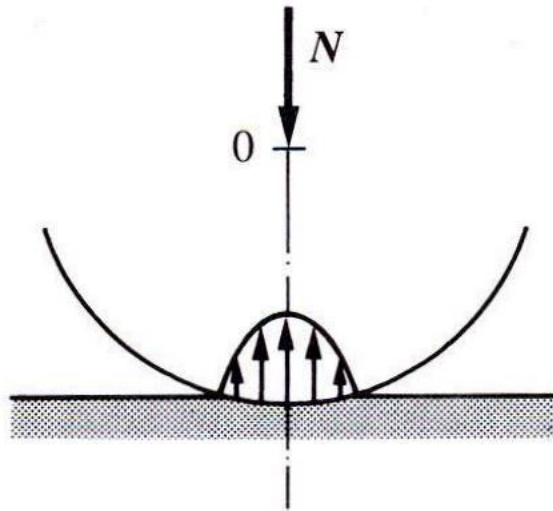
De C à B,
 $\tau = \mu_0 p$ microglissement

avec $p = N/A = T/(\mu_0 A)$
 et $\tau = \mu_0 p = T/A$

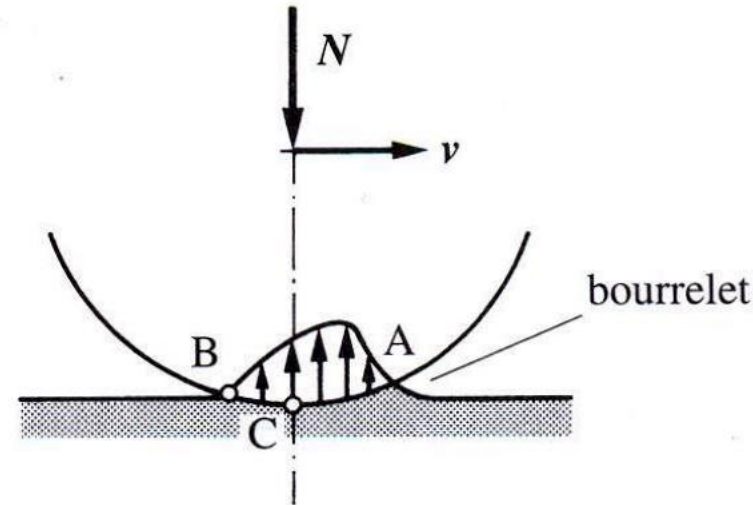


Dissipation

Roue libre au repos



Roue libre en mouvement



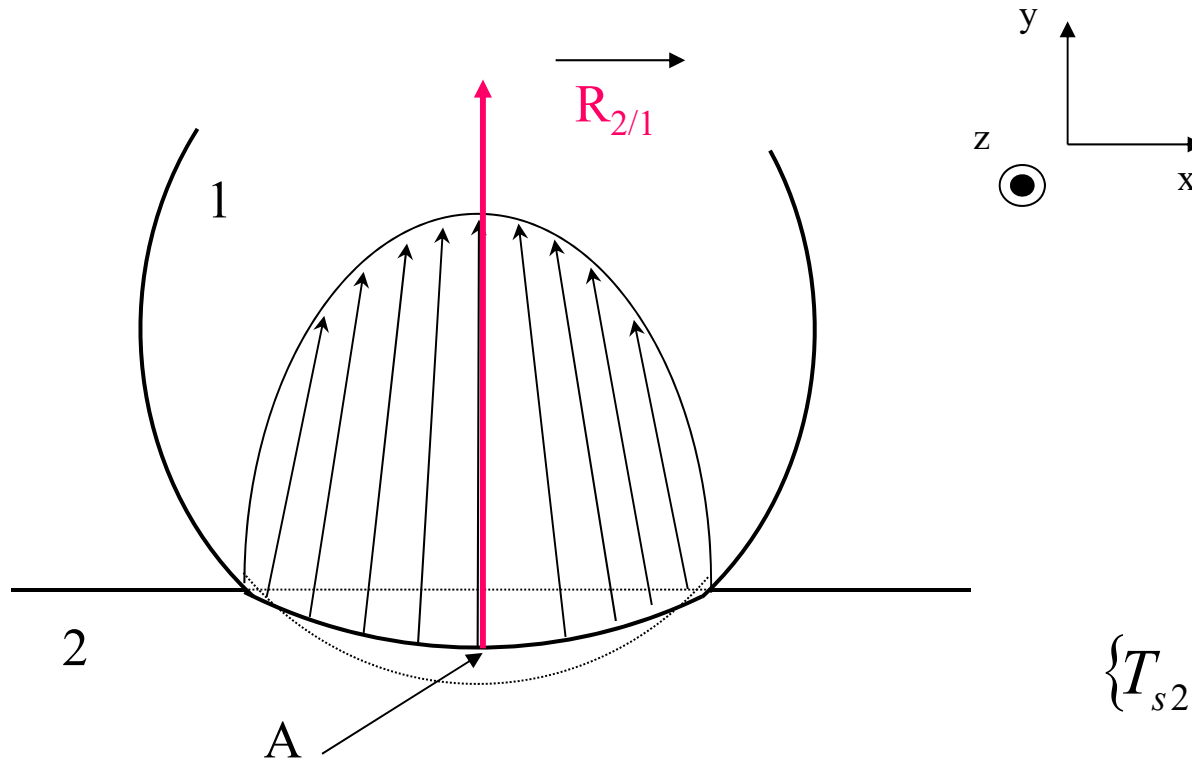
Mécanismes de résistance au roulement et dissipation:

- Formation du bourrelet
- AC puis CB, compression et détente de la matière = échauffement

