

Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un réseau de moyenne tension

Salma EL AIMANI



RESE
Réseaux électriques
et systèmes énergétiques

LABORELEC
From innovation to operational assistance

CNRT Futurelec Lille

MINISTÈRE DE LA RECHERCHE
LIBÉRIE • ÉGALITÉ • PROGRES
RÉGION NORD PAS DE CALAIS

HEY
LILLE

CENTRALE LILLE

Plan de la présentation

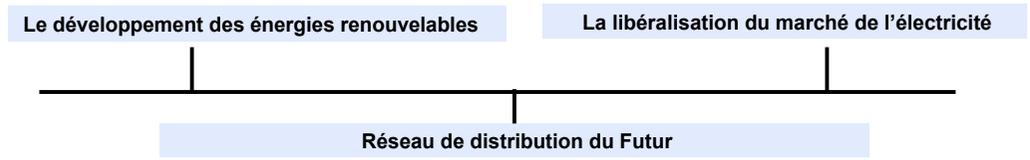
- Contexte et objectifs de la thèse
- Partie I : Formalismes et classes de modèles d'éoliennes
 - Outils utilisés et classes de modèles
 - Commande de la turbine éolienne avec intégration du modèle mécanique
- Partie II : Modélisation de l'éolienne étudiée et exploitation des résultats expérimentaux
 - Éolienne à base de MADA
 - Confrontation des résultats de simulation à des résultats de mesure de l'éolienne
- Partie III : Intégration de l'éolienne dans un réseau moyenne tension
 - Influence de l'éolienne sur le réseau
 - Influence du réseau sur l'éolienne
- Conclusion et perspectives

- Contexte et objectifs de la thèse
- Partie I : Formalismes et classes de modèles d'éoliennes
 - Outils utilisés et classes de modèles
 - Commande de la turbine éolienne avec intégration du modèle mécanique
- Partie II : Modélisation de l'éolienne étudiée et exploitation des résultats expérimentaux
 - Éolienne à base de MADA
 - Confrontation des résultats de simulation à des résultats de mesure de l'éolienne
- Partie III : Intégration de l'éolienne dans un réseau moyenne tension
 - Influence de l'éolienne sur le réseau
 - Influence du réseau sur l'éolienne
- Conclusion et perspectives

Contexte et objectifs de la thèse

Ce sujet rentre dans la thématique globale du programme **FUTURELEC1** au sein du Centre National de recherche technologique (C.N.R.T.)

CONTEXTE



(Impact de ces générateurs sur les réseaux qui ne sont pas adaptés à les accueillir)

Opération **STATICOM - DYNACOM**

PROBLEMATIQUE

Spécificités liées à l'intégration des éoliennes

- Étude du comportement en puissance en fonctionnement normal
- Étude du comportement de l'éolienne en présence de défauts sur le réseau
- Estimation des harmoniques générés par la MLI et des pertes dans les semi-conducteurs

Modélisation fine des générateurs (EOLIENS)

Temps de calcul non prohibitif : Modèles intégrés dans des systèmes plus complexes

- Contexte et objectifs de la thèse
- **Partie I : Formalismes et classes de modèles d'éoliennes**
 - Outils utilisés et classes de modèles
 - Commande de la turbine éolienne avec intégration du modèle mécanique
- **Partie II : Modélisation de l'éolienne étudiée et exploitation des résultats expérimentaux**
 - Éolienne à base de MADA
 - Confrontation des résultats de simulation à des résultats de mesure de l'éolienne
- **Partie III : Intégration de l'éolienne dans un réseau moyenne tension**
 - Influence de l'éolienne sur le réseau
 - Influence du réseau sur l'éolienne
- Conclusion et perspectives

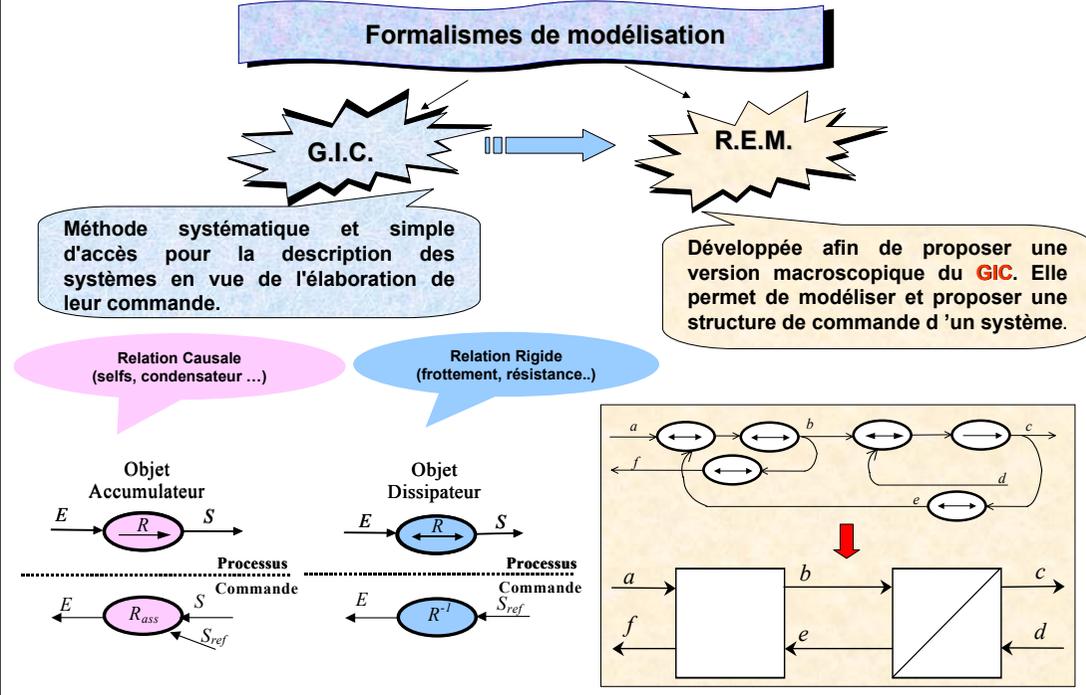


FIGURE 1 : FORMALISMES ET CLASSES DE MODÈLES D'ÉOLIENNES

Classes de modèles

- **Modélisation électromécanique 0 - 10 Hz**
 - **Modélisation électromagnétique 10 Hz - 10 kHz**
 - **Modèle continu équivalent 10 Hz - 1 kHz**
 - **Modèle harmonique global 1 kHz - 10 kHz**
 - **Modèle fin avec interrupteurs idéaux 1 kHz - 10 kHz**
 - **Modèle fin avec interrupteurs réels 1 kHz - 1 MHz**
- Modèles développés pour atteindre les objectifs souhaités

A chaque problème, son modèle !

- Contexte et objectifs de la thèse
- **Partie I : Formalismes et classes de modèles d'éoliennes**
 - Outils utilisés et classes de modèles
 - Commande de la turbine éolienne avec intégration du modèle mécanique
- **Partie II : Modélisation de l'éolienne étudiée et exploitation des résultats expérimentaux**
 - Éolienne à base de MADA
 - Confrontation des résultats de simulation à des résultats de mesure de l'éolienne
- **Partie III : Intégration de l'éolienne dans un réseau moyenne tension**
 - Influence de l'éolienne sur le réseau
 - Influence du réseau sur l'éolienne
- Conclusion et perspectives

FIGURE 11 : MODÉLISATION ET COMMANDE DES ÉOLIENNES

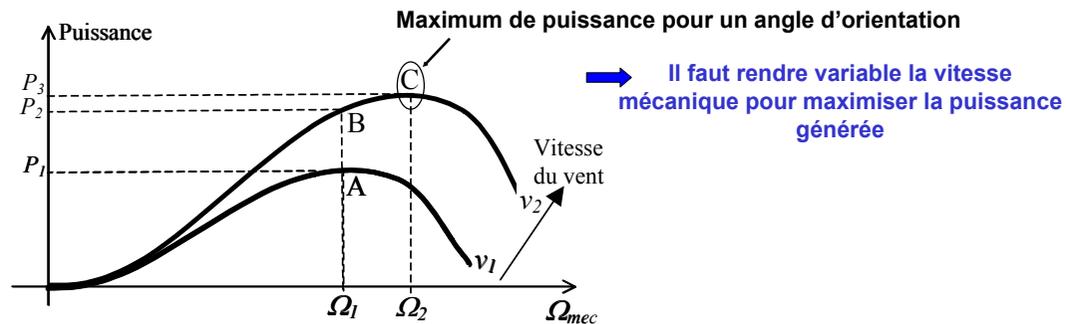
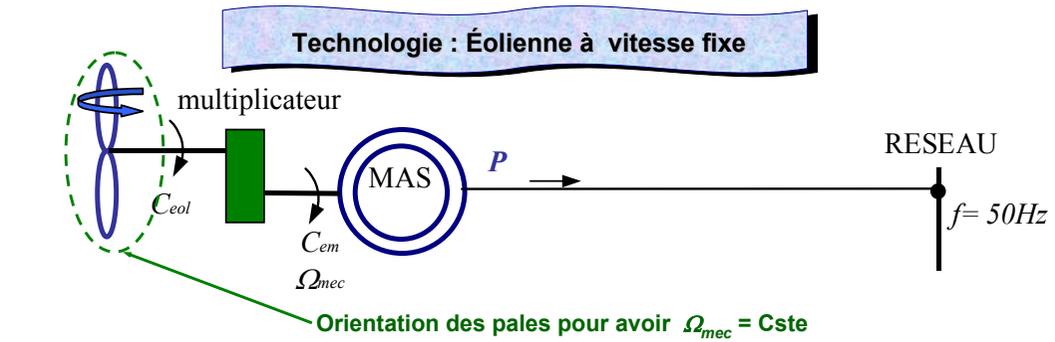


FIGURE 11 : MODÉLISATION ET COMMANDE DES ÉOLIENNES

Exemple d'une caractéristique mesurée

- Pour une éolienne de 1.5 MW à base de MADA
- Zone 1 : Démarrage**
 - Zone 2 : Extraction du maximum de puissance générée**
 - Zone 3 : Fonctionnement à vitesse constante**
 - Zone 4 : Fonctionnement à puissance constante**

