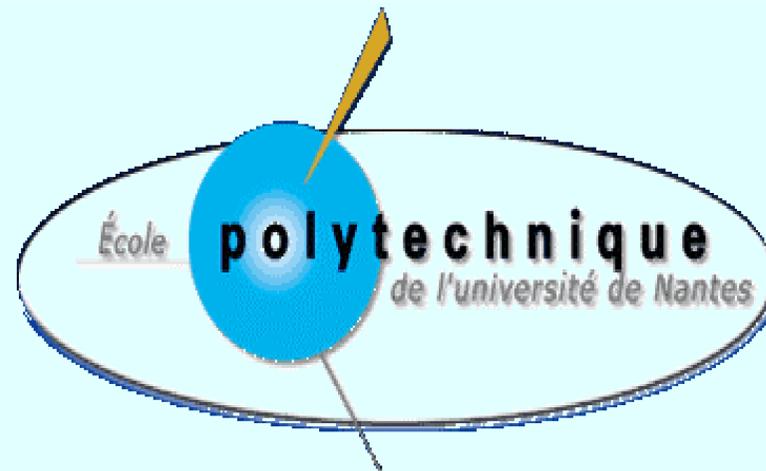


# Etude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA)

Equipe : Conversion et qualité de l'énergie

M. Machmoum, F. Poitiers, L. Moreau et M.E. Zaïm, R. Le Doeuff

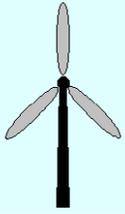
LARGE-GE44, Bd de l'Université, BP 406, 44602 Saint Nazaire Cedex  
email : mohamed.machmoum@polytech.univ-nantes.fr



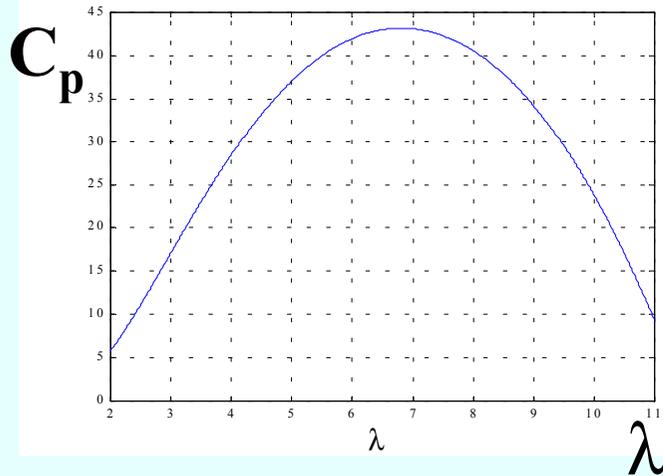
# Plan



- Rappels sur la conversion de l'énergie éolienne : objectifs et génératrices utilisées
- Machine asynchrone à cage : fonctionnement en autonome
- Machine asynchrone à cage à vitesse variable
- Machine asynchrone à double alimentation connectée sur le réseau.
- Conclusions et Perspectives



# Rappels sur la conversion d'énergie par éolienne



Courbe  $C_p(\lambda)$  (spécifique à chaque éolienne).

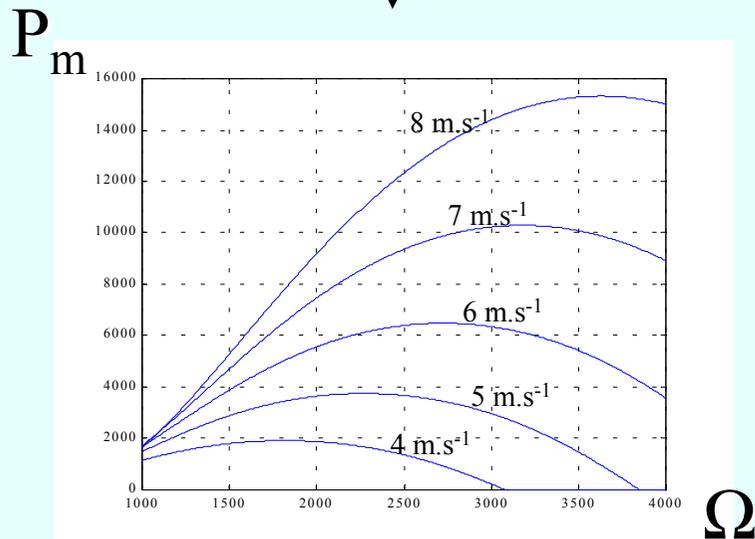
$C_p$  : coefficient de puissance

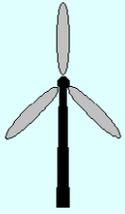
$\lambda$  : Rapport d'avance (vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent).

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3$$

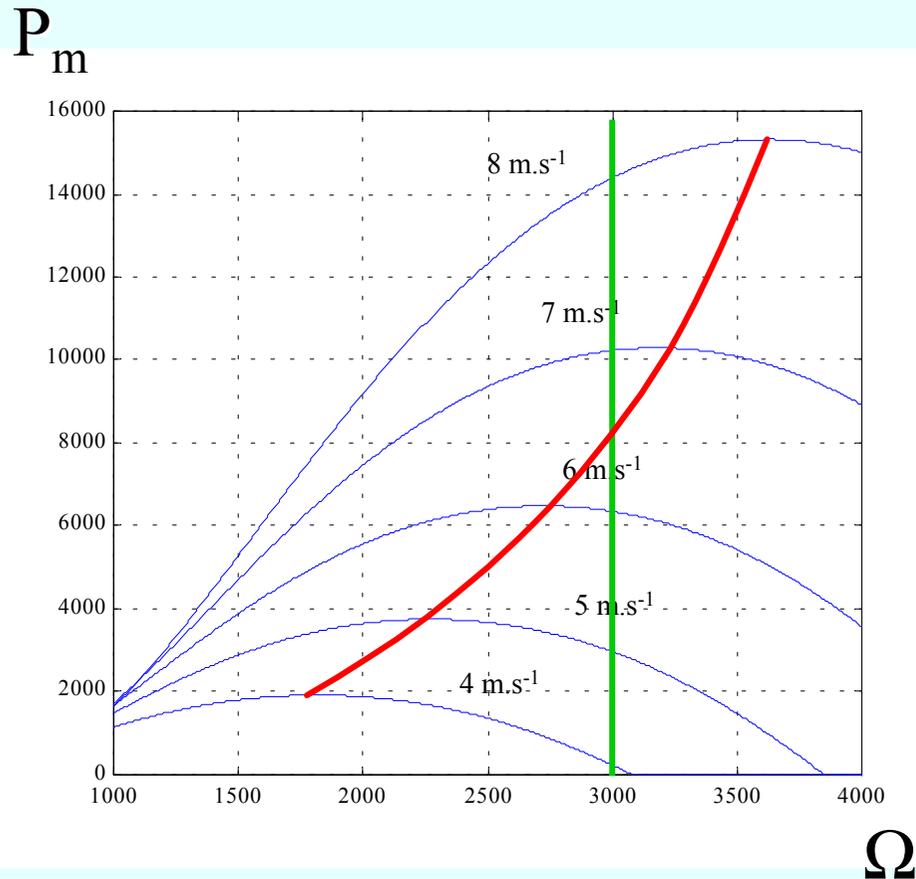
Dimension  
Densité de l'air  $\rho$   
d'une pale  $R$   
Vitesse du vent  $V_1$

Puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent.



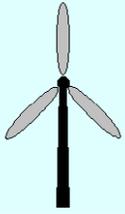


# Objectifs de cette conversion

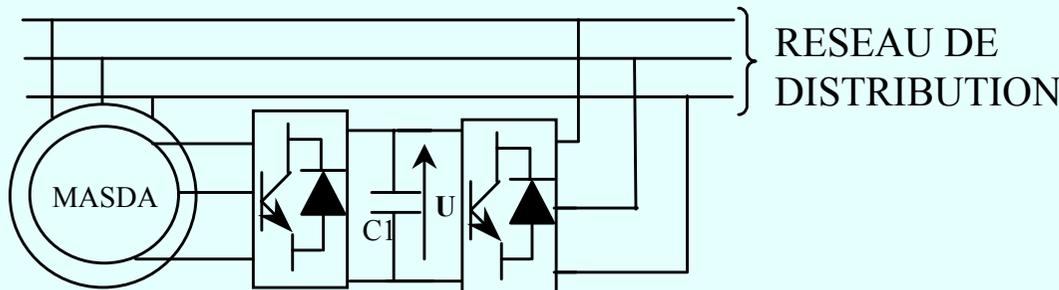
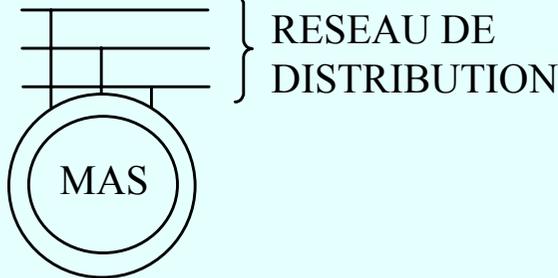
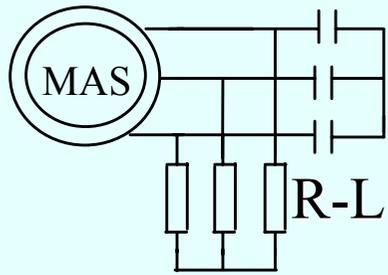


— En vitesse fixe : le maximum théorique n'est pas atteint

— En **vitesse variable** : La puissance maximale est exploitée pour toutes les vitesses du vent (régulation de  $\lambda$  optimal pour avoir  $C_p$  maximum)



# Génératrices utilisées



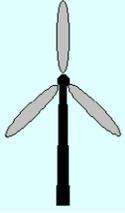
Machine asynchrone en autonome.

\* Nécessité de capacités d'auto-excitation pour magnétiser la machine.

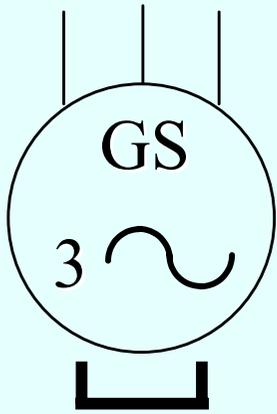
Machine asynchrone à cage débitant sur un réseau.

\* Obligation de fonctionner au voisinage du synchronisme.

Autorise le fonctionnement à vitesse variable ( **MAS** ou **MADA** ).

