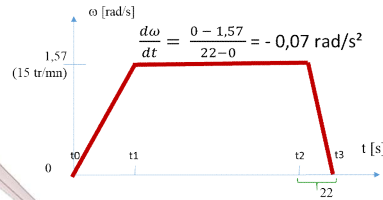


$$J_{oz} = 10\,000\,000 \text{ kg.m}^2 !$$

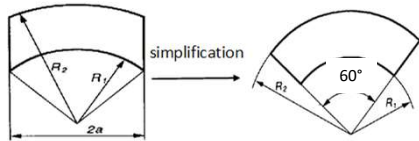


*PFD appliqué au rotor, pales mises en drapeau (Cvent = 0 N.m)*

$$-C = J_{oz} \cdot \frac{d\omega}{dt} < 0$$

$$C = 700\,000 \text{ N.m}$$

La forme réelle de la garniture est :



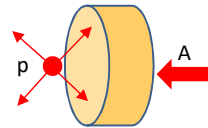
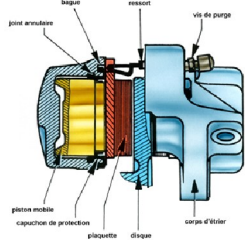
$$|C| = \frac{2}{3} f \cdot A \cdot \left[ \frac{Re^3 - Ri^3}{Re^2 - Ri^2} \right] \cdot \left( \frac{60}{360} \right) \cdot 2$$

Portion de couronne Une plaquette de chaque coté du disque

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

$$\begin{aligned} Re &= 0,7 \text{ m} \\ Ri &= 0,35 \text{ m} \\ f &= 0,32 \end{aligned}$$

$$A = 12\,000\,000 \text{ N}$$



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

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

$$p = 125 \text{ Mpa soit } 1250 \text{ bars}$$



Pompe très haute pression 1400 bars

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

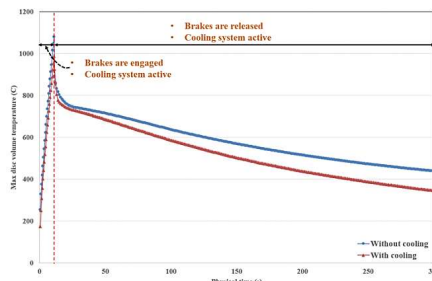
Estimation de la puissance moyenne dissipée :  $P = \frac{E_c}{T} = \frac{12\,300}{22} = 560 \text{ kW}$

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.



Simulation CFD pour une éolienne de 1,5 MW.

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 synthèse du cours présenté

### Parc éolien en mer de Saint Nazaire

Il s'agit du tout premier parc éolien en mer installé en France (2022).



Modèle éolienne : GE Haliade 150 – 6 MW (ex Alstom Wind)

Type posé, fondation monopieu

Nombre d'éoliennes : 80

Hauteur du mat : 100 m

Longueur des pales : 74 m

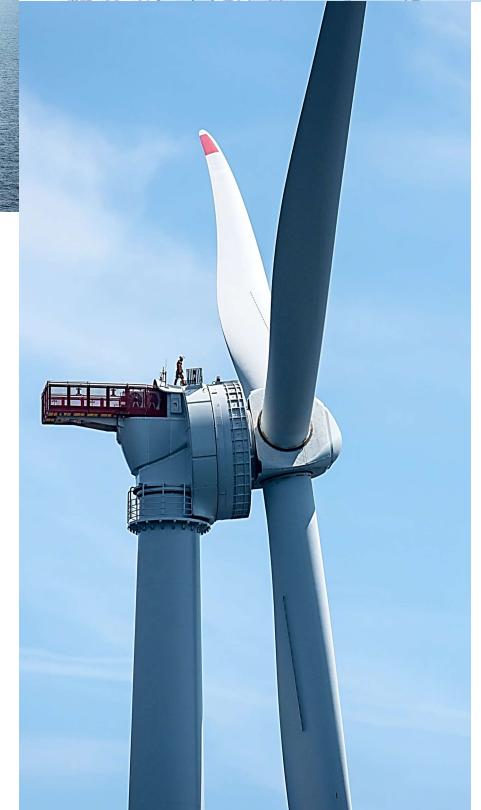
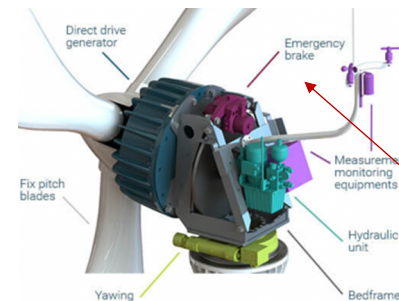
Diamètre hors tout : 150 m

Superficie du parc : 78 km<sup>2</sup>

Investissement en euros : 2 Milliards

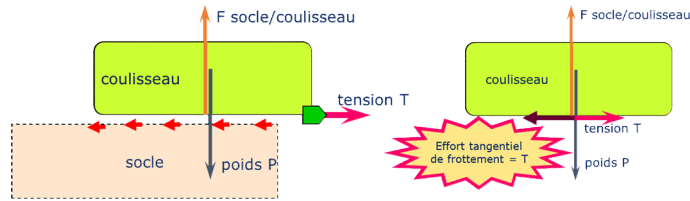
Puissance installée 480 MW

Équivalent de la production : 720 000 hab.

