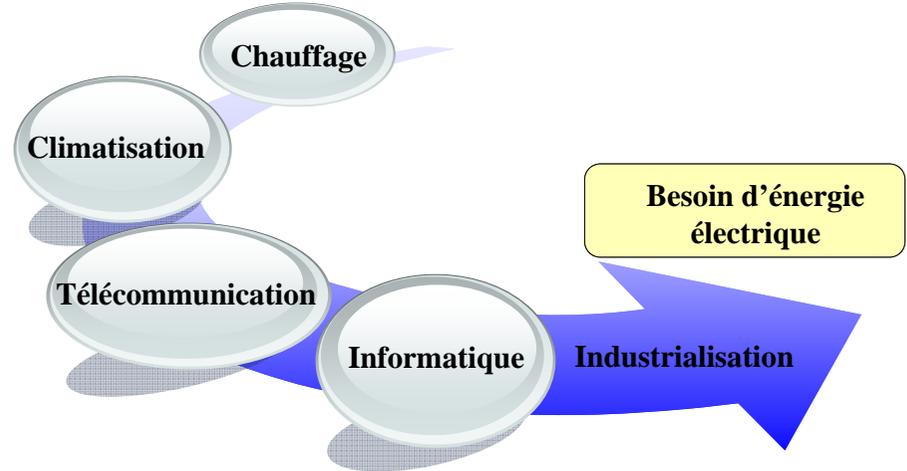


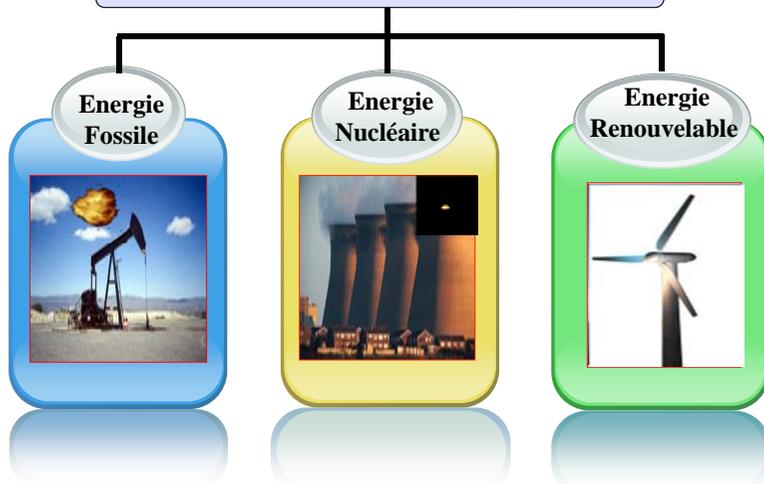
Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation

Proposé et dirigé par:
Professeur BERKOUK El Madjid (ENP Alger)
Professeur FRANCOIS Bruno (EC-Lille)

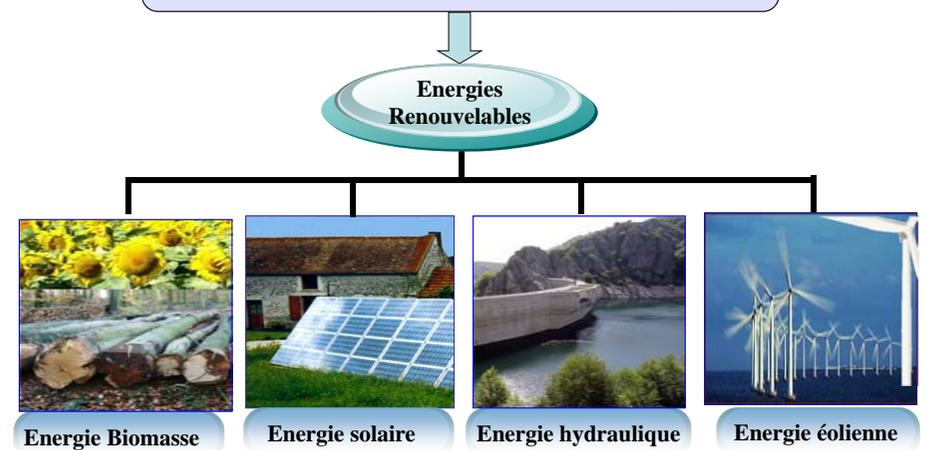
Présenté par :
Cdt: GHENAM Tarak

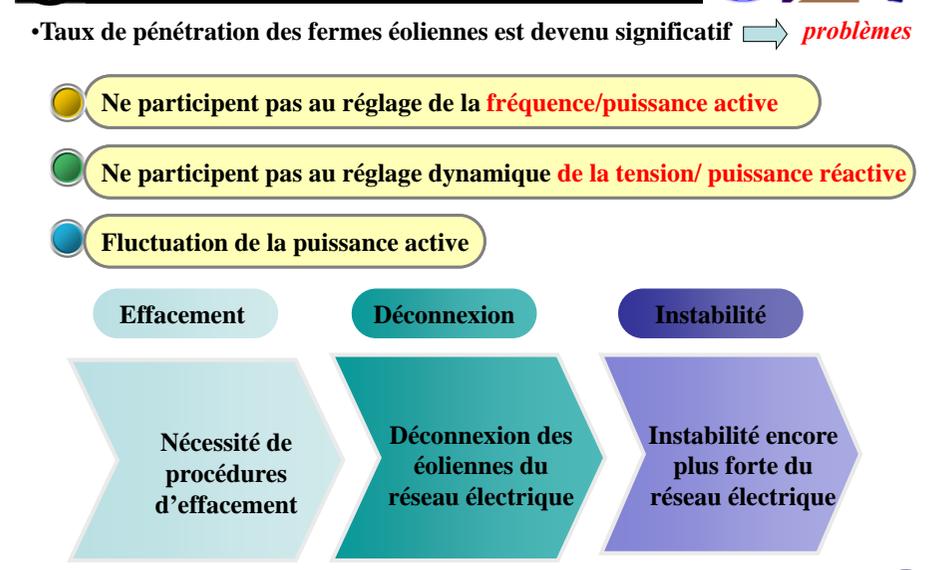
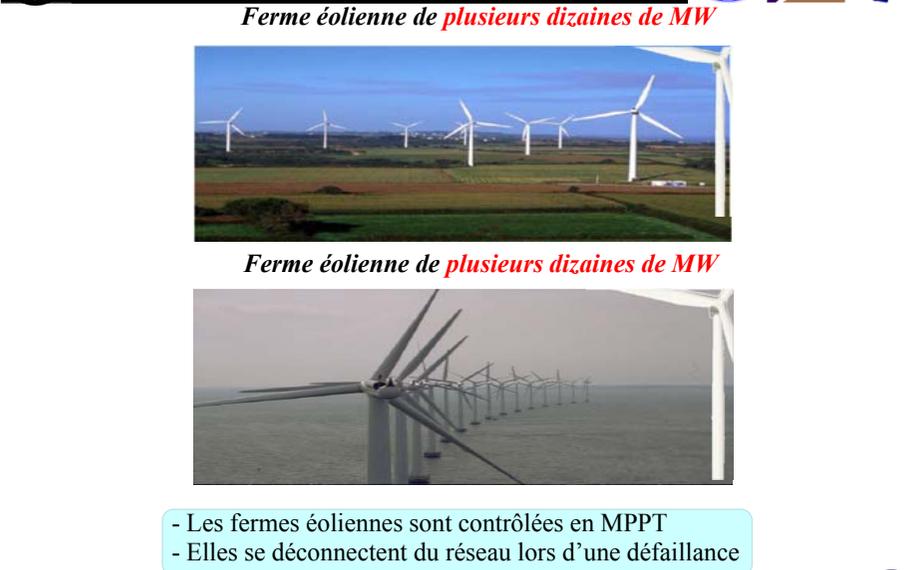
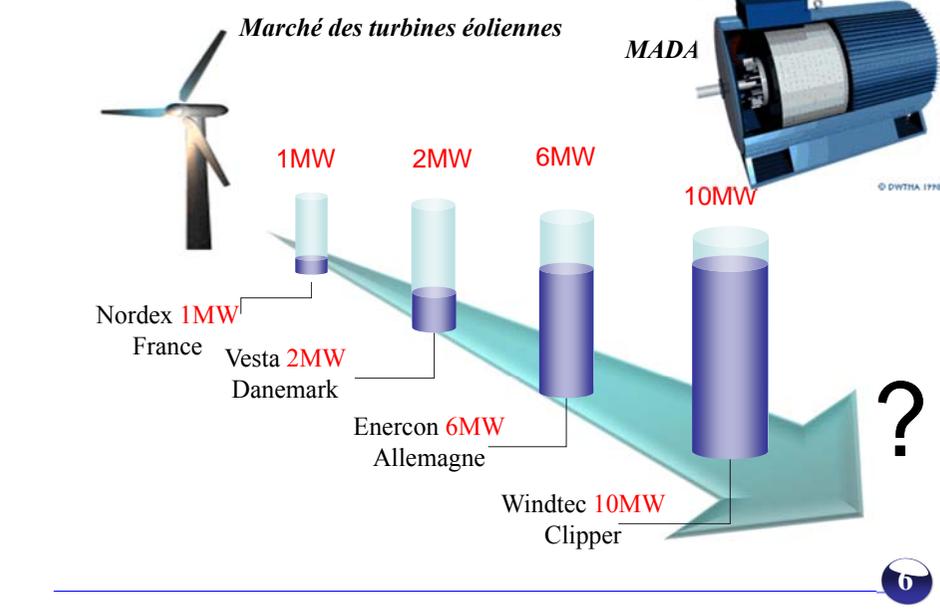
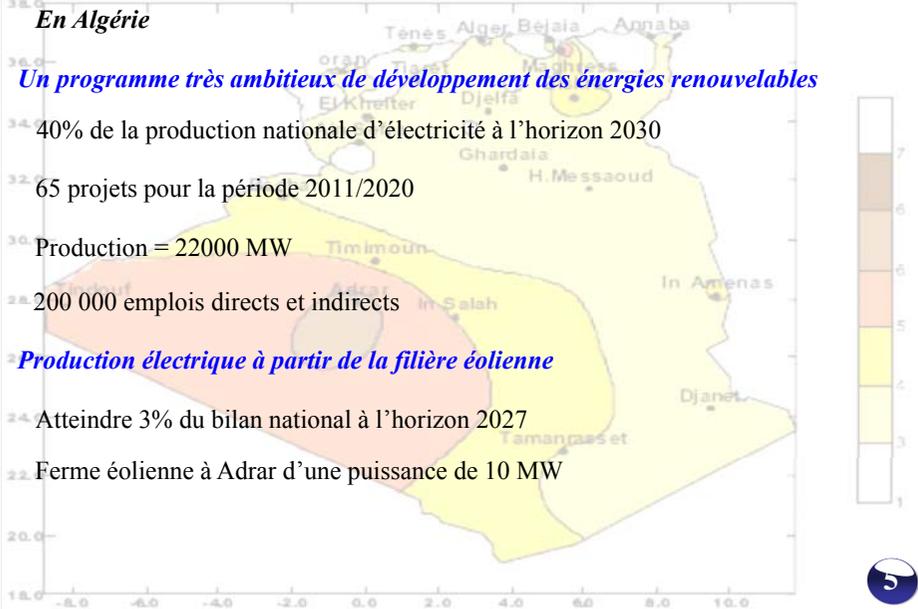