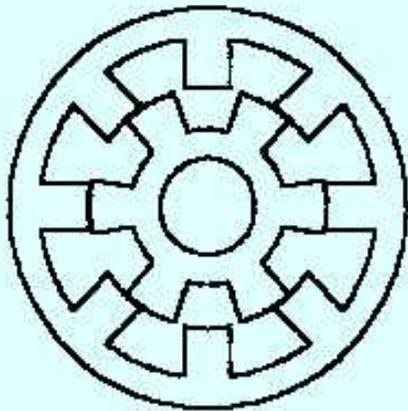


# Génératrices utilisées



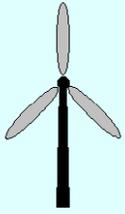
Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

\* bon rendement, faibles puissances, adaptée aux faibles vitesses mais prix élevé.

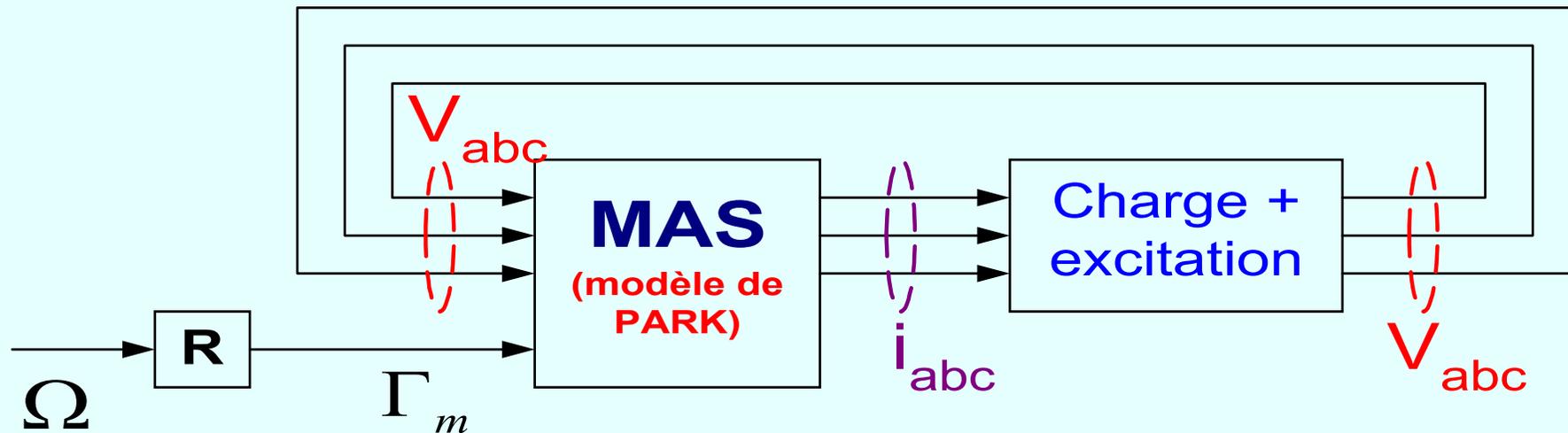
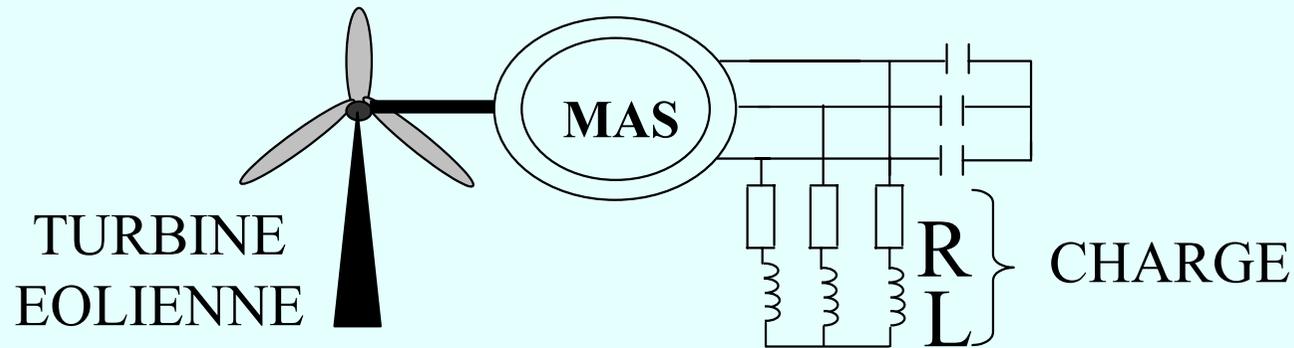


Machine à réluctance variable (MRV) permettant de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse.

\* Etudes actuellement en cours.



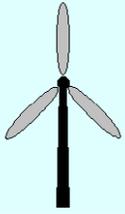
# Machine asynchrone à cage en fonctionnement autonome



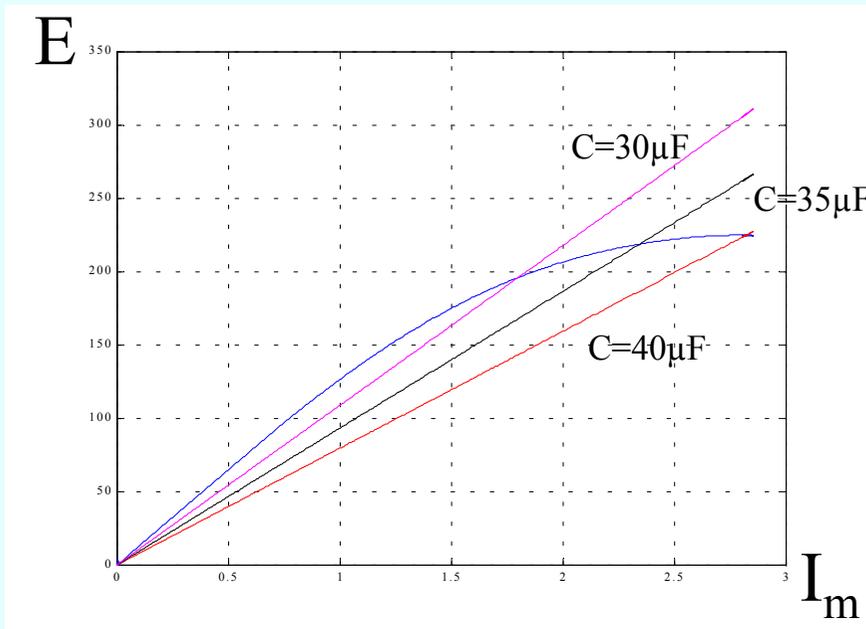
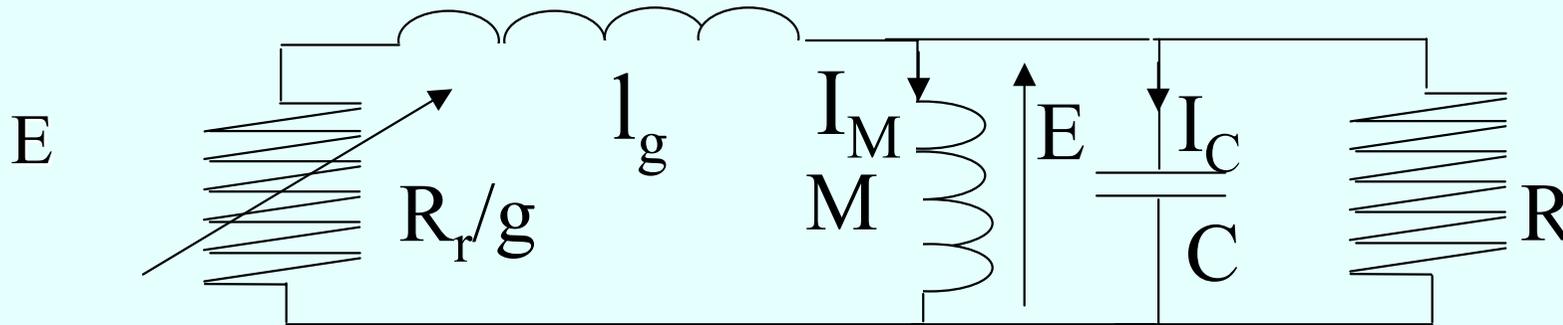
Modèle diphasé associé à une transformation étoile-triangle côté charge

→ méthode simple d'étude de régimes déséquilibrés, gain en temps de calcul et modèles indépendants machine - charge/excitation.

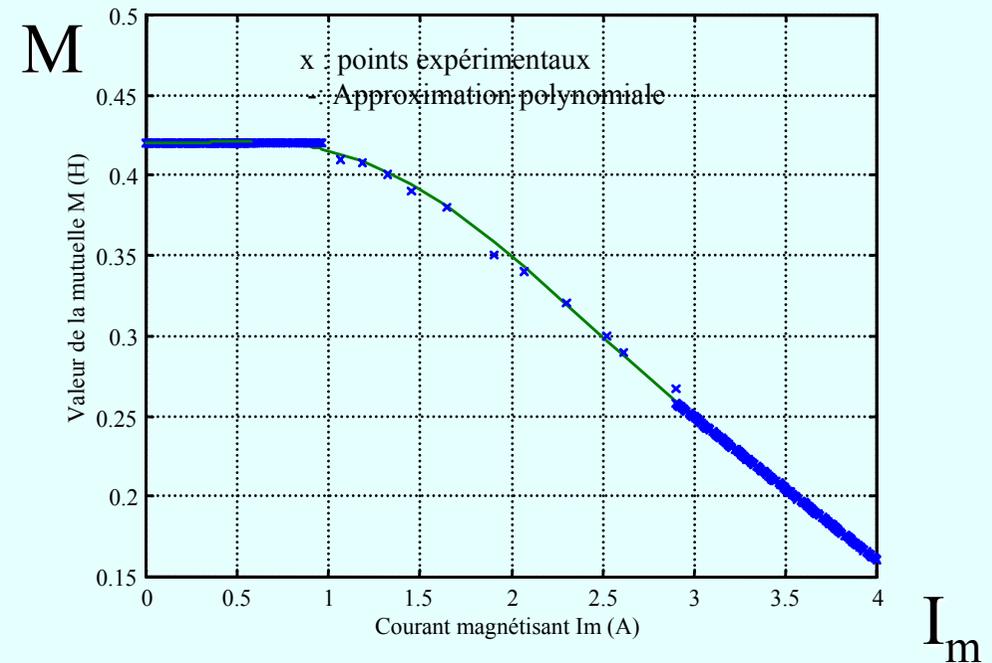
**Paramètres** : Machine LS, 3 kW,  $p=1$ , 220/380 V,  $J=0.117 \text{ kg.m}^2$ ,  $f=5.10^{-3} \text{ N.m.s}^{-1}$