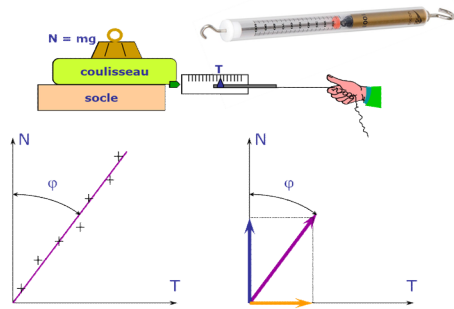


Ces éoliennes ultra-modernes utilisent un générateur monté en direct drive, sans multiplicateur intercalé.  
Quid du système de freinage d'urgence ?

## 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.



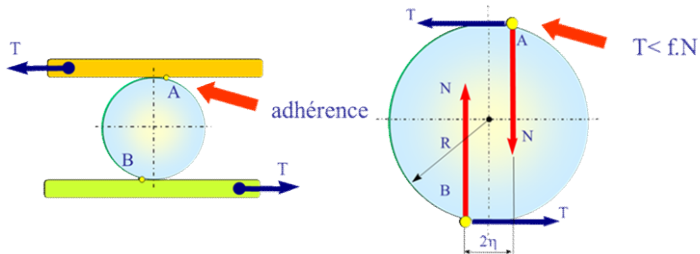
## Loi de COULOMB (1780)

$$T = f \cdot N$$

$f$  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



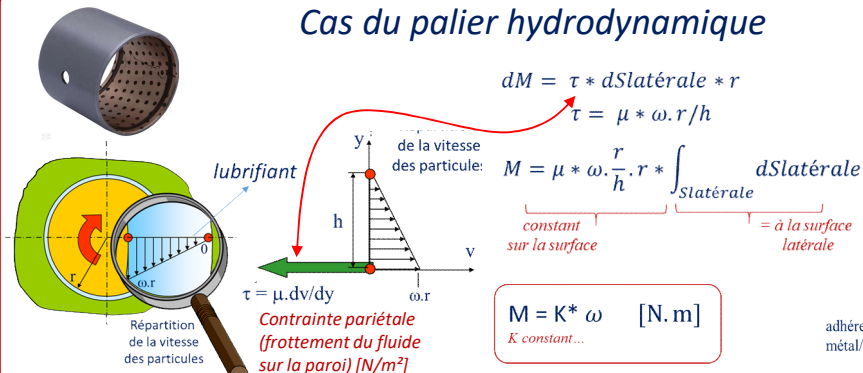
Résistance au roulement liée à la déformation au contact.

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

Paramètre de roulement [mètre]

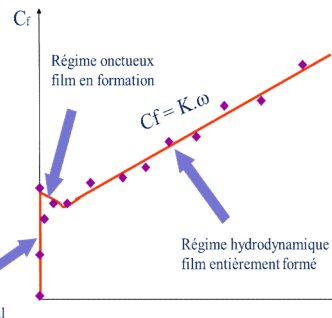
La résistance au roulement est 100 à 10000 fois inférieure à la résistance au glissement.

## Cas du palier hydrodynamique

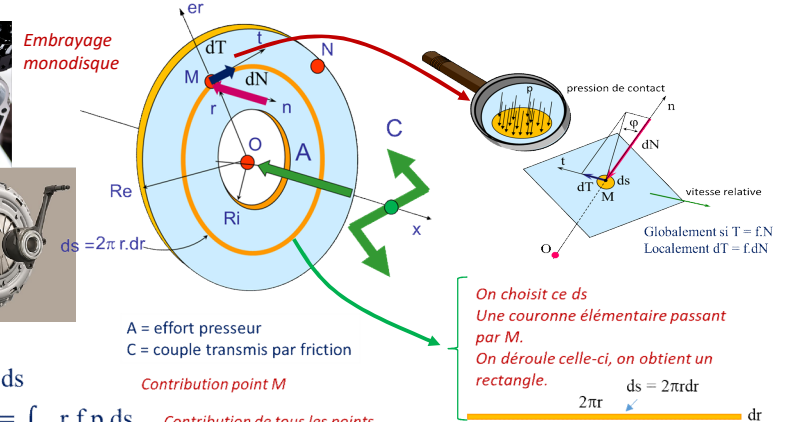
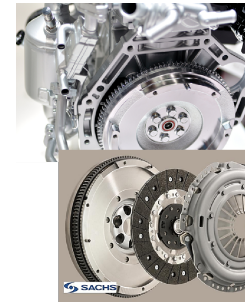


$$M = K \cdot \omega \quad [\text{N.m}]$$

$K$  constant...



## Cas de la couronne de friction (embrayages et freins)



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

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

Contribution de tous les points

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

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

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

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

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.

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