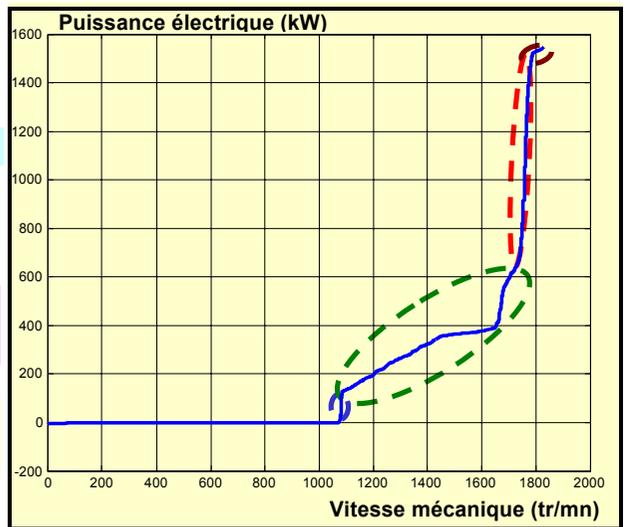


FIGURE 11 : MODÉLISATION ET COMMANDE DES ÉOLIENNES

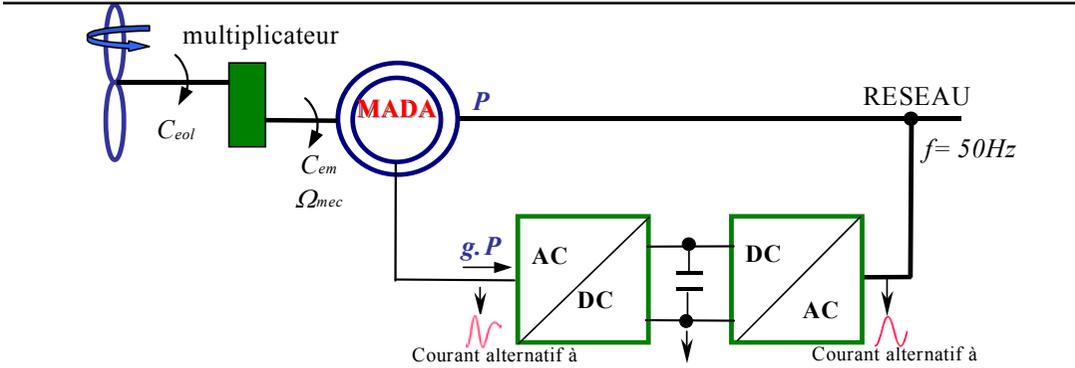
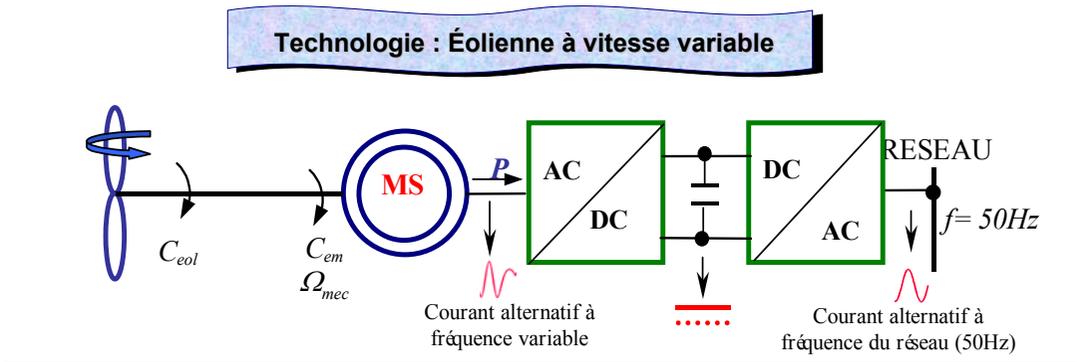
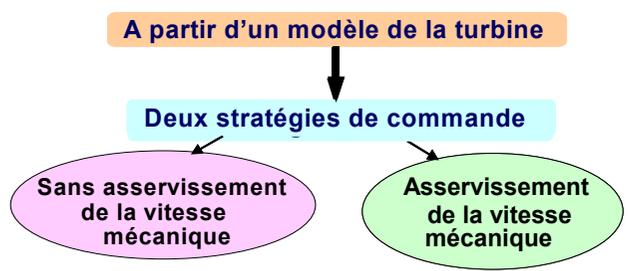


FIGURE 11 : MODÉLISATION ET COMMANDE DES ÉOLIENNES

ZONE 2

Objectif : M.P.P.T. Maximum Power Point Traking (Extraction maximale de la puissance produite par réglage de la vitesse)

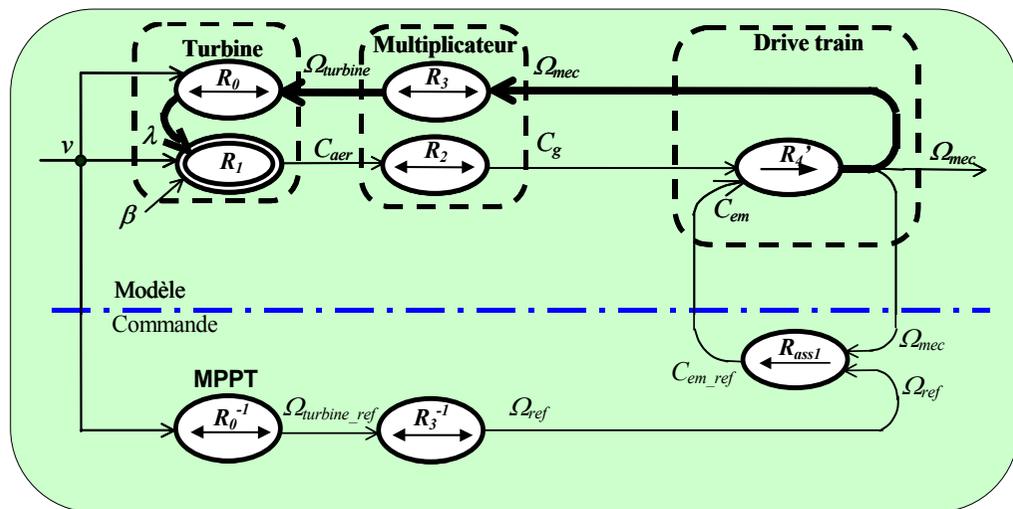


Sensibilité des lois de réglage de la turbine sur la puissance générée (CESA'03)

FIGURE 11. MODÉLISATION ET COMMANDE DES COLONNES

ZONE 2

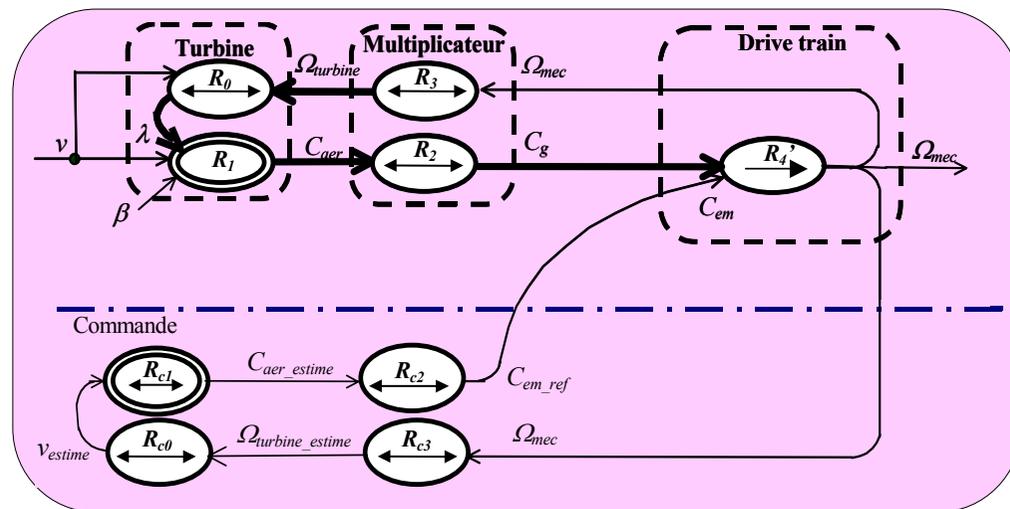
G.I.C. du modèle de la turbine et de sa commande en boucle fermée de la vitesse



Couple électromagnétique $C_{em_ref} = C_{\Omega} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec})$

ZONE 2

G.I.C. du modèle de la turbine et de sa commande sans asservissement de vitesse



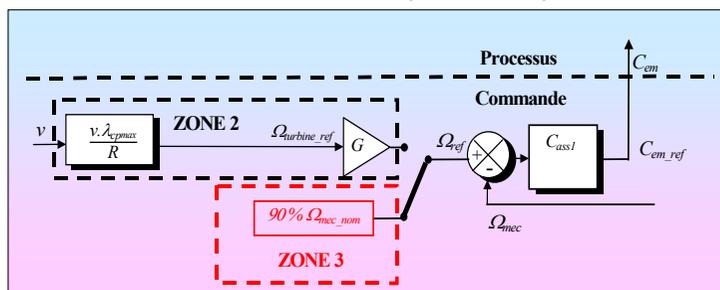
Couple électromagnétique $C_{em_ref} = A \cdot \Omega_{mec}^2$ Avec $A = \frac{C_p}{\lambda_{cpmax}^2} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{1}{G^3}$

FIGURE 11. MODÉLISATION ET COMMANDE DES COLONNES

ZONE 3

Objectif : fonctionner à vitesse constante à partir d'une vitesse d'environ 90% Ω_{mec_nom} (=1750 tr/mn)