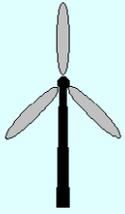
# Machine asynchrone à cage en fonctionnement autonome



Points de fonctionnement pour différentes valeurs de capacités

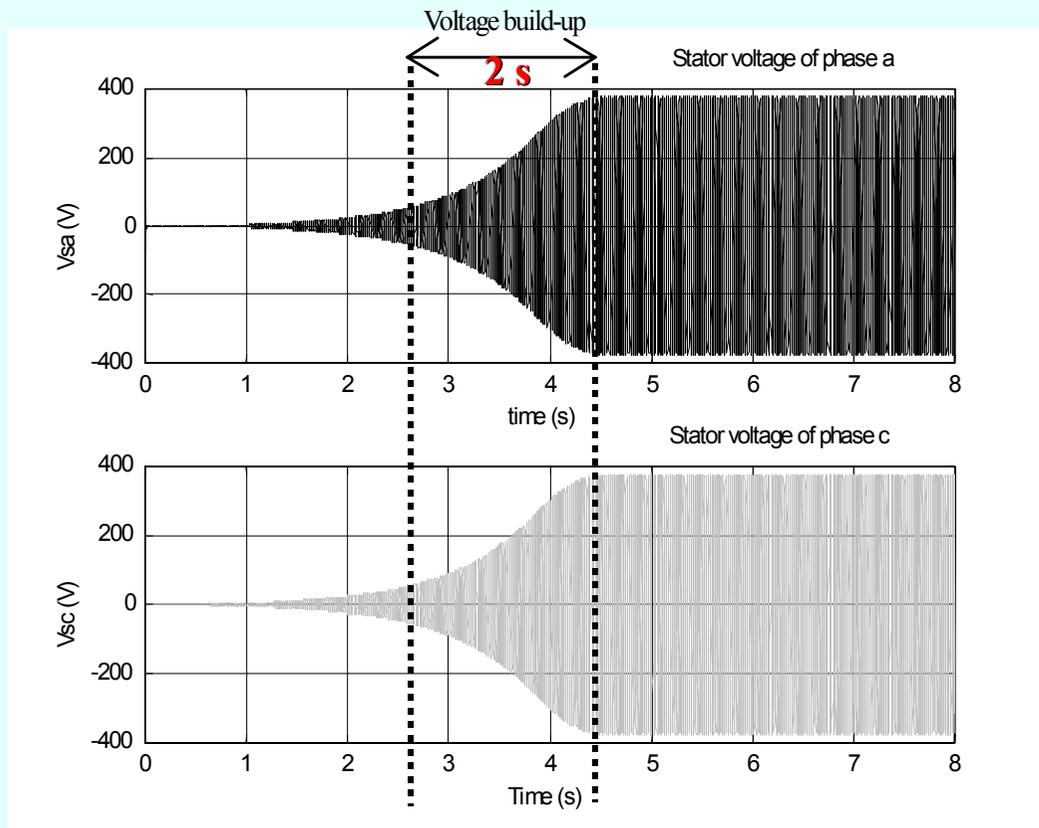


Prise en compte de la saturation

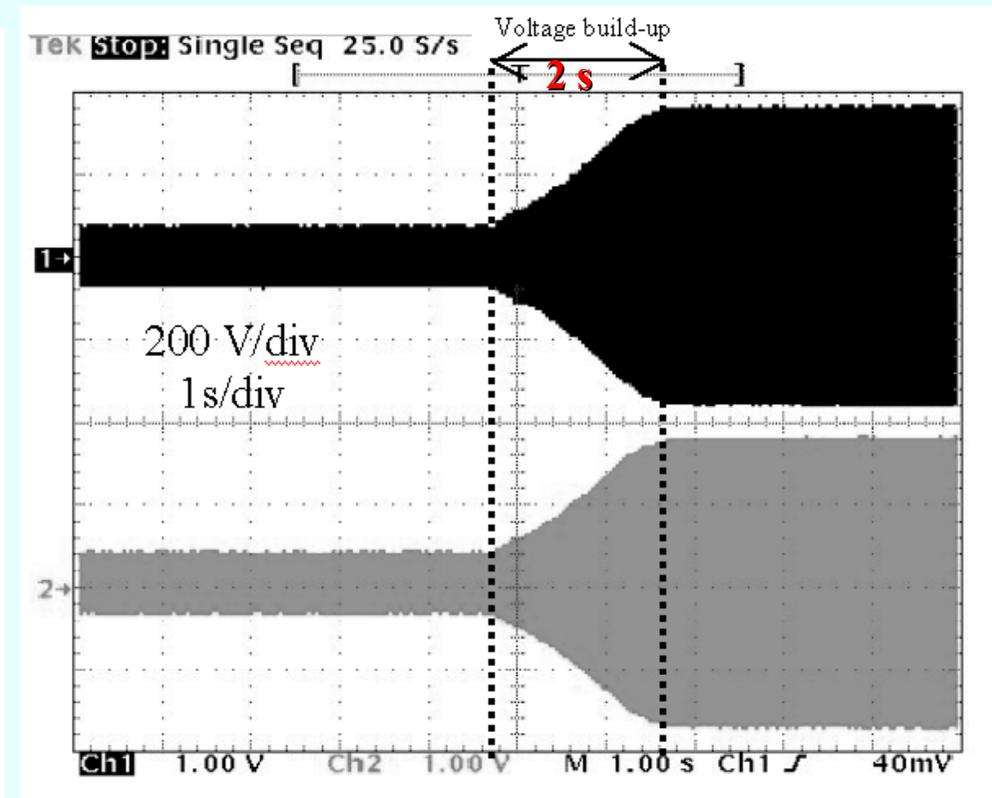


# Machine asynchrone à cage en fonctionnement autonome

## Tensions stator des phases a et c

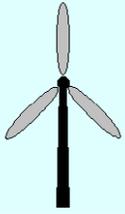


Simulation

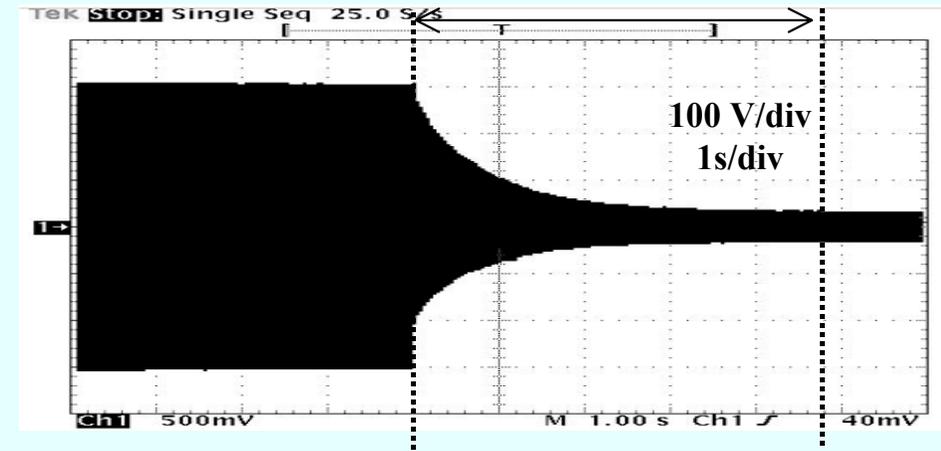
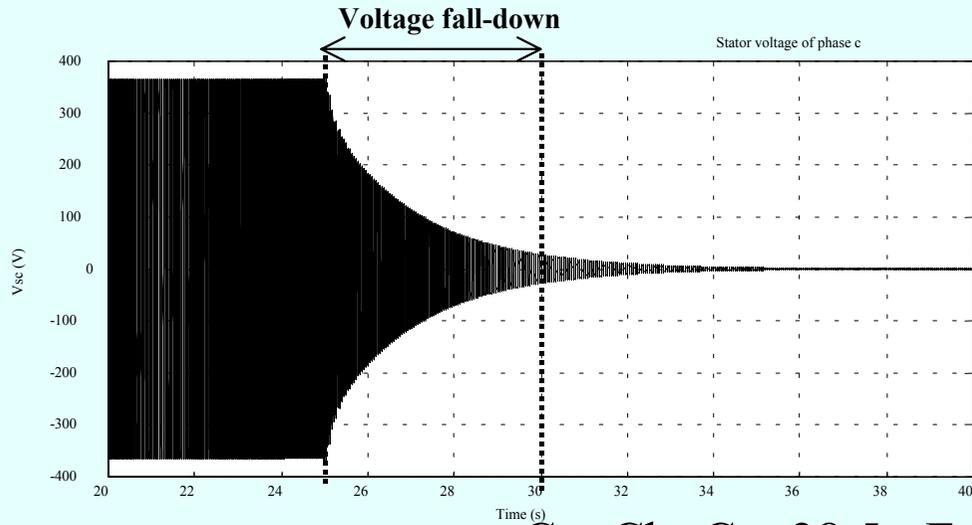


Relevé expérimental

Processus d'amorçage en régime équilibré



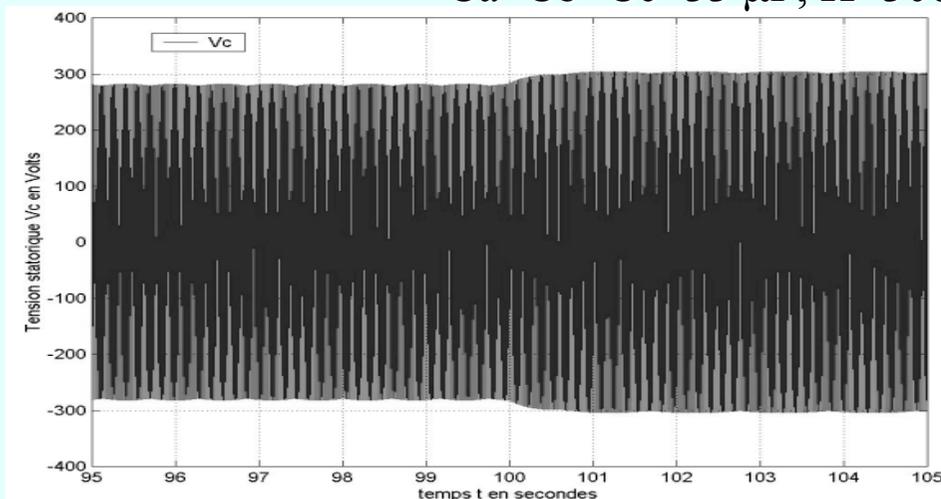
# Machine asynchrone à cage en fonctionnement autonome



