



Mécanique des systèmes

Version 2024

Cette étude porte sur la friction.



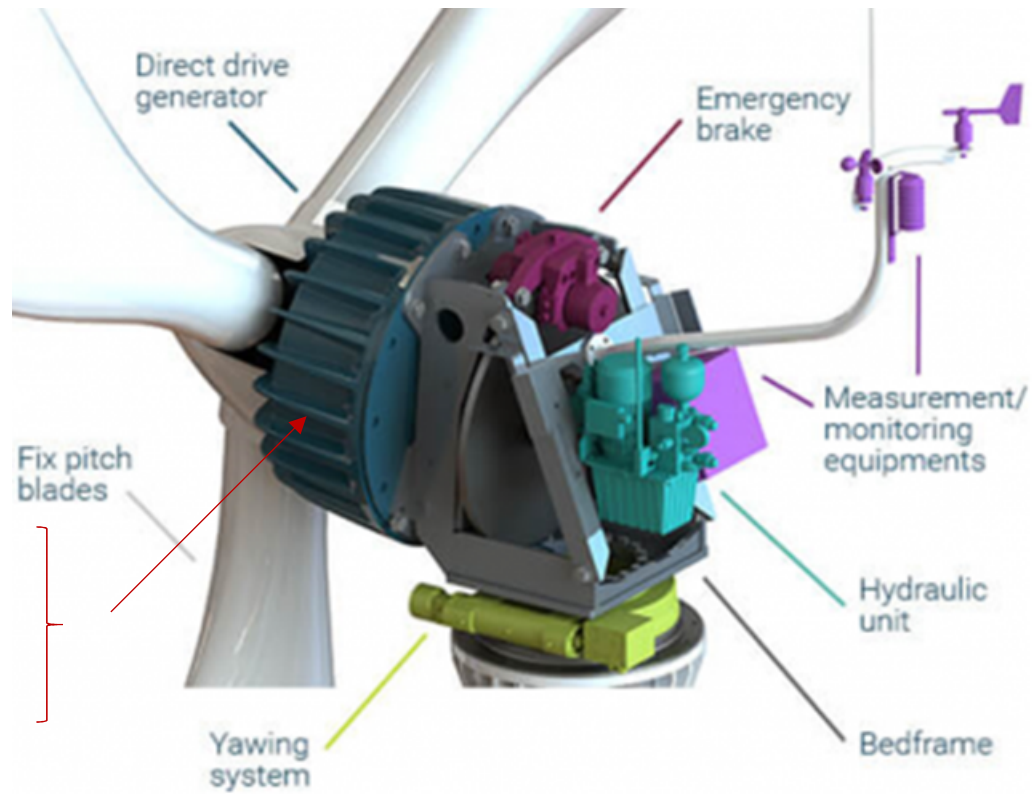
Équivalent de la production : 720 000 hab.



Etude n°4

Cette étude porte sur la friction.

Ces éoliennes ultra-modernes utilisent un générateur monté en direct drive, sans multiplicateur intercalé.
Quid du système de freinage d'urgence ?



