

7. Contrôle des turbines éoliennes



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

Plan de cette présentation

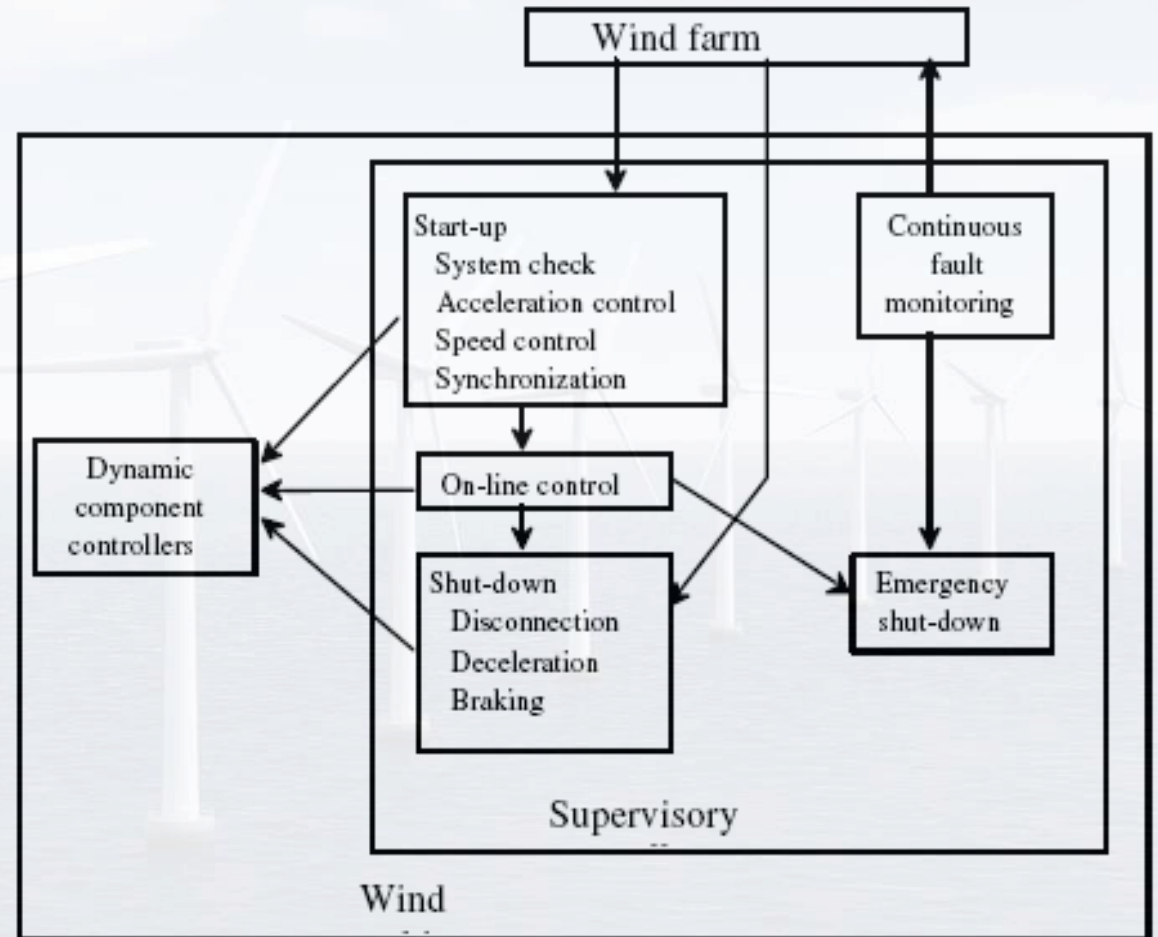
- Introduction et objectifs
- Modèle simplifié d'une turbine
- Composants des systèmes de contrôle
- Contrôle de turbine
- Contrôle des machines reliées au réseau
- Système superviseur
- Contrôle dynamique des sous-systèmes
- Conclusion

Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Modèle simplifié d'une turbine
- Composants des systèmes de contrôle
- Contrôle de turbine
- Contrôle des machines reliées au réseau
- Système superviseur
- Contrôle dynamique des sous-systèmes
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Les systèmes de contrôle sont répartis en plusieurs échelles distinctes et gèrent le parc dans sa totalité, une machine ou un sous-système d'une machine.
- Les systèmes à grande échelle sont des systèmes intégrateurs gérant la totalité d'un parc de plusieurs machines (SCADA). C'est une gestion à basse fréquence du parc de machines.