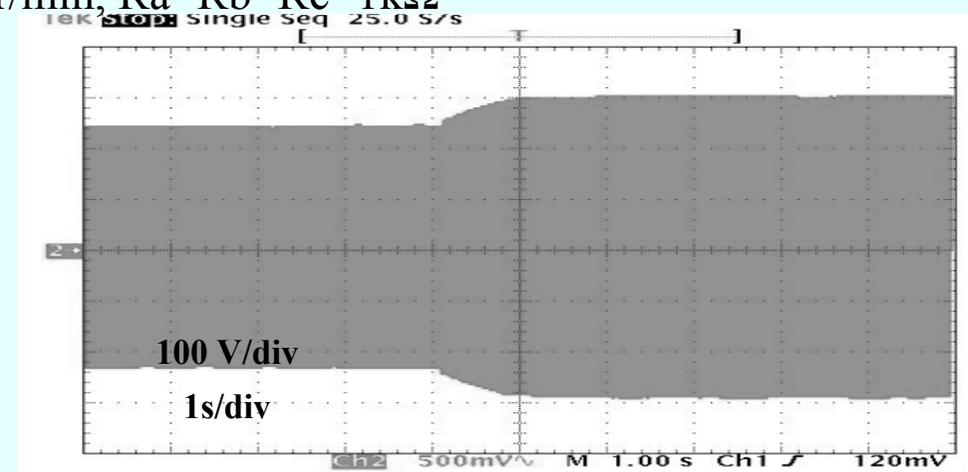
$C_a=C_b=C_c=28.5 \mu\text{F}$ ,  $\Omega=3000 \text{ tr/min}$ , essai à vide

**Déconnexion brusque d'un condensateur ou de la charge**

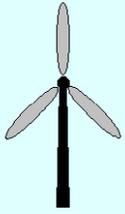
$C_a=C_b=C_c=33 \mu\text{F}$ ,  $\Omega=3000 \text{ tr/min}$ ,  $R_a=R_b=R_c=1\text{k}\Omega$



Simulation

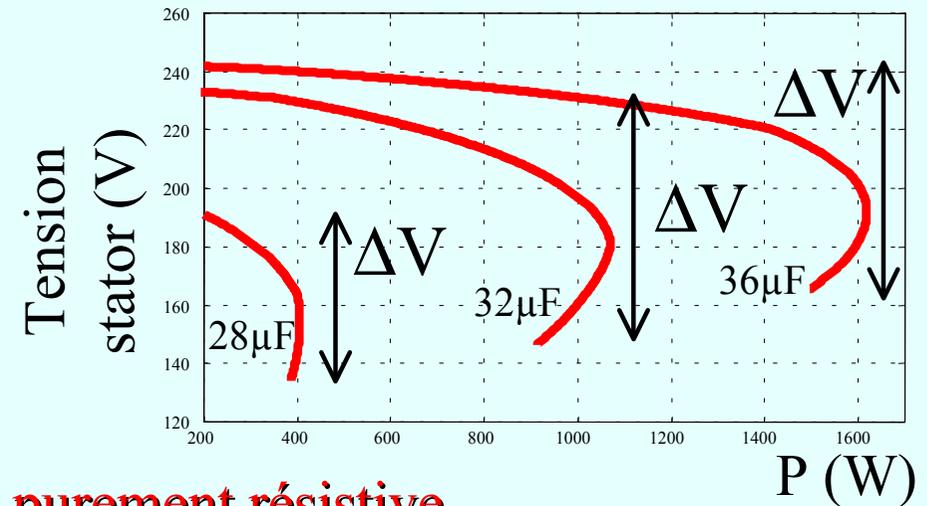


Relevé expérimental

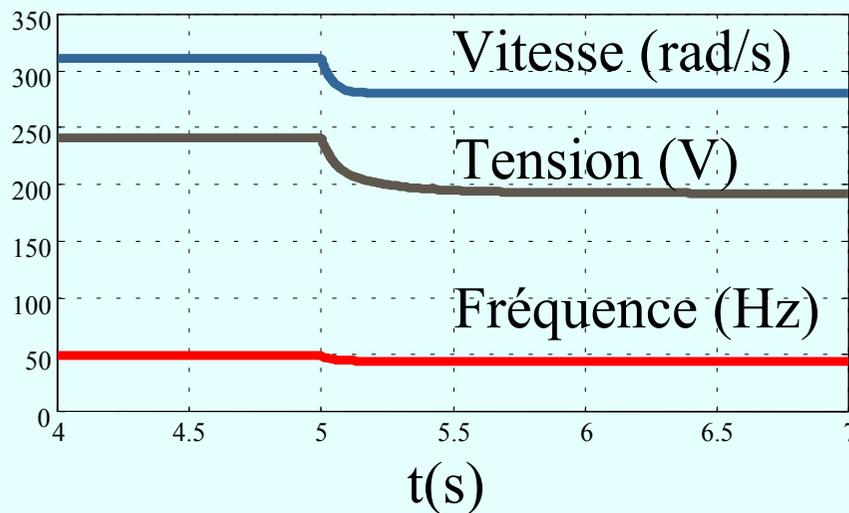


# Machine asynchrone à cage en fonctionnement autonome

C=28 $\mu$ F	C=32 $\mu$ F	C=36 $\mu$ F
$V_{no\ load}=199.4V$	$V_{no\ load}=236.5V$	$V_{no\ load}=243.9V$
$F_{no\ load}=49.79Hz$	$F_{no\ load}=49.78Hz$	$F_{no\ load}=49.74Hz$
$R_{min}=140\Omega$	$R_{min}=70\Omega$	$R_{min}=55\Omega$
$\Delta V=-74.4V$	$\Delta V=-101.5V$	$\Delta V=-95.1V$
$\Delta F=-0.7Hz$	$\Delta F=-1.37Hz$	$\Delta F=-2.22Hz$



## Influence d'une charge purement résistive

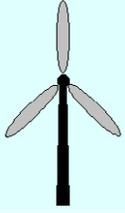


## Influence d'un impact de vitesse

## BILAN

- \* Impossibilités d'utiliser des charges exigeantes en tension et fréquence.
- \* Risque de démagnétisation.
- \* Fonctionnement sur une plage de vitesse restreinte.

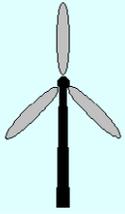
→ autres solutions !



# Vitesse variable

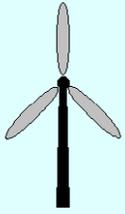


- **Avantages de la vitesse variable**
  - Optimisation de l'énergie captée
  - Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée sur le réseau.
- **Inconvénients de la vitesse variable**
  - Utilisation de machines spéciales
  - Convertisseur de puissance « complexe »



# Génératrice asynchrone à vitesse variable

- nécessité d'utiliser un convertisseur de fréquence (ac/dc dc/ac)
- ac/dc
  - redresseur à diodes associé à un convertisseur dc/dc (machines synchrones)
  - redresseur à MLI (machines asynchrones)
- gestion du transfert de puissance entre le redresseur à MLI et l'onduleur (régulation du bus continu) et le placement au point de puissance optimum de l'éolienne.
  - **2 approches possibles** : approche source de courant ou approche source de tension.

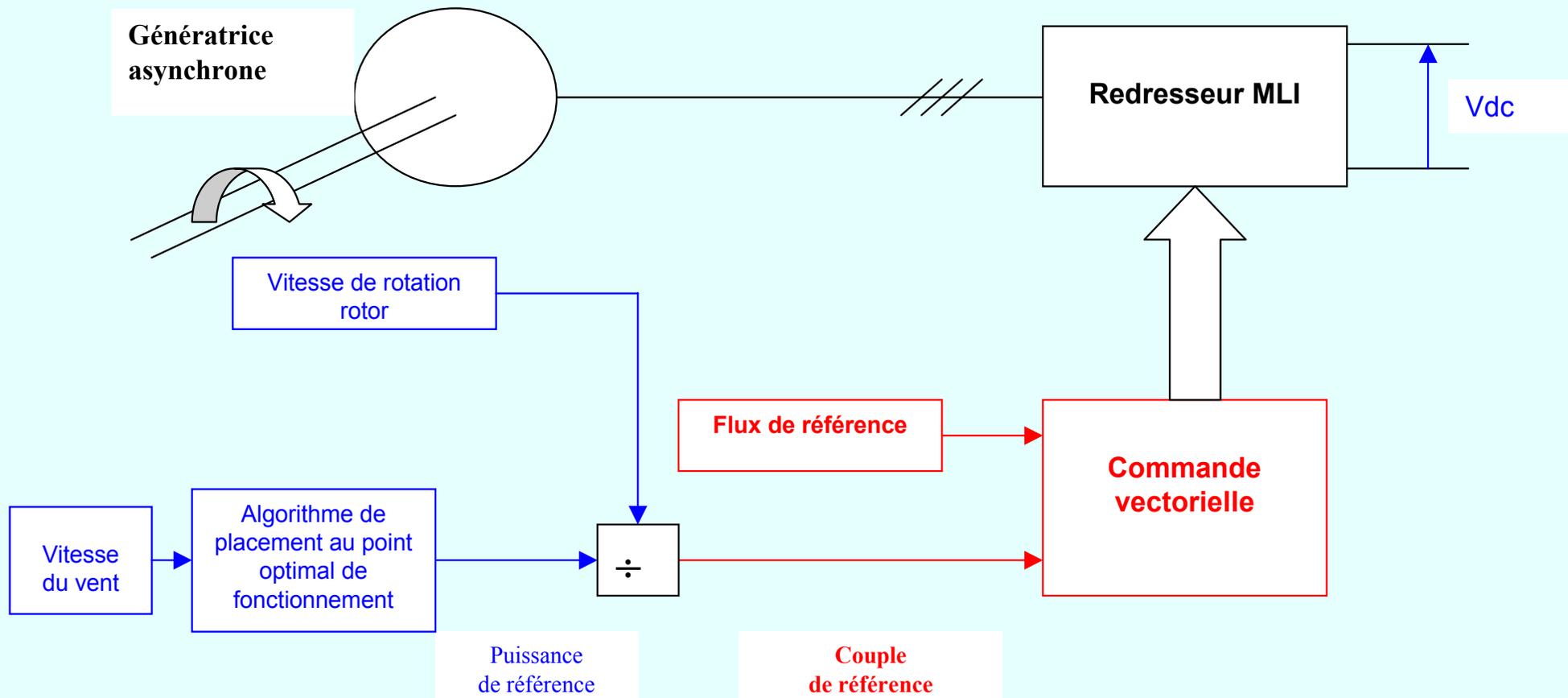


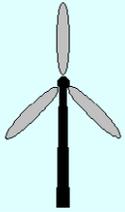
# MAS associée à un redresseur MLI

## Régulation de Puissance (1)

- $V_{dc}$  régulée par l'onduleur, le redresseur fixe le couple
- Commande vectorielle de la MAS sur modèle diphasé :