Etude n°4

Résistance au déplacement

Dissipation d'énergie

Pollution

Usure

Bruit



60 milliards € soit 3% du PIB français
50% des dépenses en maintenance

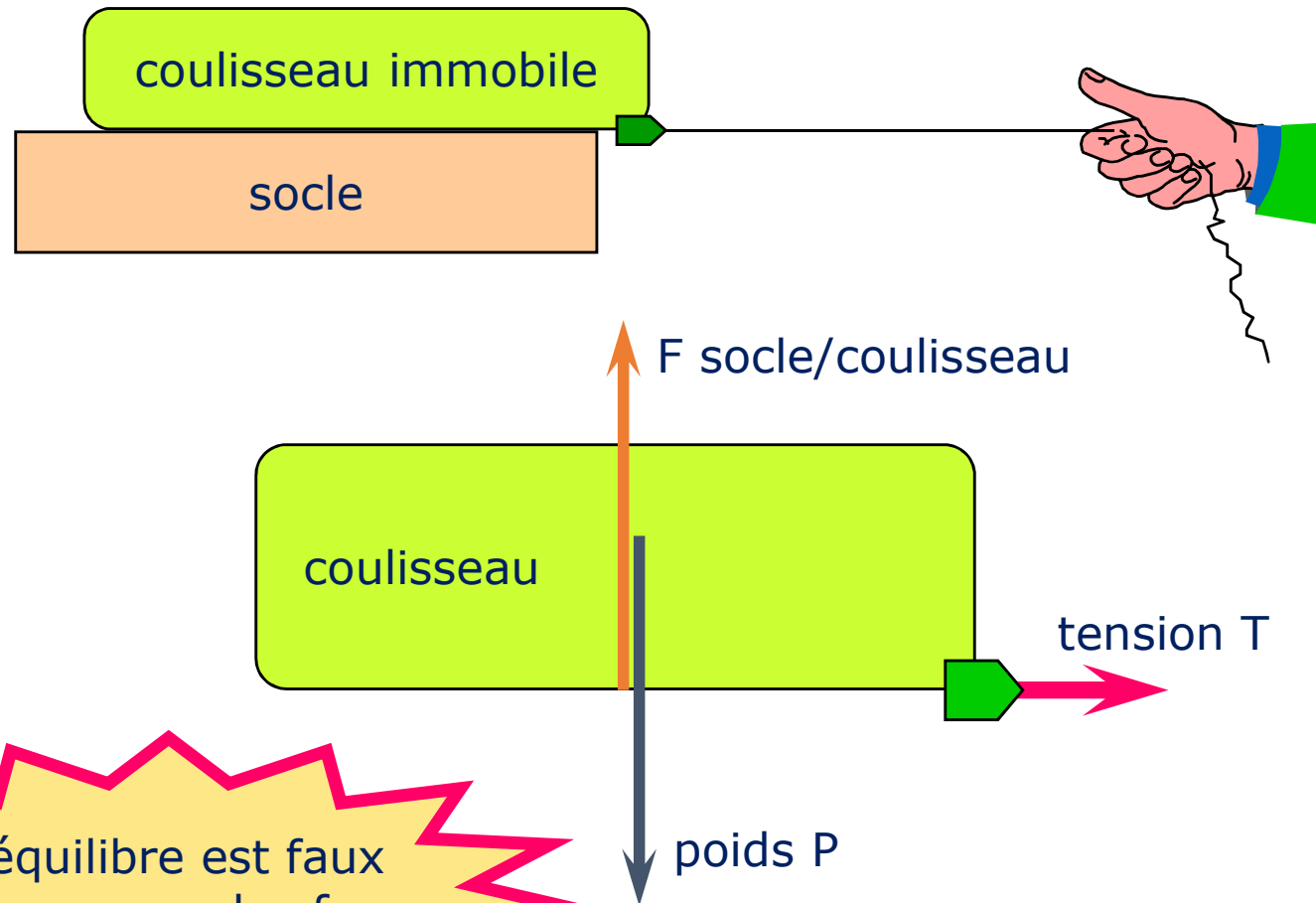


Cependant sans frottement
pas de vie possible !



Etude n°4

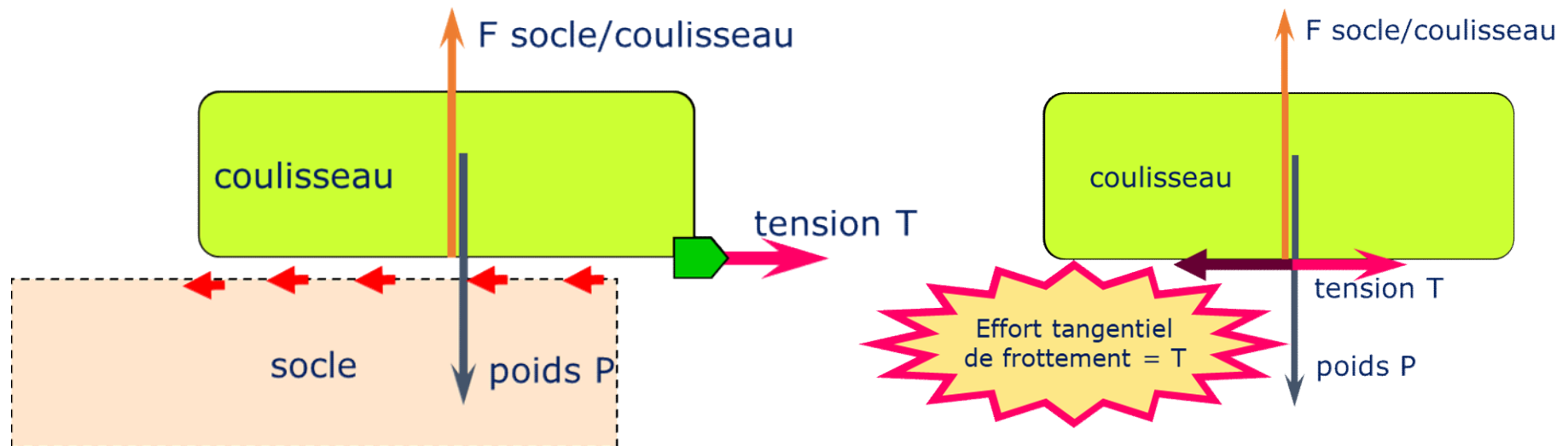
Frottement sec



L'équilibre est faux
car la somme des forces
n'est pas nulle !

Etude n°4

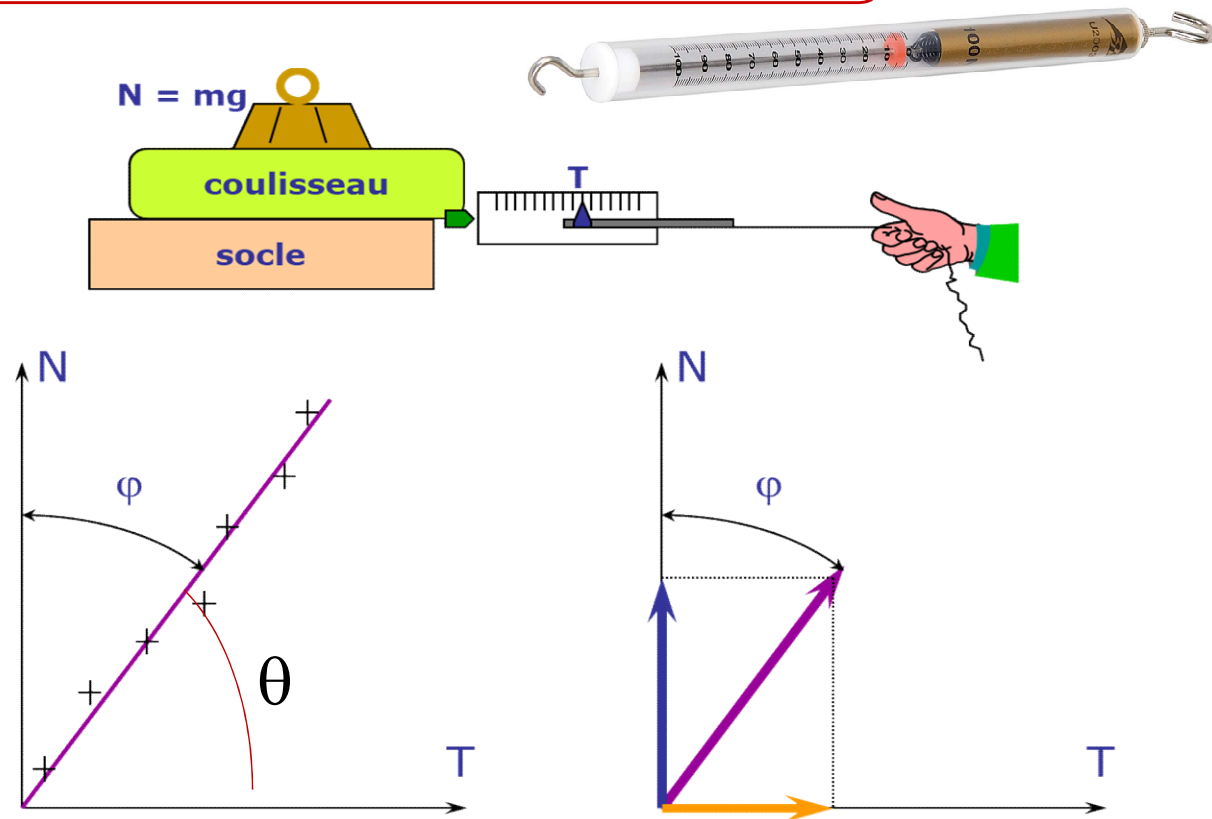
Qu'est-ce qu'une action de frottement ?