Satisfaction des besoins en énergie



Satisfaction des besoins énergétiques loin des énergies fossiles et nucléaires





Pour maintenir la sécurité électrique du réseau



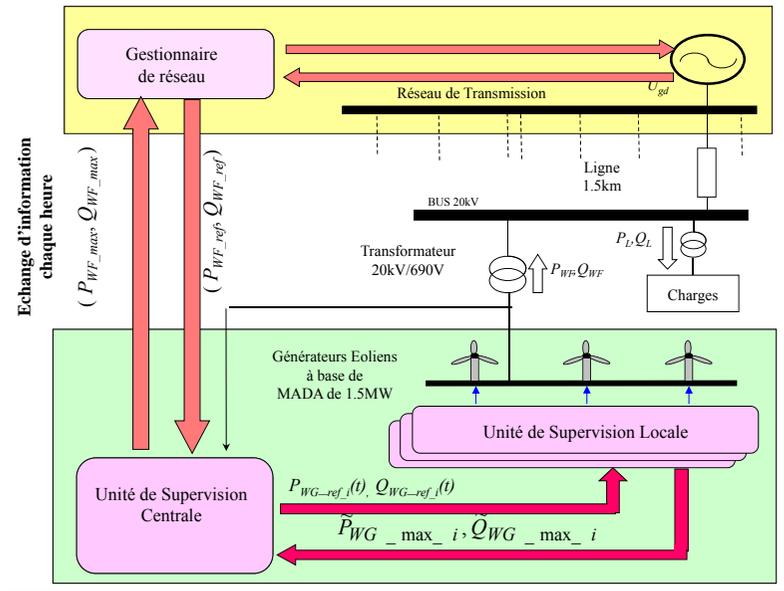
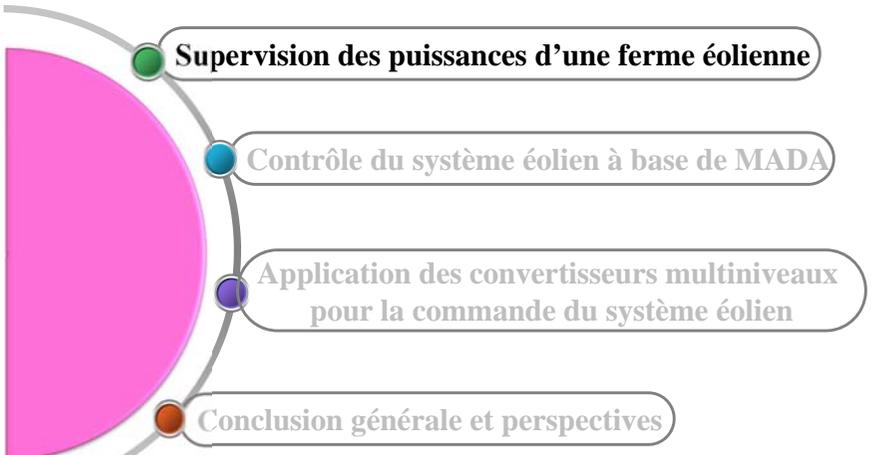
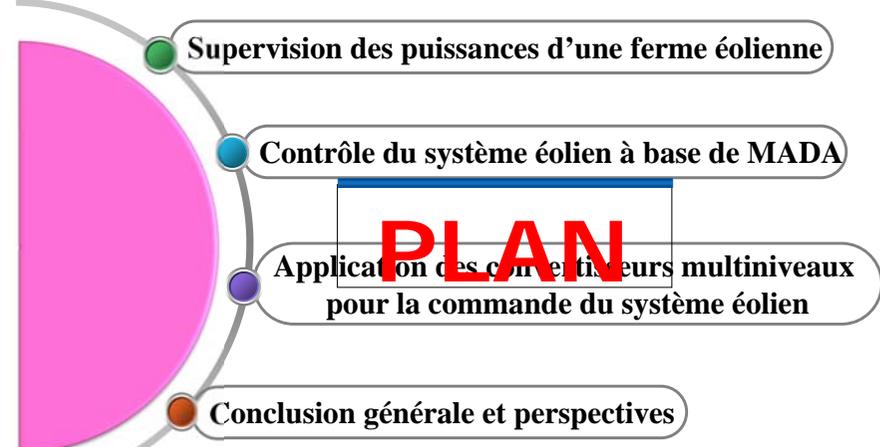
Réglementations spécifiques pour l'éolien

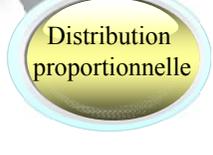


décrets du 19 avril 2003 du ministère de l'économie, des finances et de l'industrie de la France

Article 7:
 -Pour les installations de puissance **supérieure à 10MW**, chaque génératrice électrique doit pouvoir à ses bornes **fournir** une puissance réactive **minimale** égale à **0.6** de sa puissance nominale apparente et **absorber** une puissance réactive égale à **0.2** de sa puissance nominale apparente

Une supervision semble nécessaire





•Avantage

Facilité d'implémentation
Ne nécessite pas la mesure de $P_{aéro_i}$

•Inconvénient

Risque de saturation des éoliennes
Absence d'information sur P_{max_i}, Q_{max_i}

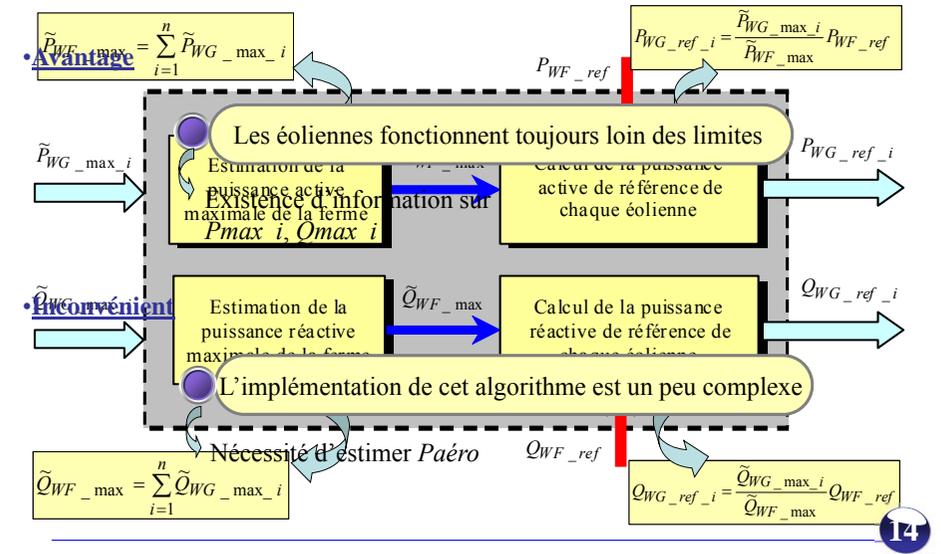
•Avantage

Minimisation des pertes de puissance dans les lignes de la ferme

•Inconvénient

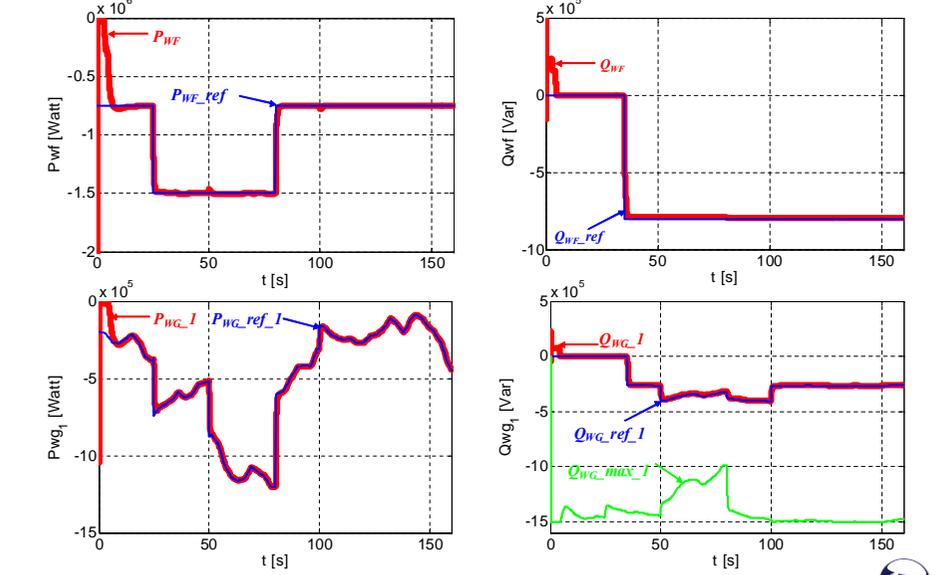
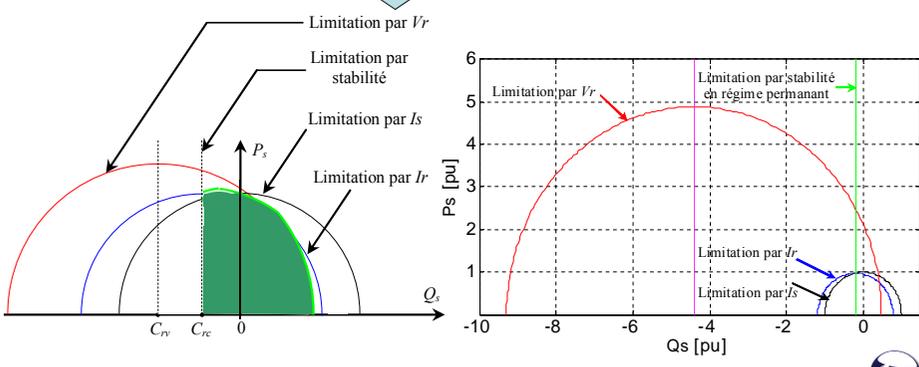
Mauvaises performances lors des variations brusques des puissances de référence
Temps de calcul assez important

•Principe Répartition proportionnelle des puissances sur les éoliennes

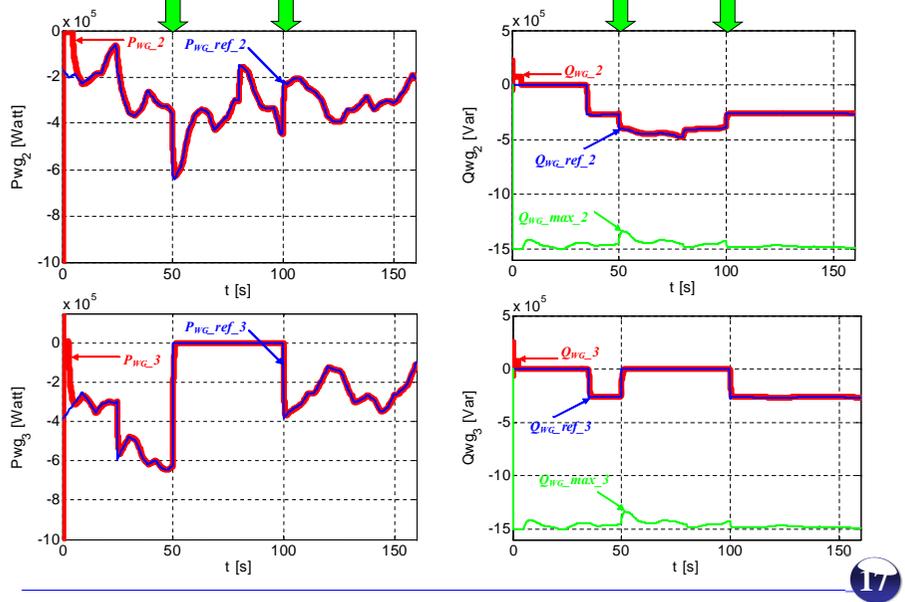


Estimation des puissances maximales de chaque éolienne

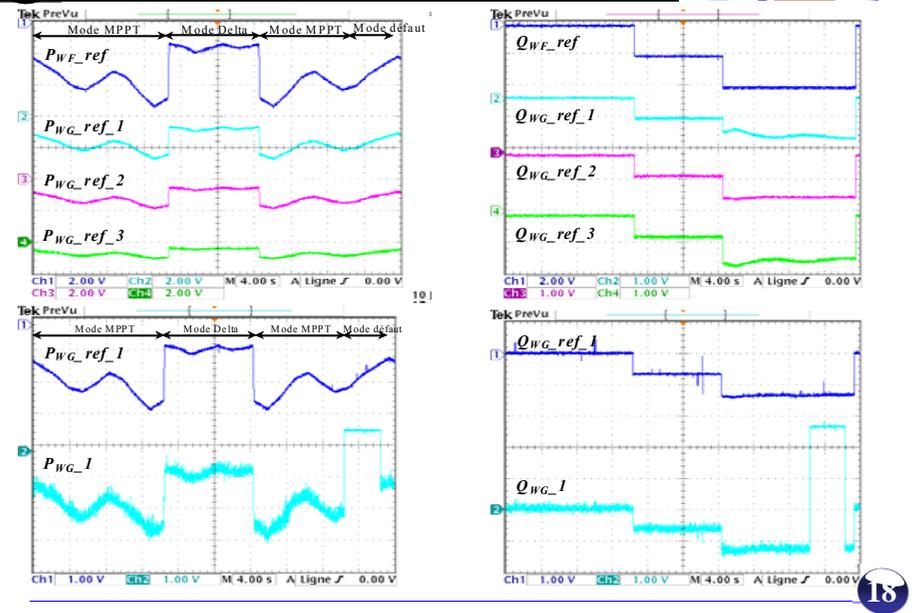
$$P_{WG_max_i} = P_{aéro_i} = \frac{1}{2} C_p \rho S v^3$$