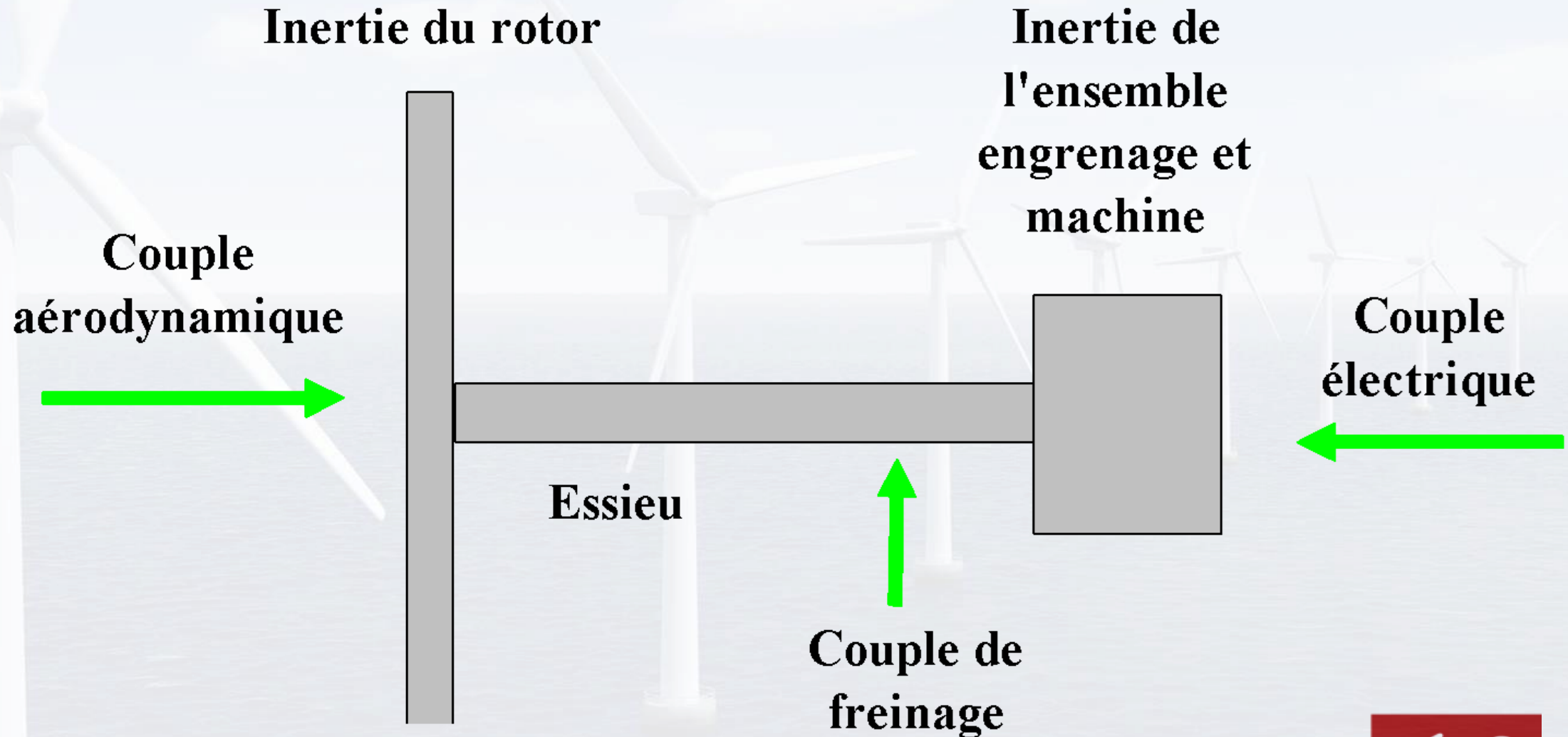
Introduction et objectifs

- Les systèmes à moyenne échelle sont des systèmes superviseurs gérant une seule machine. Ces contrôles peuvent concerner le démarrage (vérification, vitesse, accélération, synchronisme), les opérations en ligne, les arrêts (déconnexion, décélération, freinage), les arrêts d'urgence ainsi que la surveillance en continu.
- Les systèmes à petite échelle sont des contrôleurs dynamiques gérant un sous-système. Ces systèmes peuvent être de l'électronique de puissance, gérer l'asservissement en position ou la commande d'un pas variable.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Modèle simplifié d'une turbine***
- Composants des systèmes de contrôle
- Contrôle de turbine
- Contrôle des machines reliées au réseau
- Système superviseur
- Contrôle dynamique des sous-systèmes
- Conclusion

