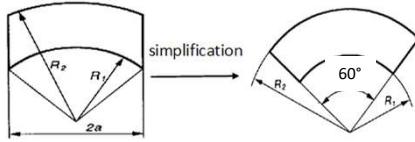


La forme r\'eelle de la garniture est :

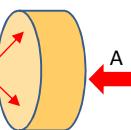
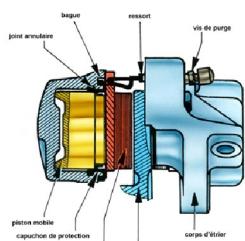


$$|C| = \frac{2}{3} f \cdot A \cdot \left[\frac{Re^3 - Ri^3}{Re^2 - Ri^2} \right] * \frac{60}{360} * 2$$

Portion de couronne Une plaquette de chaque cot\'e du disque

$$A = |C| \frac{3 * 3}{2} \left[\frac{Re^2 - Ri^2}{f \cdot (Re^3 - Ri^3)} \right]$$

$Re = 0,7 \text{ m}$
 $Ri = 0,35 \text{ m}$
 $f = 0,32$



$$\text{Si } d \text{ piston} = 0,35 \text{ m}$$

$$p \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = A$$

p 125 Mpa soit 1250 bars



Pompe tr\`es haute pression 1400 bars

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

Estimation de l'\'energie cin\'etique du rotor au moment du freinage : $E_c = \frac{1}{2} \cdot Joz \cdot \omega^2 = 12 300 \text{ kJ}$

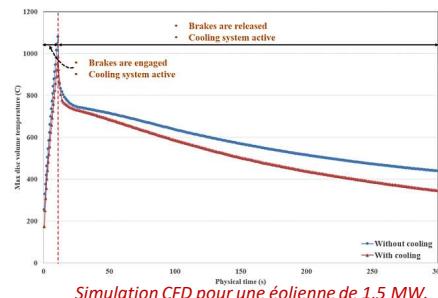
Estimation de la puissance moyenne dissip\'ee : $P = \frac{E_c}{T} = \frac{12 300}{22} = 560 \text{ kW !}$

Cette \'energie est enti\`erement dissip\'ee en chaleur lors de la phase de freinage.

La temp\'erature maximale du disque peut alors ais\'ement d\'epasser 1000 °C et 5 mn apr\'es l'arr\'et le disque peut encore \^tre \`a une temp\'erature de 400 °C.

Le danger provient bien d'un risque d'incendie dans la nacelle provoqu\'e par l'inflammation de liquide (huile), fatal \`a l'\'olienne et potentiellement tr\`es dangereux pour les environs.

Ces incendies ne sont pas rares.



Il est possible d'abaisser ce risque en refroidissement activement le frein...



<https://www.ogab.co.uk/sustainable-braking-for-wind-turbines/>

Dossier 4 – La friction

Ce document est une synth\`ese du cours pr\'esent\'e

Parc \'olien en mer de Saint Nazaire



Il s'agit du tout premier parc \'olien en mer install\'e en France (2022).



Mod\`ele \'olienne : GE Haliade 150 – 6 MW (ex Alstom Wind)

Type pos\'e, fondation monopieu

Nombre d'\'oliennes : 80

Hauteur du mat : 100 m

Longueur des pales : 74 m

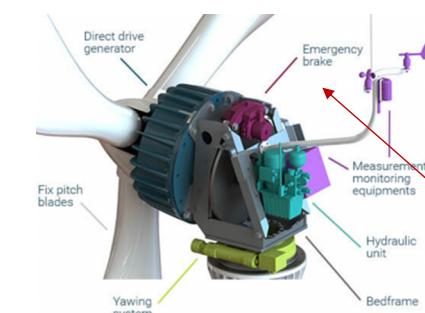
Diam\`etre hors tout : 150 m

Superficie du parc : 78 km\text{²}

Investissement en euros : 2 Milliards

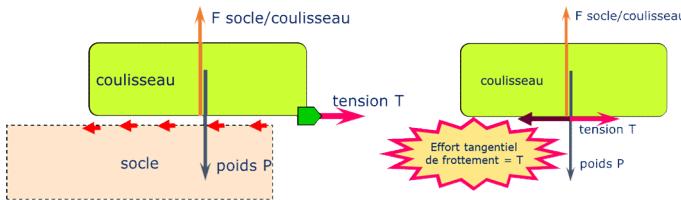
Puissance install\'ee 480 MW

\'Equivalent de la production : 720 000 hab.