Résultats de simulation (1^{er} scénario)

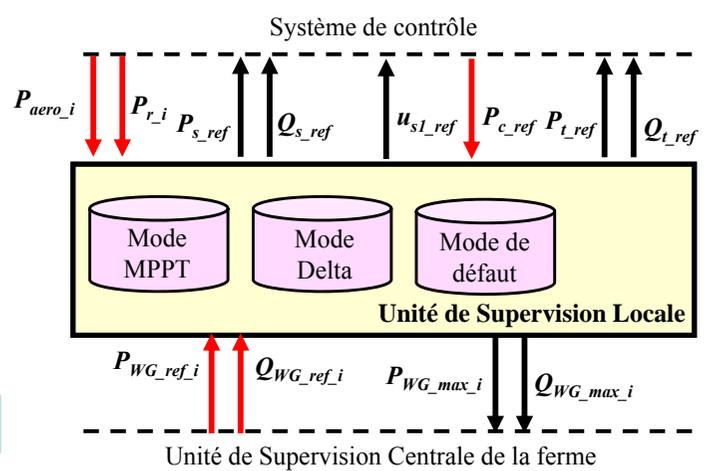


Résultats expérimentaux (2^{ème} scénario)



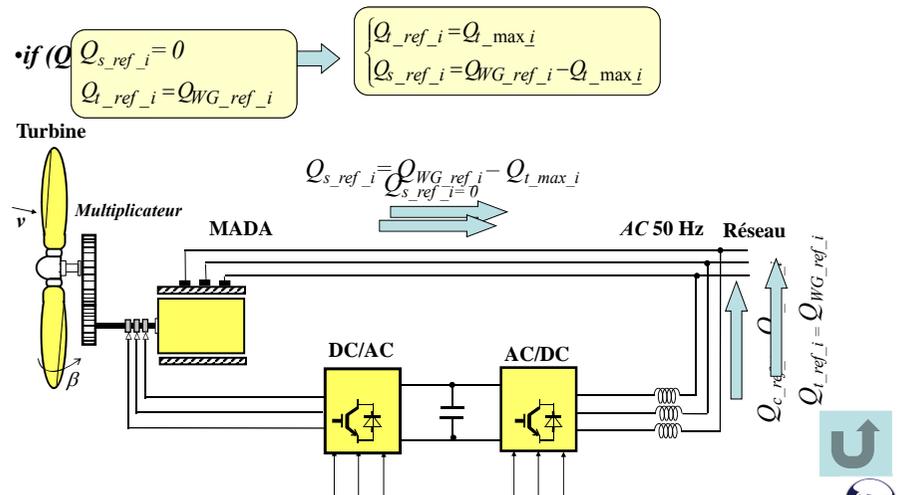
Supervision locale de la puissance réactive de l'éolienne

Principe Distribution des puissances sur le stator la MADA et le convertisseur coté réseau d'une manière coordonnée



Supervision locale de la puissance réactive de l'éolienne

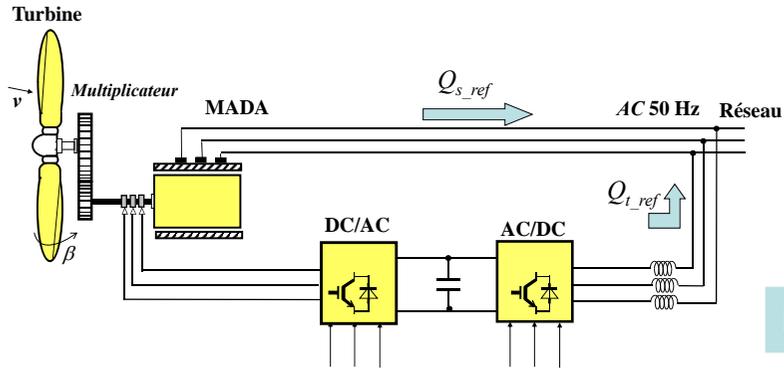
1 Mode MPPT



2 Mode Delta

$$Q_{s_ref_i} = \frac{Q_{WG_ref_i}}{Q_{WG_max_i}} Q_{s_max_i}$$

$$Q_{c_ref_i} = \frac{Q_{WG_ref_i}}{Q_{WG_max_i}} Q_{c_max_i}$$

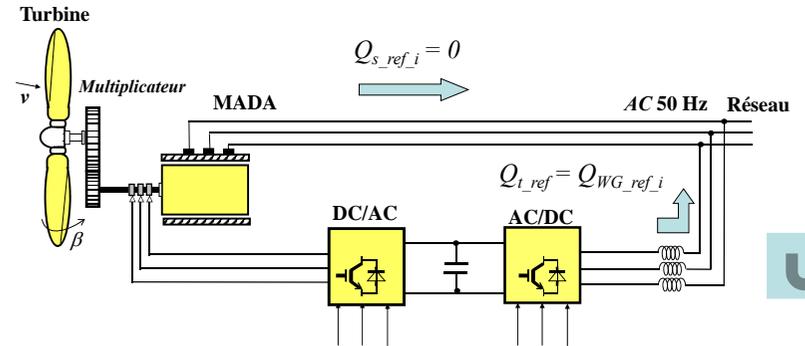


2 Mode Défaut

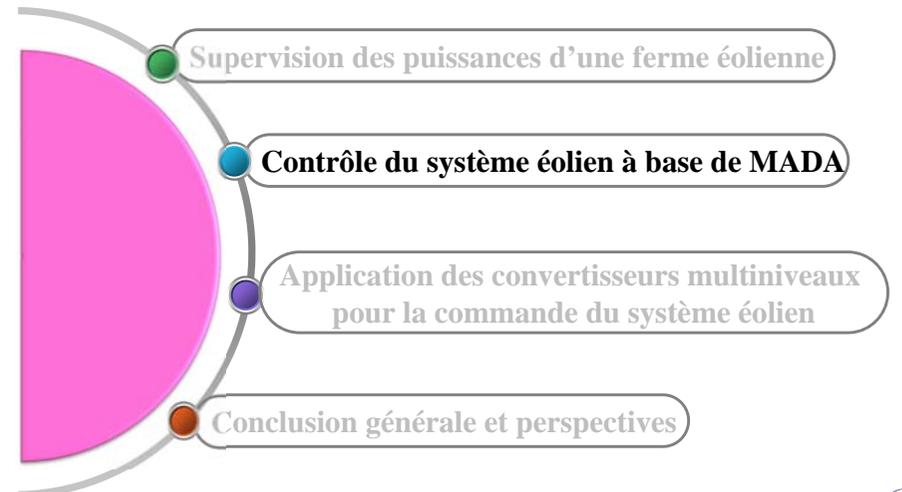
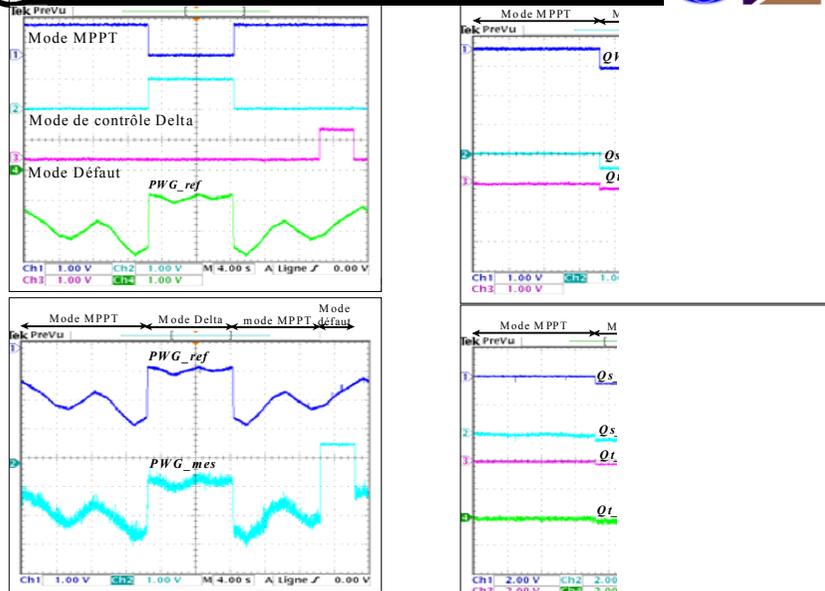
- Le crow-bar court-circuite le rotor de la MADA
- Le convertisseur coté réseau fonctionne comme un STATCOM

$$Q_{s_ref_i} = 0$$

$$Q_{t_ref_i} = Q_{WG_ref_i}$$



Résultats expérimentaux



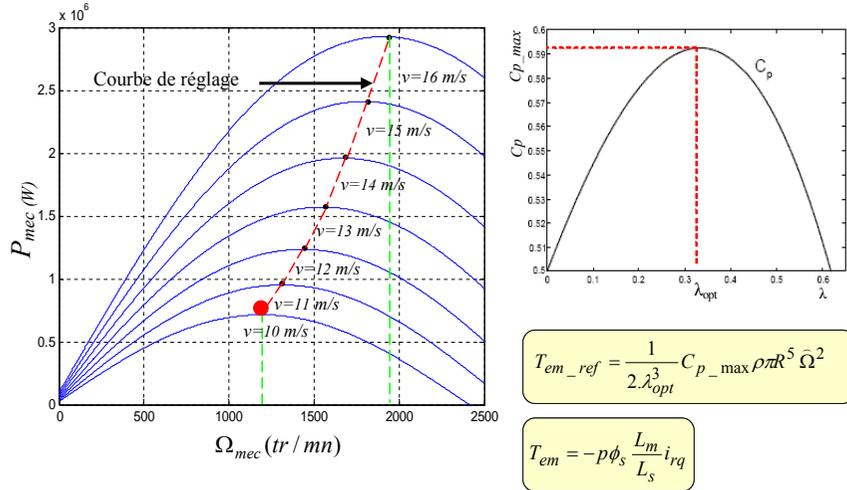


Stratégie de commande MPPT



Extraction du maximum de puissance (MPPT)

Ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent

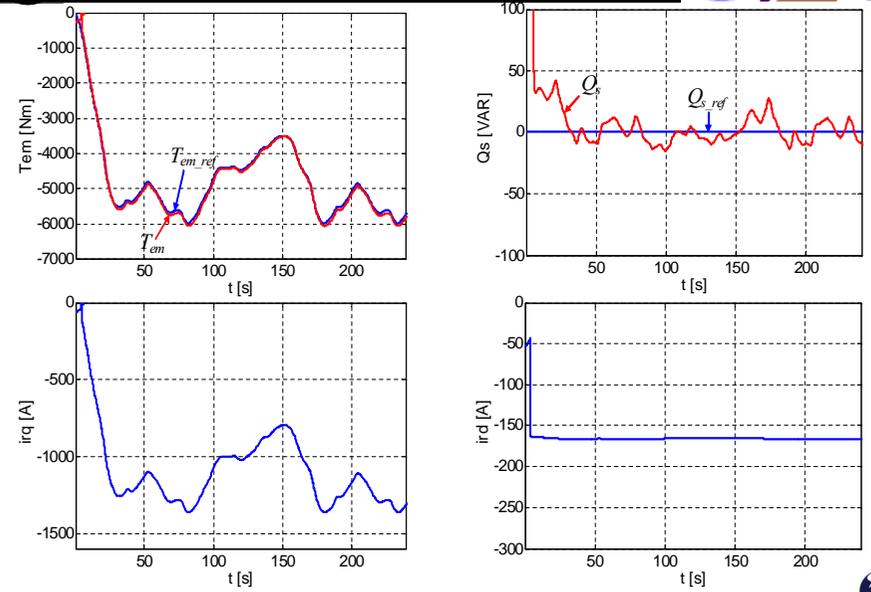


$$T_{em_ref} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3} C_{p_max} \rho \pi R^5 \Omega^2$$

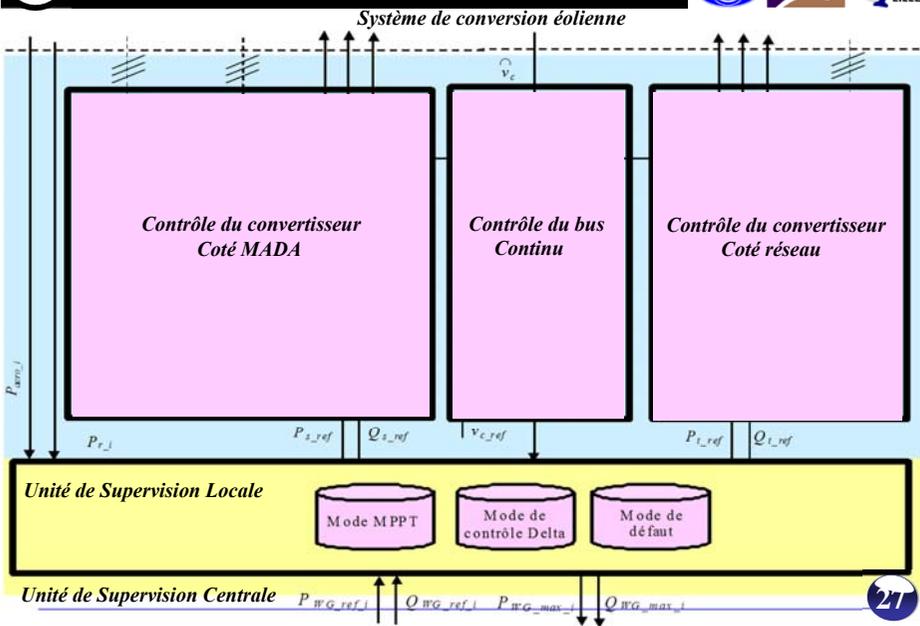
$$T_{em} = -p\phi_s \frac{L_m}{L_s} i_{rq}$$



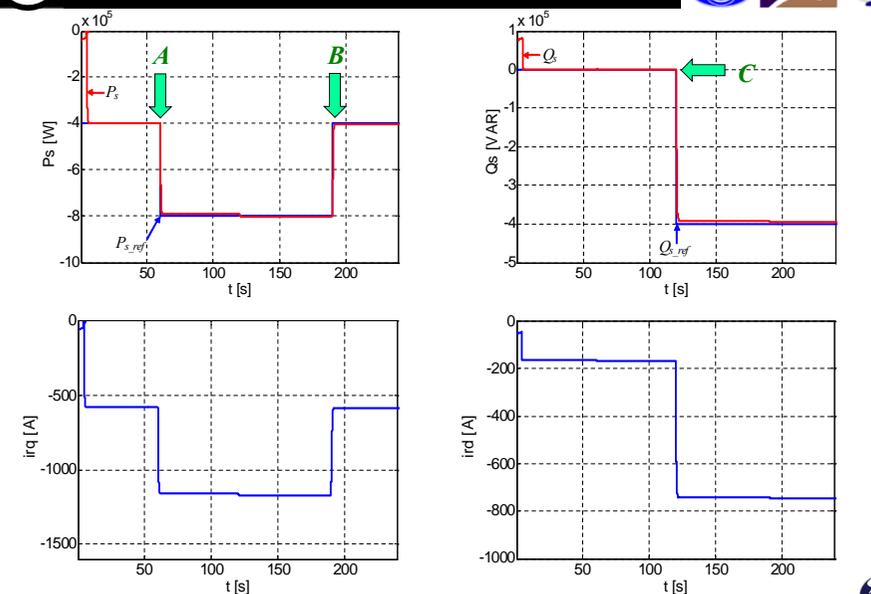
Résultats de simulation



Stratégie de commande découplée des puissances

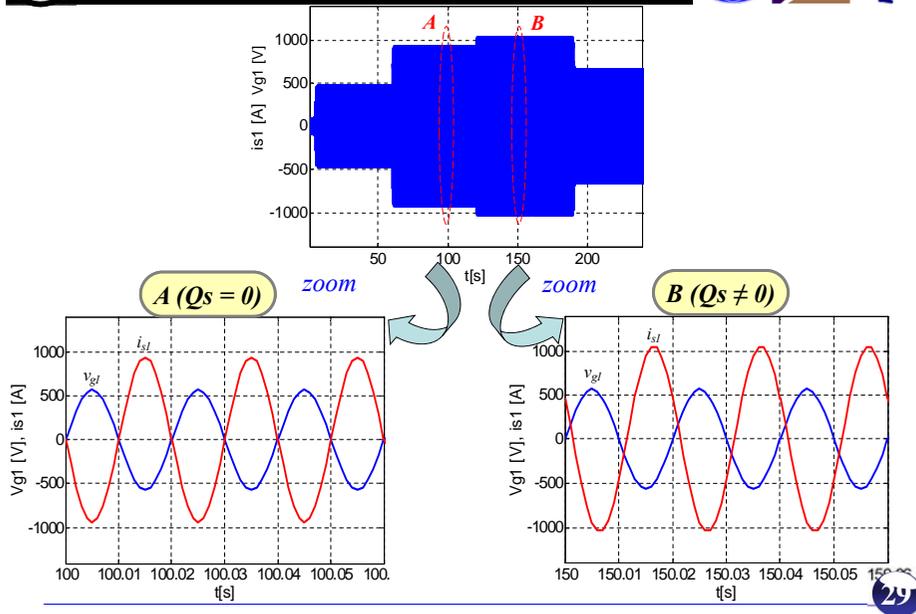


Résultats de simulation

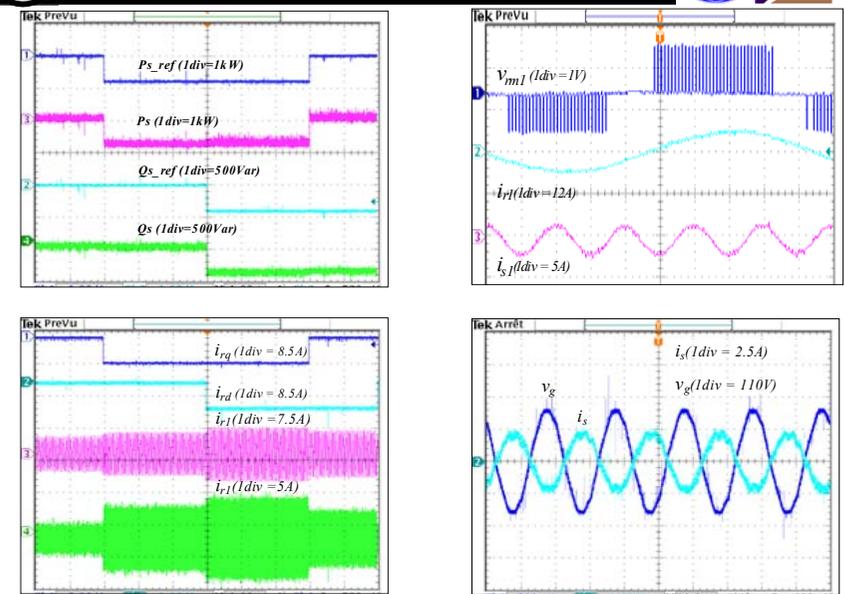




Résultats de simulation



Résultats expérimentaux

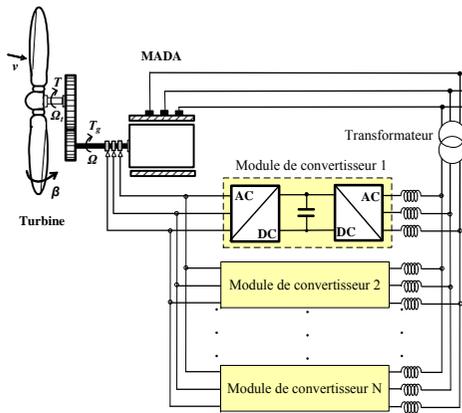


Inconvénients des convertisseurs à deux niveaux



Les éoliennes de puissance élevée \rightarrow Plusieurs modules de convertisseur

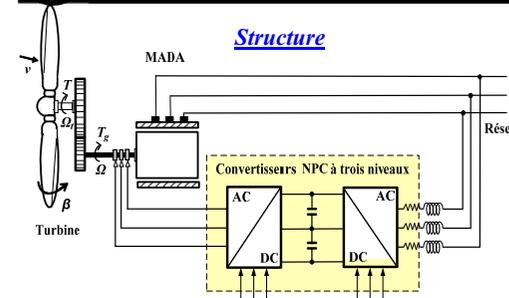
Inconvénients



- Impossibilité d'augmenter la puissance par le biais d'une tension plus élevée
- Multiplication du nombre des convertisseurs (back-to-back)
- Augmentation des pertes par commutation
- Multiplication des filtres de connexion au réseau
- Nécessité d'un transformateur élévateur
- Augmentation des pertes dans lignes
- Mauvais THD



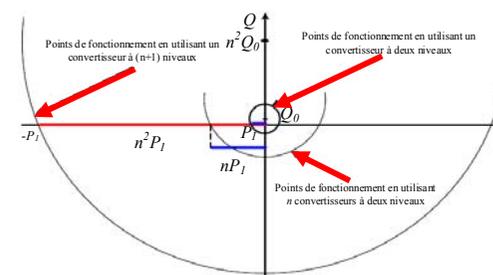
Avantages des convertisseurs multiniveaux



Avantages

- L'augmentation de la puissance par le biais de la tension
- La possibilité de connexion aux réseaux de moyenne tension
- La réduction du contenu harmonique des courants

