

Chapitre III

*Contrôle de la chaîne
de conversion par des
régulateurs classiques*

PI

III.1 Introduction

Le modèle complet de la chaîne de conversion d'énergie englobe en outre la génératrice synchrone à aimants permanents, un redresseur et un onduleur couplés par un bus continu commun et un filtre qui assure le couplage au réseau. Ce système est assez complexe pour la génération des lois de commande qui le gère, néanmoins, il suffit de partitionner le système et ainsi suivre le transfert de la puissance de la génératrice jusqu'au réseau. [60]

Nous présentons dans ce chapitre le contrôle des différentes parties de la chaîne de conversion à savoir la commande du convertisseur coté machine, la régulation du bus continu, et celle du convertisseur coté réseau comme l'illustre la figure (III.1).

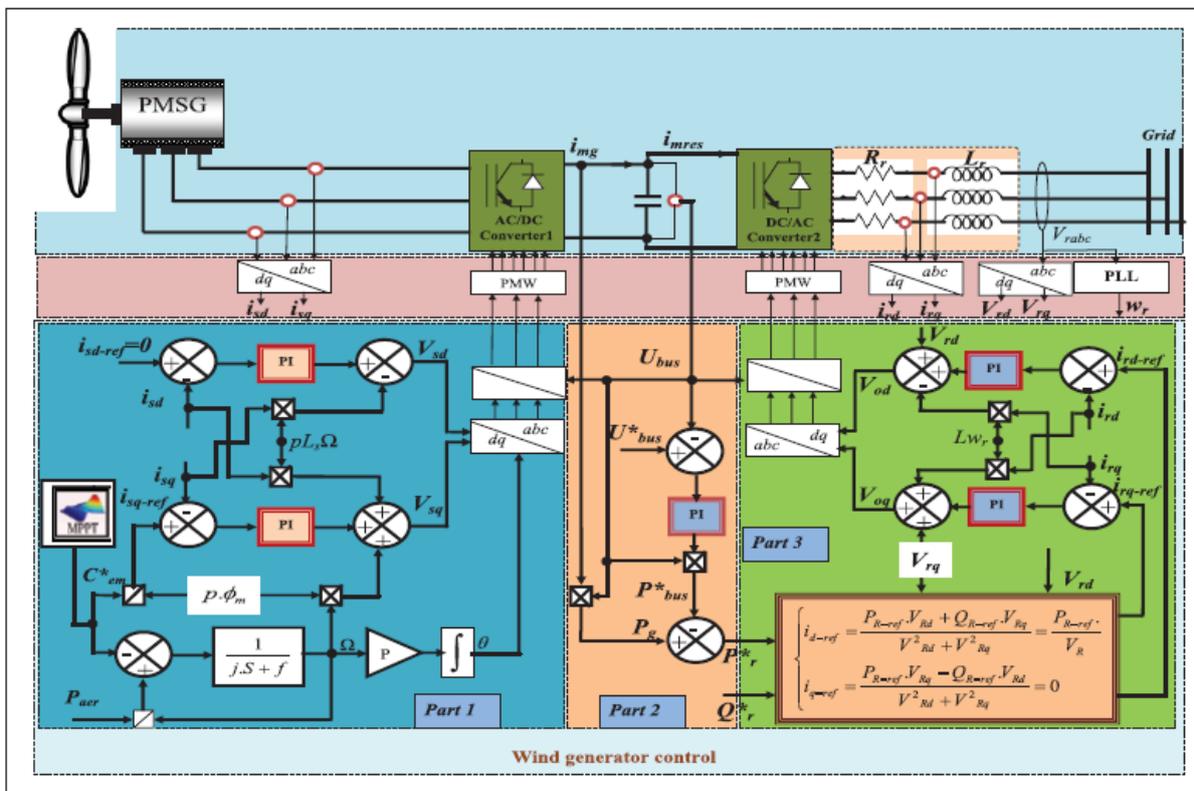


Figure III.1 : Stratégie de contrôle de l'éolienne.