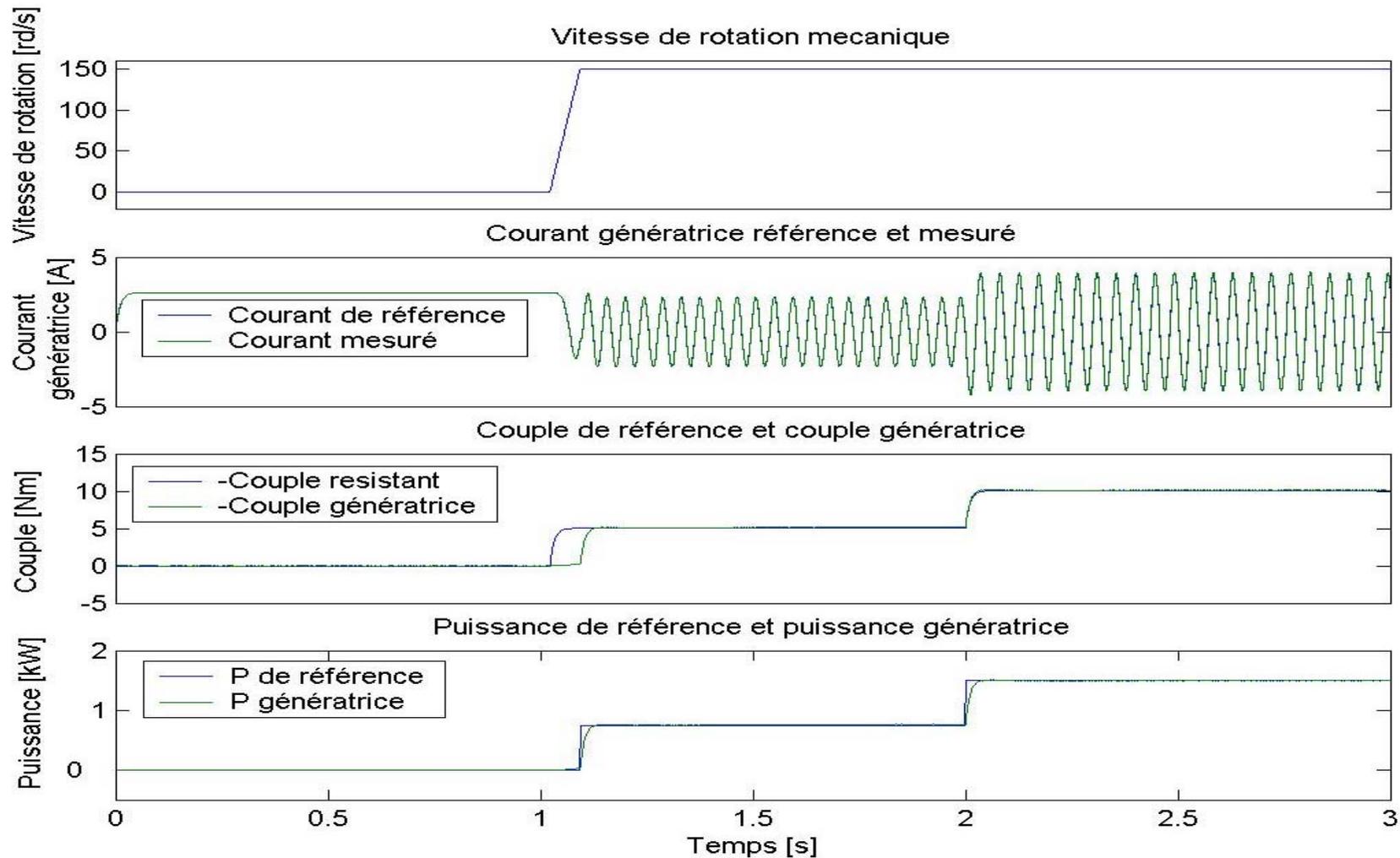
$$C_{ref} = P_{ref} / \Omega_{rotor} \text{ et } \Psi_{ref} \text{ constant}$$

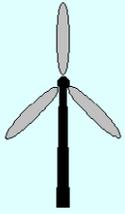




# MAS associée à un redresseur MLI

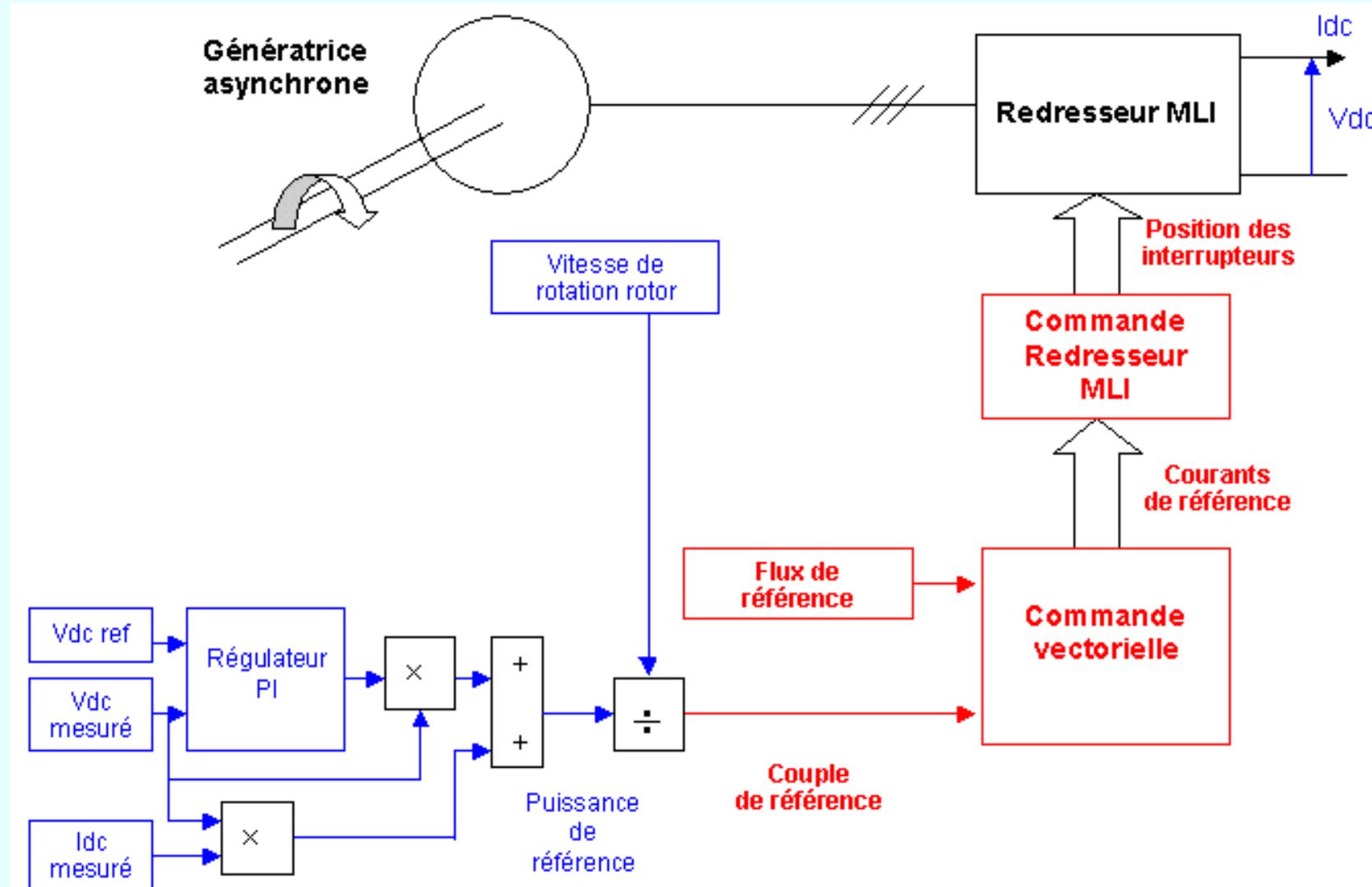
## Régulation de Puissance (2)

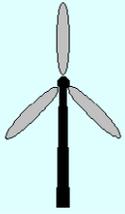




# MAS associée à un redresseur MLI

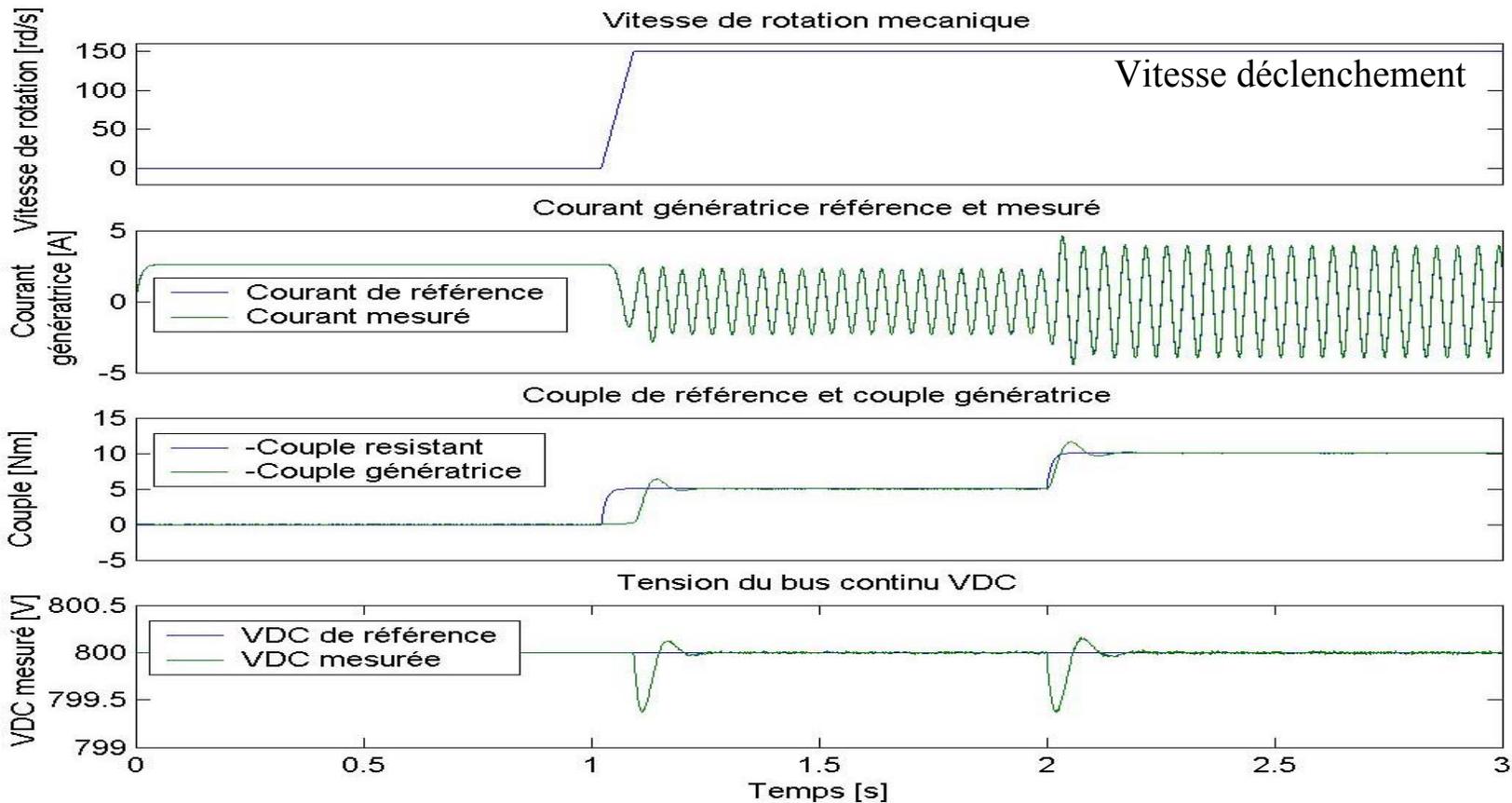
## Régulation de Vdc (1)