Avec un contrôle en boucle fermée de la vitesse



Sans asservissement de la vitesse mécanique

$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{v}$

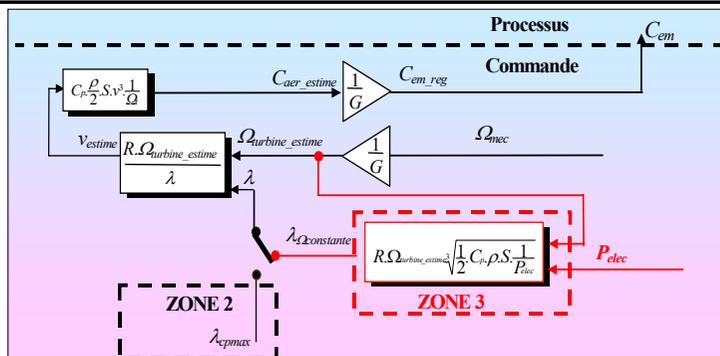
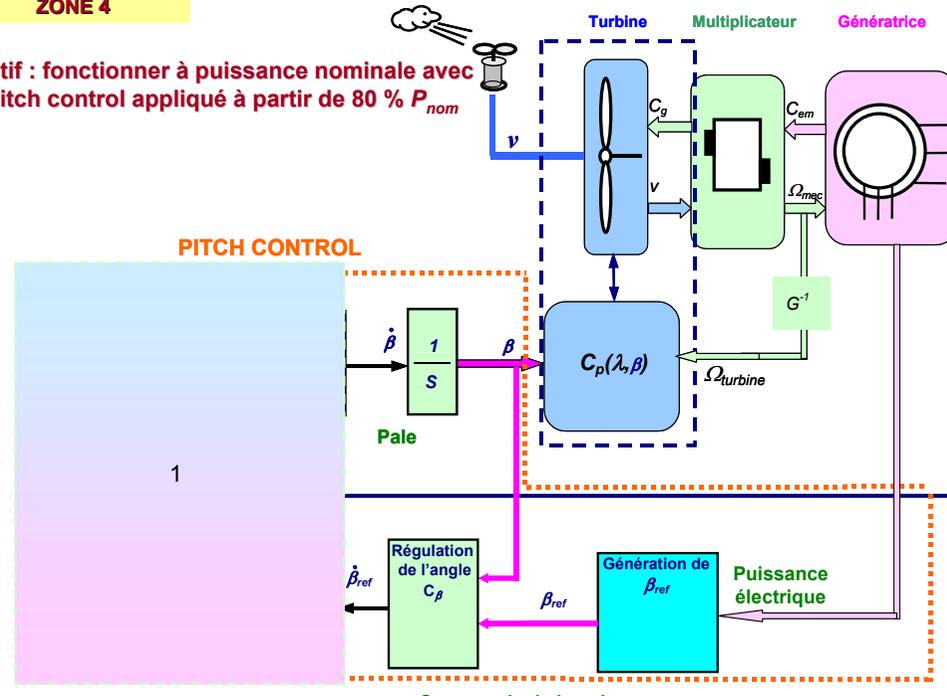


FIGURE 11. MODÉLISATION ET COMMANDE DES COLONNES

ZONE 4

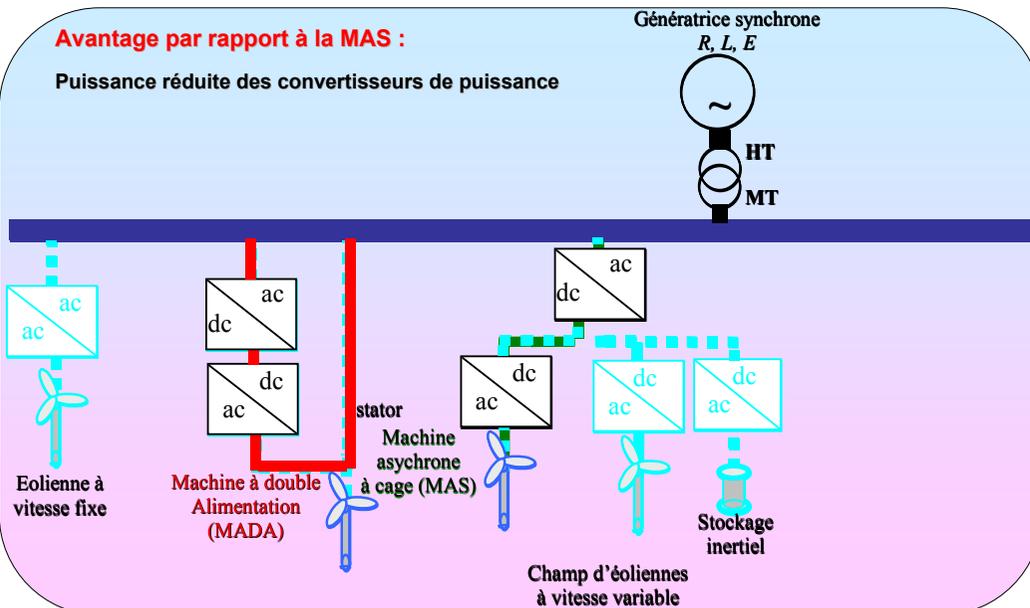
Objectif : fonctionner à puissance nominale avec un pitch control appliqué à partir de 80% P_{nom}



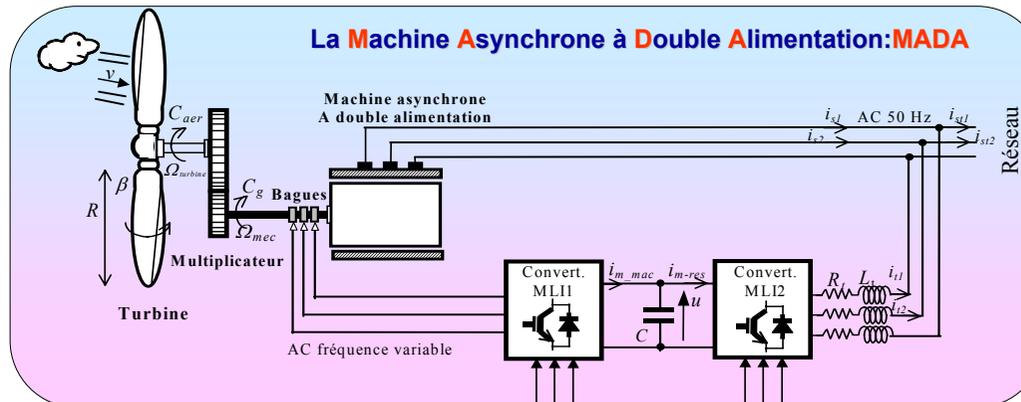
Technologie étudiée

Avantage par rapport à la MAS :

Puissance réduite des convertisseurs de puissance



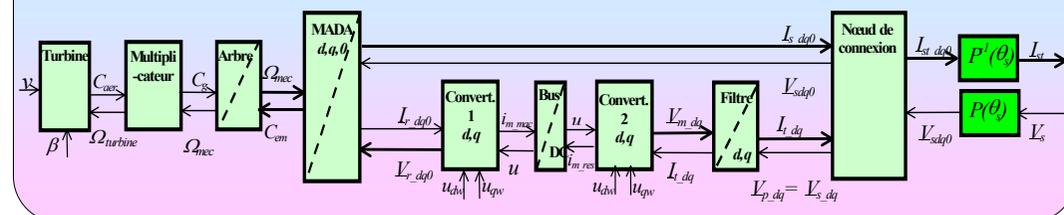
La Machine Asynchrone à Double Alimentation: MADA



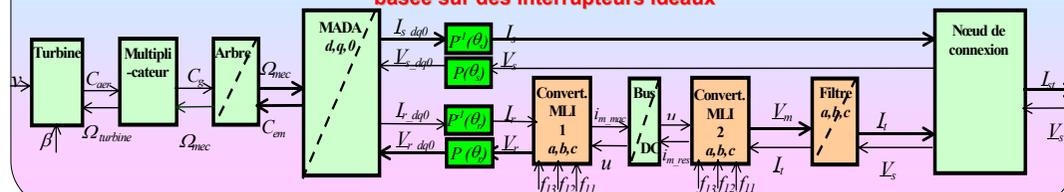
Objectifs de l'étude

- Étude dans le repère de Park avec ou sans défauts réseau : Modèle continu équivalent
- Prise en compte des harmoniques : Modèle à interrupteurs idéaux des convertisseurs
- Confrontation à des résultats expérimentaux obtenus pour éolienne du même type
- Intégration du modèle dans un réseau de moyenne tension

R.E.M du modèle continu équivalent de l'éolienne à base de MADA



R.E.M du Modèle de de l'éolienne à base de MADA basée sur des interrupteurs idéaux



R.E.M du modèle continu équivalent et de la commandes de l'éolienne à base de MADA