Dissipation d'énergie par hystérésis

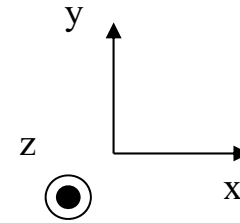
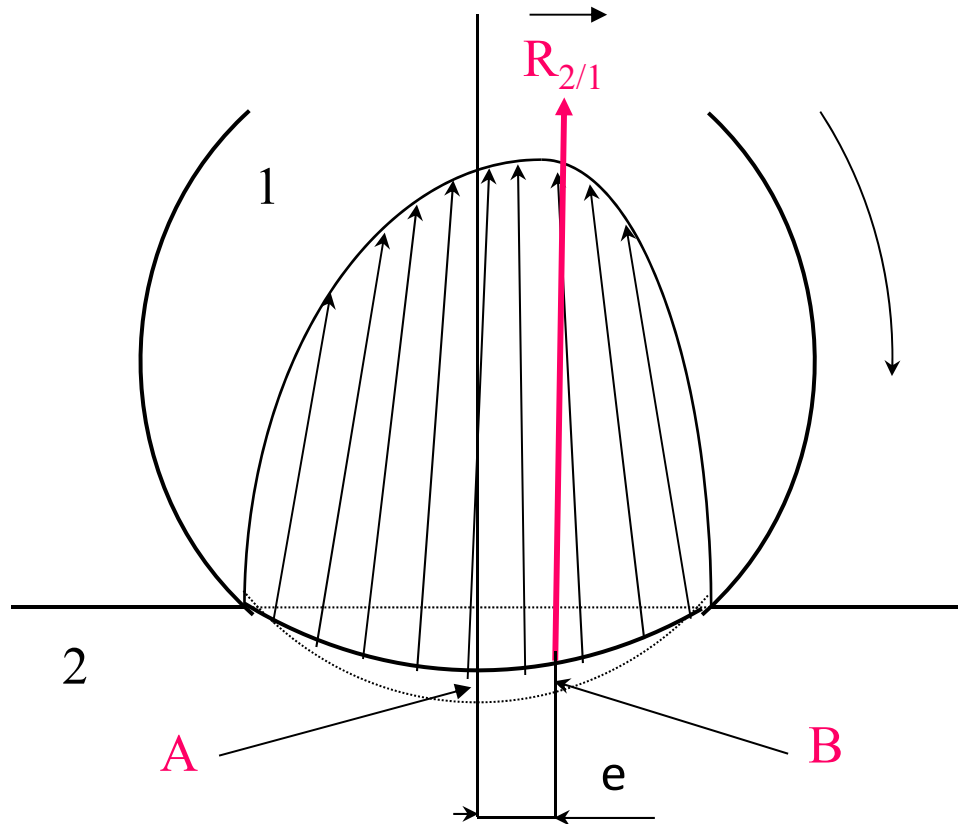
- CB Microglissement au contact

A l'arrêt



$$\{T_{s2/1}\}_A = {}_A \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ N & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{(x,y,z)}$$

Mouvement de roulement sans glissement



$$\{T_{S2/1}\}_A = \begin{Bmatrix} T & 0 \\ N & 0 \\ 0 & N e \end{Bmatrix}_{(x,y,z)}$$

Coefficient de roulement

Roue de wagon sur rail sec : $e = 0,5 \text{ à } 1,5 \text{ mm}$

Roue de voiture sur route : $e = 5 \text{ à } 50 \text{ mm}$

Rouleau bois sur bois : $e = 0,5 \text{ à } 1 \text{ mm}$

Galet de pont roulant sur rail : $e = 0,2 \text{ à } 0,7 \text{ mm}$

Pneu sur route « normale » : $e = 2 \text{ à } 5 \text{ mm}$

Modélisation: Roue folle ou libre (non-motrice, non-freinée)

Rayon statique $r < R$

Force motrice T

Réactions du sol N^- et F^- dues au bourrelet

Paramètre de résistance au roulement e

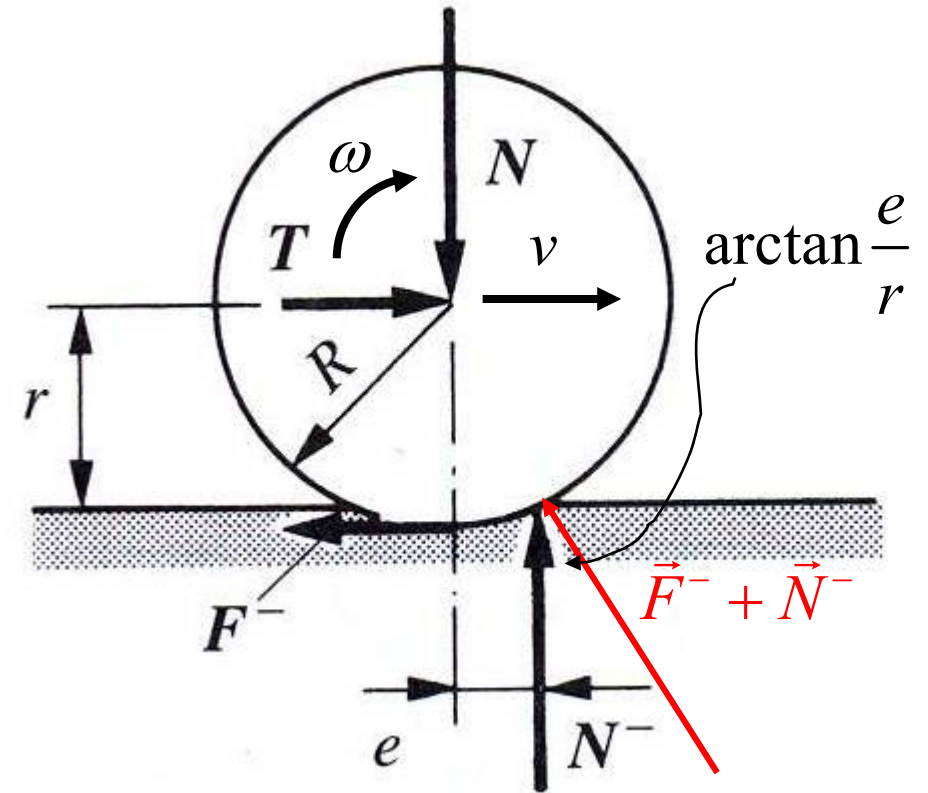
Equilibre statique ($v = \text{cst}$, $\omega = \text{cst}$):