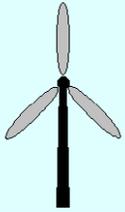


# MAS associée à un redresseur MLI

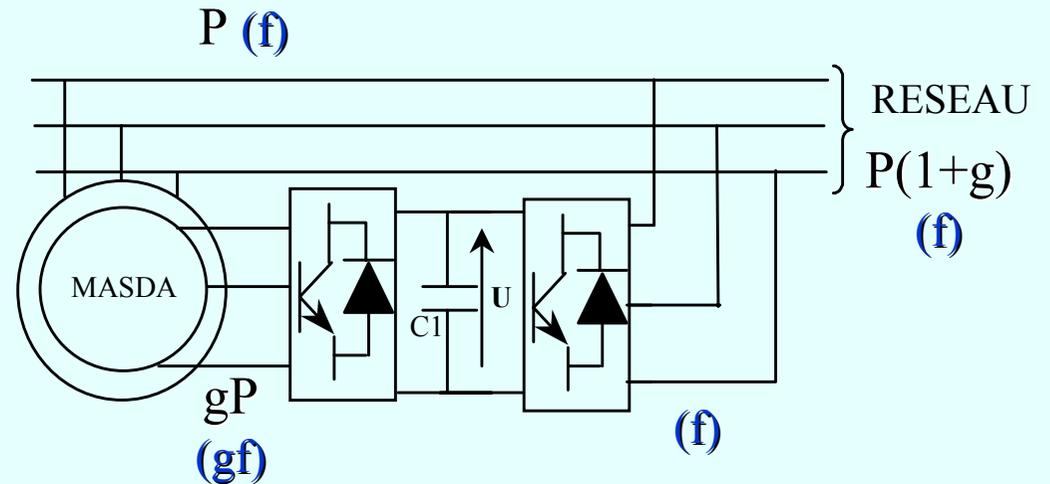
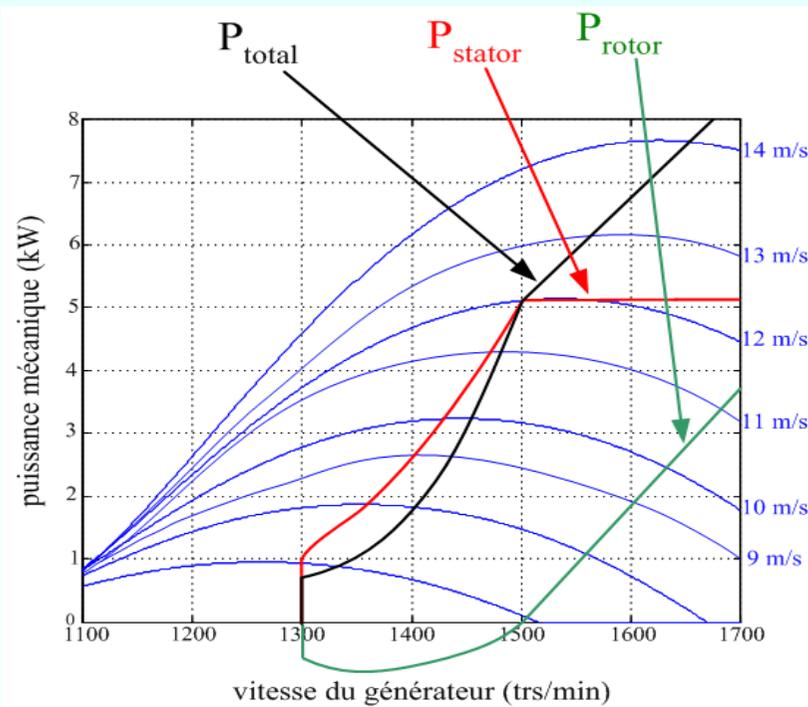
## Régulation de Vdc (2)



- $t=1.15s$   $P_{ref}=P_{nom}/4$  et à  $t= 2s$   $P_{ref}=P_{nom}/2$  → Equilibre puissance assuré - bon choix du rendement de l'ensemble convertisseur machine.
- Bonne régulation de Vdc à l'aide d'un PI + compensation.

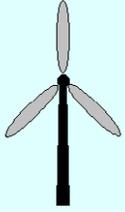


# Machine asynchrone à double alimentation (MADA) sur le réseau (fortes puissances)



## Avantages :

- transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
  - fonctionnement hypo. ou hypersynchronisme, donc large plage de vitesse.
- Convertisseur rotorique de faible puissance.
- meilleure utilisation de la machine : puissance élevée au delà du synchronisme
  - possibilité de fonctionner à vitesse élevée du vent.
- Mode « MPTM » au dessous de  $\Omega_s$  et couple constant au delà de  $\Omega_s$ .



# Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

## Modèle diphasé :

Tensions statoriques et rotoriques

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \dot{\theta}_s \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \dot{\theta}_s \psi_{ds} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - \dot{\theta}_r \psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + \dot{\theta}_r \psi_{dr} \end{array} \right.$$

- **Contrôle de la puissance active et réactive**

Flux statoriques et rotoriques :

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{array} \right.$$

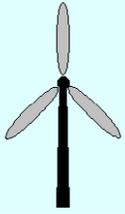
Equation mécanique :

$$\Gamma_m = \Gamma_e + J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega$$

$$\psi_{ds} = \psi_s \quad \text{et} \quad \psi_{qs} = 0$$

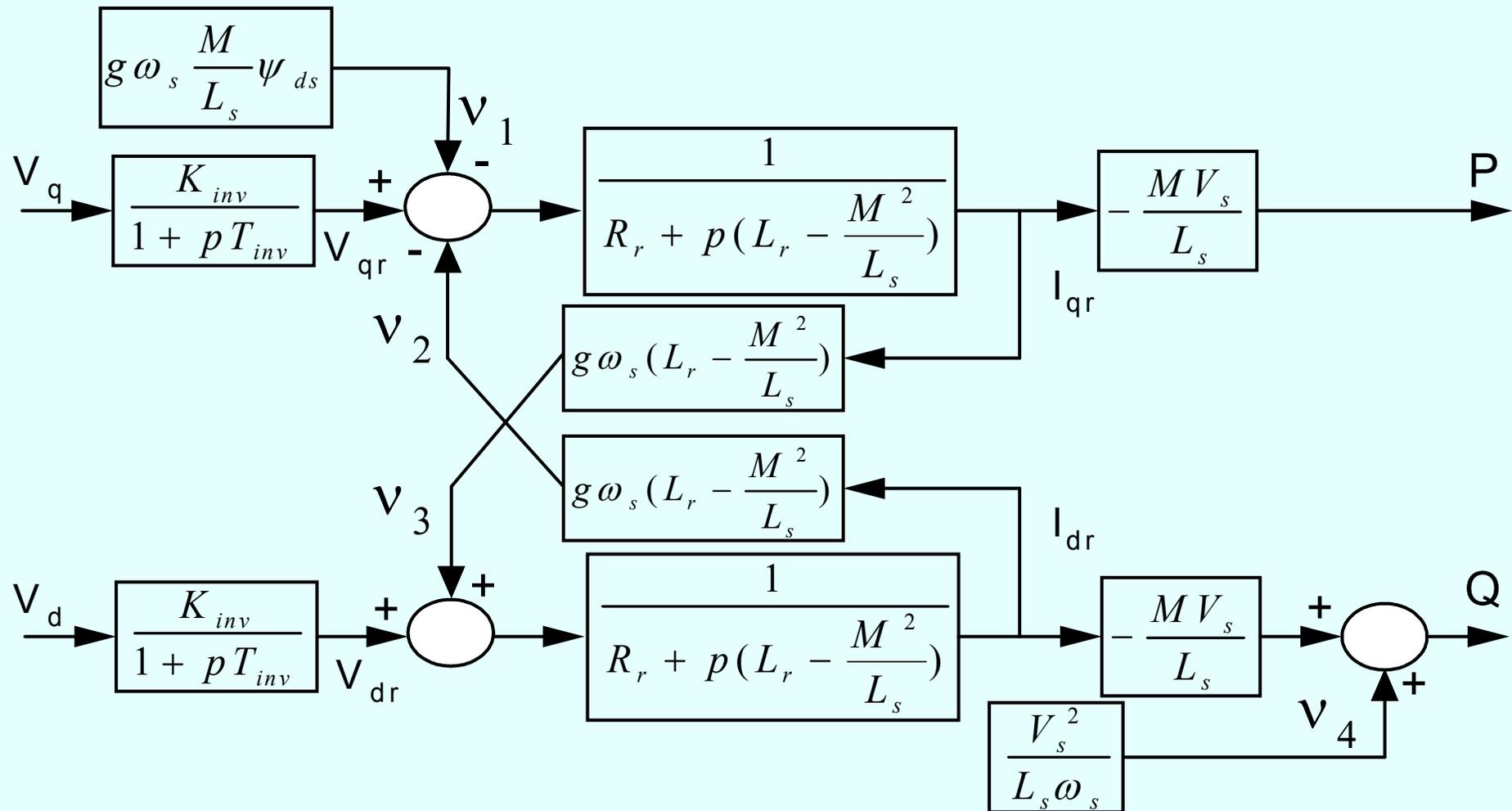
$$\Gamma_e = -p \frac{M}{L_s} I_{qr} \psi_{ds}$$

$$V_{ds} = 0 \quad \text{et} \quad V_{qs} = V_s \cong \omega_s \psi_{ds}$$

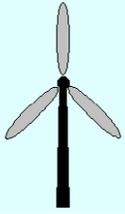


# Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

## Modèle interne de la MADA







# Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

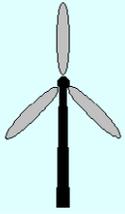
Régulateurs **monovariables** utilisés : **IP, RST, Observateur**