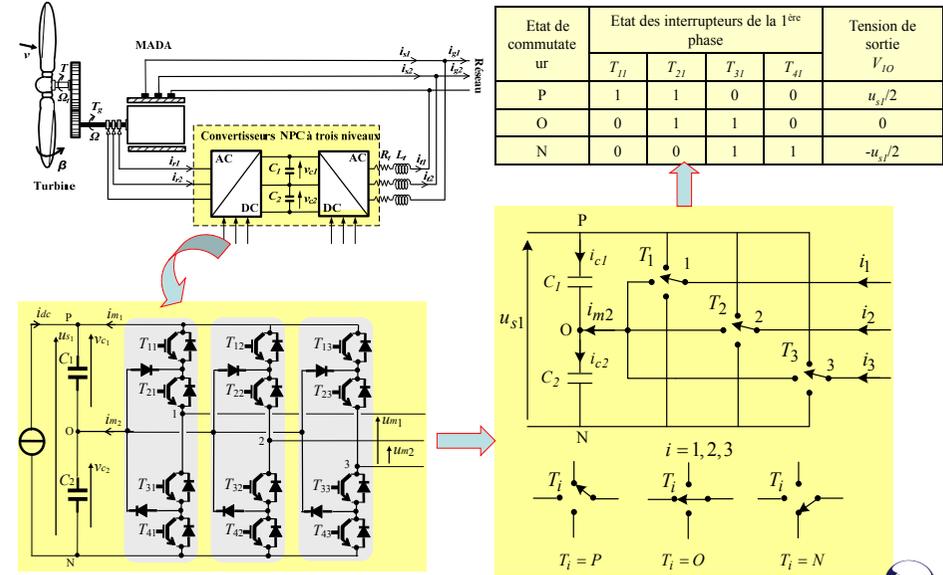
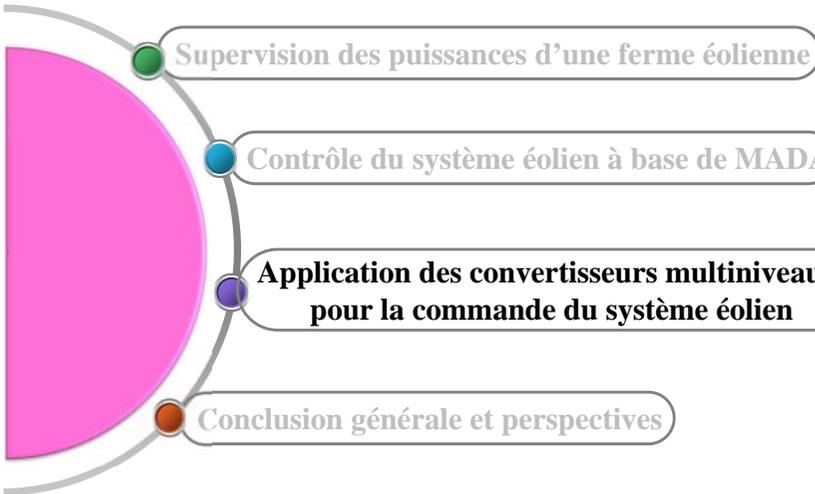
Domaine de fonctionnement



$$P_1 = S_{c\max} \sqrt{1 - \frac{Q_0^2}{S_{c\max}^2}}$$

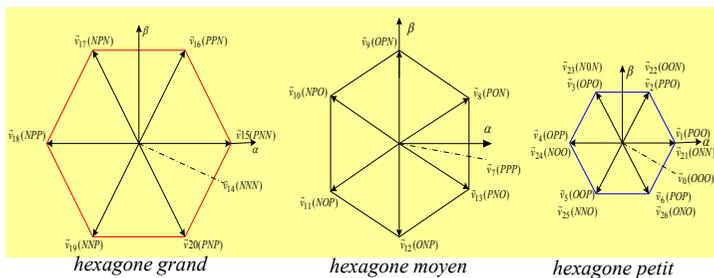
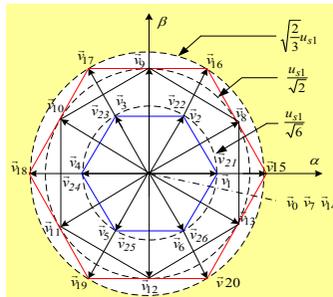
$$P_{1_global} = nP_1 = nS_{c\max} \sqrt{1 - \frac{Q_0^2}{S_{c\max}^2}}$$

$$P_{1n_global} = n^2 S_{c\max} \sqrt{1 - \frac{Q_0^2}{S_{c\max}^2}} \geq nP_{1_global}$$

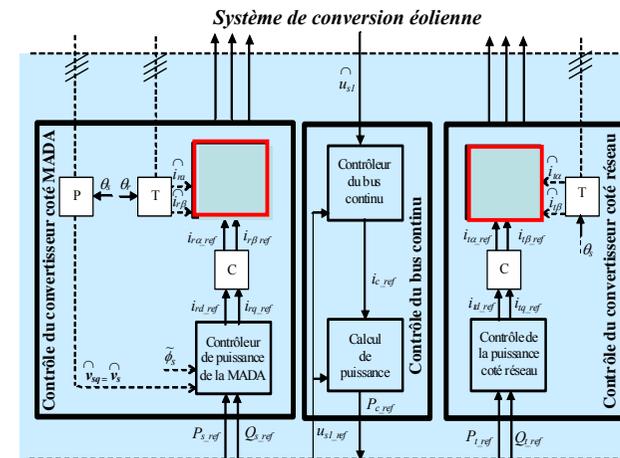


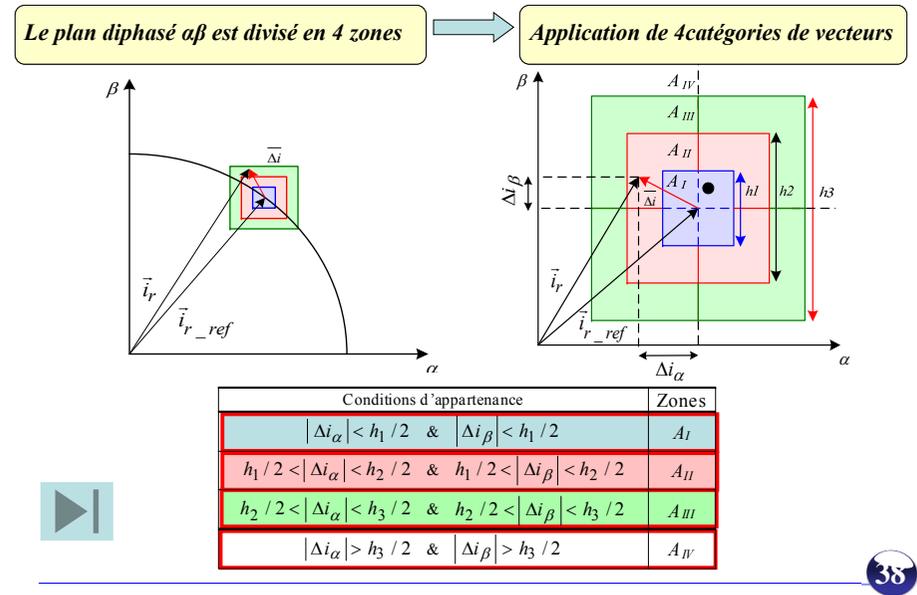
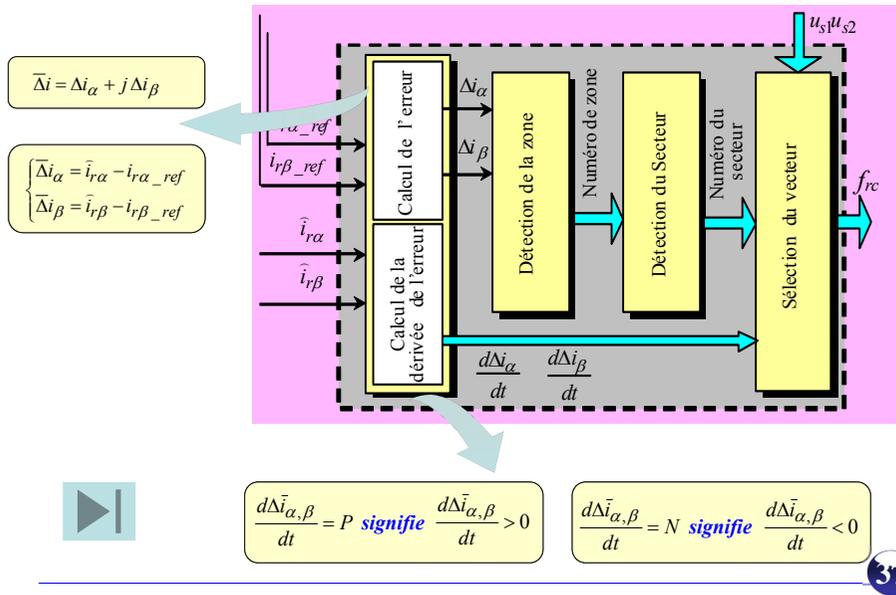
27 vecteurs dont 24 actifs et 4 nuls

03 hexagone (grand, moyen petit)

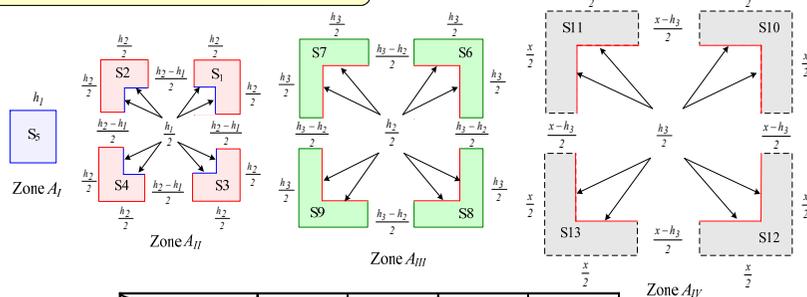


- 1- Commande vectorielle directe du courant basée sur l'Hystérésis à Zones Carrées (HZCA)
- 2- Commande vectorielle directe du courant basée sur l'Hystérésis à Zones Circulaires (HZCI)



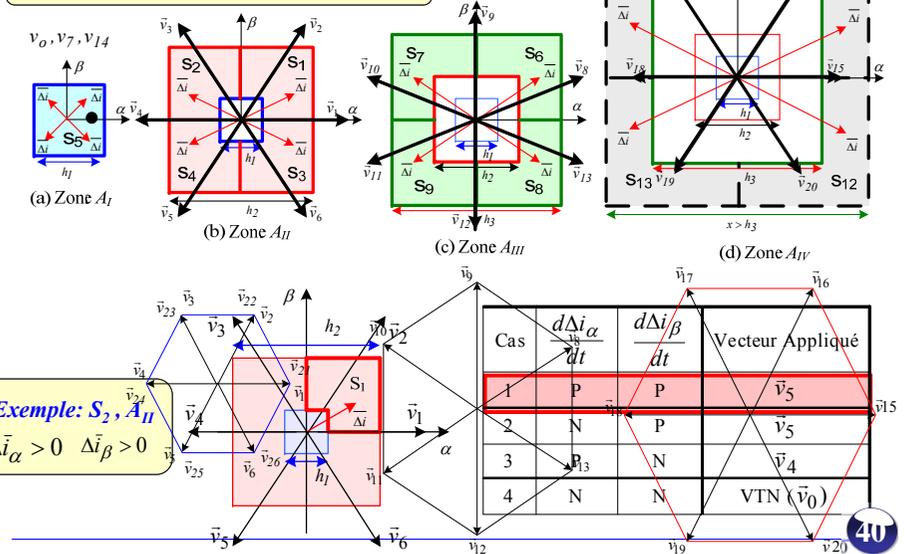


Chaque zone est subdivisée en 04 secteurs

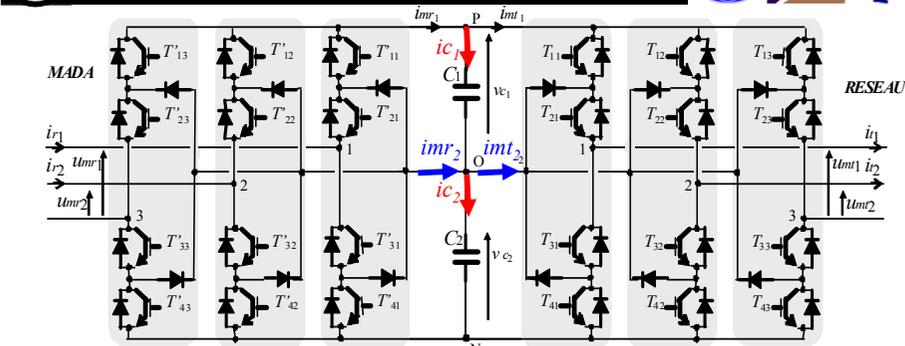


Zone		A_I	A_{II}	A_{III}	A_{IV}
Δi_α	Δi_β	S_5	S_1	S_6	S_{10}
+	+	S_5	S_1	S_6	S_{10}
-	+	S_5	S_2	S_7	S_{11}
+	-	S_5	S_3	S_8	S_{12}
-	-	S_5	S_4	S_9	S_{13}