*L'action de frottement apparaît sur la surface de contact entre deux corps.
Elle s'oppose à la vitesse relative de glissement entre eux deux.*

Etude n°4

Comment exprimer une action de frottement de glissement ?

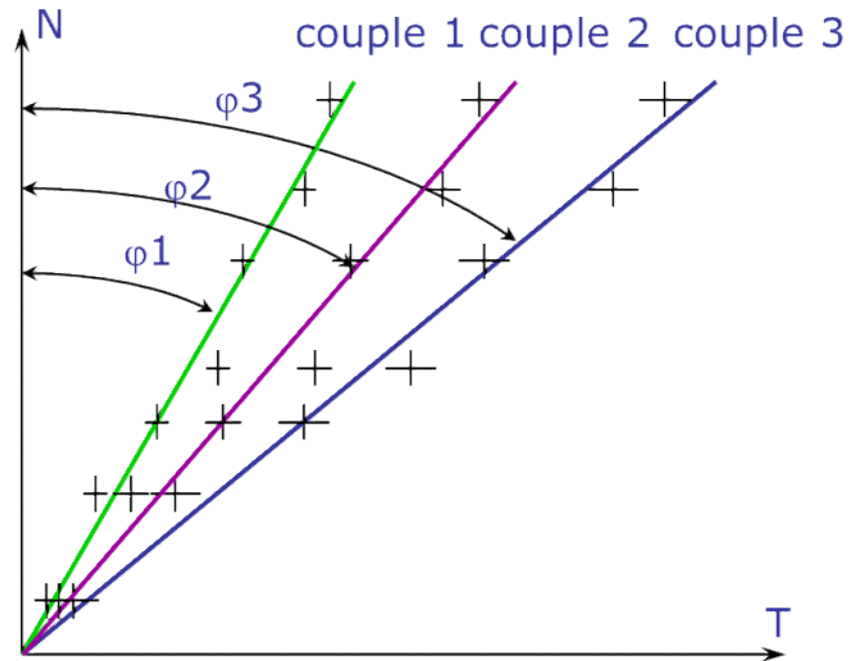


On utilise la loi de Coulomb (1780) :

