

5. Mécanique et dynamique

5.1 Principes généraux de la mécanique



Hussein Ibrahim, Ph.D. - Antoine Brégaint, M.Sc.A.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Les types de charges
- Les sources de charges
- Principes mécaniques de base
- Vibrations
- Cas des éoliennes en milieu nordique
- Conclusion

Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Les types de charges
- Les sources de charges
- Principes mécaniques de base
- Vibrations
- Cas des éoliennes en milieu nordique
- Conclusion

Introduction et objectifs

- En plus de créer la production éolienne souhaitée, l'interaction des forces extérieures, principalement dues au vent, génère des contraintes dans les matériaux constituant l'éolienne.
- Ces contraintes sont très importantes pour les concepteurs car elles affectent directement la résistance de la turbine et donc sa durée de vie.
- Un projet éolien doit concilier la production d'énergie, la survie de la turbine et sa rentabilité. L'étude des contraintes présentes dans l'éolienne est donc indispensable pour concevoir des machines assez solides pour supporter les charges qu'elle subit.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Les types de charges***
- Les sources de charges
- Principes mécaniques de base
- Vibrations
- Cas des éoliennes en milieu nordique
- Conclusion

Question

- Quels types de charges varient dans le temps ?
 - A. Statiques
 - B. Cycliques
 - C. Stationnaires
 - D. Transitoires
 - E. Stochastique

Les types de charges

- Statiques (turbine à l'arrêt)
 - Ne varie pas sur une période de temps relativement longue.
 - Ex : vent constant soufflant sur une éolienne fixe.
- Stationnaires (turbine en rotation à vitesse constante)
 - Ne varie pas sur une période de temps relativement longue.
 - Ex : vent constant soufflant sur une éolienne produisant de l'électricité induisant des charges constantes sur les pales.
- Cycliques
 - Varie de façon régulière ou périodique
 - S'applique principalement aux charges résultants de la rotation du rotor (poids des pales, cisaillement du vent...)
 - Peut aussi provenir de la vibration de la structure de la turbine

Les types de charges

- Transitoires

- Varie dans le temps
- Survient à la suite d'évènements externes temporaires
- Peut provoquer des oscillations qui finissent par se dégrader
- Ex : charge issue de l'application d'un frein dans la chaîne cinématique

- Impulsives

- Charges transitoires
- Varie dans le temps et de durée relativement courte
- Amplitude pouvant être importante
- Ex : charge subie par une pale lorsque le vent passe derrière la tour

Les types de charges

- Stochastiques

- Varie dans le temps de manière aléatoire
- Valeur moyenne de la charge relativement constante mais fluctuations importantes autour de cette moyenne
- Ex : charges résultantes de la turbulence du vent

- Induites par résonance

- Charges cycliques résultantes de la réponse dynamique d'une partie de l'éolienne à l'excitation à l'une de ses fréquences naturelles
- Elles doivent être évitées
- Peuvent se produire en raison d'une mauvaise conception ou d'un fonctionnement inhabituel

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Les types de charges
- ***Les sources de charges***
- Principes mécaniques de base
- Vibrations
- Cas des éoliennes en milieu nordique
- Conclusion

Les sources de charges

- Charges aérodynamiques
 - Les plus importantes sont celles résultant des conditions de vent extrêmes.
 - À l'arrêt et sous des vents forts, les forces de traînée sont importantes.
 - En fonctionnement, les forces de portances sont les plus préoccupantes.
- Charges dues à la gravité
 - Source importante de charges sur les pales des grandes turbines
 - Poids du sommet de la tour important pour la conception et le montage de l'éolienne.

Les sources de charges

- Charges dues aux interactions dynamiques
 - Les mouvements induits par les forces aérodynamiques et gravitationnelles induisent des charges dans d'autres parties de l'éolienne.
 - Les éoliennes à axe horizontal permettent un mouvement autour d'un axe de lacet.
 - Ce mouvement associé à la rotation du rotor induit des forces gyroscopiques.
- Charges dues au contrôle mécanique
 - Le contrôle mécanique peut parfois être source de charges importantes.
 - Ex : démarrage d'une turbine utilisant un générateur à induction
 - Ex : arrêt de la turbine à l'aide du frein

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Les types de charges
- Les sources de charges
- ***Principes mécaniques de base***
- Vibrations
- Cas des éoliennes en milieu nordique
- Conclusion