$$N = N^- \quad T = F^-$$

$$T \cdot r = N^- \cdot e \rightarrow e = \frac{r \cdot T}{N}$$

$$f = \frac{e}{r} = \frac{T}{N}$$

$$T = F = \frac{e}{r} \cdot N^-$$



Modélisation: Roue motrice

Equilibre statique ($v = \text{cst}$, $\omega = \text{cst}$)

Moment moteur sur l'axe: M

Force motrice a la roue: F^-

Force résistante sur l'axe: T^-

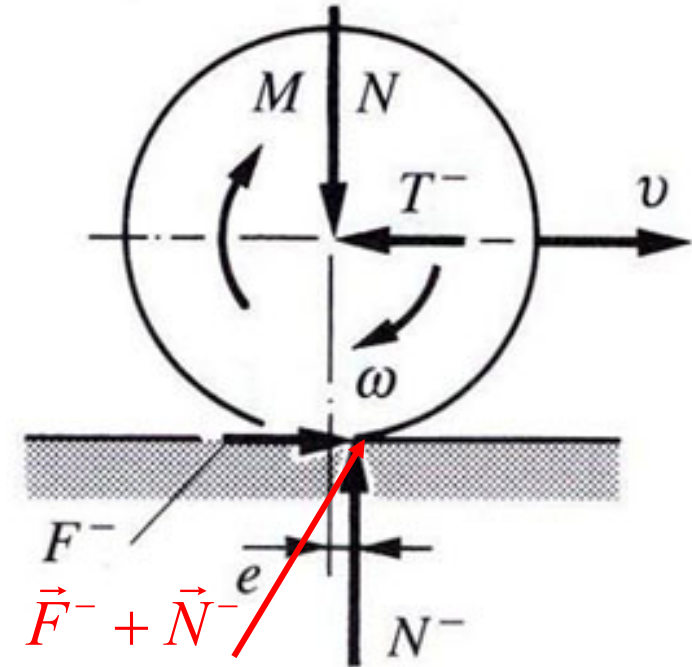
Moment de résistance a l'avancement:

$$M_R = e \cdot N^-$$

Force disponible au sol pour propulser la roue:

$$T = F = \frac{M - M_R}{r} = \frac{M - e \cdot N}{r} = \frac{M}{r} - f \cdot N$$

Condition d'adhérence: $\frac{M}{r} < \mu_0 \cdot N$



Modélisation: Roue freinée

Equilibre statique ($v = \text{cst}$, $\omega = \text{cst}$)

Moment de freinage sur l'axe: M_f

Force de freinage à la roue: F^-

Force motrice sur l'axe: T

Moment de résistance à l'avancement:

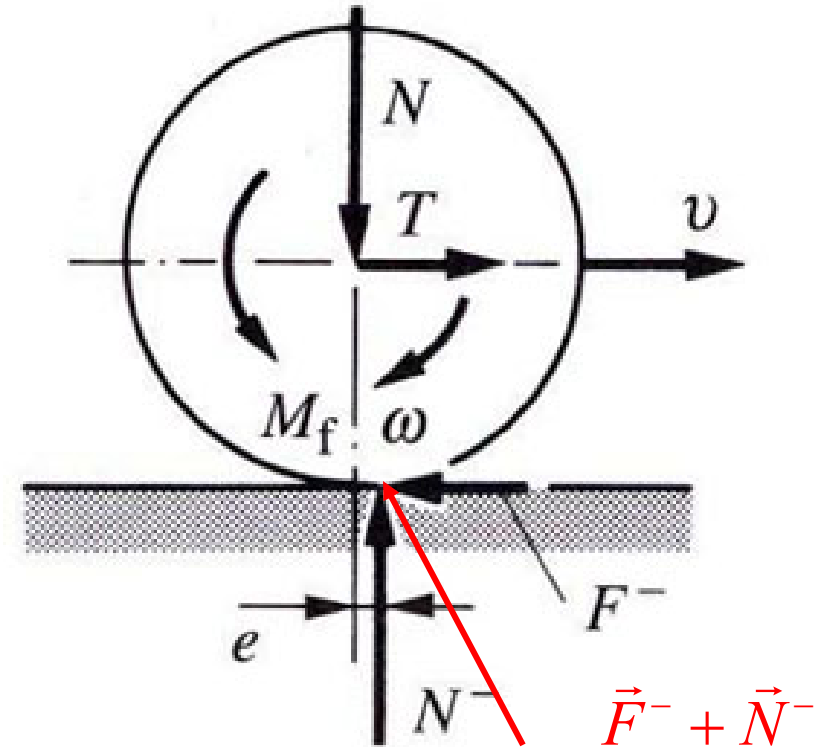
$$M_R = e \cdot N^-$$

Force disponible au sol pour freiner la roue:

$$F = T = \frac{M_f + M_R}{r} = \frac{M_f + e \cdot N}{r} = \frac{M_f}{r} + f \cdot N$$

Condition d'adhérence:

$$\frac{M_f}{r} < \mu_0 \cdot N$$



Modélisation: Roue folle ou libre (non-motrice, non-freinée)