## Test 1 :

- **Poursuite** : échelon de puissance active  $\Delta P = -5 \text{ kW}$  à  $t = 1 \text{ s}$   
suivi d'un échelon de puissance réactive  $\Delta P = 2 \text{ kVar}$  à  $t = 2 \text{ s}$
- **Sensibilité aux perturbations** : échelon de vitesse  $\Delta \Omega = (318 - 260) \text{ rd/s}$   
à  $t = 3 \text{ s}$

## Test 2 :

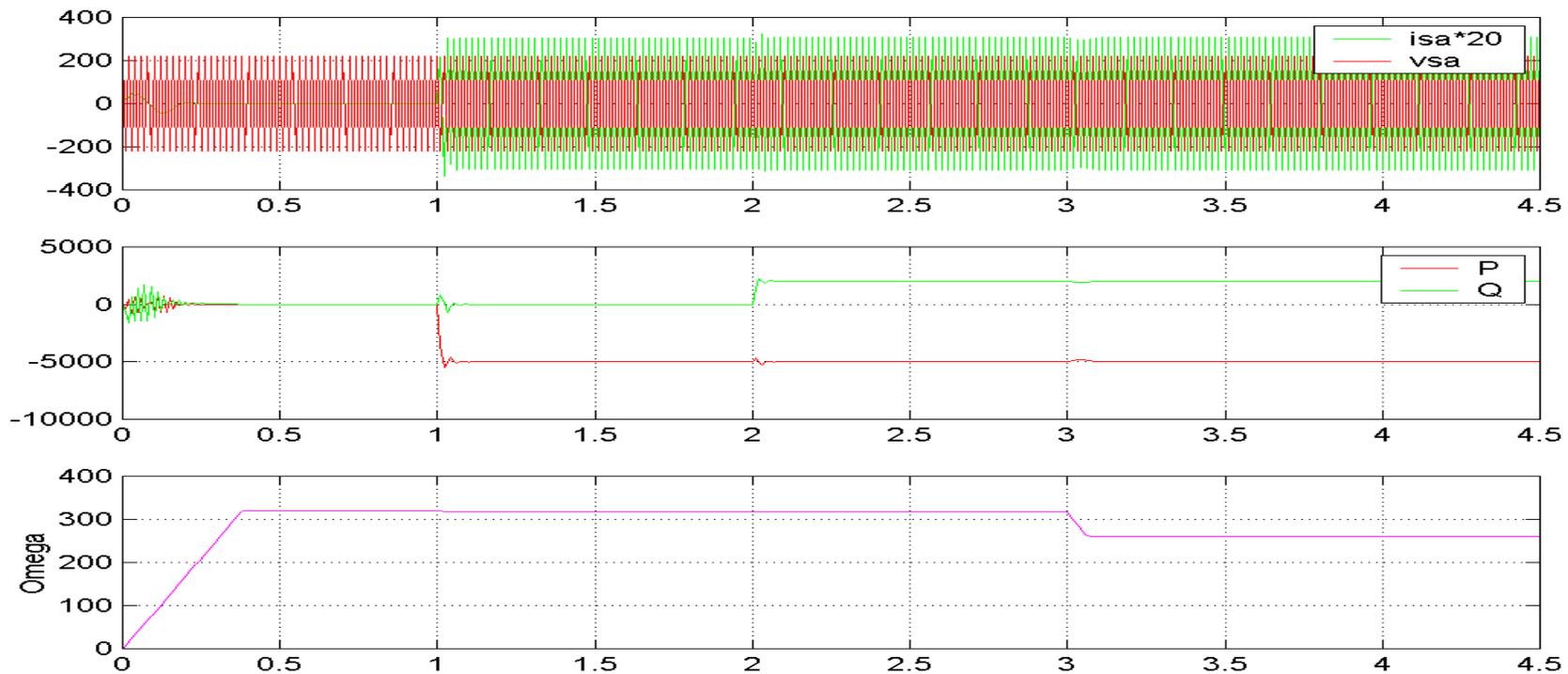
- mêmes échelons en puissances avec **variation aléatoire de la vitesse**
- Robustesse vis-à-vis de la résistance rotorique



# Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

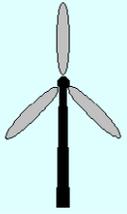
*Réponses à des impacts de puissance active, de puissance réactive et de vitesse*

$v_{sa}$   
 $i_{sa} * 20$



$P$   
 $Q$   
 $\Omega$

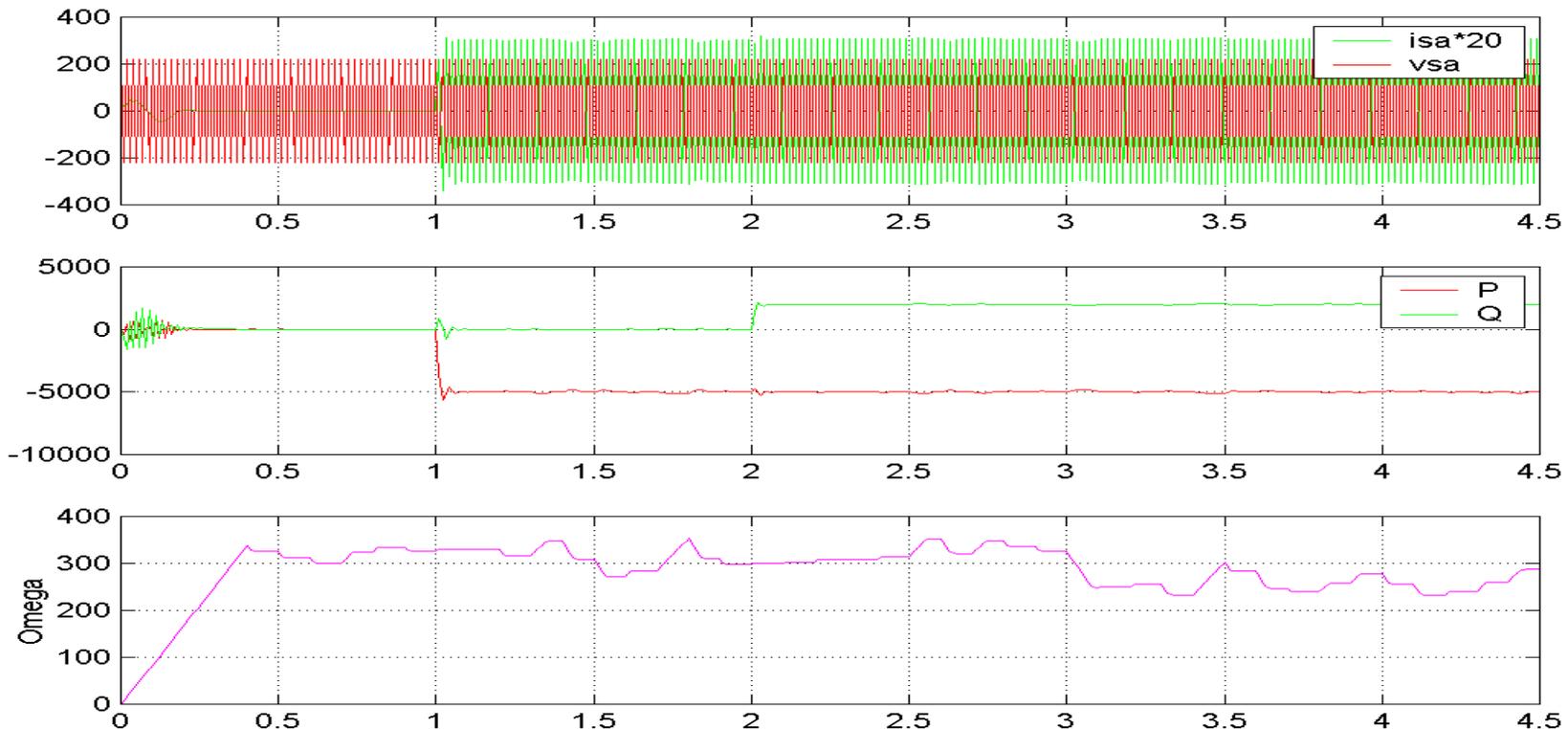
- meilleur découplage avec le RST qu'avec le PI
- temps de réponse : **RST** :  $tr=45ms$  , **PI** :  $tr=130ms$
- échelon  $\Omega$  : **RST**  $\Delta P=150W$  (3%) et  $\Delta Q=100Var$  (5%)  
**PI**  $\Delta P=1300W$  (26%) et  $\Delta Q= 1000Var$  (50%) pour le PI.