III.2 Contrôle du convertisseur coté génératrice (CCG)

La première partie de la figure (III.1) montre la commande du convertisseur coté génératrice qui est obtenu par l'algorithme MPPT et la commande en couple de la génératrice.

III.2.1 Stratégie de control MPPT

L'objectif du contrôleur MPPT (maximum power point tracking) est de générer la vitesse de référence qui va aider la turbine à extraire la puissance maximale disponible correspondante à une puissance de vent donnée. Ainsi quand la vitesse du vent change, la

vitesse de la GSAP est contrôlée pour suivre la trajectoire de la puissance maximale, et la vitesse de rotation de la turbine est estimée comme suit : [61]

$$\Omega_{ref} = \frac{V_{vent} \lambda_{opt}}{R_t} \tag{III.1}$$

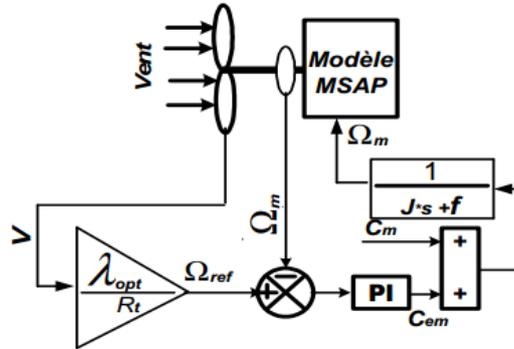


Figure III.2: Stratégie de la régulation de la vitesse.

Nous allons synthétiser dans le paragraphe suivant les différents régulateurs pour la commande MPPT.

III.2.1.a Contrôle de la vitesse par un régulateur PI

Le schéma de commande donné par la figure (III.3) illustre le fonctionnement du régulateur de vitesse PI, tel que l'entrée du régulateur est la différence entre la vitesse de référence de la turbine et la vitesse mesurée de la génératrice, la sortie donne le couple électromagnétique de référence.

On peut écrire le bloc représentant la boucle de commande de vitesse, on appliquant le théorème de superposition, en boucle fermée comme suis :

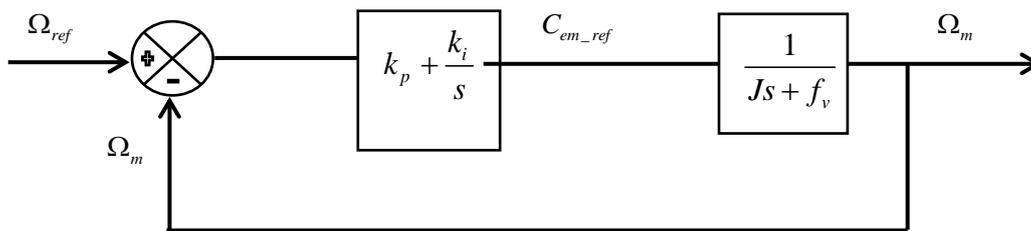


Figure III.3 : Boucle de la régulation de la vitesse par PI.

$$FTBO = \frac{sk_p + k_i}{s(Js + f_v)} \tag{III.2}$$

$$FTBF = \frac{s.k_p + k_i}{J.s^2 + s.f_v + s.k_p + k_i} = \frac{s.\frac{k_p}{J} + \frac{k_i}{J}}{s^2 + (\frac{f_v}{J} + \frac{k_p}{J})s + \frac{k_i}{J}} \tag{III.3}$$

Par identification on déduit :

$$\begin{cases} k_p = 2\xi.\omega_n.J - f_v \\ k_i = J.\omega^2 \end{cases} \quad (III.4)$$

$$\text{Avec : } \omega_n = \frac{5.8}{t_{sd}} ;$$

III.2.1.b Contrôle de la vitesse par un régulateur IP

Le correcteur Intégral proportionnel IP est essentiellement différent du correcteur PI par le fait qu'il ne présente pas de zéro dans la fonction de transfert en boucle fermée.