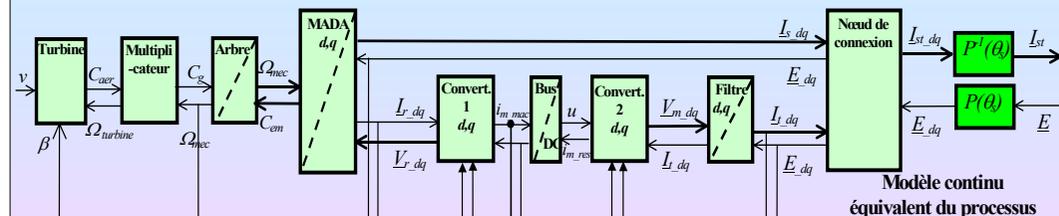


Figure 11 : Modélisation et commande des éoliennes

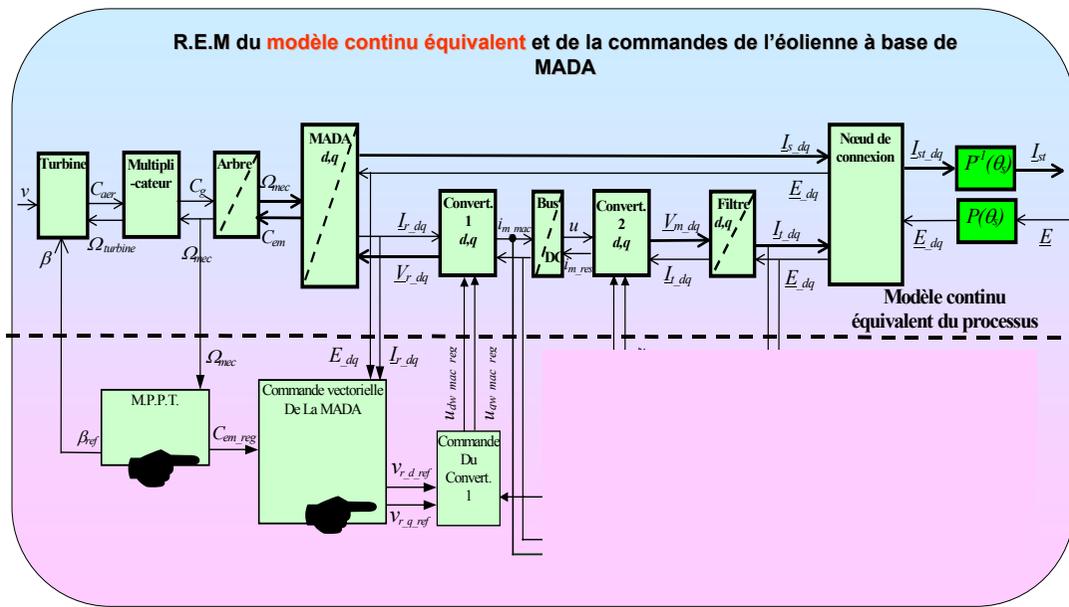


Figure 12 : Modélisation et commande des éoliennes

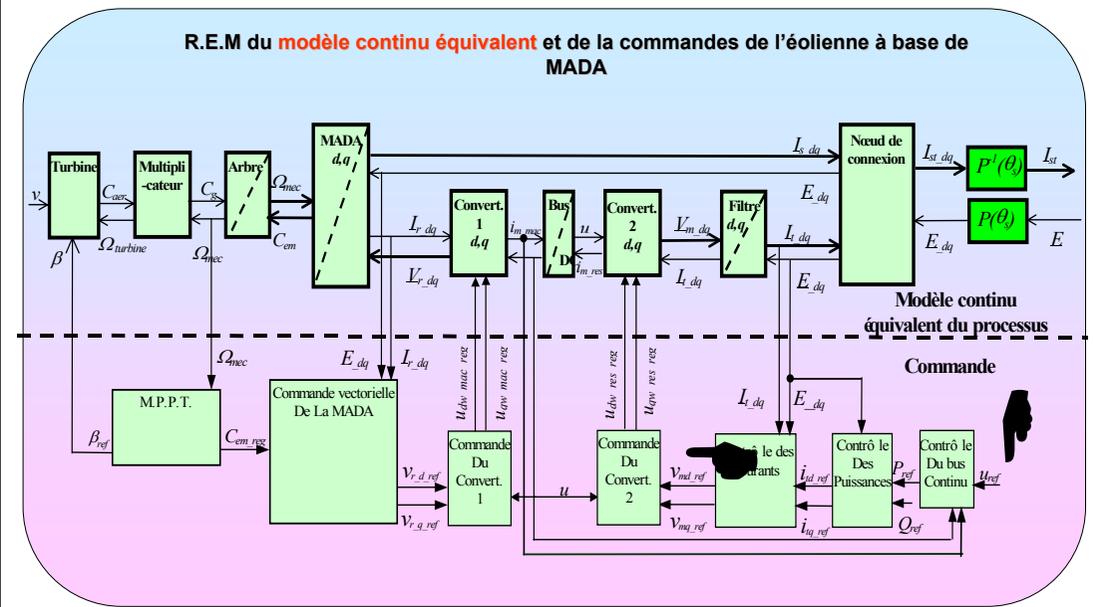


Figure 13 : Modélisation et commande des éoliennes

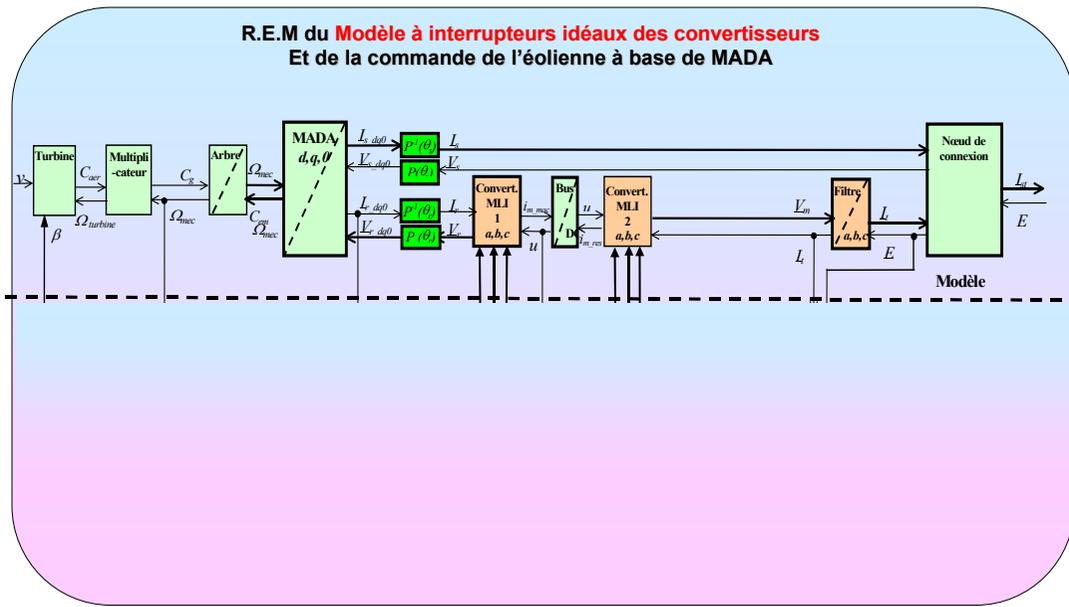
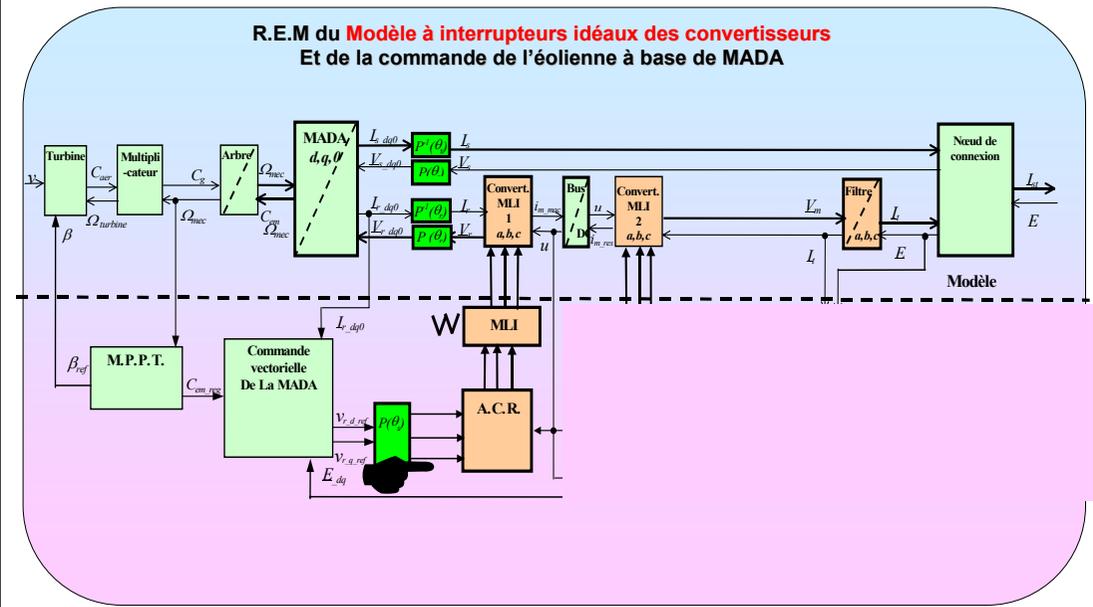
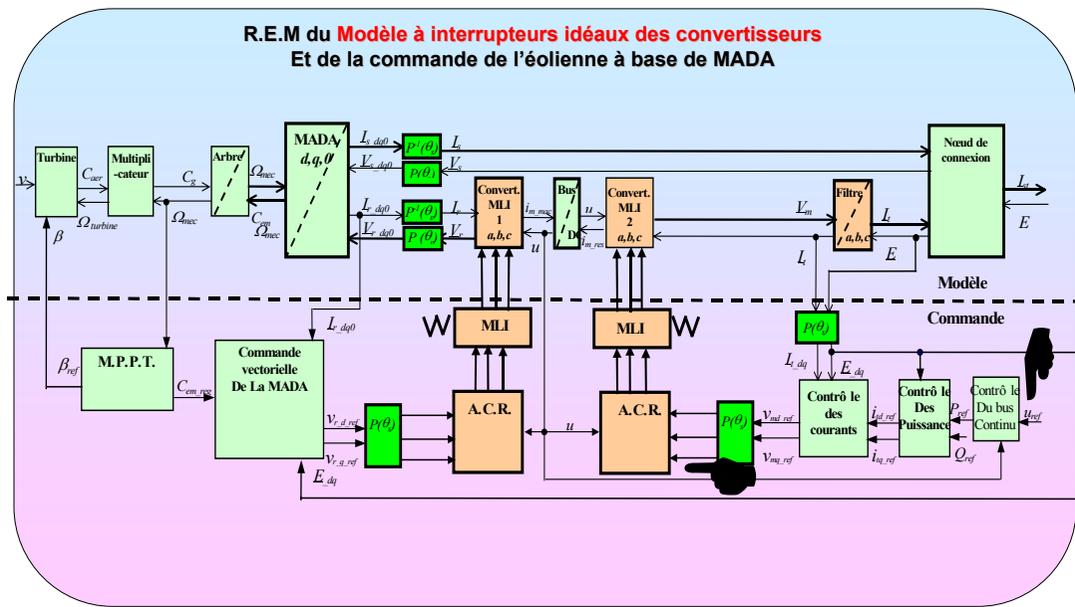


Figure 14 : Modélisation et commande des éoliennes





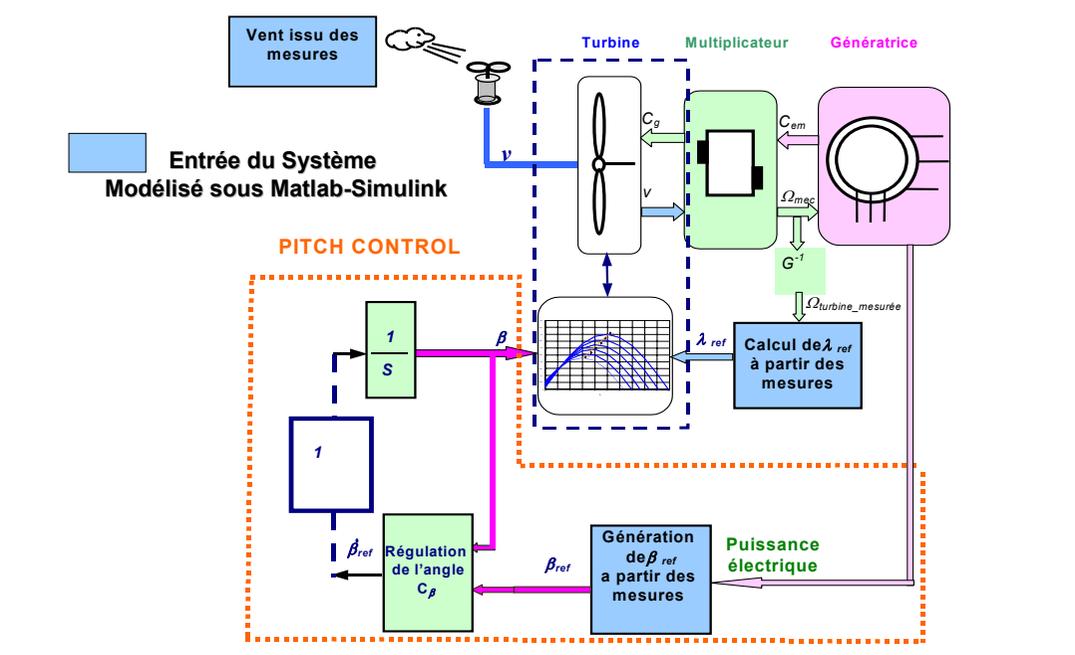
Confrontation des résultats de simulation à des mesures sur l'éolienne de 1,5 MW