Rayon statique $r < R$

Force motrice T

Réactions du sol N^- et F^- dues au bourrelet

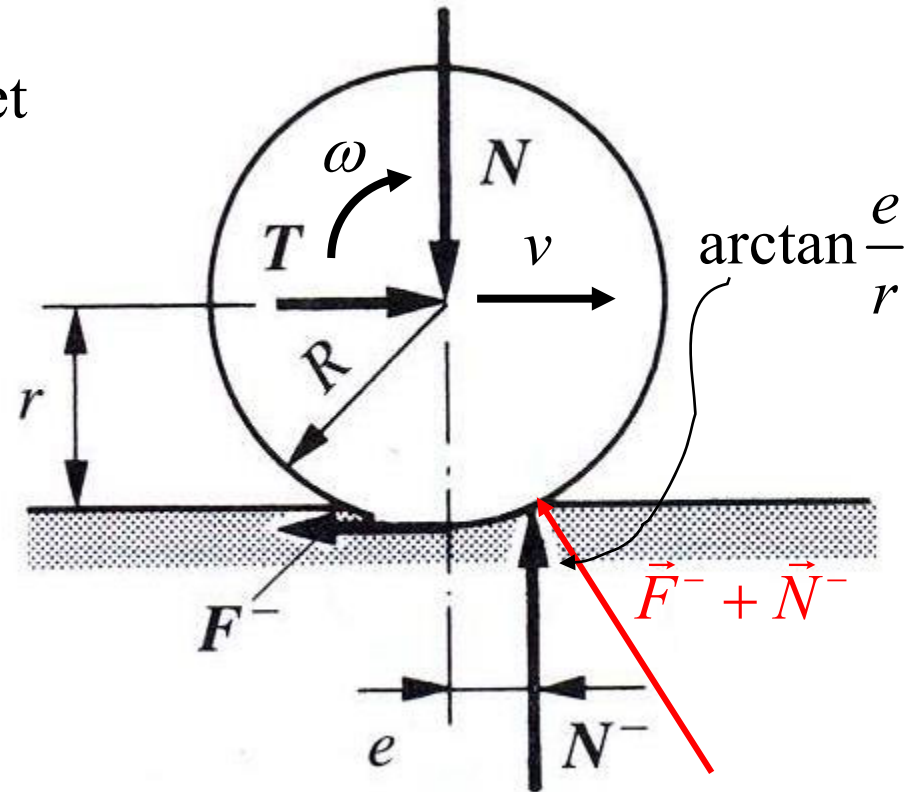
Paramètre de résistance
au roulement e

Equilibre statique:

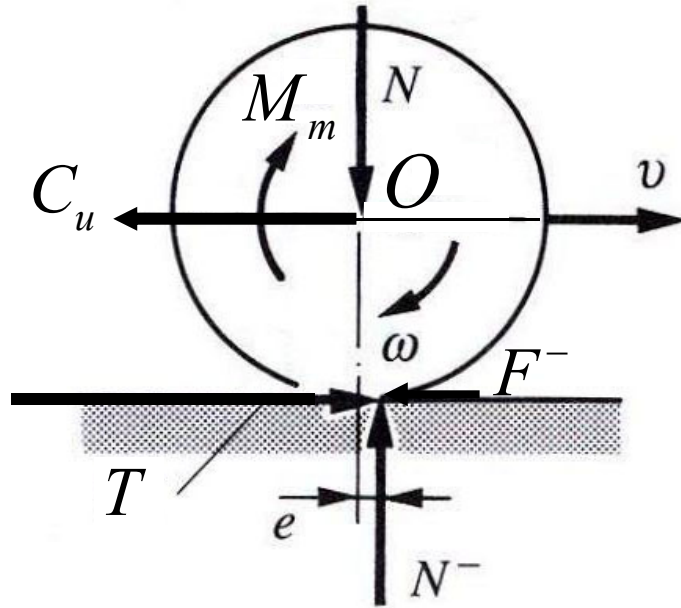
$$N = N^- \quad T = F^-$$

$$Tr = N^- e \rightarrow e = \frac{rT}{N}$$

$$f = \frac{e}{r} = \frac{T}{N} \quad T = F = \frac{e}{r} N^-$$



Modélisation: Roue motrice



Condition d'adhérence:

$$T = \frac{M_m}{r} < \mu_a N^-$$

Régime stationnaire: $v = cst$, $\omega = cst$

Moment moteur: M_m Force motrice: T

Force "utile": C_u

Equilibre des efforts horizontaux:

$$T - C_u - F^- = 0 \quad \text{avec} \quad F^- = \frac{e}{r} N^-$$

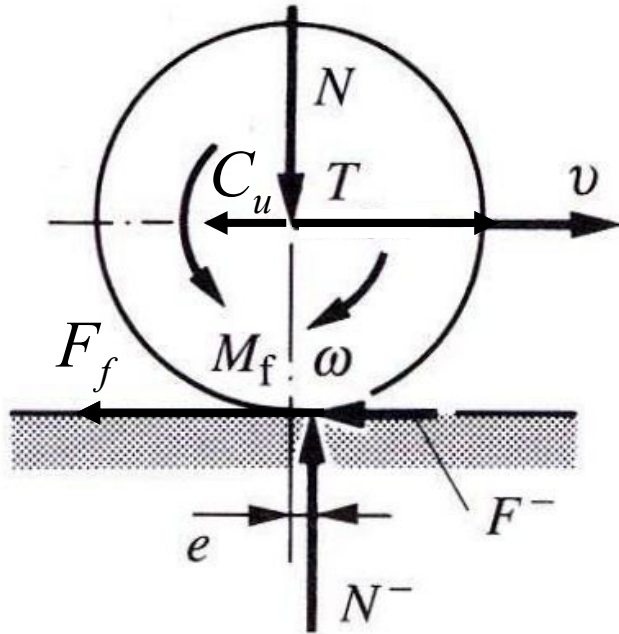
$$T = \frac{e}{r} N^- + C_u$$

Equilibre des moments:

$$M_m - C_u r - N^- e = 0 \quad C_u = \frac{M_m}{r} - \frac{e}{r} N^-$$

$$\rightarrow \text{Force utile : } C_u = \frac{M_m}{r} - f N^-$$

Modélisation: Roue freinée



Condition d'adhérence:

$$F_f = \frac{M_f}{r} < \mu_a N^-$$

Régime stationnaire: $v = cst$, $\omega = cst$

Moment de freinage: M_f Force motrice: T

Force "utile": C_u Force de freinage: F_f

Force de freinage totale: $F_{f\ tot} = F^- + F_f$

Equilibre des efforts horizontaux:

$$T - C_u - F^- - F_f = 0 \rightarrow T = C_u + F_{f\ tot}$$

Equilibre des moments:

$$M_f + C_u r + N^- e - T r = 0$$

$$T = \frac{M_f}{r} + \frac{e}{r} N^- + C_u = C_u + F_{f\ tot}$$

$$\rightarrow \text{Force motrice requise : } T = \frac{M_f}{r} + f N^- + C_u$$

$$\rightarrow \text{Force de freinage totale : } F_{f\ tot} = \frac{M_f}{r} + f N^-$$

Coefficient de Résistance au Roulement: Relation avec Coefficient de Frottement

$$f = C_{RR} = \frac{e}{r}$$

Matériaux	Coefficient de frottement	
Acier/bronze graissé	0,10	(frottement)
Film hydrodynamique	0,05	(frottement)
Roulement à billes	0,001 à 0,002	(roulement)
Roulement à rouleaux	0,002	(roulement)
Roulement à aiguilles	0,005	(roulement)

Pertes par roulement < Pertes par frottement

Coefficient de Résistance au Roulement:

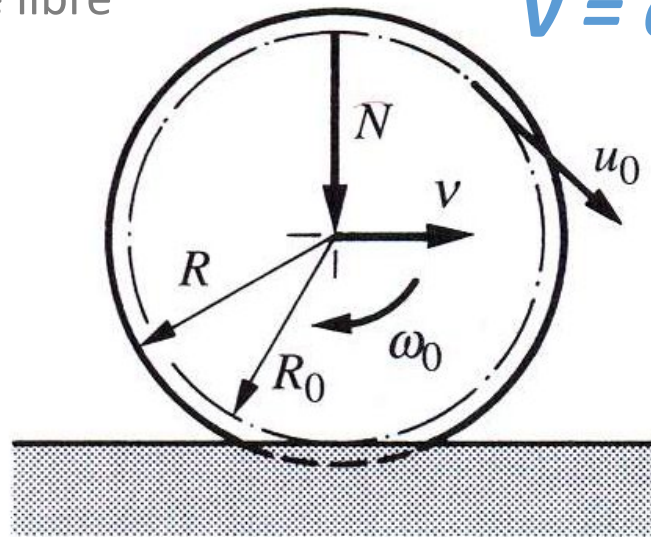
$$f = C_{RR} = \frac{e}{r}$$

C_{rr}	b	Description
0.0003 to 0.0004 ^[16]		"Pure rolling resistance" Railroad steel wheel on steel rail
0.0010 to 0.0024 ^{[17][18]}	0.5 mm ^[2]	Railroad steel wheel on steel rail. Passenger rail car about 0.0020 ^[19]
0.001 to 0.0015 ^[20]	0.1 mm ^[2]	Hardened steel ball bearings on steel
0.0019 to 0.0065 ^[21]		Mine car cast iron wheels on steel rail
0.0022 to 0.005 ^[22]		Production bicycle tires at 120 psi (8.3 bar) and 50 km/h (31 mph), measured on rollers
0.0025 ^[23]		Special Michelin solar car/eco-marathon tires
0.005		Dirty tram rails (standard) with straights and curves ^[citation needed]
0.0045 to 0.008 ^[24]		Large truck (Semi) tires
0.0055 ^[23]		Typical BMX bicycle tires used for solar cars
0.0062 to 0.015 ^[25]		Car tire measurements
0.010 to 0.015 ^[26]		Ordinary car tires on concrete
0.0385 to 0.073 ^[27]		Stage coach (19th century) on dirt road. Soft snow on road for worst case.
0.3 ^[26]		Ordinary car tires on sand