Question

- À quel niveau de la pale le moment de flexion est le plus important ?
 - A. En bout de pale
 - B. Aux $2/3$ de la pale
 - C. Au centre de la pale
 - D. À $1/3$ de la pale
 - E. Au niveau de l'encastrement

Principes mécaniques de base

- Calcul des forces d'inertie
 - Dans un système dynamique, les forces ne sont pas toutes réelles et certaines accélérations peuvent être traduites en forces d'inertie. C'est souvent le cas dans les systèmes tournants comme pour l'étude dynamique du rotor des éoliennes.
 - Ces forces sont calculées à partir du principe de d'Alembert.
 - Ex : effet de l'accélération centripète associée à la rotation du rotor s'explique par la force centrifuge d'inertie.

Principes mécaniques de base

- La flexion des poutres encastrées
 - Sujet important pour la résistance des matériaux
 - Ex : pales d'éoliennes encastrées dans le moyeu du rotor
 - Ex : Cas d'une poutre encastrée uniformément chargée :

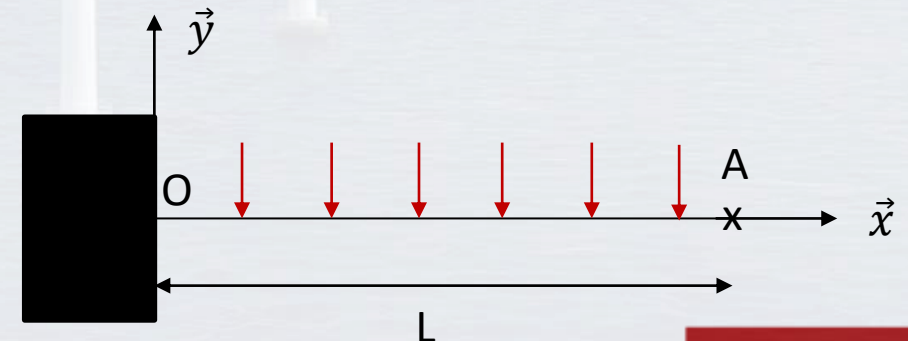
$$M(x)[kg.m^2.s^{-2}] = \frac{w}{2}[kg.s^{-2}] * (L - x)^2[m^2] \quad \sigma_{maxi}[kg.m^{-1}.s^{-2}] = \frac{M_{maxi}c}{I}$$

L : la longueur de la poutre en m

w : la charge (force/unité de longueur)

c : la corde en m

I : le moment quadratique en m^4



Principes mécaniques de base

- Aspects dynamiques de la rotation des corps rigides

- Moment angulaire :

$$H [kg.m^2.s^{-1}] = J[kg.m^2] * \Omega[rad.s^{-1}]$$

$$H [kg.m^2.s^{-1}] = R[m] * p[kg.m.s^{-1}]$$

- Pour l'application éolienne, le moment d'inertie peut être considéré comme constant :

$$\left| \sum M \right| [kg.m^2.s^{-2}] = J[kg.m^2] * \dot{\Omega}[rad.s^{-2}] = J\alpha$$

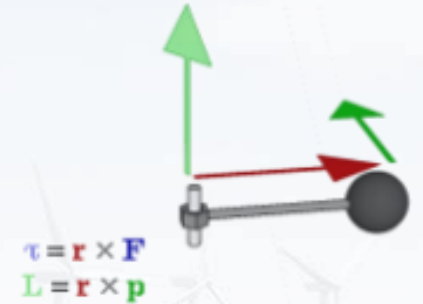
J : le moment d'inertie polaire massique en $kg.m^2$

Ω : la vitesse de rotation en rad/s

α : l'accélération angulaire du centre d'inertie en $rad.s^{-2}$

R : distance entre le point d'application et l'origine en m

p : quantité de mouvement (masse * vitesse) en $kg.m.s^{-1}$



Principes mécaniques de base

- Aspects dynamiques de la rotation des corps rigides

- La relation entre les couples appliqués et l'accélération angulaire :

$$\sum Q [kg.m^2.s^{-2}] = J[kg.m^2] * \alpha [rad.s^{-2}]$$

- Un corps en mouvement possède une énergie cinétique :

$$E = \frac{1}{2} J \Omega^2$$

- Puissance consommée ou générée par un corps en rotation :

$$P = Q \Omega$$

Principes mécaniques de base

- Boîte d'engrenages et rapport de transmission

- Dans un train d'engrenages idéal, la puissance d'entrée est égale à celle de sortie.