General Electric 1,5 MW
A Schelle région d'Anvers (Belgique)

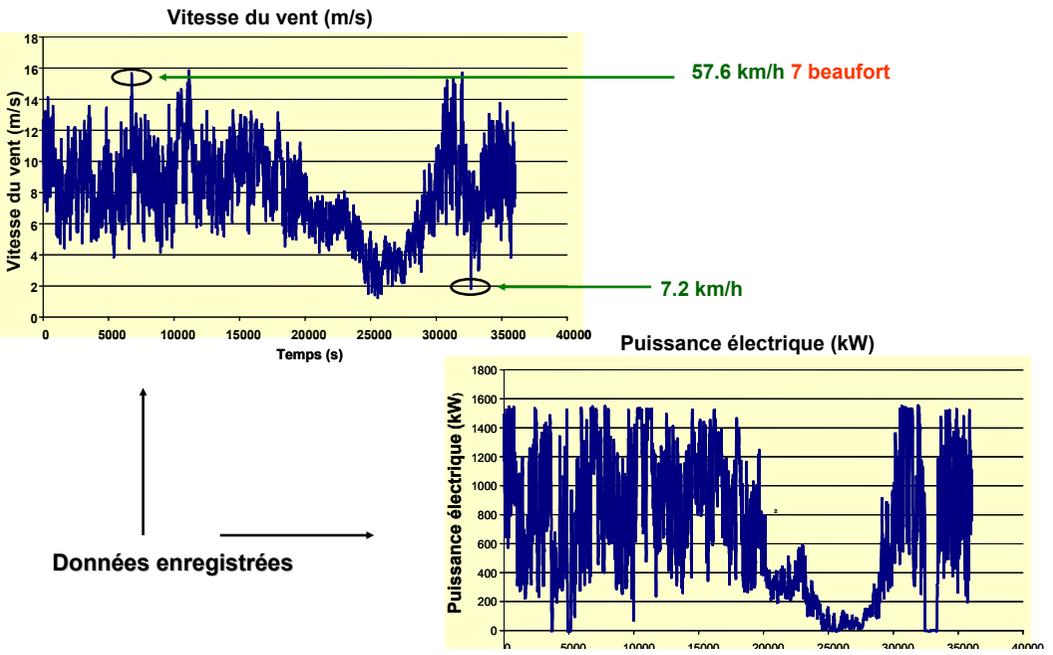
| ROTOR | |
|-------------------------|-----------------|
| Longueur | 35 (m) |
| pales | 3 |
| Régulation | pitch/optiSpeed |
| Tour | |
| Hauteur | 85 (m) |
| Données opérationnelles | |
| Cut in wind speed | 4m/s |
| Nominal wind speed | 16m/s |
| Stop wind speed | 25m/s |
| Génératrice | |
| Type | MADA |
| Puissance Nominale | 1,5 MW |
| Tension et fréquence | 690V/50Hz |
| Poids | |
| Tour | 160t |
| Nacelle | 57t |
| Rotor | 23t |



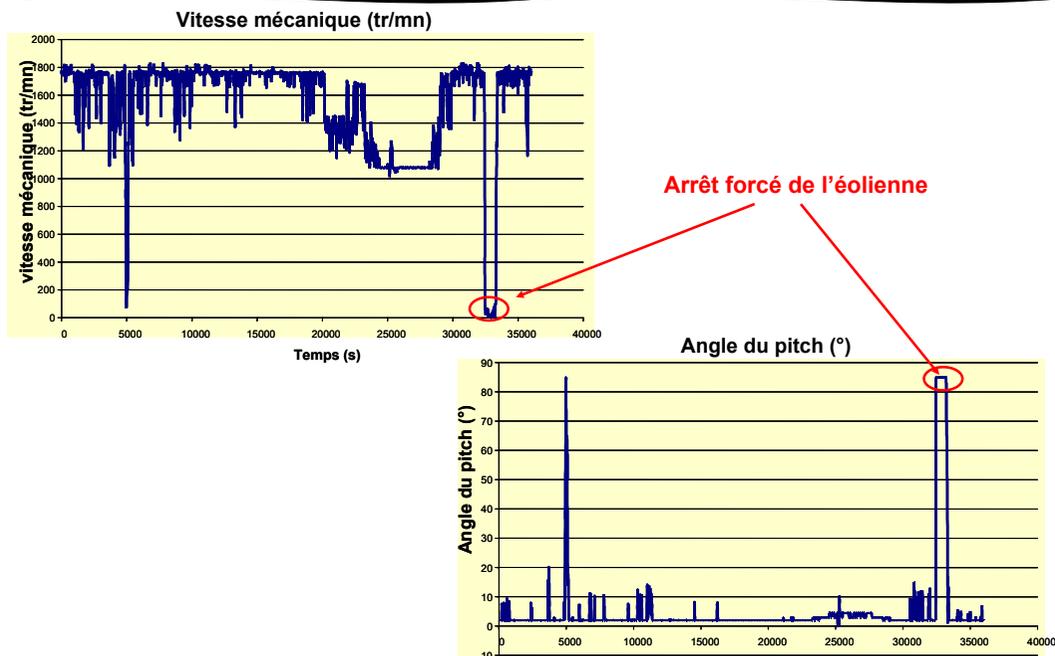
Confrontation des résultats de simulation à des mesures sur l'éolienne de 1,5 MW



Confrontation des résultats de simulation à des mesures sur l'éolienne de 1,5 MW



Confrontation des résultats de simulation à des mesures sur l'éolienne de 1,5 MW

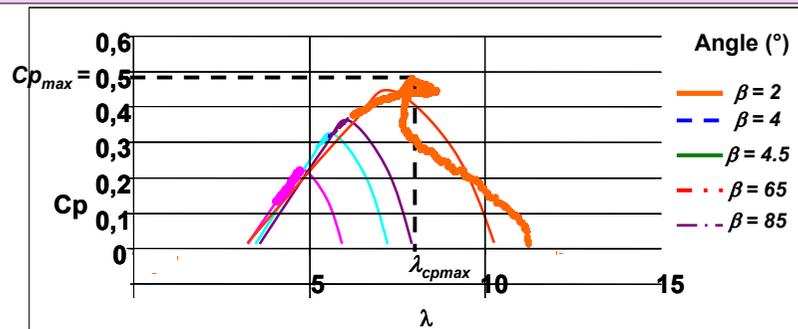


Confrontation des résultats de simulation à des mesures sur l'éolienne de 1,5 MW

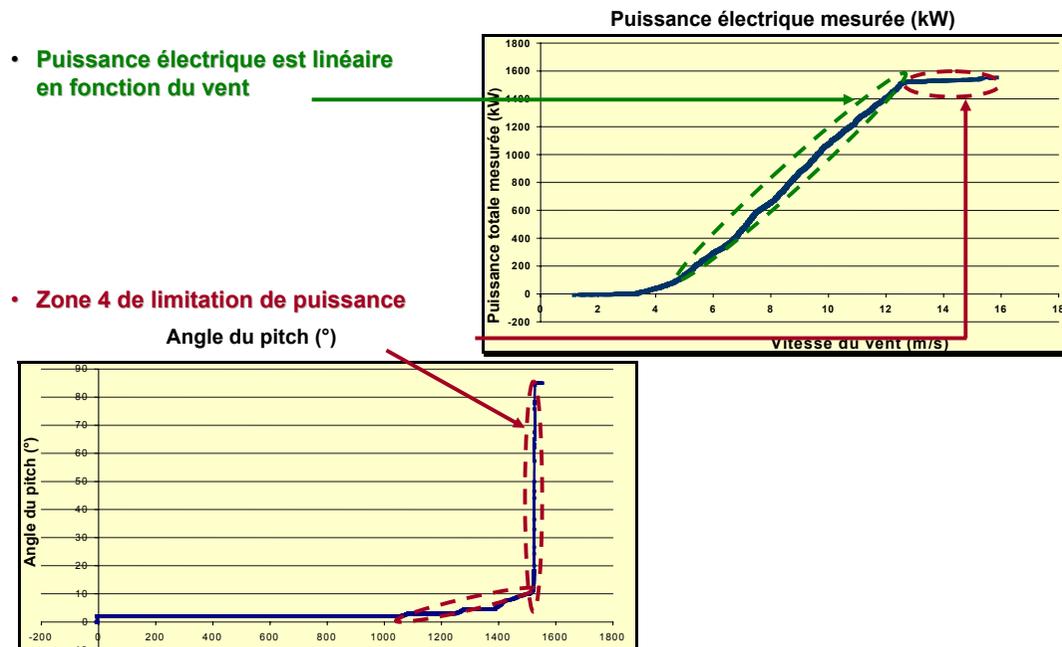
Valeurs de $C_p=f(\lambda, \beta)$ utilisées par le système de commande de la turbine

Rappel La puissance captée par la turbine $\rightarrow P = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2}$

Mesuré (hypothèse $P_{elec} = P$) $C_p = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot S \cdot v^3}$



Confrontation des résultats de simulation à des mesures sur l'éolienne de 1,5 MW



Confrontation des résultats de simulation à des mesures sur l'éolienne de 1,5 MW

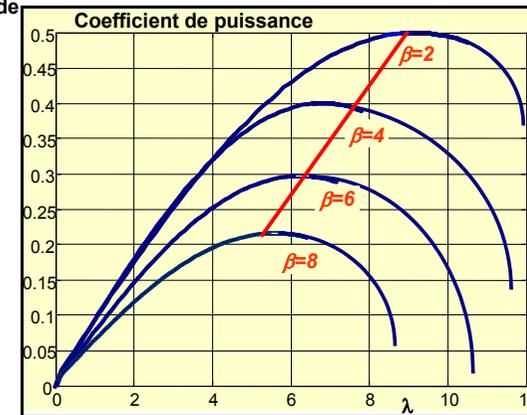
Caractérisation de la turbine

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{(18.5 - 0.3 \cdot (\beta - 2))}\right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2)$$