$$T = f \cdot N$$

f est le coefficient de frottement
 $f = \tan(\varphi)$

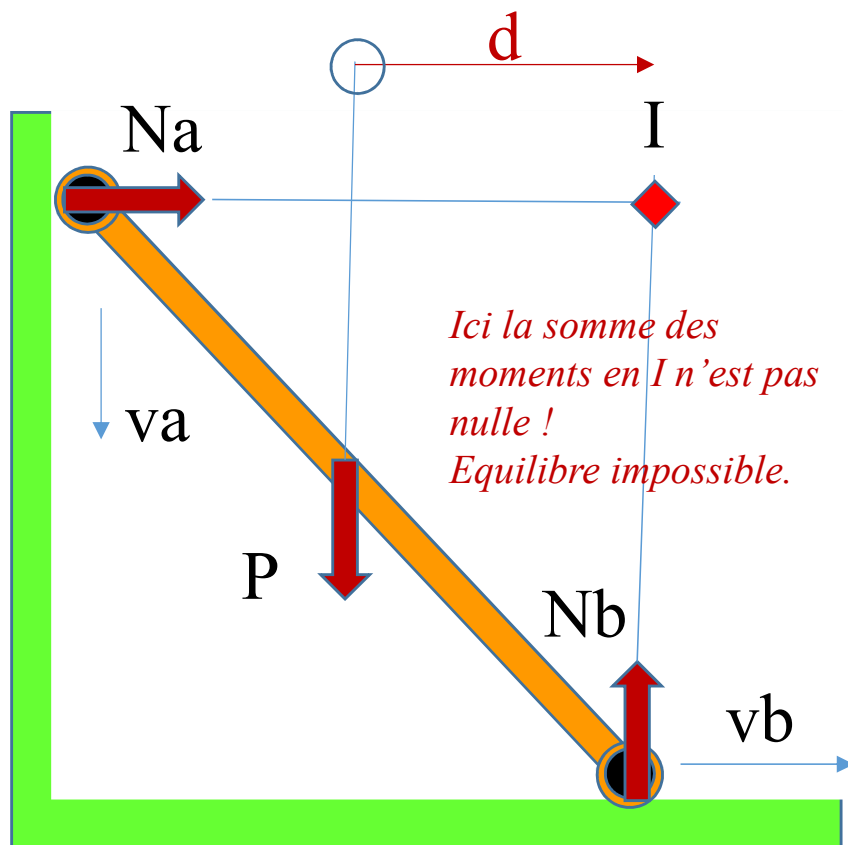
Etude n°4



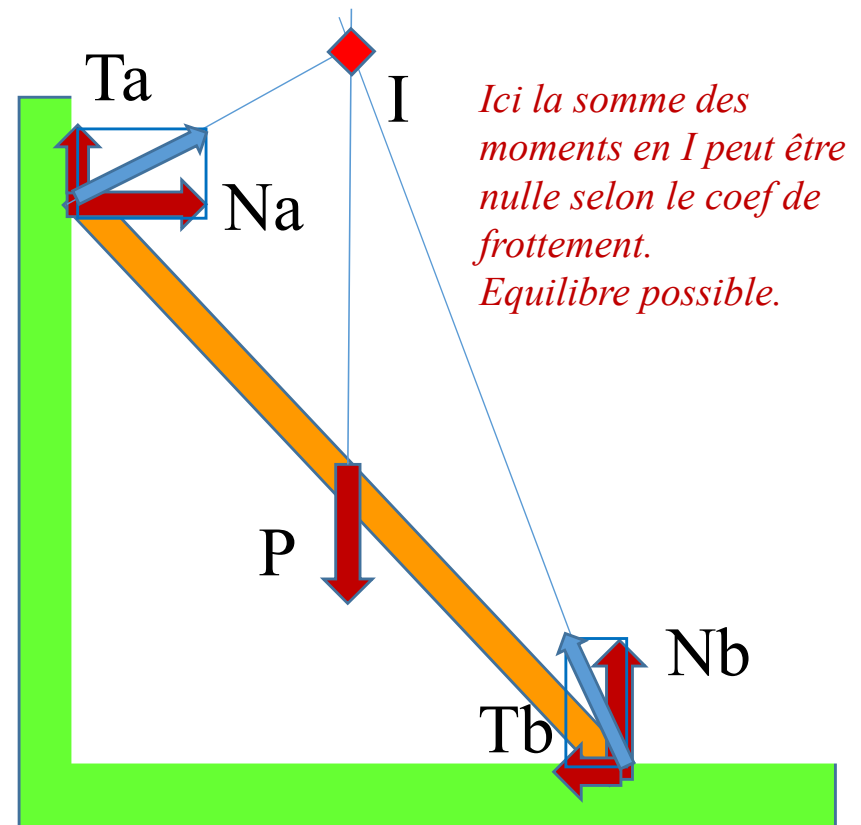
	Contact sec	Contact gras
acier - acier	0.2	0.1
acier - bronze	0.25	0.1
fonte - bronze	0.1	0.08
fonte - FERODO	0.3	0.1
pneu - macadam	0.6	0.3
bois - bois	0.4	-

Etude n°4

Échelle avec roulettes
(frottement $\rightarrow 0$)



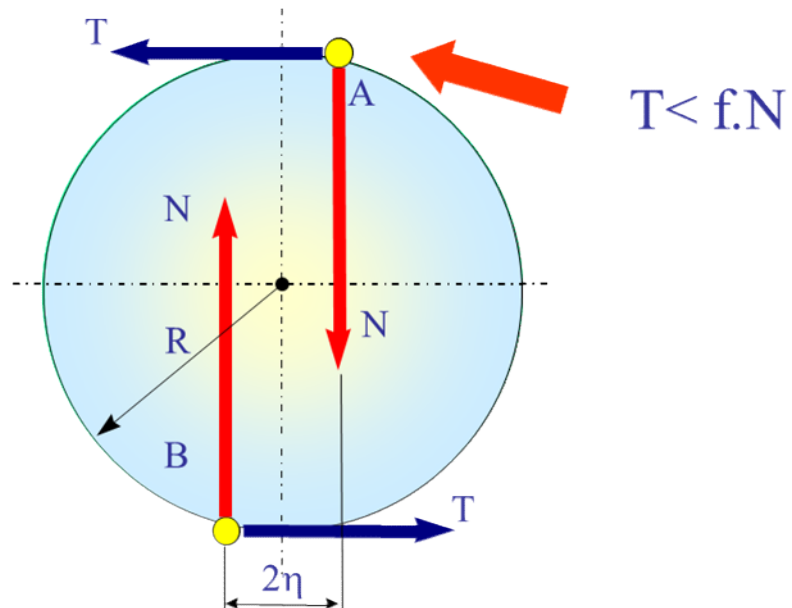
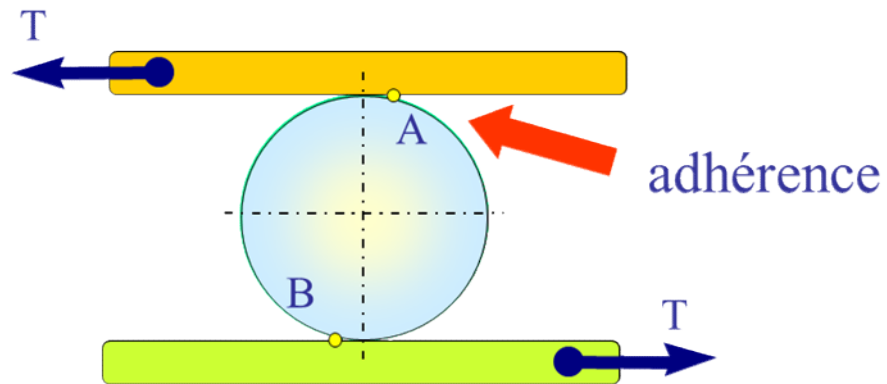
Echelle sans roulette
(donc frottement)



Le frottement rend possible les équilibres !

Etude n°4

Comment exprimer la résistance au roulement ?