- Rapport de transmission à partir des vitesses de rotation :

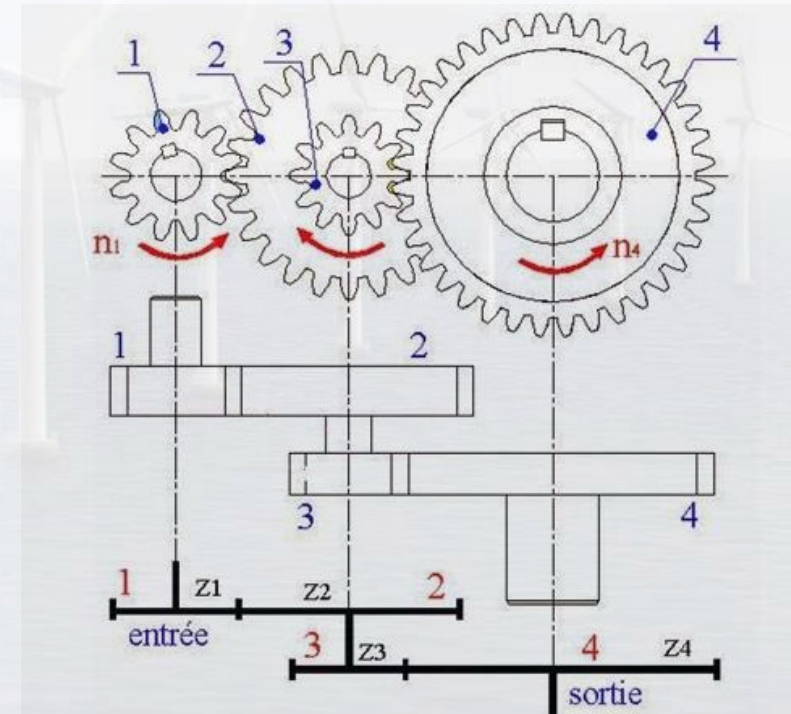
$$r_{4/1} = \frac{N_4}{N_1}$$

- Rapport de transmission à partir du nombre de dents Z (menants/menées) avec n le nombre de contacts extérieurs :

$$r_{4/1} = (-1)^n * \frac{\prod Z_{menantes}}{\prod Z_{menées}} = (-1)^2 \frac{Z_3 Z_1}{Z_4 Z_2}$$

- Rapport de transmission à partir des diamètres des roues :

$$r_{4/1} = \frac{D_3 D_1}{D_4 D_2}$$



Principes mécaniques de base

- Charge dues au mouvement gyroscopique

- Le théorème du gyroscope : si un corps rigide d'un moment angulaire $J\Omega$ est en rotation avec une vitesse ω autour d'un axe perpendiculaire à Ω , alors un moment $J\Omega\omega$ agit sur ce corps autour d'un axe perpendiculaire à ceux gyroscopique Ω et de précession ω .

- Moment agissant sur la roue :

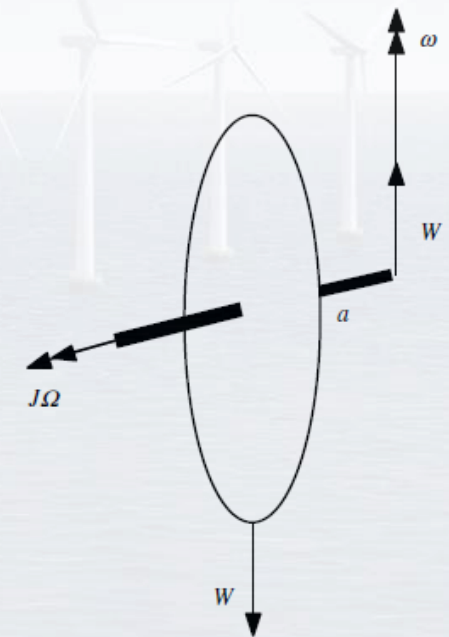
$$\sum M = W_a = J\Omega\omega$$

M : le moment en $kg.m^2.s^{-1}$

J : le moment d'inertie polaire massique en $kg.m^2$

ω : la vitesse de rotation en rad/s

Ω : le vecteur de vitesse angulaire en rad/s



Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Les types de charges
- Les sources de charges
- Principes mécaniques de base
- ***Vibrations***
- Cas des éoliennes en milieu nordique
- Conclusion