Modèle simplifié d'une turbine



Plan de cette présentation

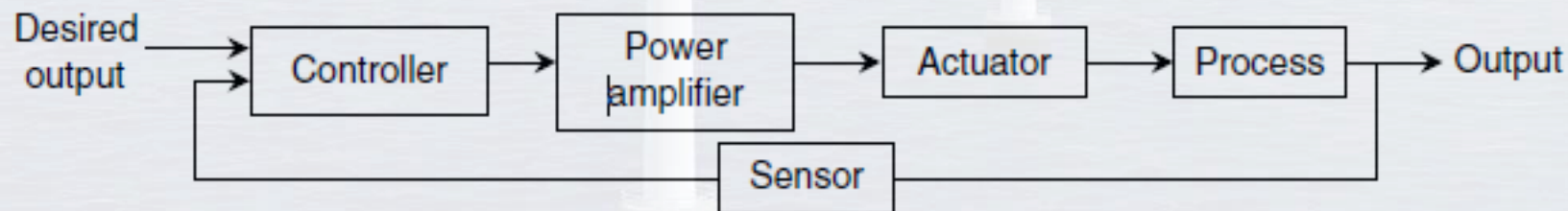
- Introduction et objectifs
- Modèle simplifié d'une turbine
- ***Composants des systèmes de contrôle***
- Contrôle de turbine
- Contrôle des machines reliées au réseau
- Système superviseur
- Contrôle dynamique des sous-systèmes
- Conclusion

Question

- Lesquels de ces composants sont situés dans la boucle de retour d'un système de contrôle ?
 - A. Les contrôleurs
 - B. Les capteurs
 - C. Les actionneurs
 - D. Les amplificateurs de puissance
 - E. Tous ces composants

Composants des systèmes de contrôle

- Le contrôle mécanique et électrique requiert cinq composants fonctionnels principaux :
 1. Le processus de contrôle de la turbine
 2. Les capteurs
 3. Les contrôleurs
 4. Les interfaces aux actionneurs de puissance
 5. Les actionneurs des sous-systèmes



Composants des systèmes de contrôle

1. Le processus de contrôle de la turbine

Il inclut les points suivants :

- Évolution du couple aérodynamique et générateur.
- Conversion du courant électrique et du flux de fluide en mouvement (mécanismes de lacet et de tangage généralement contrôlés par des vannes alimentées par du courant électrique ou du fluide hydraulique).
- Conversion de l'énergie électrique d'une forme à une autre : utilisation de l'électronique de puissance.
- La conversion globale de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique nécessite le séquençage d'un certain nombre de sous-processus soumis aux actions du système de contrôle (connexion du générateur au réseau, ouvrir les vannes, allumer les pompes ou compresseurs...).

Composants des systèmes de contrôle

2. Les capteurs

Sur les grandes éoliennes modernes, différents types de capteurs sont utilisés pour communiquer les données importantes de fonctionnement :

- Vitesses (rotor, générateur, vent, rotation angulaire de la nacelle)
- Températures (huile de la boîte d'engrenage, huile des systèmes hydrauliques, roulements à billes, générateur, air ambiant, circuits électroniques)
- Direction (sens de rotation de la nacelle, direction du vent)

Composants des systèmes de contrôle

2. Les capteurs

- Position (pas variable, inclinaison des pales, ailerons, angle de rotation de la nacelle)
- Données électriques (courants, tensions, puissances, facteur de puissance, fréquence électrique)
- Paramètres des fluides (pressions hydrauliques et pneumatiques, niveaux d'huile, vitesses d'écoulement d'huile)
- Vibrations (au sommet de la tour, boîte d'engrenage)
- Conditions environnantes (température, givrage sur la turbine ou sur les capteurs, humidité, foudre)

Composants des systèmes de contrôle

3. Les contrôleurs

Ils assurent la connexion entre la mesure d'un aspect de fonctionnement de la turbine et les actions susceptibles d'affecter le fonctionnement de cette turbine :