http://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance

Modélisation: Glissement

Roue libre

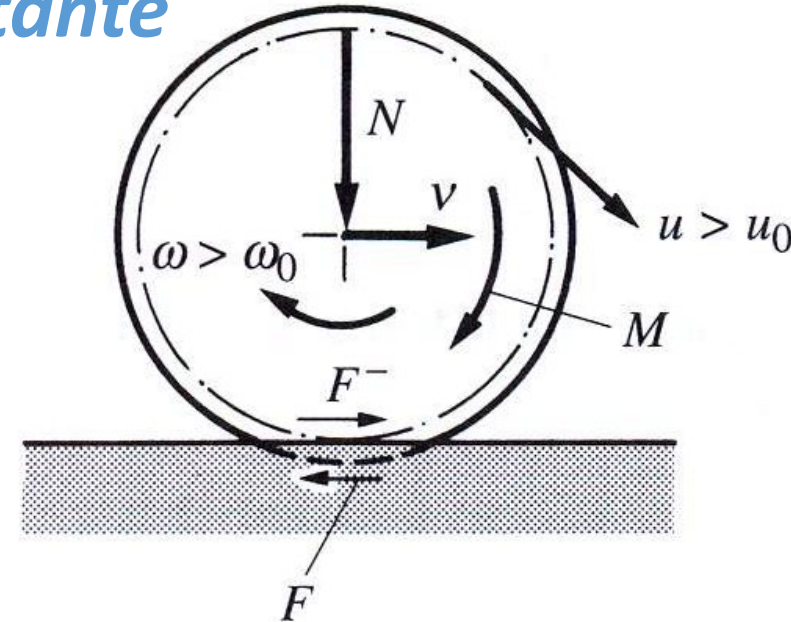


$v = \text{constante}$

Rayon dynamique R_0

$$v = R_0 \omega_0 = u_0$$

Roue motrice



A cause du microglissement

$$v = R_0 \omega_0 = u_0 = u - u_g = R_0 \omega - u_g$$

$$\omega > \omega_0 \quad u > u_0$$

$$u_g = u - u_0 = R_0 (\omega - \omega_0)$$

$$\text{Facteur de glissement } g = \frac{u_g}{u} = 1 - \frac{u_0}{u} = 1 - \frac{\omega_0}{\omega}$$

Modélisation: Glissement = écart entre la vitesse circonférentielle d'une roue et sa vitesse de translation

Roue folle	$u = u_0$	$g = 0$ <i>0% de glissement</i>
Roue motrice	$u > u_0$	$0 < g < 1$
Roue motrice emballée	$u = \infty$	$g = 1$ <i>100% de glissement</i>
Roue freinée	$u < u_0$	$g < 0$
Roue bloquée en glissant	$u = 0$	$g = -\infty$

Modélisation: Adhérence en Roulement

$$\mu_a = \frac{F}{N}$$

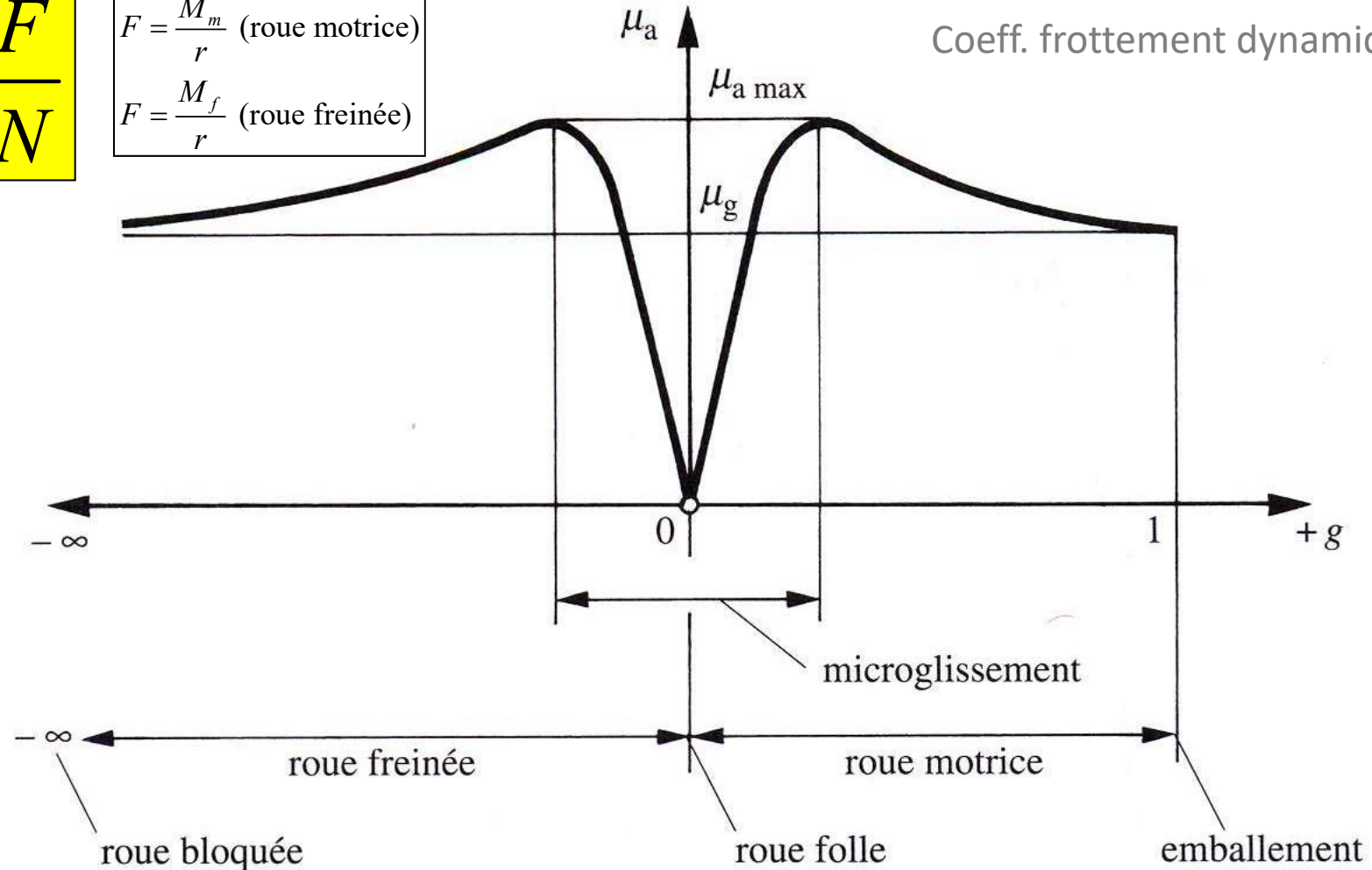
$$F = \frac{M_m}{r} \text{ (roue motrice)}$$