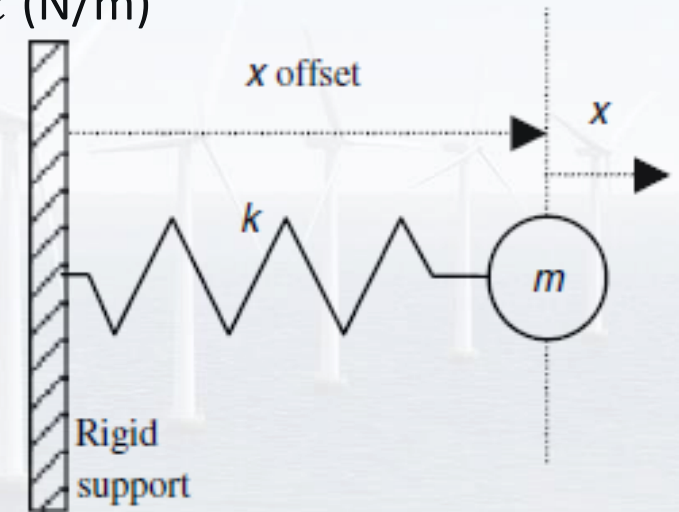
Vibrations

❖ Système à un degrés de liberté

- Vibrations non amorties

- L'exemple le plus simple : Masse m attachée à un ressort de raideur k (N/m)
- La position de la masse à l'instant t est régie par l'équation suivante :

$$x(t) = C \sin(\omega_n t + \Phi)$$



Avec :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad ; \quad C = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_n}\right)^2} \quad ; \quad \Phi = \tan^{-1}\left(\frac{x_0 \omega_n}{\dot{x}_0}\right)$$

\dot{x}_0 est la vitesse de la masse à l'instant initial en m/s

Vibrations

❖ Système à un degrés de liberté

• Vibrations amorties

- En réalité, les vibrations ne sont pas infinies. Pour le modéliser, un terme d'amortissement visqueux de constante c est pris en compte.
- On introduit un taux d'amortissement adimensionnel $\xi = \frac{c}{c_c}$; $c_c = 2\sqrt{km}$
- Le cas critique est obtenu pour $\xi = 1$. Pour $\xi > 1$, le mouvement est sur-amorti et pour $\xi < 1$, le mouvement est sous-amorti et la position de la masse à l'instant t est régie par l'équation suivante :

$$x(t) = C e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \Phi)$$

Avec :

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \text{ la fréquence naturelle d'amortissement}$$

Vibrations

❖ Système à un degrés de liberté

• Vibrations harmoniques forcées

- La masse, le ressort et l'amortissement sont conservé mais la masse est entraînée par une force sinusoïdale d'amplitude F_0 et de fréquence ω .
- La position de la masse à l'instant t est régie par l'équation suivante :

$$x(t) = \frac{F_0}{k} \frac{\sin(\omega t - \Phi)}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2}}$$

Avec :