- Mécanismes : liens, ressorts, masselottes, roue d'inertie
- Circuits électriques : Relais, interrupteurs de fin de course
- Ordinateurs ou microcontrôleurs :
 - Ordinateurs de bureau ou portable
 - Automates programmables
 - Microcontrôleurs

Composants des systèmes de contrôle

4. Les interfaces aux actionneurs de puissance

Des amplificateurs de puissance entre le contrôleur et l'actionneur sont nécessaires lorsque le signal de commande du contrôleur n'est pas assez puissant :

- Interrupteurs mécaniques et à semi-conducteur (Transistors BJT, MOS, IGBT, Thyristors SCRs)
- Amplificateurs électriques pour actionneurs
- Pompes hydrauliques

Composants des systèmes de contrôle

5. Les actionneurs des sous-systèmes

- Dispositifs électromécaniques : moteurs CC, moteurs pas-à-pas, moteurs CA
- Cylindres hydrauliques
- Éléments chauffants et ventilateurs

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Modèle simplifié d'une turbine
- Composants des systèmes de contrôle
- ***Contrôle de turbine***
- Contrôle des machines reliées au réseau
- Système superviseur
- Contrôle dynamique des sous-systèmes
- Conclusion

Question

- Quelles données peuvent être contrôlées par des systèmes de contrôle ?
 - A. Le couple aérodynamique
 - B. La vitesse du vent en entrée
 - C. Le couple de freinage
 - D. La tension d'alimentation des lignes électriques
 - E. L'angle de lacet

Contrôle de turbine

- Couple aérodynamique
 - La variation de la vitesse spécifique peut être utilisée pour réguler le couple du rotor.
 - L'inclinaison de la pale permet de réguler le couple aérodynamique.
- Couple au niveau du générateur
 - Réguler par les caractéristiques de conception du générateur connecté au réseau.
 - Peut être contrôlé indépendamment à l'aide de convertisseurs électroniques de puissance.

Contrôle de turbine

- Couple de freinage
 - Nécessite l'activation d'électrovannes ou de vannes contrôlables pour contrôler le couple de freinage.
 - Freinage du rotor avec le couple générateur pour des machines commandées par des convertisseurs de puissance.
 - Freins dynamiques (composants électriques auxiliaires) fournissent un couple de freinage électrique au générateur.
- Contrôle de l'orientation de l'angle de lacet
 - Permet de contrôler la puissance de l'éolienne en modifiant la direction du vent entrant dans le rotor.
 - Orientation de l'angle de lacet pour placer le rotor hors du vent.
 - Rotation de la nacelle vers le haut pour limiter la puissance de sortie.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Modèle simplifié d'une turbine
- Composants des systèmes de contrôle
- Contrôle de turbine
- ***Contrôle des machines reliées au réseau***
- Système superviseur
- Contrôle dynamique des sous-systèmes
- Conclusion

Contrôle des machines reliées au réseau

- Il existe plusieurs technologies de contrôle selon les machines utilisées :

Machines à vitesse fixe ou quasi-fixe	Machine à vitesse variable
Pas fixe, décrochage aérodynamique	Pas fixe, décrochage aérodynamique
Pas fixe (2 vitesses), décrochage aérodynamique	Pas variable actif
Pas variable actif	Variation légère de vitesse (rotor bobiné)
	Pas variable passif

Contrôle des machines reliées au réseau

- ❖ Machine à vitesse fixe, pas fixe, décrochage aérodynamique
 - Pas fixe optimisé pour un vent faible.
 - Pour des vents moyens et forts, l'efficacité du rotor diminue progressivement.
 - À un vent maximum choisi, dépendant des pales et du pas fixe, le décrochage se produit.
 - Le contrôle se limite au simple démarrage et à l'arrêt de ces turbines selon la vitesse du vent.
 - Une fois accroché au réseau, la production électrique se fait elle-même, la machine asynchrone étant légèrement au-dessus de la vitesse synchrone.
 - Les fluctuations du vent vont affecter le réseau.

Contrôle des machines reliées au réseau

- ❖ Machine à 2 vitesses fixes, pas fixe, décrochage aérodynamique
 - Utilisation d'une machine à 2 bobinages au stator ou 2 machines pour 2 vitesses fixes.
 - Pour des vents faibles, la vitesse basse est optimisée pour le rendement et le faible bruit (exemple: 6 pôles).
 - Pour des vents plus forts, la vitesse élevée est choisie (exemple: 4 pôles).
 - Le contrôle consiste au démarrage et à l'arrêt et au passage d'une vitesse à l'autre.
 - Les fluctuations du vent affectent le réseau.