Résistance au roulement liée
à la déformation au contact.

$$T \cdot R = \eta \cdot N$$

*Paramètre de
roulement [mètre]*

Etude n°4

*Le **palier lisse** également appelé palier à coussinet est le plus fréquemment utilisés sur des machines tournantes de forte puissance. On entend par palier lisse, un ensemble constitué de :*

- un support, le palier*
- un coussinet*
- un système de lubrification, par pression d'huile et/ou barbotage*
- un système d'étanchéité*



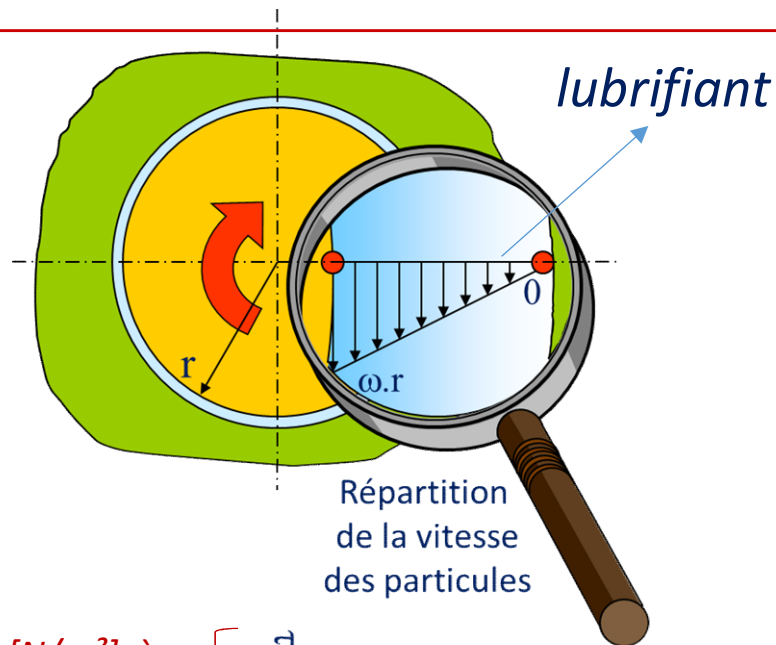
Ils ont pour avantage de supporter des charges radiales importantes.

Ils ont pour inconvénient d'être fragiles, de ne pas accepter de températures très élevées et de peu supporter les phénomènes vibratoires.

Ils nécessitent du personnel compétent dans le domaine pour en assurer l'entretien.

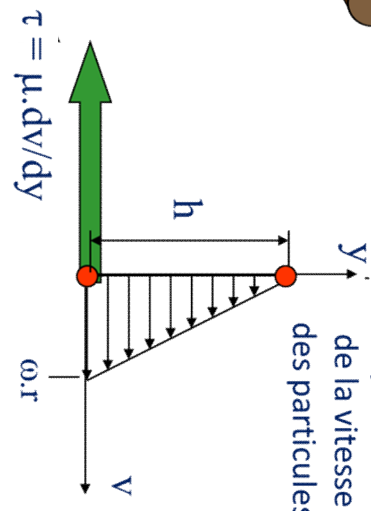
Etude n°4

Comment exprimer le couple de frottement visqueux dans un palier lisse ?



Contrainte $[N/m^2]$ à la paroi qui s'oppose à la mise en rotation.

μ = coefficient de viscosité $[Pa.s]$



Le moment élémentaire exercé par la contrainte sur la paroi et observé sur l'axe du rotor, est :

$$dM = \tau * dS_{latérale} * r$$

$$\tau = \mu * \omega \cdot r / h$$

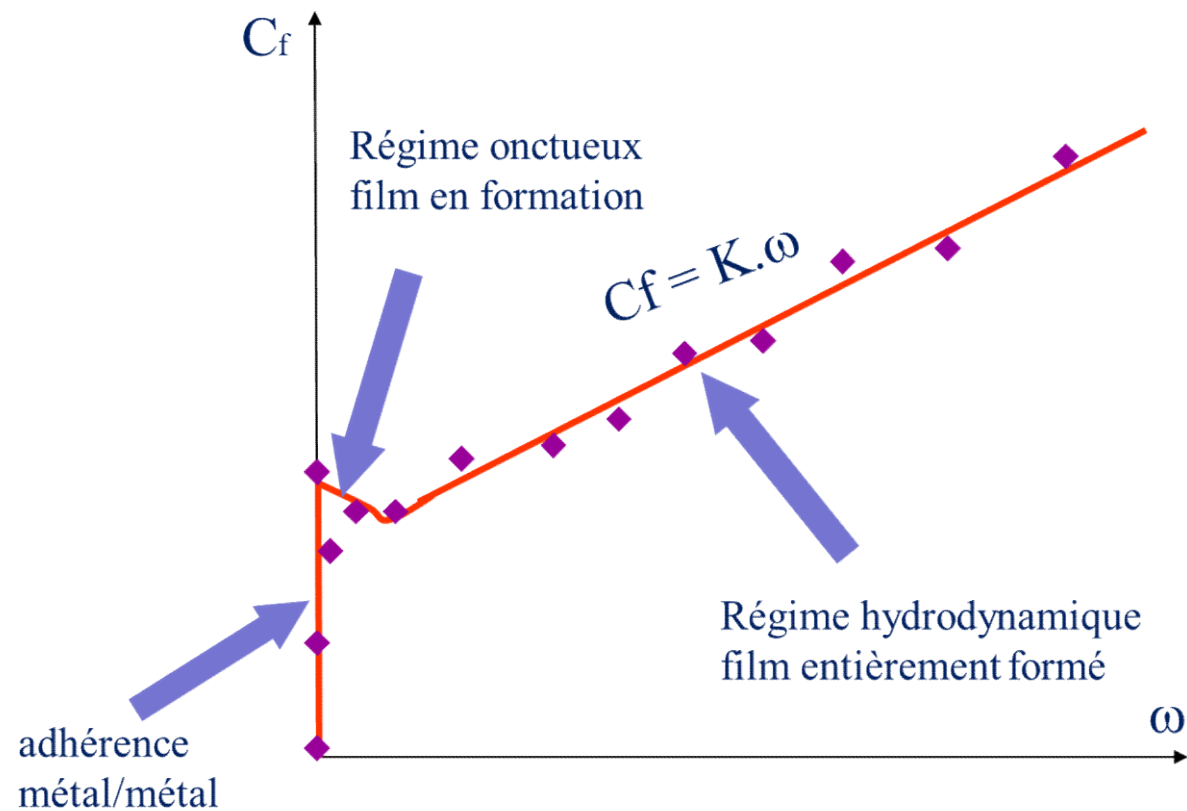
$$M = \underbrace{\mu * \omega \cdot \frac{r}{h} \cdot r}_{\text{constant sur la surface}} * \underbrace{\int_{S_{latérale}} dS_{latérale}}_{= \text{à la surface latérale}}$$

$$M = K * \omega \quad [N.m]$$

K constant...