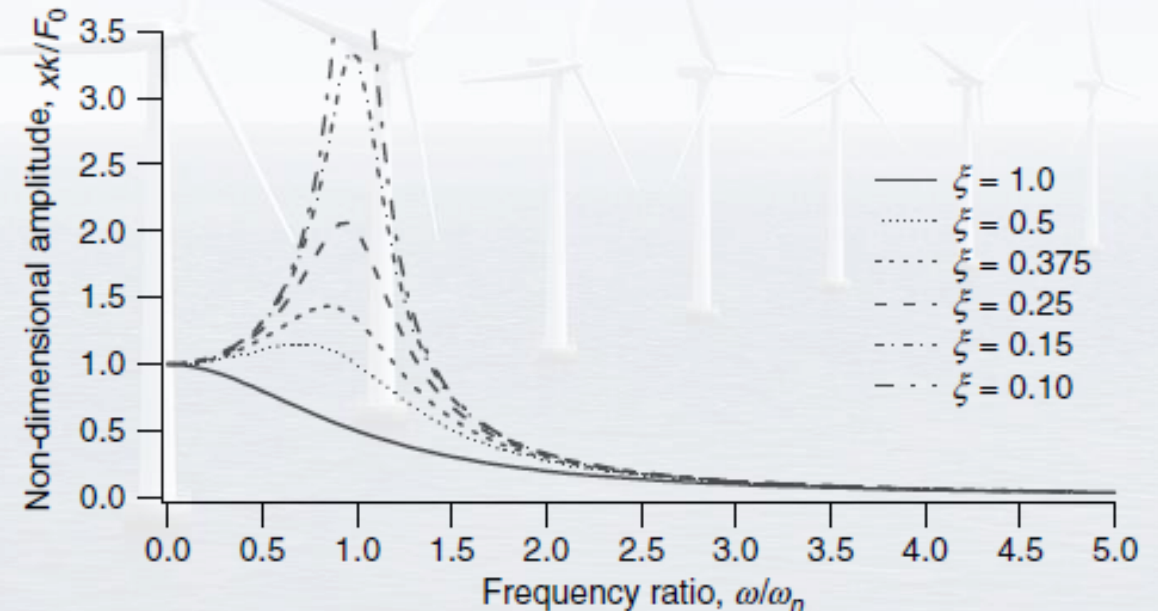
$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right)$$

Vibrations

- ❖ Système à un degré de liberté
- Vibrations harmoniques forcées

Il est pertinent de poser l'amplitude de réponse adimensionnelle suivante :

$$\frac{xk}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2}}$$



Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Les types de charges
- Les sources de charges
- Principes mécaniques de base
- Vibrations
- ***Cas des éoliennes en milieu nordique***
- Conclusion

Cas des éoliennes en milieu nordique

- L'étude des contraintes pour des éoliennes situées dans des climats nordiques est légèrement différente.
- Du point de vue mécanique, les faibles températures ainsi que la présence de givre doivent être pris en considération.
- Il existe bien sûr d'autres contraintes qui ne sont pas directement liées au calcul des contraintes dans une éolienne et qui seront donc présentées plus tard.

Cas des éoliennes en milieu nordique

❖ Contraintes dues aux basses températures

- Les propriétés mécaniques des matériaux se modifient à basses températures :
 - Acier, soudures : plus fragiles → résistance à la rupture réduite
 - Matériaux composites : subissent de contraintes → microfissures → rigidité et perméabilité diminuent → favorise la détérioration du matériel
 - Cuivre :
 - Résistance électrique diminue → pertes par effet joule diminue
 - Risque de dommage lié à la contraction-dilatation des connexions électriques.
 - Composantes en caoutchouc : perdent leur flexibilité à basses températures → sujet à la fissuration → dégradation des performances de la turbine

Cas des éoliennes en milieu nordique

❖ Contraintes dues à la densité de l'air

- Diminution de la température de l'air → diminution de la densité de l'air
 - La portance augmente → Augmentation du couple et de la vitesse de rotation.
 - Les charges sur l'éolienne augmentent → Endommagement des composantes mécaniques (boîte de vitesses) et électriques (surpuissance électrique produite).



Arrêt obligatoire des éoliennes sous la limite opérationnelle de température : (HQ : -28 C à -30 C pour l'opération)

Cas des éoliennes en milieu nordique

❖ Contraintes dues au givre

- Accumulation du givre non-symétrique sur les pales : vibrations excessives :
 - Augmentation des charges statiques et dynamiques → fatigue de la structure → réduction de la durée de vie de la machine
 - Possibilité d'effondrement de l'éolienne.
 - Arrêt de l'éolienne.



Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Les types de charges
- Les sources de charges
- Principes mécaniques de base
- Vibrations
- Cas des éoliennes en milieu nordique
- ***Conclusion***

Conclusion

- Lors du dimensionnement d'une éolienne, toutes ces charges sont à prendre en considération.
- En vue de connaître les contraintes s'appliquant dans les différentes parties d'une éolienne, des hypothèses simplificatrices doivent être faites pour les étudier plus facilement.
- La présentation suivante présente les principes dynamiques pour un rotor idéal.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION !



MERCI



Questions ?

Hussein IBRAHIM, Ph.D
Tél: 418-962-9848 # 340
cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca
Hussein_ibrahim01@uqar.ca
Hussein.ibrahim@itmi.ca