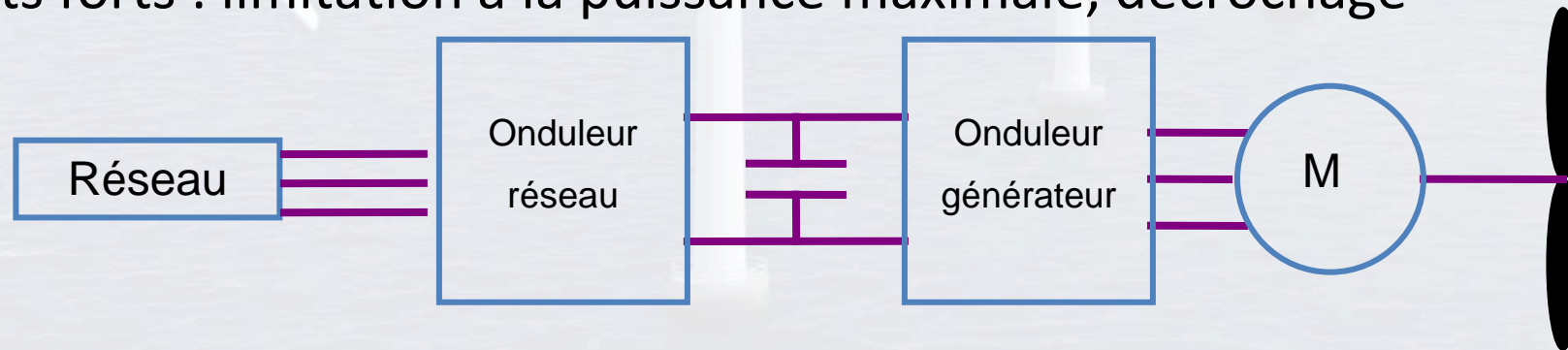
Contrôle des machines reliées au réseau

❖ Machine à vitesse fixe, pas variable actif

- Le contrôle actif du pas variable :
 - Permet une meilleure efficacité en puissance de la machine.
 - Permet un lissage de la puissance transmise au réseau.
- La dynamique du système de pas variable :
 - Doit être rapide afin de compenser les fluctuations du vent.
 - Est limitée par la force des actionneurs du pas variable et par l'inertie des pales.
- Par vents faibles, le pas est souvent laissé constant afin d'éviter le vieillissement du mécanisme.

Contrôle des machines reliées au réseau

- ❖ Machine à vitesse variable, pas fixe, décrochage aérodynamique
 - Machines plutôt de petite et moyenne puissances.
 - Contrôle de la fréquence et du couple du côté générateur.
 - 3 modes de fonctionnement :
 - Vents faibles : optimisation de la puissance
 - Vents moyens : vitesse fixe nominale
 - Vents forts : limitation à la puissance maximale, décrochage



Contrôle des machines reliées au réseau

❖ Machine à vitesse variable, pas variable actif

- Deux variables de contrôle : la fréquence du générateur et le pas variable.
- Permet une pleine optimisation et un plein lissage de la puissance électrique.
- À plein régime, l'énergie d'une bourrasque de vent sera emmagasinée en énergie cinétique dans le rotor et transmise par la suite au réseau.
- Le mécanisme de pas variable n'a pas à avoir une dynamique très élevée.

Contrôle des machines reliées au réseau

❖ Machine à vitesse légèrement variable

- Utilisation d'une machine à rotor bobiné afin de faire varier légèrement la vitesse du rotor.
- En changeant la résistance au rotor :
 - Légère variation de vitesse
 - Lissage des pointes de puissances
 - Augmentation des pertes électriques
- Un mécanisme de pas variable peut aussi être ajouté.