Etude n°4

Evolution du couple développé par le frottement visqueux sur l'axe d'un palier lisse de machine.

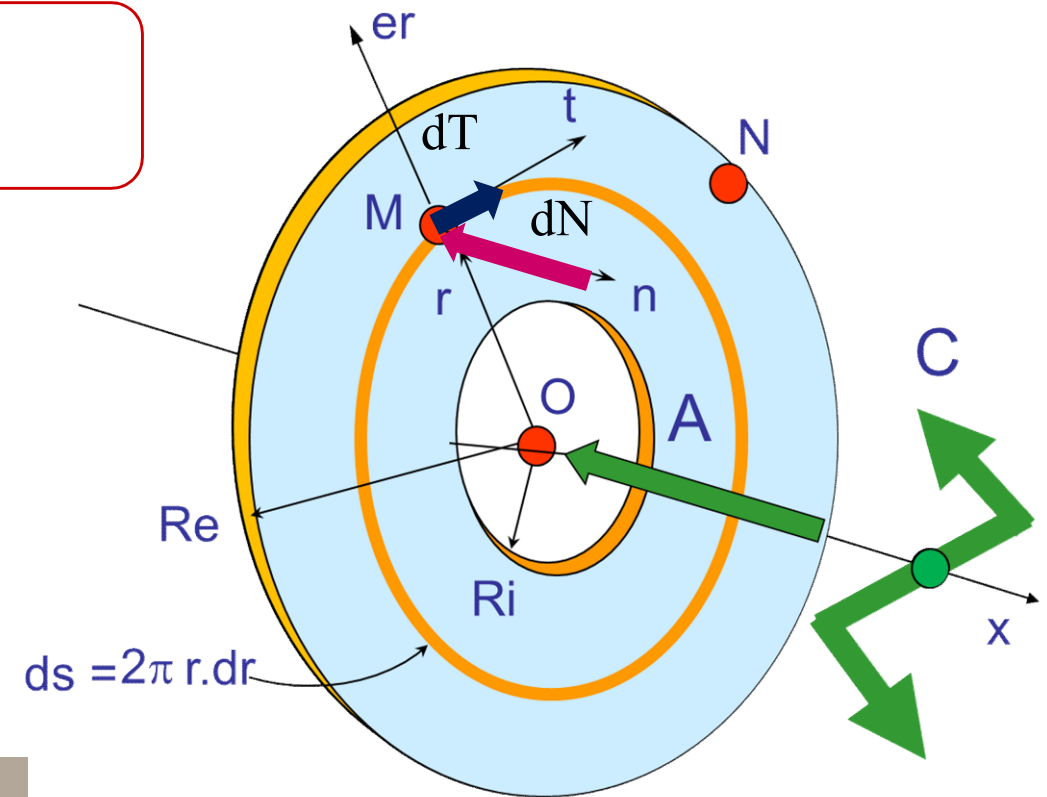


On utilise la relation de proportionnalité à la vitesse de rotation

$$C_f = K.\omega.$$

Etude n°4

Quel est le couple transmissible par une couronne de friction ?