Terme correspondant au (C_{pmax})

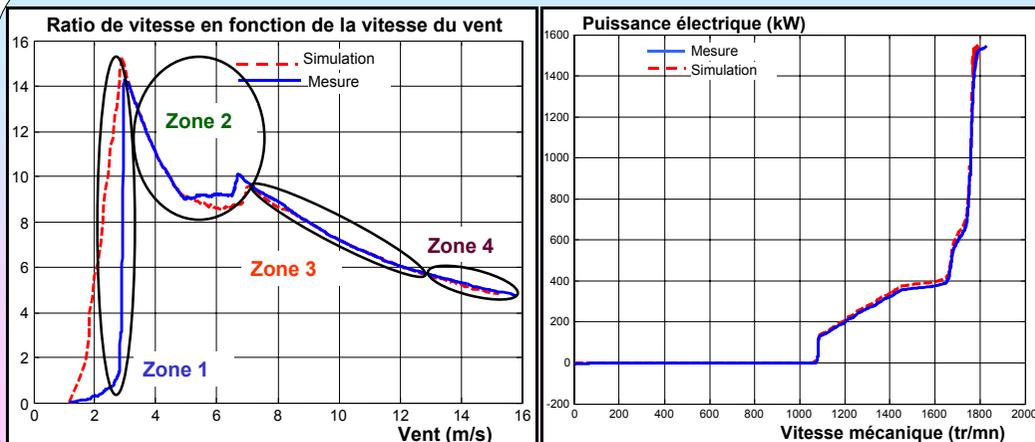
Terme correspondant au λ_{cpmax}

Angle de pale, 2° correspondant à l'extraction maximale de puissance



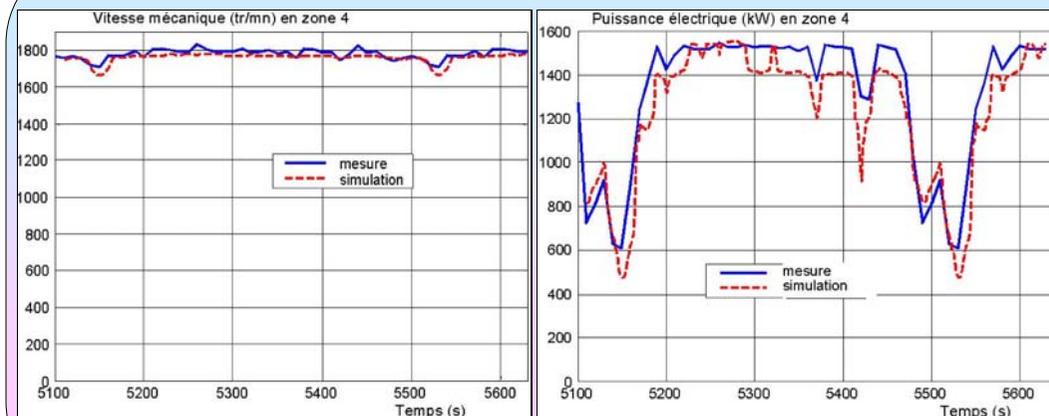
Confrontation des résultats de simulation à des mesures sur l'éolienne de 1,5 MW

Exemple de confrontation en régime quasi statique



Confrontation des résultats de simulation à des mesures sur l'éolienne de 1,5 MW

Exemple de confrontation en régime dynamique : zone 4



• Contexte et objectifs de la thèse

• Partie I : Formalismes et classes de modèles d'éoliennes

- Outils utilisés et classes de modèles
- Commande de la turbine éolienne avec intégration du modèle mécanique

• Partie II : Modélisation de l'éolienne étudiée et exploitation des résultats expérimentaux

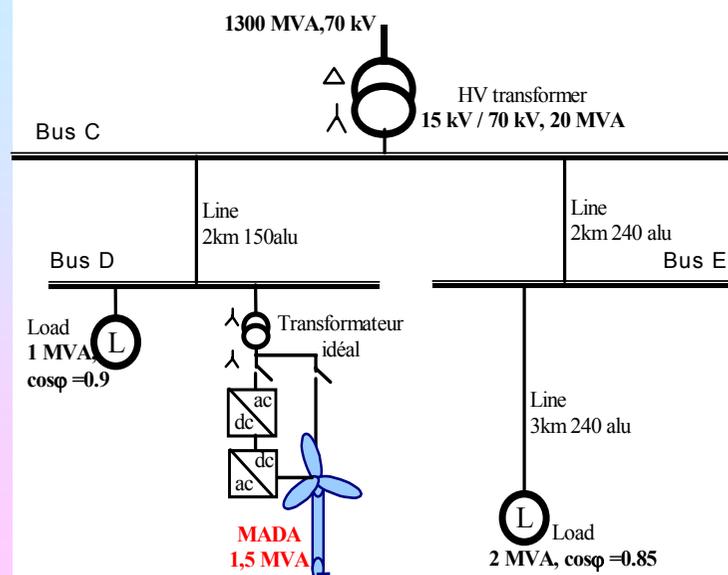
- Éolienne à base de MADA
- Confrontation des résultats de simulation à des résultats de mesure de l'éolienne

• Partie III : Intégration de l'éolienne dans un réseau moyenne tension

- Influence de l'éolienne sur le réseau
- Influence du réseau sur l'éolienne

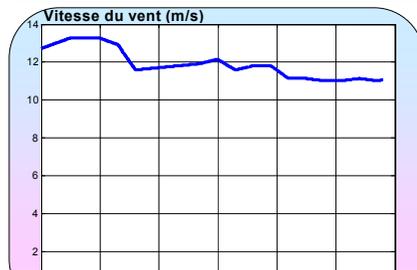
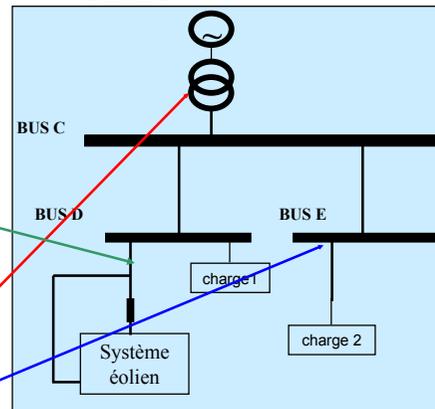
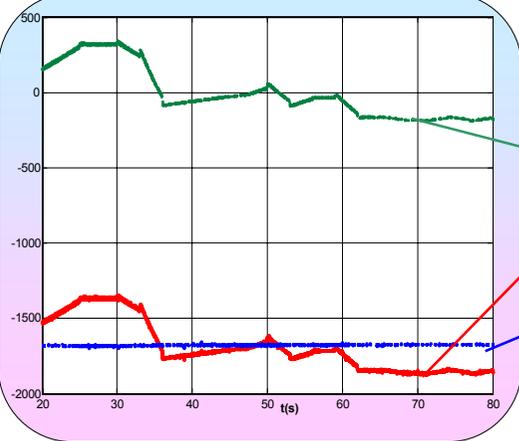
• Conclusion et perspectives

Réseau HTA étudié



Influence sur les flux de puissance

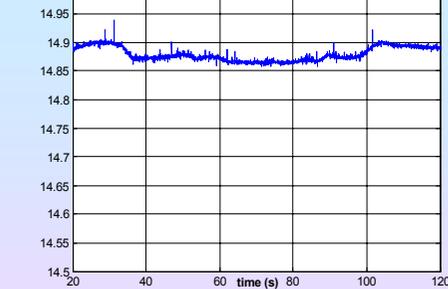
Puissances actives dans le réseau HTA (kW)



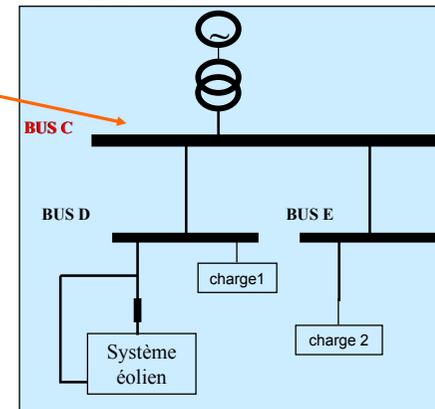
EPE 2003

Influence sur le plan de tension

Tension au secondaire du transformateur (kV)



Courant au secondaire du transformateur (A)



Qualité de la tension

Intérêt de l'étude

- La variation de la tension au point de livraison ne doit pas dépasser 5 % pendant 0.5 s.
- La variation de la puissance ne doit pas dépasser 4 MW/min

Normes sur les taux d'émission harmonique limite

| Rangs impairs | k_n (%) | Rangs pairs | k_n (%) |
|---------------|-----------|-------------|-----------|
| 3 | 4 | 2 | 2 |
| 5 et 7 | 5 | 4 | 1 |
| 9 | 2 | > 4 | 0,5 |
| 11 et 13 | 3 | | |
| > 13 | 2 | | |

Pour notre cas. Évaluation avec une fréquence de modulation de 5 kHz

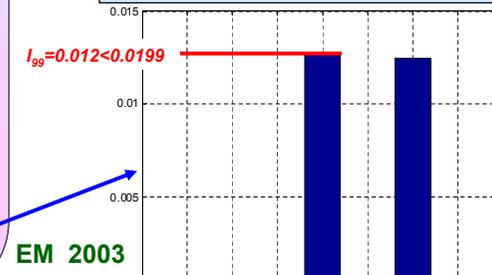
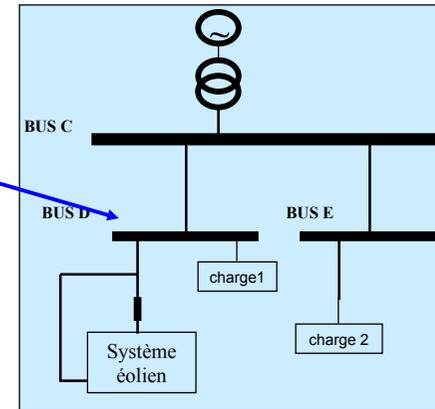
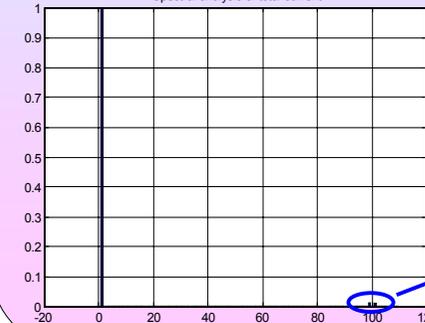
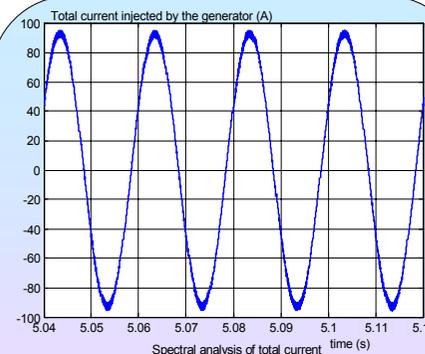
S_n est la Puissance nominale de l'installation = 1.5 MVA