Contrôle des machines reliées au réseau

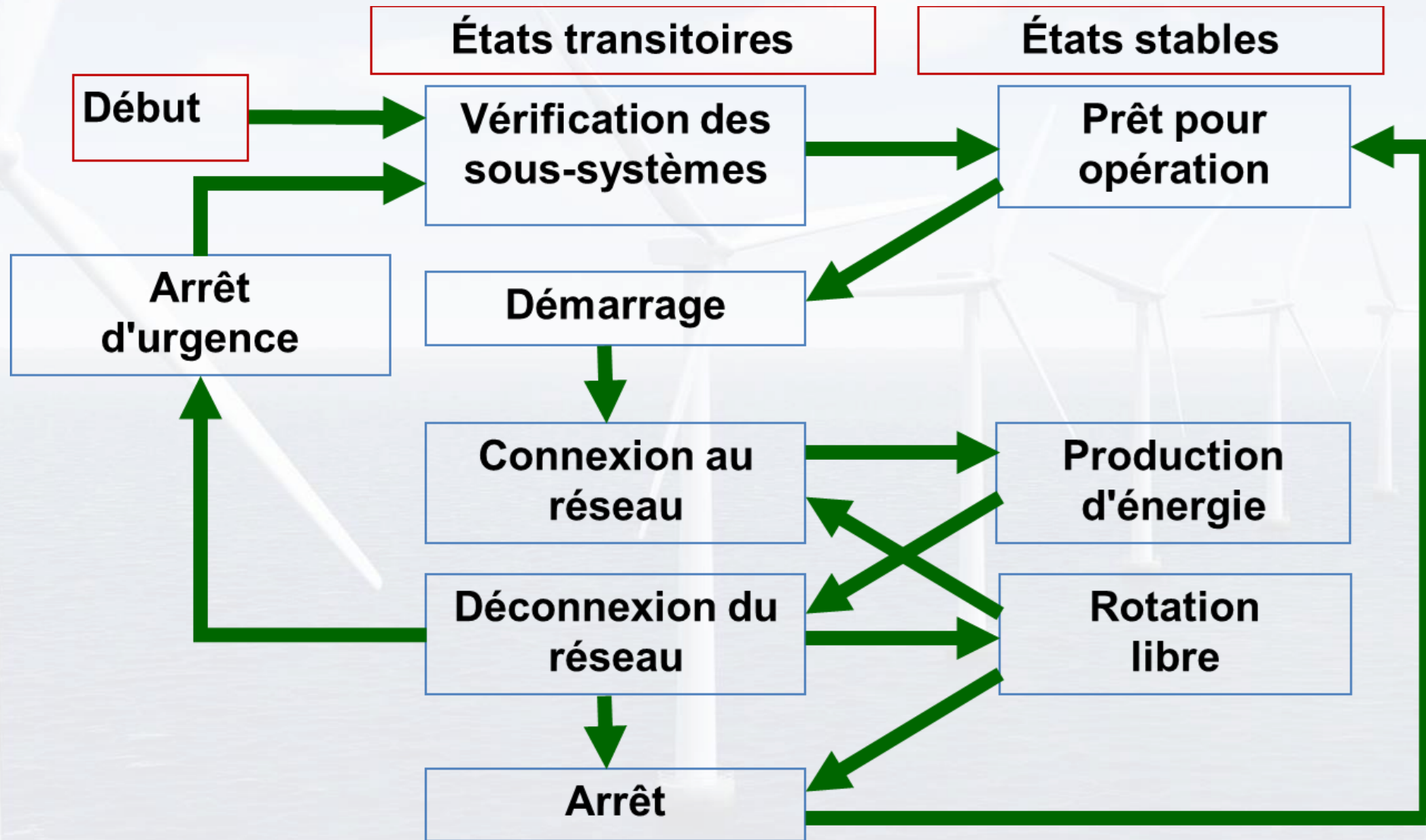
❖ Machine à vitesse variable, pas variable passif

- Un mécanisme de pas variable passif actionné par la vitesse du rotor et la vitesse du vent permet une régulation de la vitesse et une limitation de la puissance.
- La relation de variation du pas est ajustée mécaniquement afin de suivre la courbe de puissance de la turbine.