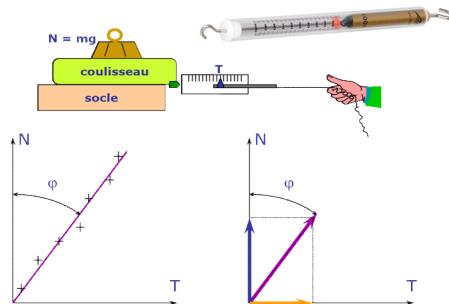


Ces \'oliennes ultra-modernes utilisent un g\'en\'erateur mont\'e en direct drive, sans multiplicateur intercal\'e.
Quid du syst\`eme de freinage d'urgence ?

Résistance au GLISSEMENT



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.



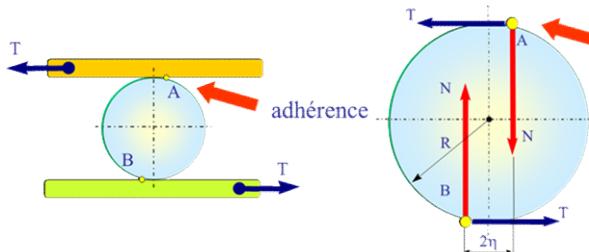
Loi de COULOMB (1780)

$$T = f \cdot N$$

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

	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	-

Résistance au ROULEMENT

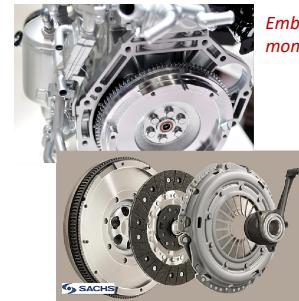


La résistance au roulement est 100 à 10000 fois inférieure à la résistance au glissement.

$$T^*R = \eta * N$$

Paramètre de roulement [mètre]

Cas de la couronne de friction (embrayages et freins)



Embrayage monodisque

Frein

dr

ds

Re

Ri

t

n

p

dN

ds

dr

pression de contact

vitesse relative

Globalement si $T = f \cdot N$

Localement $dT = f \cdot dN$

$$dC = r \cdot dT = r \cdot f \cdot p \cdot ds$$

$$C = \int_{\text{surface}} dC = \int_S r \cdot f \cdot p \cdot ds$$

Contribution de tous les points

$$C = f \cdot p \cdot \int_S r \cdot ds \quad Si p \text{ est uniforme}$$

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

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

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

Cette relation est valable pour une couronne entière.

Le couple de friction est proportionnel à la surface de friction employée.

A noter que souvent une couronne de friction fonctionne en mode recto verso (2 surfaces).



Embrayage multidisques



Friction sous tête de vis
= 50% du couple de serrage



Frein électromagnétique
pour moteur électrique

Pour des raisons de sécurité, l'effort presseur est toujours assuré par un système mécanique élastique (ressort). La force électromagnétique n'est utilisée que pour désactiver le frein.

Cas du palier hydrodynamique

$$dM = \tau * dS_{\text{latérale}} * r$$

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

$$M = \mu * \omega \cdot \frac{r}{h} \cdot r * \int_{S_{\text{latérale}}} dS_{\text{latérale}}$$

$$= \text{à la surface latérale}$$

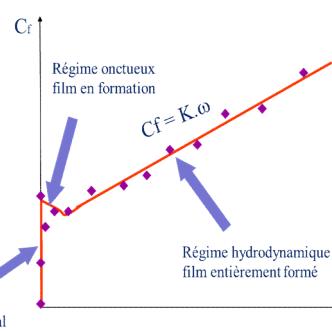
$$M = K * \omega \quad [\text{N.m}]$$

$$K \text{ constant...}$$

$$\text{Contrainte pariétale (frottement du fluide sur la paroi) } [N/m^2]$$

$$\tau = \mu \cdot dv/dy$$

$$\text{Répartition de la vitesse des particules}$$



Les éoliennes sont équipées de freins aérodynamiques et mécaniques. En cas de vents violents, il peut être nécessaire d'activer le mécanisme de freinage pour éviter une survitesse et des dommages catastrophiques à la nacelle ou à l'ensemble. Les systèmes de freinage mécanique de la majorité des éoliennes sont constitués d'un frein à disque.

Le disque rotatif (rotor) est encastré 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 serrent le disque et créent une friction qui réduit la vitesse.



Frein à disque pour éolienne