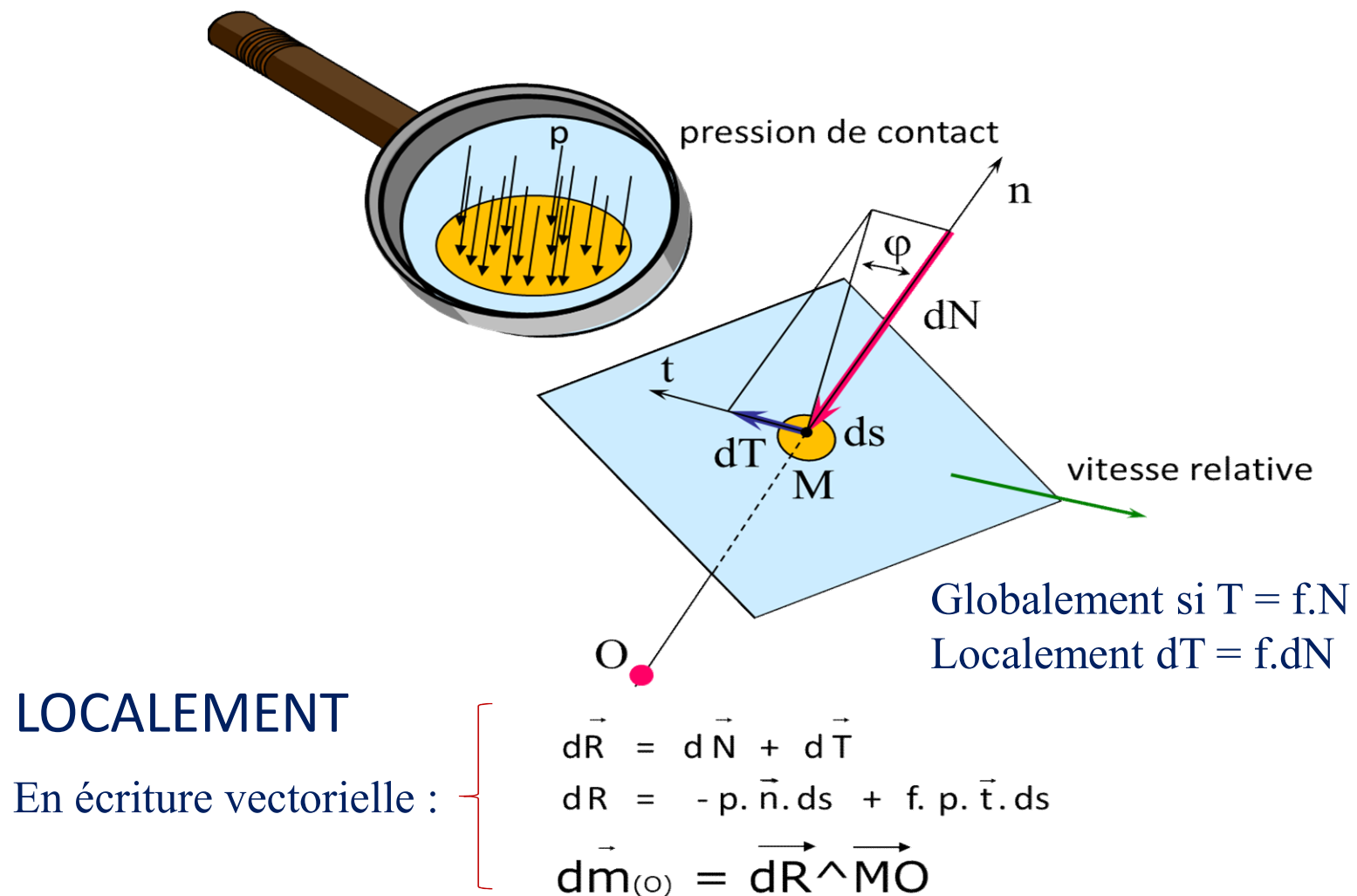


A = effort presseur

C = couple transmis par friction

Etude n°4

Les calculs sur les freins font appel aux actions locales de contact.



Etude n°4

Pour calculer le couple de friction développé en O par le frottement de la couronne pressée par un effort axial A, on doit tenir compte du fait que chaque point de la surface n'est pas à la même distance de O → les bras de levier des efforts locaux dT ne sont pas les mêmes en M et en N et donc ils contribuent différemment → calcul intégral nécessaire.

$$dC = r.dT = r.f.p.ds$$

Contribution point M

$$C = \int_{surface} dC = \int_s r.f.p.ds$$

Contribution de tous les points

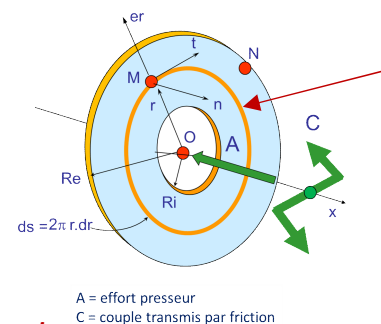
Hypothèse : en chaque point on trouve le même coefficient de frottement et la même pression de contact (il faut que A soit purement axial...).

$$C = f.p. \int_s r.ds$$

$$C = f.p. \int_{Ri}^{Re} 2\pi r^2.dr = 2\pi.f.p. \left[\frac{r^3}{3} \right]_{Ri}^{Re}$$

$$C = 2\pi.f.p. \left[\frac{Re^3 - Ri^3}{3} \right]$$

$$\text{Or on sait que } p = A/S = \frac{A}{\pi.(Re^2 - Ri^2)}$$



On choisit ce ds
Une couronne élémentaire passant par M.
On déroule celle-ci, on obtient un rectangle.

$$ds = 2\pi r dr$$

Coef frottement
Autour de 0,3
typiquement

Effort presseur

Géométrie

$$C = \frac{2}{3} \cdot f \cdot A \cdot \left[\frac{Re^3 - Ri^3}{Re^2 - Ri^2} \right] \quad [\text{N.m}]$$