U_{nom} est la valeur de la tension nominale d'alimentation = 690 V

$$I_{99} = k_{99} \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{nom}}$$

$I_{99}=25A$, En (p.u) on a $I_{99}=0,0199$

Influence sur la qualité de la tension



EM 2003

Influence du réseau sur l'éolienne

Contexte et objectifs

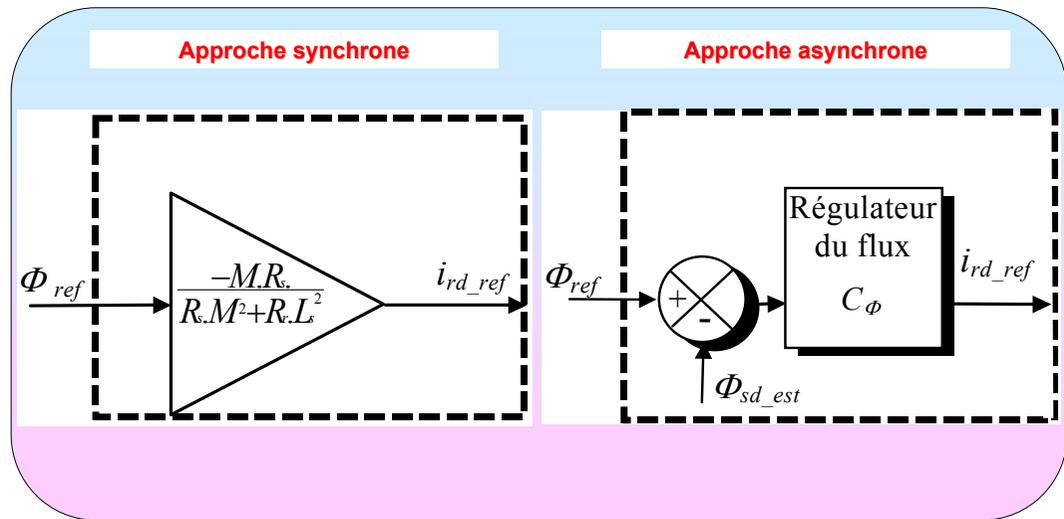
Apparition d'incidents (court-circuits aux bornes des charges) d'origines diverses et provoquant des creux de tension (équilibrés et déséquilibrés)

Contraintes sur les réseaux de distribution HTA

- En cas de défaut, la centrale de production ne doit pas entraîner une élévation du courant de court-circuit au delà de **12,5 kA en zone urbaine** et de **8 kA en zone rurale**.
- L'éolienne doit pouvoir supporter les creux de tension mono, bi ou triphasés (**0.3 U_n résiduelle pendant 0.6 s, 0.7 U_n pendant 2.5 s**)
- Étude de stabilité à faire par le producteur d'après les paramètres fournis par le gestionnaire du réseau

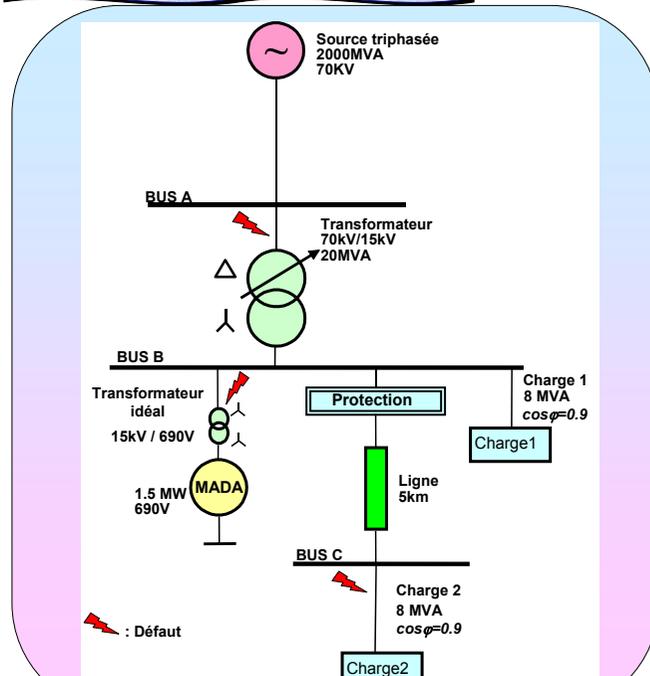
Influence du réseau sur l'éolienne

Comparaison de deux approches de contrôle du flux statorique de la MADA



Influence du réseau sur l'éolienne

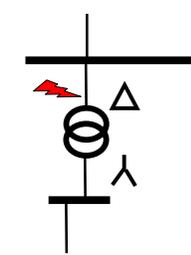
Réseau étudié



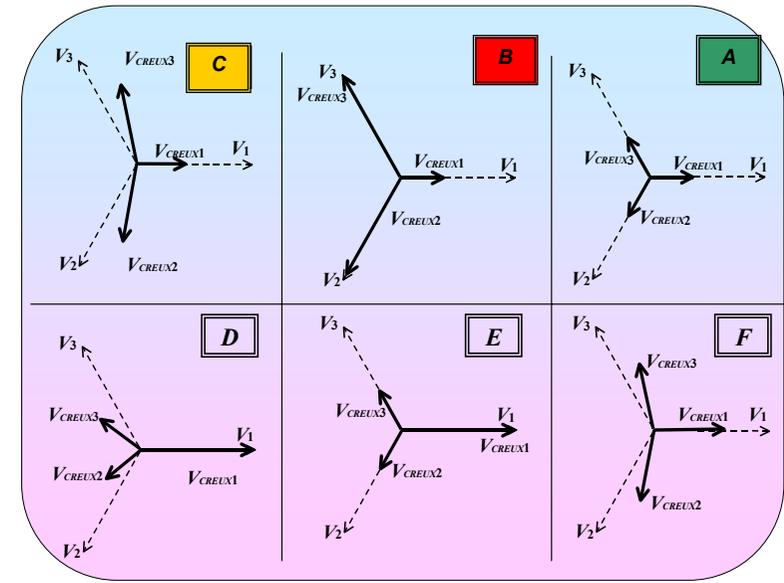
Influence du réseau sur l'éolienne

Dans notre étude

- Type A
- Type B
- Type C



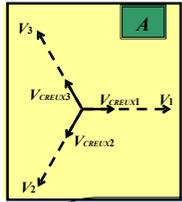
Classification des creux de tension



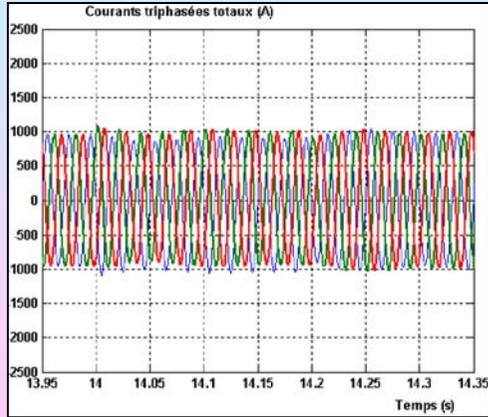
Influence du réseau sur l'éolienne

Creux de tension de type A au bornes de la MADA
De 20% et d'une durée de 200 ms

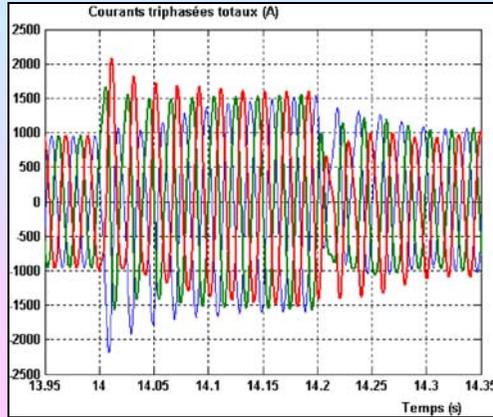
Courants triphasés totaux



Approche synchrone



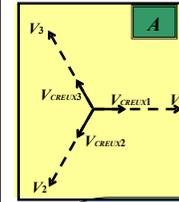
Approche asynchrone



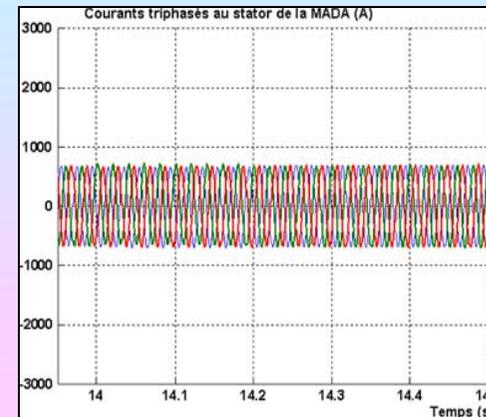
Influence du réseau sur l'éolienne

Creux de tension de type A au bornes de la MADA
De 20% et d'une durée de 200 ms

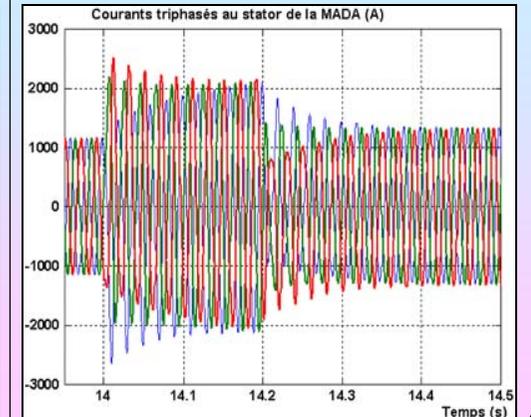
Courants triphasés au stator de la MADA



Approche synchrone



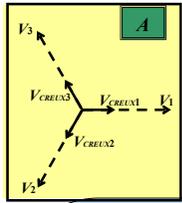
Approche asynchrone



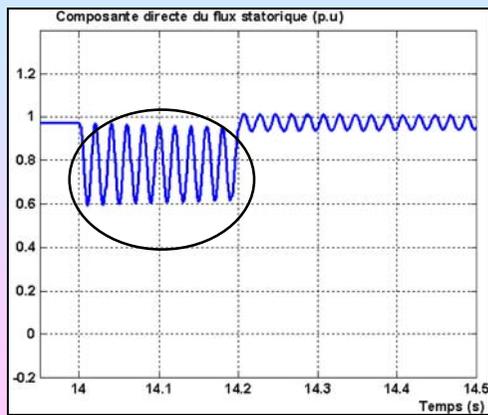
Influence du réseau sur l'éolienne

Creux de tension de type A au bornes de la MADA
De 20% et d'une durée de 200 ms

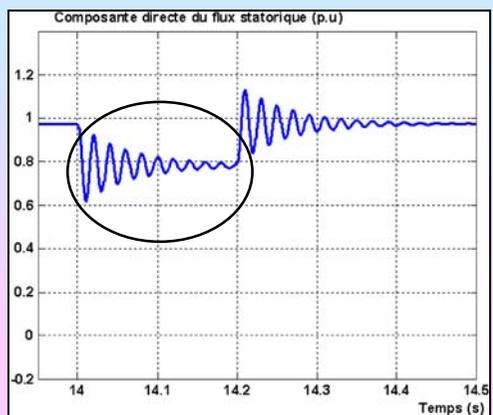
Composante directe du flux statorique de la MADA