Chaque zone est subdivisée en 04 secteurs



Equilibrage du diviseur capacitif



$$\frac{d(v_{c1} - v_{c2})}{dt} = \frac{1}{C} (i_{c1} - i_{c2}) = i_{mt2} - i_{mr2} = i_{d0}$$

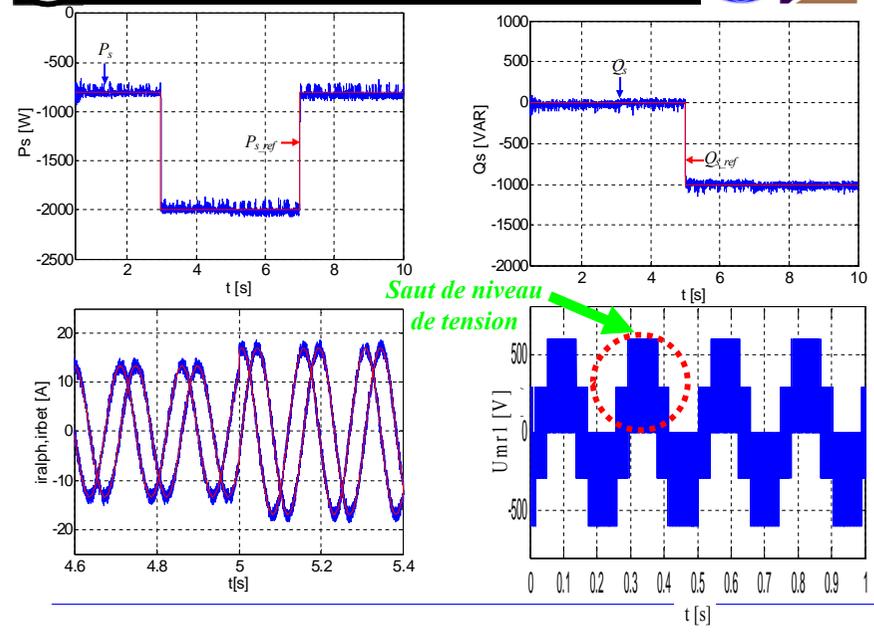
Utilisation des configurations redondantes

Vecteur petit ou moyen

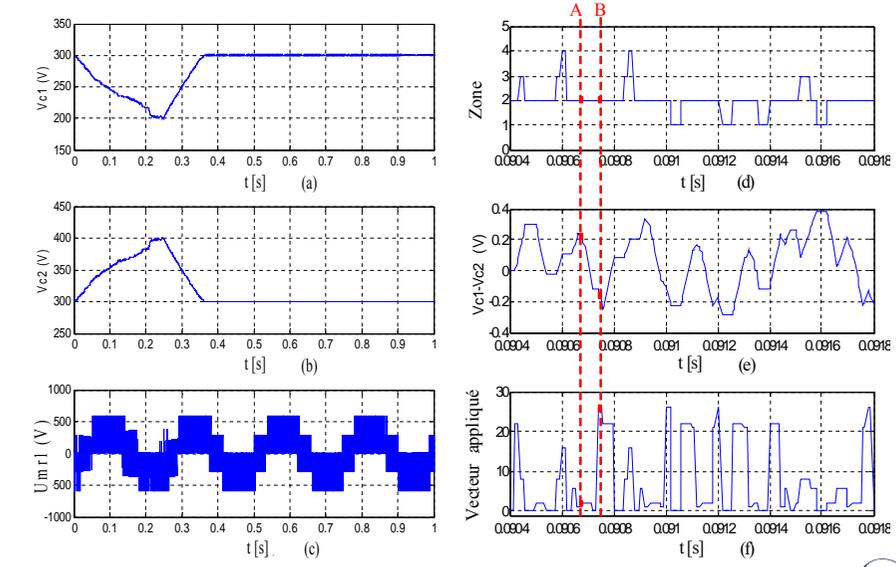
Vecteur	1 ou 4		3 ou 6		2 ou 5	
Courant	$i_{r1} < 0$	$i_{r1} > 0$	$i_{r2} < 0$	$i_{r2} > 0$	$(i_{r1} + i_{r2}) < 0$	$(i_{r1} + i_{r2}) > 0$
$\Delta u_{s1} > 0$	\vec{v}_{21}, \vec{v}_4	\vec{v}_1, \vec{v}_{24}	\vec{v}_{23}, \vec{v}_6	\vec{v}_3, \vec{v}_{26}	\vec{v}_5, \vec{v}_{22}	\vec{v}_2, \vec{v}_{25}
$\Delta u_{s1} < 0$	\vec{v}_1, \vec{v}_{24}	\vec{v}_{21}, \vec{v}_4	\vec{v}_3, \vec{v}_{26}	\vec{v}_{23}, \vec{v}_6	\vec{v}_2, \vec{v}_{25}	\vec{v}_5, \vec{v}_{22}

$i_{d0} \neq 0 \Rightarrow \Delta u_{s1} = (v_{c1} - v_{c2}) \neq 0$

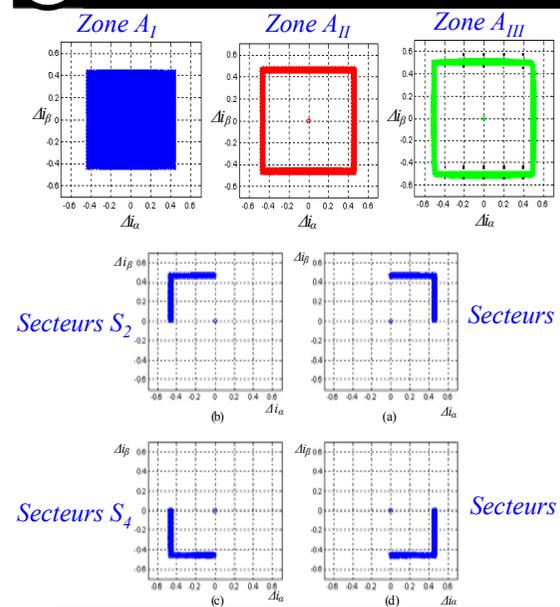
Résultats de simulation



Résultats de simulation



Résultats de simulation

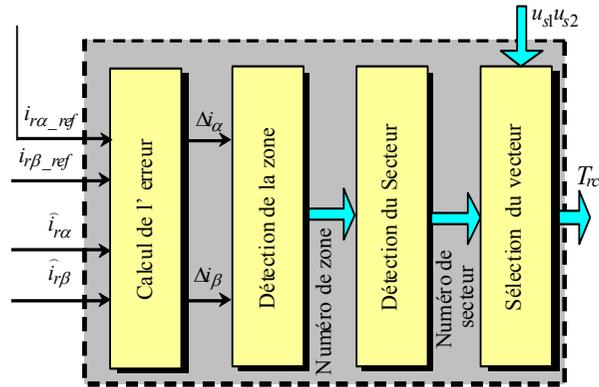


Mouvement de l'erreur dans les 3 zones A_I , A_{II} et A_{III}

Mouvement de l'erreur dans les 4 secteurs de la zone A_{II}

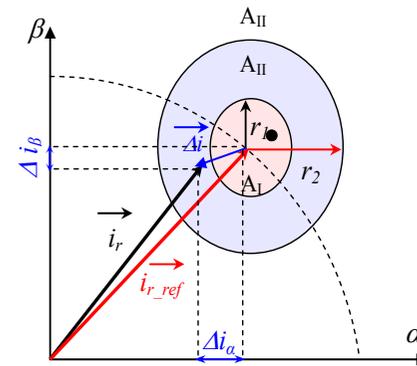
Principe

Limiter le mouvement du vecteur d'erreur du courant dans trois zones d'hystérésis de forme circulaire



Le plan diphasé $\alpha\beta$ est divisé en 3 zones

La détection de la zone est conditionnée par le mouvement de la pointe du vecteur d'erreur



Conditions	Zone
$\ \Delta i\ = \sqrt{\Delta i_\alpha^2 + \Delta i_\beta^2} < h_1$	A_I
$h_1 < \ \Delta i\ = \sqrt{\Delta i_\alpha^2 + \Delta i_\beta^2} < h_1 + h_2$	A_{II}
$\ \Delta i\ = \sqrt{\Delta i_\alpha^2 + \Delta i_\beta^2} > h_1 + h_2$	A_{III}

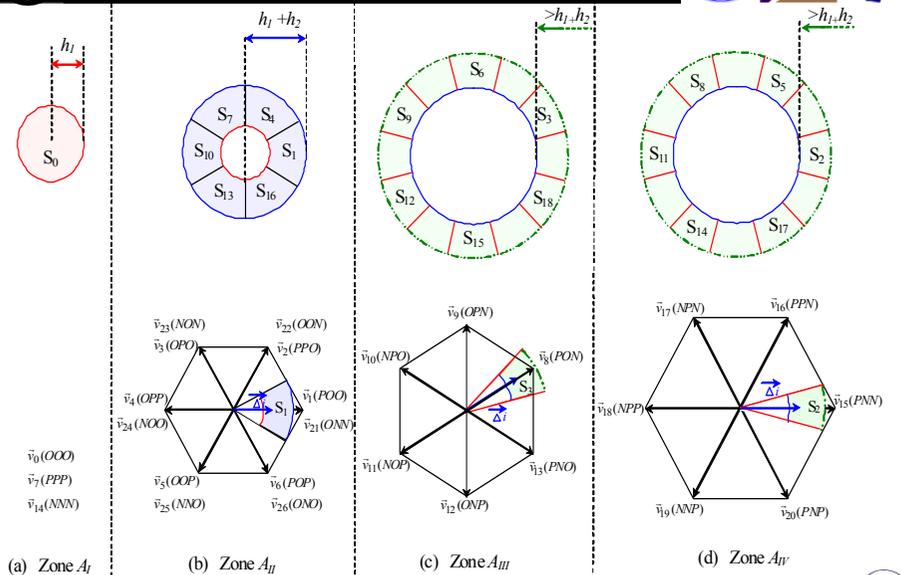
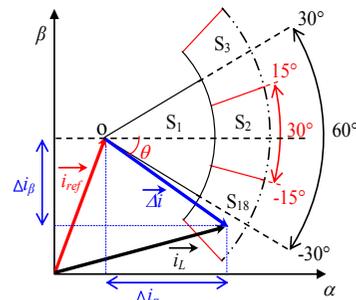
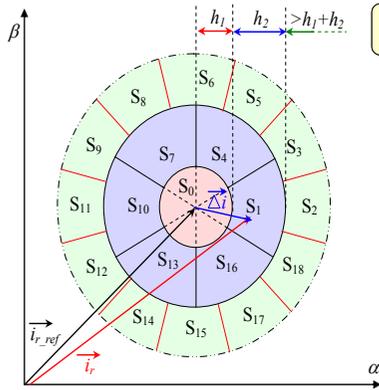


La zone A_{II} est subdivisée en six secteurs
La zone A_{III} est scindée en douze secteurs