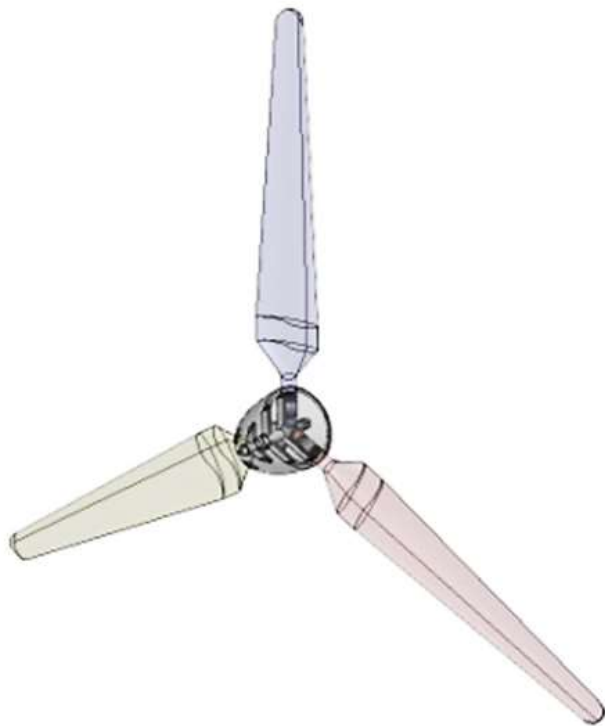
Etude n°4



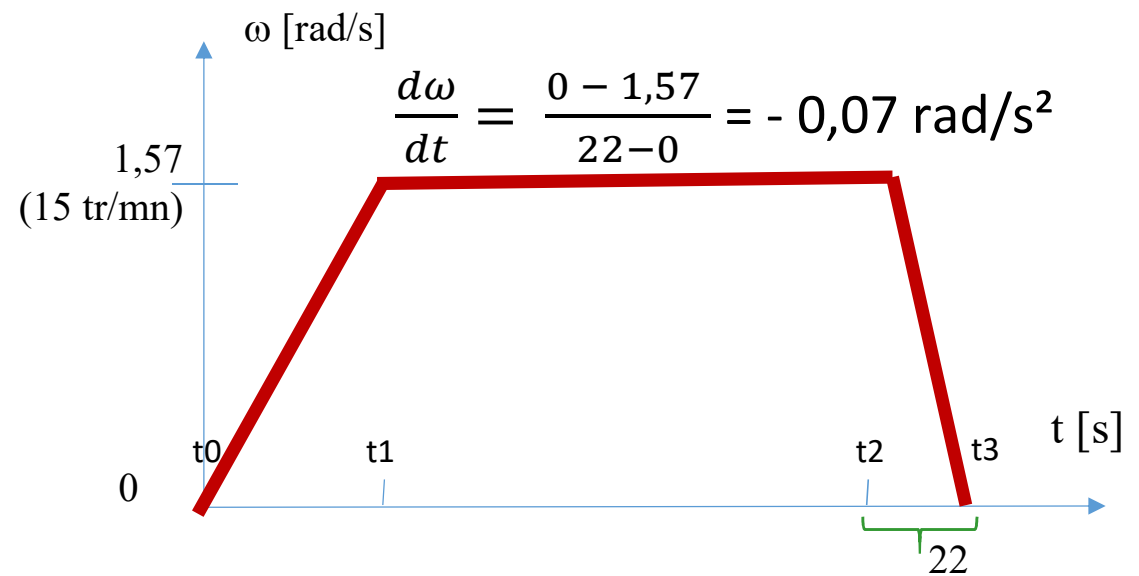
Les systèmes de freinage mécanique de la majorité des éoliennes sont constitués d'un frein à disque.

Le disque rotatif (rotor) est claveté sur l'arbre principal de la turbine et tourne avec les aubes de la turbine tandis que le stator (garniture de frein) est fixé à la nacelle. Lorsque les freins mécaniques sont activés, les garnitures de frein compriment le disque et créent une friction qui réduit la vitesse.

Etude n°4



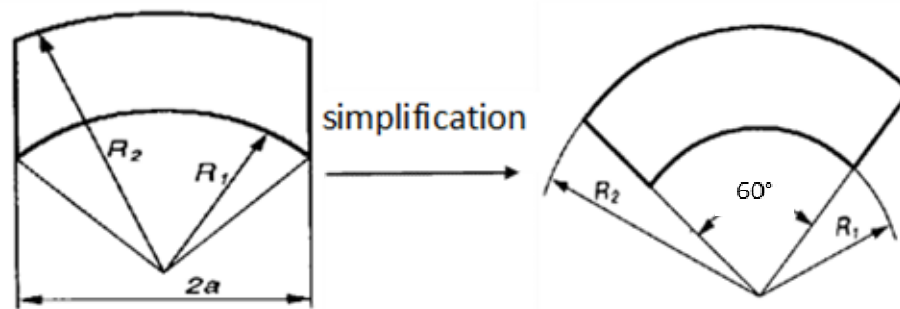
$J_{oz} = 10\,000\,000 \text{ kg.m}^2$!



$C = ?$

Etude n°4

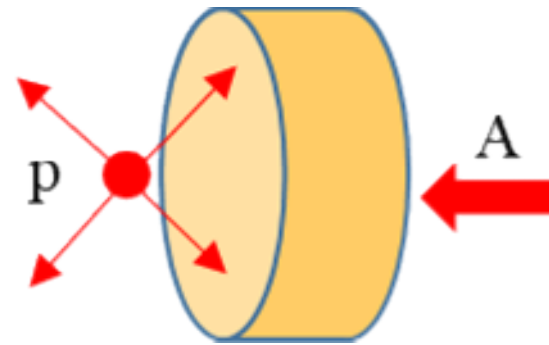
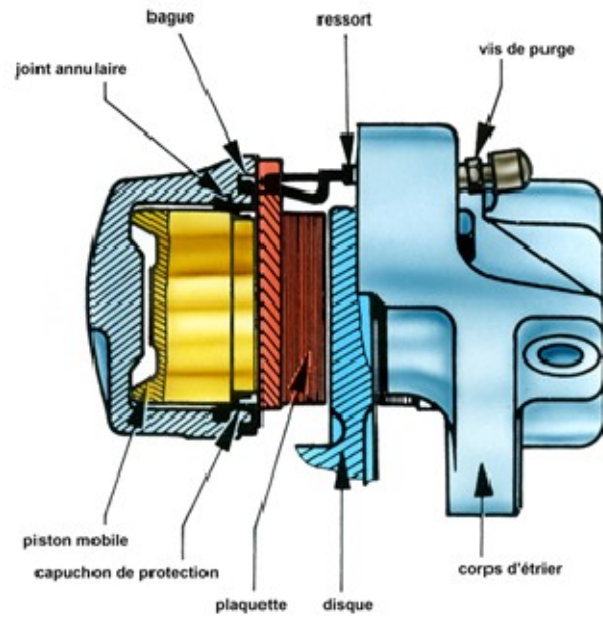
La forme réelle de la garniture est :



$R_e = 0,7 \text{ m}$
 $R_i = 0,35 \text{ m}$
 $f = 0,32$

$$A = ?$$

Etude n°4



$d_{\text{piston}} = 0,35 \text{ m}$

$p = ?$



Pompe très haute pression 1400 bars

Etude n°4

La pression hydraulique d'alimentation du frein est colossale mais ce n'est pas la principale préoccupation du concepteur.

Estimation de l'énergie cinétique du rotor au moment du freinage :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot J_{oz} \cdot \omega^2 = 12\,300 \text{ kJ}$$

Estimation de la puissance moyenne dissipée : $P = \frac{E_c}{T} = \frac{12\,300}{22} = 560 \text{ kW !}$

Cette énergie est entièrement dissipée en chaleur lors de la phase de freinage.

La température maximale du disque peut alors aisément dépasser 1000 °C et 5 mn après l'arrêt le disque peut encore être à une température de 400 °C.

Le danger provient bien d'un risque d'incendie dans la nacelle provoqué par l'inflammation de liquide (huile), fatal à l'éolienne et potentiellement très dangereux pour les environs.

Ces incendies ne sont pas rares.