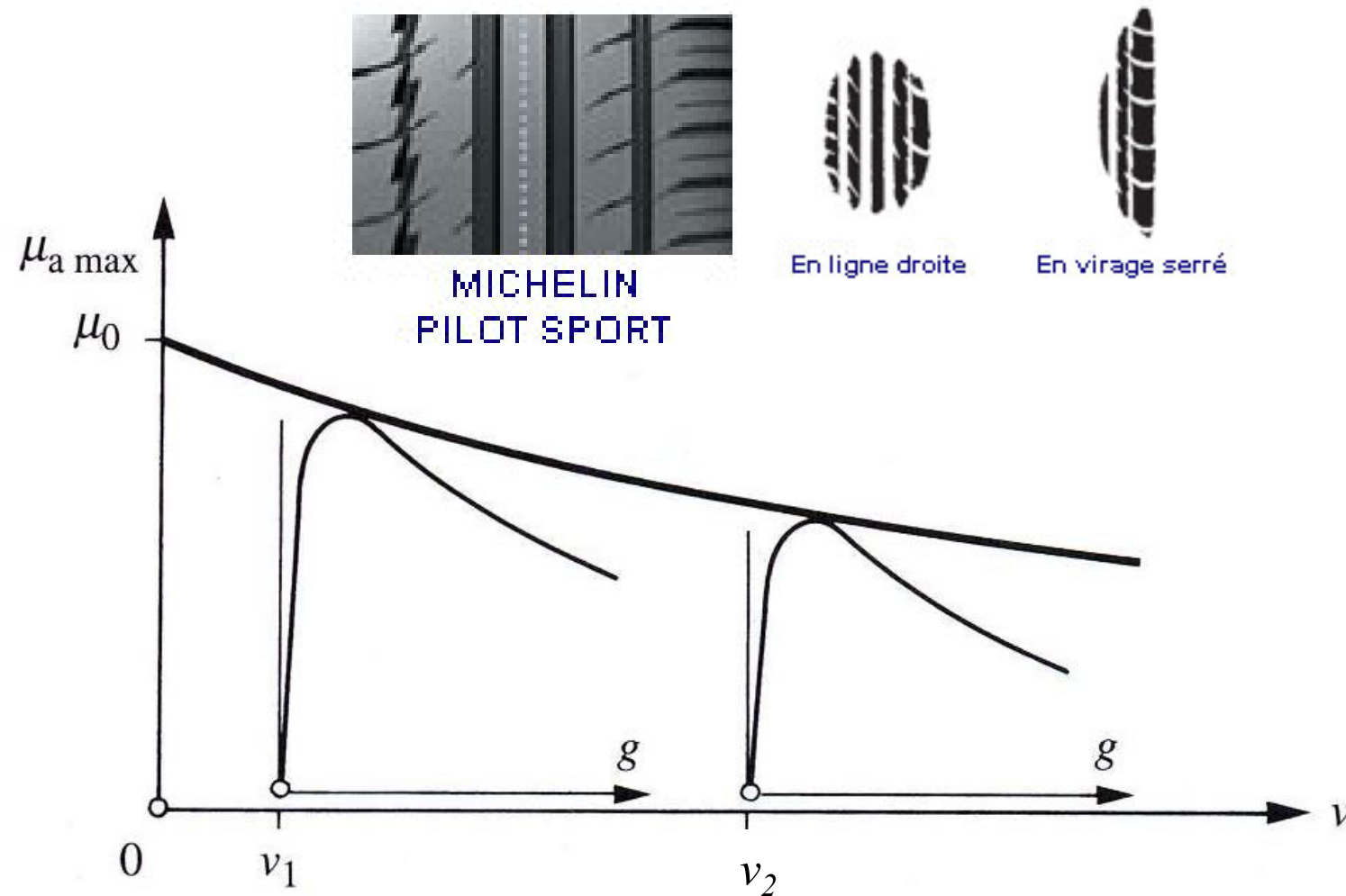
$$F = \frac{M_f}{r} \text{ (roue freinée)}$$