Approche synchrone

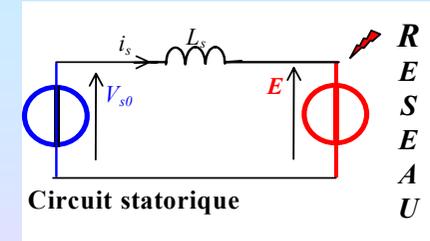


Approche asynchrone



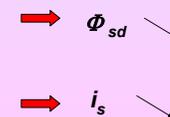
Influence du réseau sur l'éolienne

Conclusion sur les deux approches utilisées

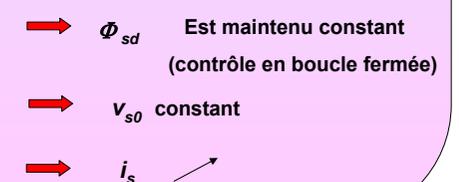


Lorsque E ↘

Approche synchrone



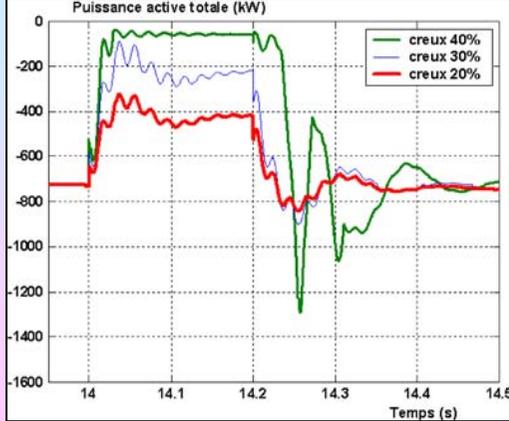
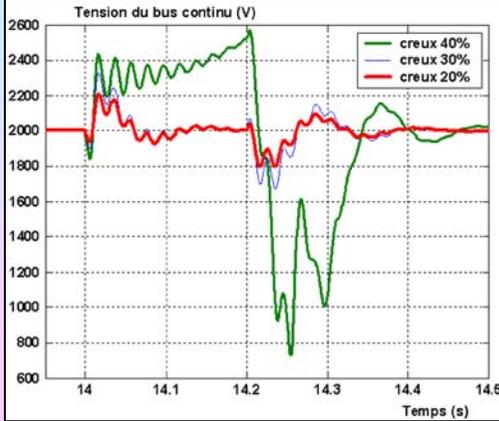
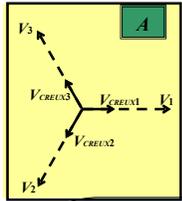
Approche asynchrone



Influence du réseau sur l'éolienne

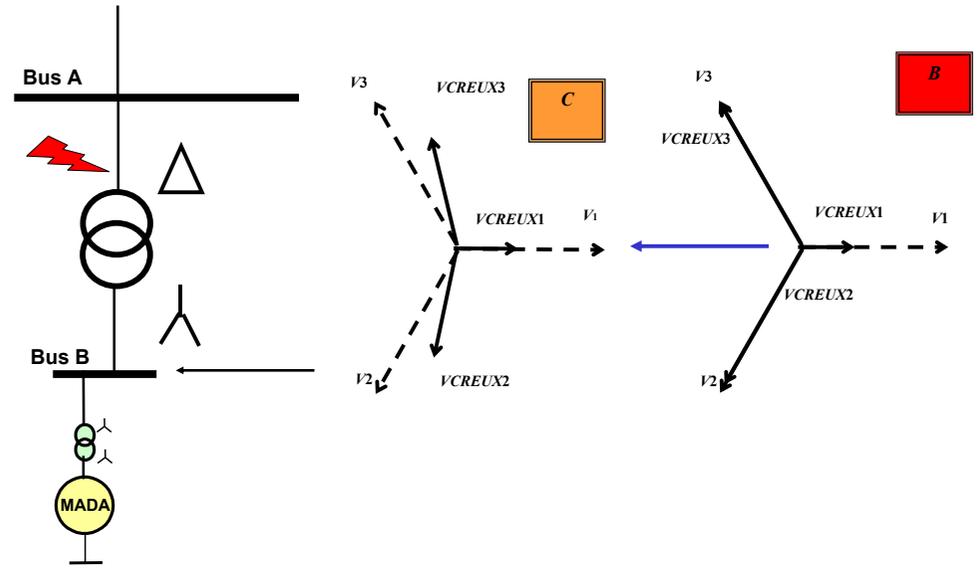
Creux de tension de type A au bornes de la MADA

Influence de la profondeur du creux de tension avec l'approche asynchrone



Influence du réseau sur l'éolienne

Creux de tension monphasé en amont du transformateur HTA

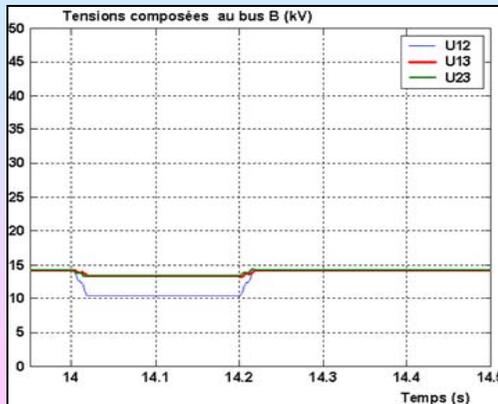
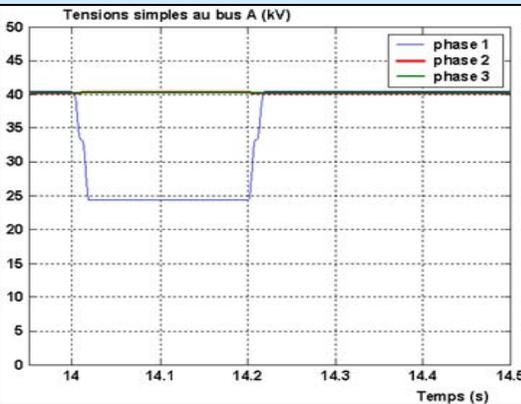


Influence du réseau sur l'éolienne

Creux de tension monphasé en amont du transformateur HTA

Bus A

Bus B



- Contexte et objectifs de la thèse
- Partie I : Formalismes et classes de modèles d'éoliennes
 - Outils utilisés et classes de modèles
 - Commande de la turbine éolienne avec intégration du modèle mécanique
- Partie II : Modélisation de l'éolienne étudiée et exploitation des résultats expérimentaux
 - Éolienne à base de MADA
 - Confrontation des résultats de simulation à des résultats de mesure de l'éolienne
- Partie III : Intégration de l'éolienne dans un réseau moyenne tension
 - Influence de l'éolienne sur le réseau
 - Influence du réseau sur l'éolienne
- Conclusion et perspectives

Objectif : Étude des spécificités liées à l'intégration des éoliennes dans les réseaux électriques



Partie I :

Formalismes et classes de modèles

- Mise en évidence des niveaux de modélisation ainsi que les formalismes utilisés

Partie II : Modélisation et commande des éoliennes

- Étude d'une éolienne à vitesse variable
 - Conception de deux algorithmes pour le M.P.P.T. en utilisant le G.I.C. et la R.E.M.
 - Contrôle sans asservissement de la vitesse
 - Contrôle en boucle fermée de la vitesse
 - Contrôle de l'éolienne afin de limiter sa puissance à sa valeur nominale pour des fortes vitesses du vent
 - Prise en compte de la procédure de démarrage

Perspectives 1

- ✓ Amélioration du modèle en prenant en compte les vibrations de la tour, l'effet d'ombre et la désynchronisation de l'orientation des pales et son influence sur les grandeurs du réseau de distribution

Partie II : Modélisation et commande des éoliennes

- Modélisation d'une chaîne de conversion basée sur une MADA de 1.5 MW

- Deux estimateurs de flux sont déterminés
- Trois stratégies de contrôle de flux statorique

- En utilisant une consigne de puissance réactive nulle
- En minimisant les pertes Joules de la machine
- En utilisant un contrôle en boucle fermée du flux statorique

Approche synchrone

Approche asynchrone

Perspectives 2

- ✓ Établir une modélisation plus complète de cette génératrice éolienne prenant en compte la saturation magnétique de la MADA.

Partie II : Modélisation et commande des éoliennes

- Confrontation des résultats de simulation à des mesures effectuées sur l'éolienne de 1,5 MW

Partie III :
Interactions Réseau – Éolienne

► **Influence de l'éolienne sur le réseau**

- Influence de la fluctuation sur les puissances et le plan de tension
- Vérification de la conformité de cette éolienne avec les normes de raccordement standard existantes
- Estimation des harmoniques générés

Perspectives 3

- ✓ Compléter l'étude avec des modèles de lignes valables à des fréquences de plusieurs kHz

Partie III :
Interactions Réseau – Éolienne

► **Influence du réseau sur l'éolienne**

- Évaluation du comportement de l'éolienne en présence de défauts sur le réseau de distribution
- Mise en évidence des performances des stratégies de commande de la MADA en régime perturbé

Perspectives 4

- ✓ Utilisation d'un système de protection (CROWBAR,..) et conception des modèles à intégrer avec des systèmes de détection de défauts
- ✓ Participation au contrôle de la tension du réseau en absence ou en présence de défauts

Merci pour votre attention ...