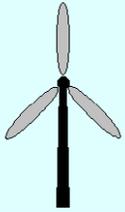
# Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

*Performances du système suite à des variations aléatoires de la vitesse*

$v_{sa}$   
 $i_{sa} * 20$

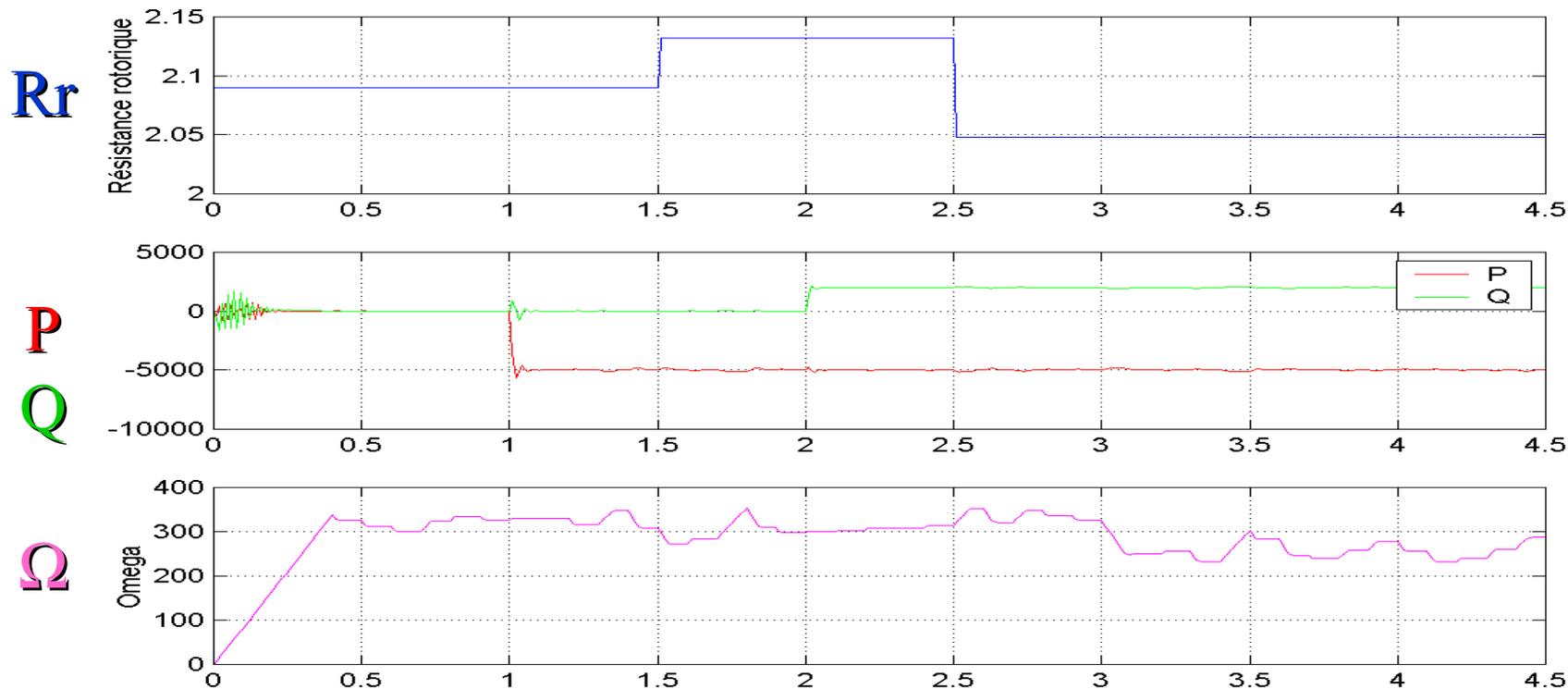


- Performances altérées avec le PI.
- Bonnes performances avec le RST :  $\Delta P$  et  $\Delta Q < 5\%$ .
- Courant stator quasi constant.

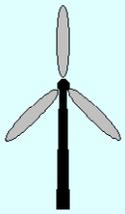


# Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

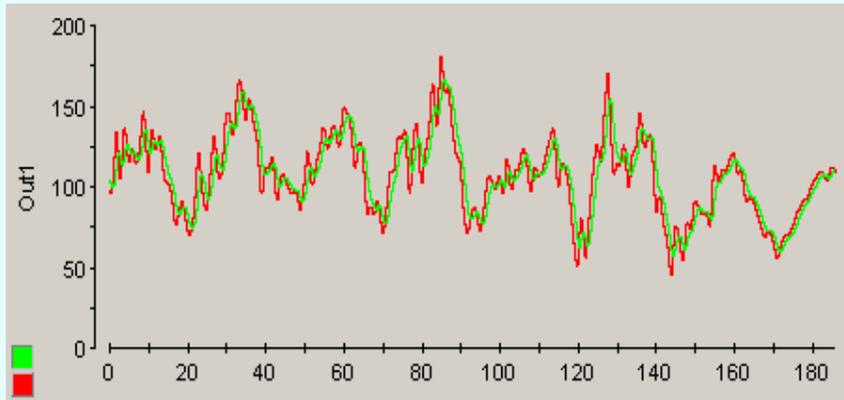
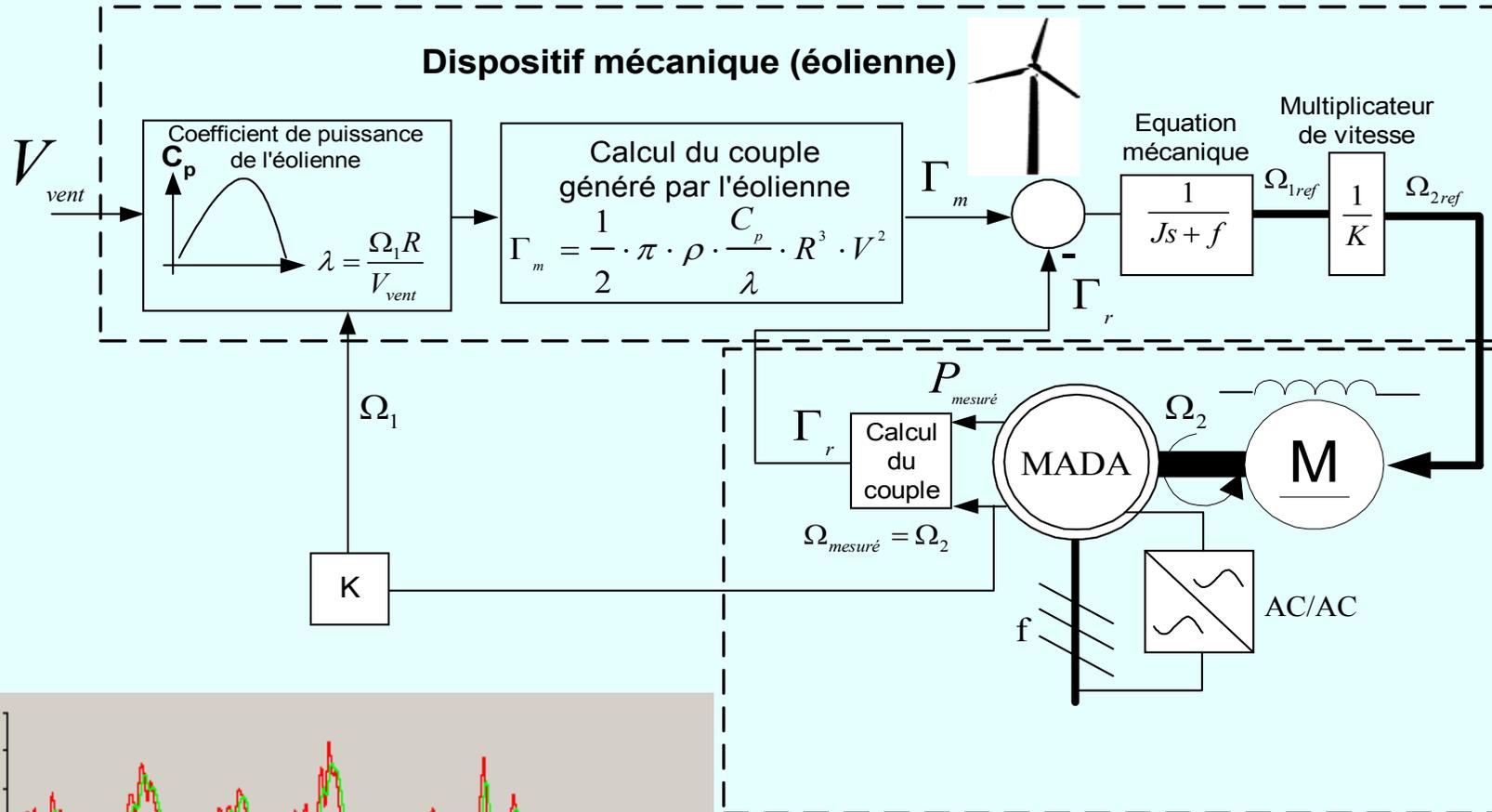
*Variations aléatoires de la vitesse + test robustesser*



- Performances médiocres avec le PI.
- Bonnes performances avec le RST :  $\Delta P$  et  $\Delta Q < 5\%$ .
- Courant stator quasi constant et robustesse via à vis de  $R_r$ .

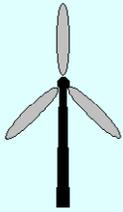


# Synoptique du simulateur (macroscopique) de la turbine éolienne



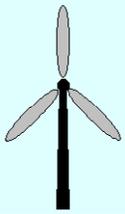
■ Vitesse de référence (rad/s).

■ Vitesse mesurée (avec l'observateur) (rad/s).



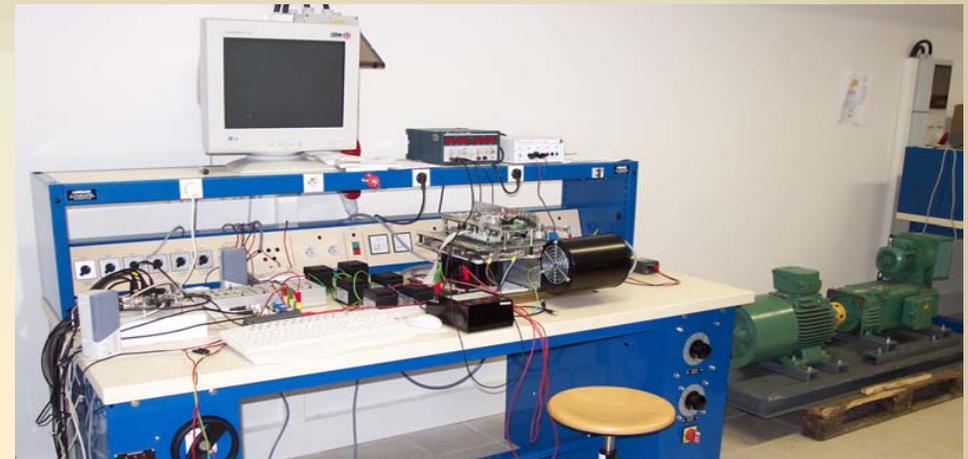
# Evolution des travaux

- ▶ Analyse du fonctionnement de l'ensemble : simulateur - MCC - MADA.
- ▶ Validation expérimentale des lois de commande mono-variables établies en simulation pour la commande de la MADA.
- ▶ Etude d'une commande robuste de la MADA par une approche multi-variable
- ▶ Prise en compte de la saturation
- ▶ Comparaison de la MADA avec la MAS à cage en prenant en compte les considérations de rendement.
- ▶ **Thèse en cours : Machines lentes (MRV)**



# Banc d'essai MADA

MADA (7.5 kW)    MCC (10kW)



Dispositif de  
production  
d'énergie à  
étudier

Moteur  
d'entraînement  
destiné à simuler  
le comportement  
d'une éolienne

Dispositif de commande  
(Onduleur + PC  
+ carte d'interface DSP)