Le schéma bloc de la régulation de la vitesse incluant le correcteur IP est illustré par la figure(III.4) suivante :

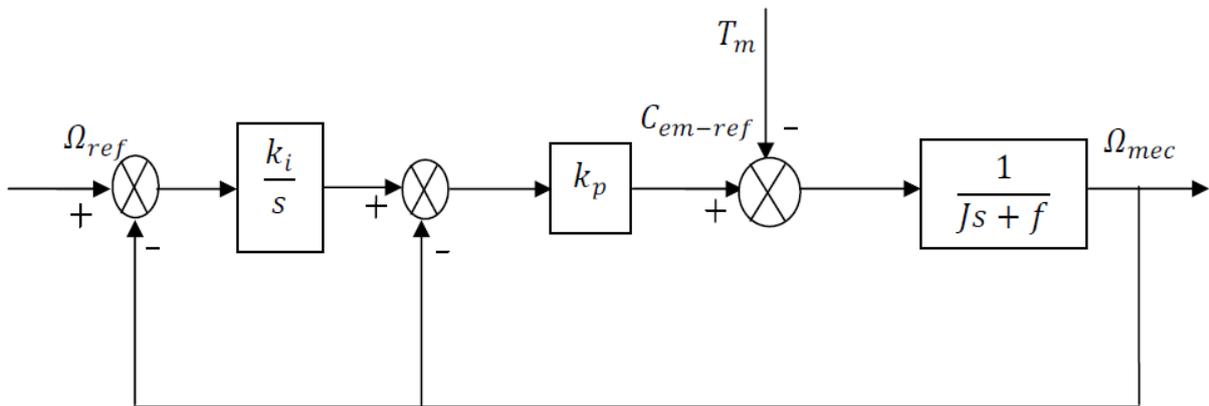


Figure III.4 : Boucle de la régulation de la vitesse par IP.

La première équation en boucle interne $G_{1BF}(s)$:

$$G_{1BF}(s) = \frac{K_{pw} \cdot P\phi_f \frac{1}{Js + f_c}}{K_{pw} \cdot P\phi_f \frac{1}{Js + f_c} + 1} \quad (III.5)$$

$$G_{1BF}(s) = \frac{K_{pw} s P\phi_f}{K_{pw} P\phi_f + Js + f_c} \quad (III.6)$$

La deuxième équation en boucle ouverte est :

$$G_{OB}(s) = \frac{K_{tw}}{s} G_{1BF}(s) \quad (III.7)$$

Et en boucle fermée la fonction de transfert est $G_{BF}(s)$:

$$G_{BF}(s) = \frac{\frac{K_{pw} K_{iw} P\phi_f}{(K_{pw} 1.5 P\phi_f + f_c)s + Js^2}}{\frac{K_{pw} K_{iw} P\phi_f}{(K_{pw} P\phi_f + f_c)s + Js^2} + 1} \quad (III.8)$$

Et par identification nous obtenons :

$$G_{BF}(s) = \frac{K_{pw} K_{iw} P\phi_f / J}{(K_{pw} K_{iw} P\phi_f) / J + (K_{pw} P\phi_f + f_c)s / J + s^2} = \frac{Kw_n}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad (III.9)$$

En imposant le coefficient d'amortissement ξ et la pulsation w_n alors on peut calculer les gains du régulateur comme suit :

$$\begin{cases} K_{pw} = \frac{2\xi w_n J - f_c}{P\phi_f} \\ K_{iw} = \frac{Jw_n^2}{K_{pw} P\phi_f} \end{cases}$$

III.2.1.3 Contrôle de la vitesse par mode glissant

La dynamique d'erreur de suivi du premier ordre de la surface de glissement proposée est égale à l'erreur entre la vitesse réelle et la vitesse de référence :

$$S(\Omega_m) = \Omega_{m-ref} - \Omega_m \quad (III.10)$$

$$\frac{d}{dt} S(\Omega_m) = \frac{d}{dt} S(\Omega_{m-ref}) - \frac{d}{dt} S(\Omega_m) \quad (III.11)$$

$$\frac{d}{dt} S(\Omega_m) = \frac{d}{dt} S(\Omega_{m-ref}) - \frac{1}{J} (C_m - C_{em} - F\Omega_m) \quad (III.12)$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega_{m-ref} = C_m + \frac{3}{2} P\phi i_{sq} - F\Omega_m \quad (III.13)$$

Après quelques manipulations la composante de référence i_{sq}^* du vecteur du courant du stator, responsable du contrôle du couple est exprimée comme suit :

$$C_{em-ref} = \left(J \frac{d}{dt} \Omega_m - C_m + F\Omega_m + K_{\Omega m} Sgn(\Omega_m) \right) \quad (III.14)$$

Avec $K_{\Omega m} > 0$

III.2.2 Commande en couple de la GSAP.