Condition d'appartenance de Δi à un secteur

Zone d'appartenance

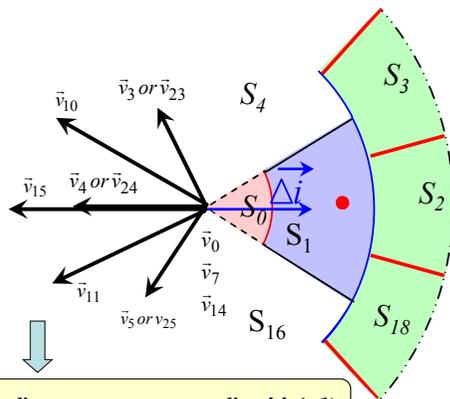
$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta i_\beta}{\Delta i_\alpha}\right)$$



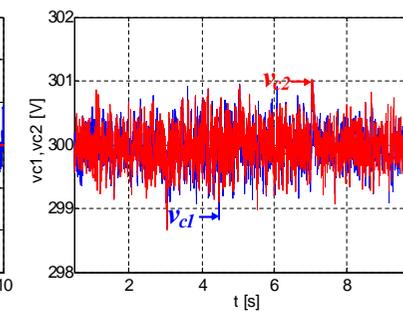
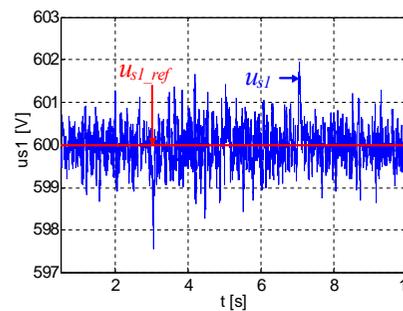
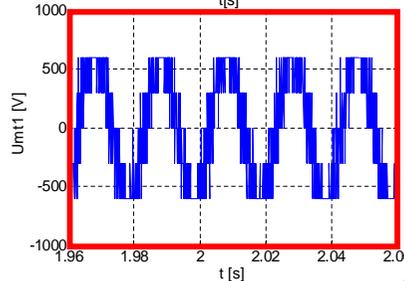
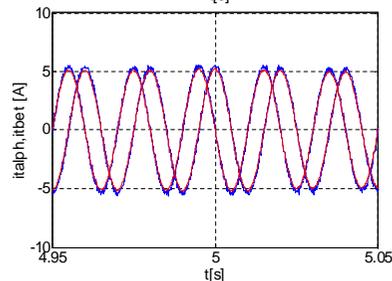
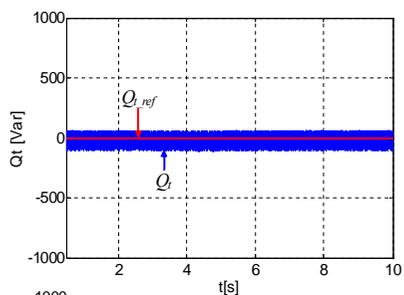
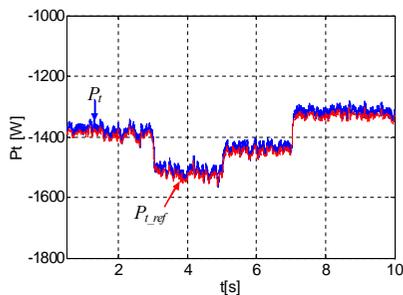
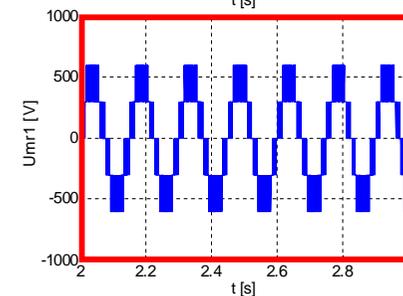
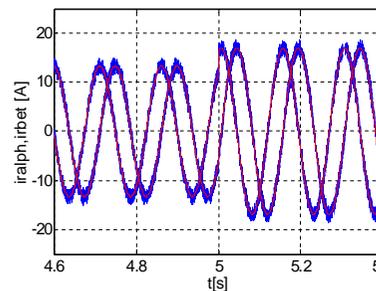
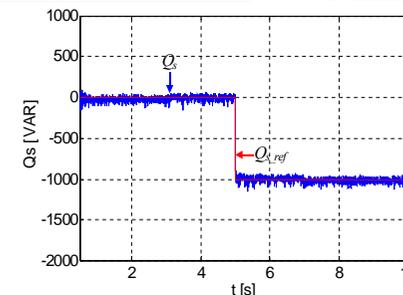
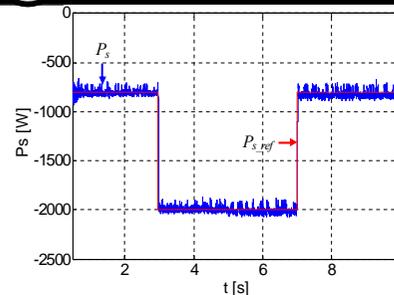
Exemple:

La pointe $\vec{\Delta i}$ est située dans le secteur S_j \rightarrow $\vec{v}_4(OPP)$ ou $v_{24}(NOO)$

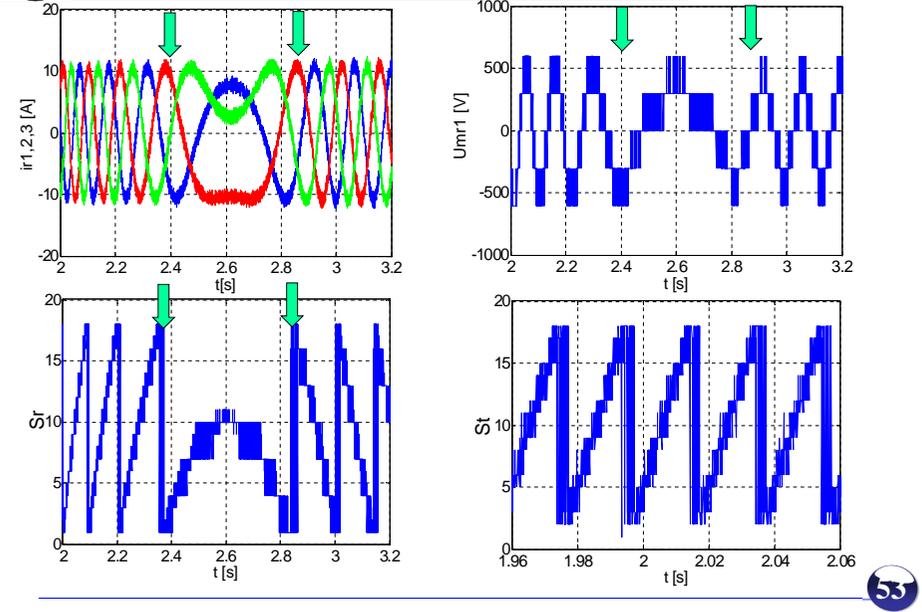
Secteur	Vecteur appliqué
S_1	$\vec{v}_4(OPP)$ ou $v_{24}(NOO)$
S_2	$\vec{v}_{18}(NPP)$ ou \vec{v}_4
S_3	$\vec{v}_{11}(NOP)$ ou \vec{v}_{24}
S_{18}	$\vec{v}_{10}(NPO)$
S_4	$\vec{v}_5(OOP)$ ou $\vec{v}_{25}(NNO)$
S_{16}	$\vec{v}_3(OPO)$ ou $\vec{v}_{23}(NON)$
S_0	VTN



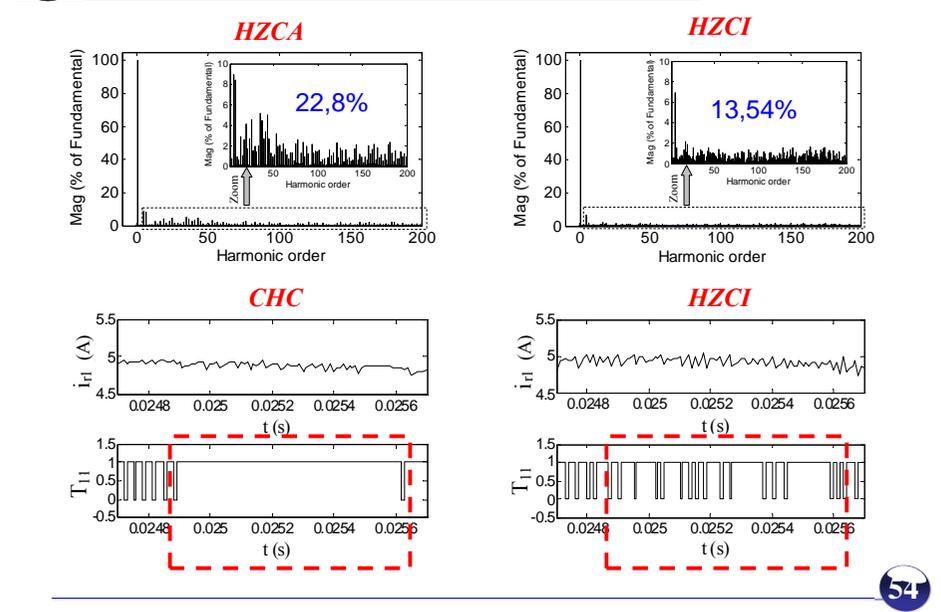
le vecteur appliqué à (t) est toujours adjacent au vecteur appliqué à (t-1)



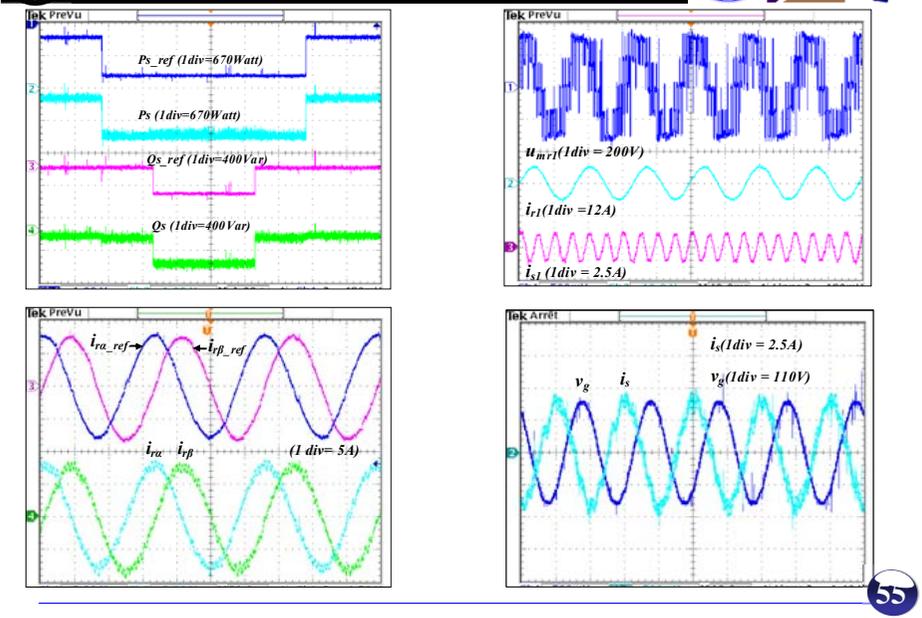
Résultats de simulation de la transition entre les deux modes de fonctionnements