Coeff. d'adhérence

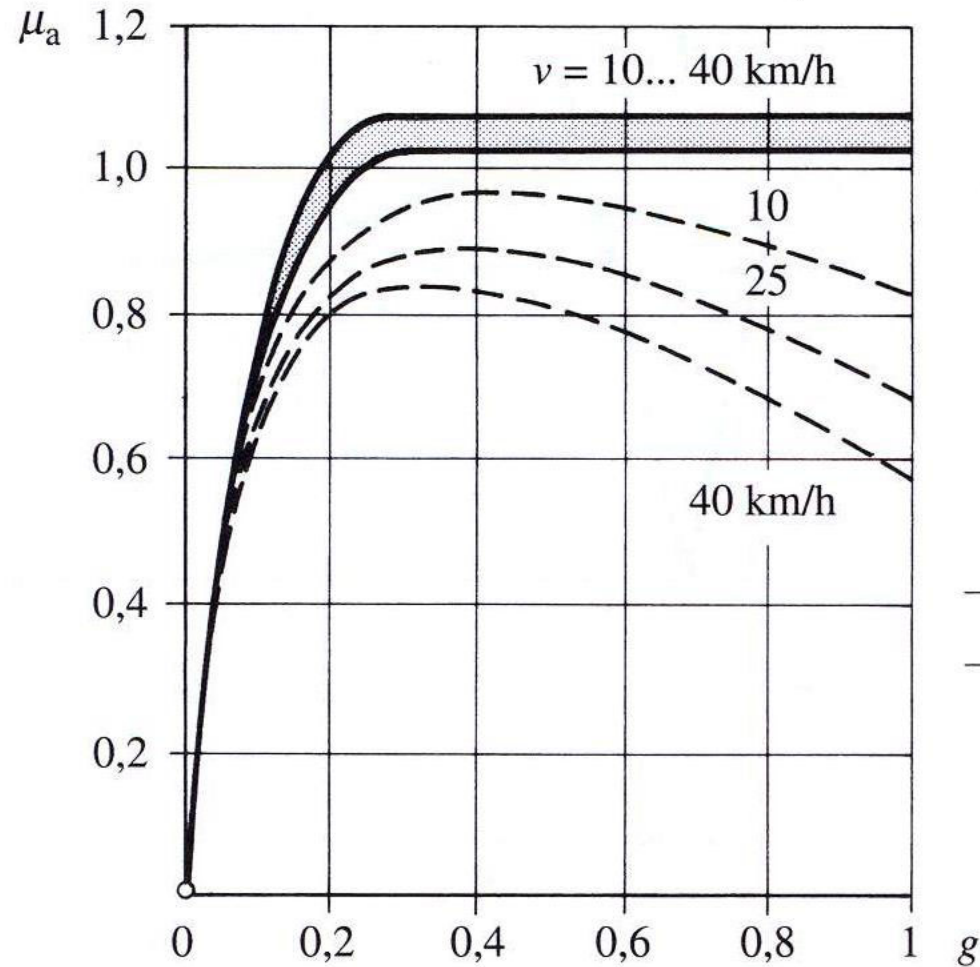
 μ_a

Coeff. frottement dynamique

 μ_g 

Modélisation: Adhérence en Roulement

Modélisation: Adhérence en Roulement



— route sèche
- - - route mouillée

Coefficient d'adhérence

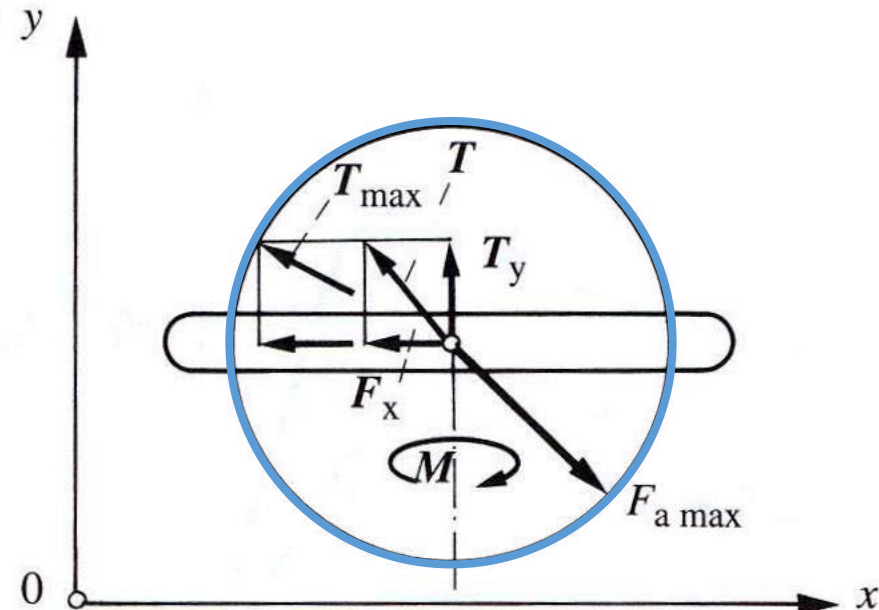
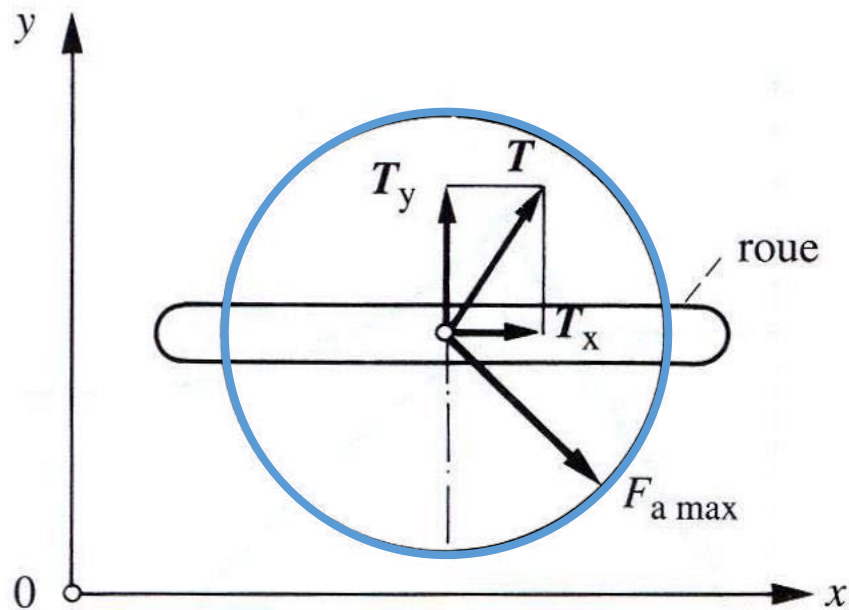
	μ_a
Pneu sur verglas	0,08 - 0,15
Pneu neuf sur asphalte mouillé	0,25 - 0,35
Pneu neuf sur asphalte lisse et sec	0,6 - 0,7
Pneu neuf sur béton rugueux	0,8 - 1

Guidage et Perte de Contrôle

Cercle d'adhérence de rayon $F_{a \max} = N(\mu_a)_{\max}$

$\vec{T}_x$ = force de propulsion ou freinage, $\vec{T}_y$ = force de direction

Si $\|\vec{T}\| = \|\vec{T}_x + \vec{T}_y\| > F_{a \max} \rightarrow$ perte d'adhérence et de contrôle



Exemple

Expliquer la mécanique du frottement qui permet de déboucher une bouteille avec une lame de couteau.



Exemple