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Modèle simplifié d'une turbine
- Composants des systèmes de contrôle
- Contrôle de turbine
- Contrôle des machines reliées au réseau
- ***Systeme superviseur***
- Contrôle dynamique des sous-systèmes
- Conclusion

Systeme superviseur



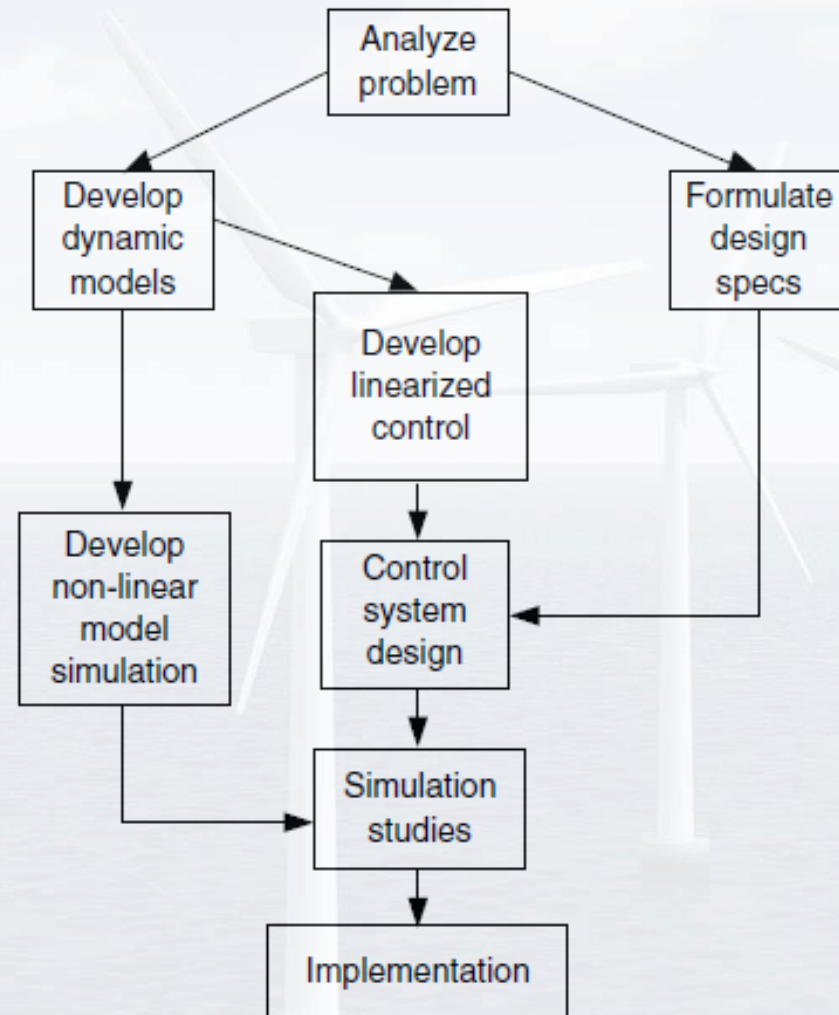
Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Modèle simplifié d'une turbine
- Composants des systèmes de contrôle
- Contrôle de turbine
- Contrôle des machines reliées au réseau
- Système superviseur
- ***Contrôle dynamique des sous-systèmes***
- Conclusion

Contrôle dynamique des sous-systèmes

- Démarche classique de contrôle des systèmes linéaires :
 - Analyse du problème
 - Énoncé des spécifications
 - Développement d'un modèle
 - Linéarisation du modèle
 - Conception de la boucle de contrôle
 - Développement et évaluation par simulation
 - Implantation

Contrôle dynamique des sous-systèmes



Contrôle dynamique des sous-systèmes

- Identification du système
- Boucles de contrôle ouvertes et fermées
- Modélisation par fonction de transfert (équations différentielles linéaires à coefficients constants)
- Implantation sur :
 - Systèmes mécaniques
 - Électronique analogique
 - Microprocesseurs

Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Modèle simplifié d'une turbine
- Composants des systèmes de contrôle
- Contrôle de turbine
- Contrôle des machines reliées au réseau
- Système superviseur
- Contrôle dynamique des sous-systèmes
- ***Conclusion***

Conclusion

- Cette présentation a fait le survol des grands principes de contrôle des systèmes éoliens :
 - Points de contrôle, capteurs, unités, interfaces et actionneurs utilisés.
 - Stratégies les plus utilisées pour les grandes machines et les plus petites.
 - Rôle du système superviseur et contrôle dynamique.

Conclusion

- Les systèmes de contrôle sont très importants pour la production d'électricité à partir des éoliennes. Par exemple, une mauvaise orientation de l'axe de l'éolienne peut avoir des conséquences économiques importantes :

<https://www.youtube.com/watch?v=zTglPoqE0bw&t=371s>

- Chaque cas est différent, il faut adapter le contrôle selon le type de système en présence.

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