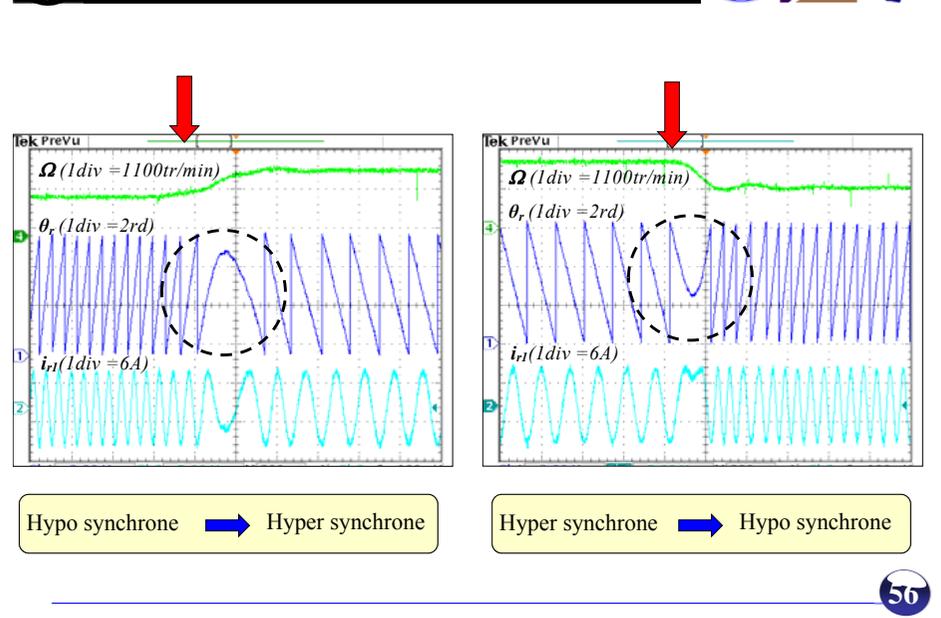
Résultats de simulation pour la comparaison entre HZCI et HZCA et l'hystérésis conventionnel



Résultats expérimentaux du convertisseur coté MADA

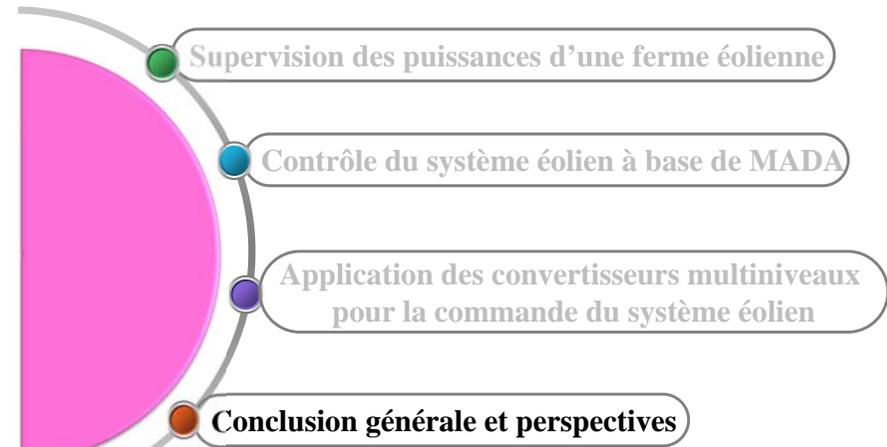
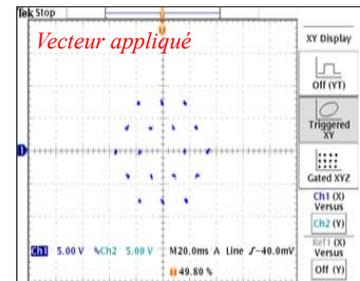
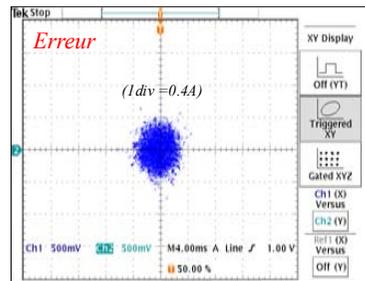
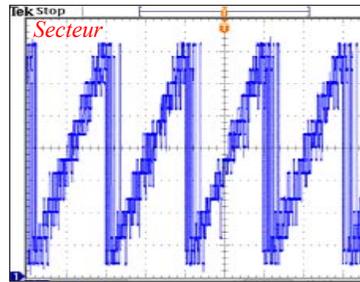
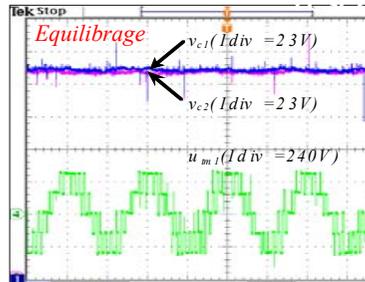


Résultats expérimentaux de la transition entre les deux modes de fonctionnements



Hypo synchrones → Hyper synchrones

Hyper synchrones → Hypo synchrones



Deux objectifs principaux

La modélisation et la commande en puissance d'un système éolien

Les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été établis
L'ensemble de la partie mécanique du système éolien a été émulé
Deux stratégies utilisant le contrôle vectoriel MPPT et commande découplée des puissances

Utilisation des convertisseurs NPC à trois niveaux

- augmenter la puissance fournie au réseau
- réduisant le contenu harmonique des courants injectés

Deux stratégies de contrôle direct du courant basées sur l'hystérésis vectoriel (HZCA & HZCI)

- (HZCA)**
- contrôler les puissances active et réactive et équilibrer les tensions du diviseur capacitif
 - les tensions de sortie du convertisseur NPC présentent des sauts de niveaux à cause de la non utilisation des vecteurs adjacents

- (HZCI)**
- contrôler les puissances active et réactive et équilibrer les tensions du diviseur capacitif
 - Amélioration des formes d'ondes des tensions de sortie du convertisseur NPC à trois niveaux en utilisant les vecteur adjacents

II- la supervision et la gestion des puissances d'une ferme éolienne

Supervision centrale

trois algorithmes de supervision
L'algorithme basé sur la distribution proportionnelle des puissances assure un fonctionnement sans saturation des éoliennes de la ferme
-il attribue les références les plus élevées aux l'éoliennes ayant la plus grande capacité de production.
cet algorithme nécessite l'estimation de la puissance aérodynamique au niveau de chaque éolienne

une analyse des puissances échangées entre le réseau et l'éolienne
identifier le diagramme (P,Q) du générateur éolien et connaître la limite de compensation du réactif

Gestion locale du réactif

coordonner la répartition des références de la puissance réactive entre le stator de la MADA et le convertisseur coté réseau pour trois modes
pouvoir de compensation du réactif même en mode défaut grâce à l'intervention du convertisseur coté réseau
(MPPT et delta) le convertisseur du coté réseau participe avec une fraction de sa capacité maximale de production à la gestion du réactif



Perspectives



-Intégration du stockage pour le lissage de la puissance active injectée dans le réseau électrique, et également pour la contribution au réglage de la fréquence

-Elaboration des algorithmes basés sur l'intelligence artificielle pour la prédiction préalable de la puissance aérodynamique disponible au niveau de chaque éolienne de la ferme.

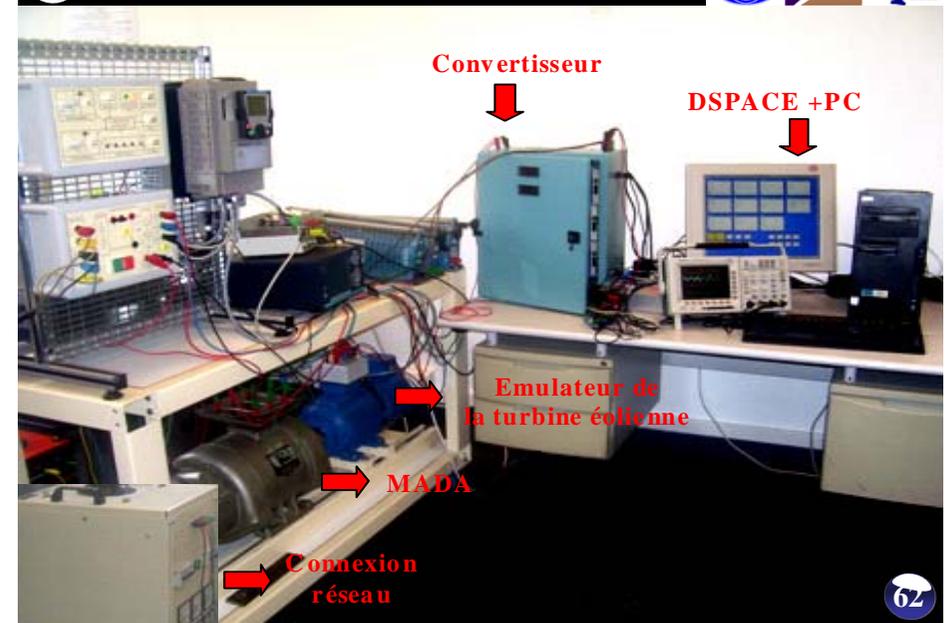
faciliter énormément l'implémentation des algorithmes de supervision centralisée (PI et distribution proportionnel)

-Mise en place d'une coordination entre les fermes éoliennes et les autres producteurs pour contribuer au réglage de la fréquence, et au réglage de la tension.

61



Photographie du banc expérimental à l'EC-Lille



62



Photographie du banc expérimental à l'EMP-Alger



63



Production scientifique



Publications internationales

[J1] **T. Ghennam**, EM. Berkouk, B. Francois, "A Novel Space Vector Current Control Based on Circular Hysteresis Areas of a Three-Phase Neutral-Point-Clamped Inverter", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. Vol 57, no 8, pp 2669-2678, 2010, (Impact factor = 5,468 en 2009).

[J2] **T. Ghennam**, EM. Berkouk, "Back-to-back three-level converter controlled by a novel space-vector hysteresis current control for wind conversion systems", *Electric Power System Research Journal, Elsevier*, Vol 10, no 5, 2010, (Impact factor = 1,259 en 2009).

[J3] **T. Ghennam**, E.M. Berkouk, B. Francois, "A Vector Hysteresis Current Control Applied on Three-Level Inverter. Application to the Active and Reactive Power Control of Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine", *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, ISSN 1827-6660, Vol. 2 no 2 March- April, Journal Citation Reports/Science Edition - ISI Thomson 2007.

64



Conférences internationales

- [C1] **T. Ghennam**, B. Francois, E.M. Berkouk, “Local supervisory algorithm for reactive power dispatching of a wind farm”, *13th European conference on power electronics and applications (EPE 2009)*, Barcelona, Spain, 5-8 September 2009.
- [C2] **T. Ghennam**, E.M. Berkouk, B. Francois, “Modeling and Control of a Doubly Fed Induction Generator Based Wind Conversion System”, *IEEE International conference on power engineering, energy and electrical drives (POWERENG 2009)*, Lisbon, Portugal, 18-20 Mach 2009.
- [C3] **T. Ghennam**, E.M. Berkouk, B. Francois, “DC-link Voltage Balancing Algorithm Using a Space-Vector Hysteresis Current Control for Three-level VSI Applied for Wind Conversion System”, *12th European conference on power electronics and applications (EPE 2007)*, Aalborg, Denmark, 02-05 September 2007.
- [C4] A. Beugniez, **T. Ghennam**, B. François, E. M. Berkouk, B. Robyns, “Centralized supervision of reactive power generation for a wind farm”, *12th European conference on power electronics and applications (EPE 2007)*, Aalborg, Denmark 02-05, September 2007.



- [C5] **T. Ghennam**, E.M. Berkouk, B. Francois, “Three level inverter controlled by means of hysteresis current control. Application to back to back structure”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2007)*, Vigo, Spain, 04-07 June 2007.
- [C6] **T. Ghennam**, E.M. Berkouk, B. Francois, K. Aliouane, “A New Space-Vector Based Hysteresis Current Control Applied on Three-Level Inverter to Control Active and Reactive Powers of Wind Generator”, *International conference on power engineering, energy and Electrical drives (POWERENG 2007)*, Setubal, Portugal, 12-14 April 2007.