La commande de la MSAP est basée sur un pilotage vectoriel des tensions statorique [62]. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (I_{ds} , I_{qs}) en quadrature dans un référentiel lié au champs tournant de façon que l'une des composantes (I_{qs}) commande le couple électromagnétique et l'autre (I_{ds}) commande le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée [63].

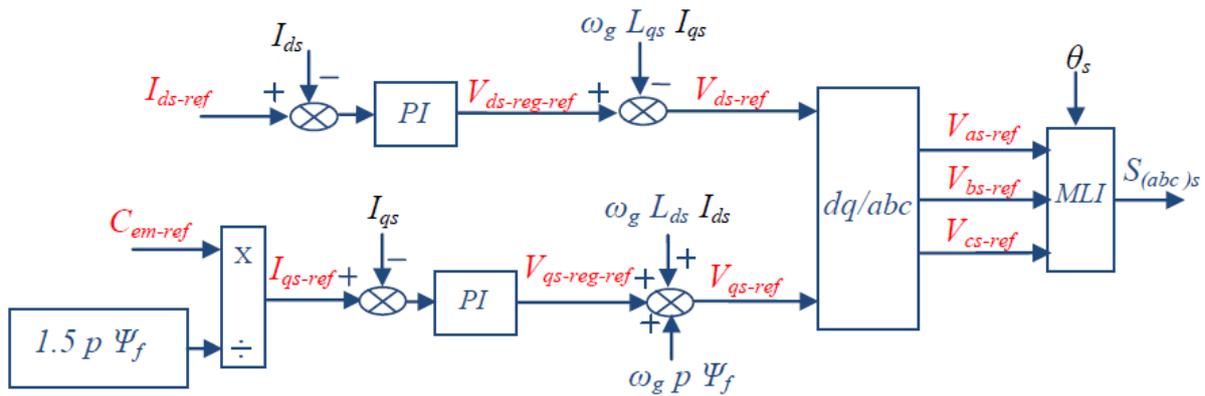


Figure III.5 : Stratégie de commande en couple de la MSAP

Les variables V_{as-ref} , V_{bs-ref} et V_{cs-ref} sont les valeurs de référence des tensions statoriques à imposer à l'entrée du redresseur triphasé commandé pour obtenir la vitesse de rotation de référence désirée.

$$\begin{cases} L_d \frac{d}{dt} i_{ds} = -R_s i_{ds} - V_{ds} + \omega_r L_q i_{qs} \\ L_q \frac{d}{dt} i_{qs} = -R_s i_{qs} - V_{qs} - \omega_r (L_d i_{qs} + \phi_f) \end{cases} \quad (III.15)$$

Le modèle de la machine synchrone dans le référentiel de Park représenté par les équations ci-dessus conduit à un système d'équations différentielles où les courants ne sont pas indépendants l'un de l'autre. Ils sont reliés par des termes non linéaires $\omega L_q i_{qs}$ et $\omega L_d i_{ds}$.

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation. Cette dernière méthode consiste à faire ajouter des termes afin de rendre les axes d et q complètement indépendants.

III.2.3.a Technique de découplage

Plusieurs techniques sont disposées pour le découplage et parmi elles, on a :

1. Découplage par compensation.
2. Commande vectorielle indirecte.

3. Découplage par régulateur.

Dans notre travail, on s'est basé seulement sur la technique de découplage par compensation.

III.2.3 .b Découplage par compensation

La compensation donc, a pour but de découpler les axes d et q . Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs.

Le principe de ce découplage revient à définir deux nouvelles variables de commande e_d, e_q représentées dans la Figure III.5 telle que:

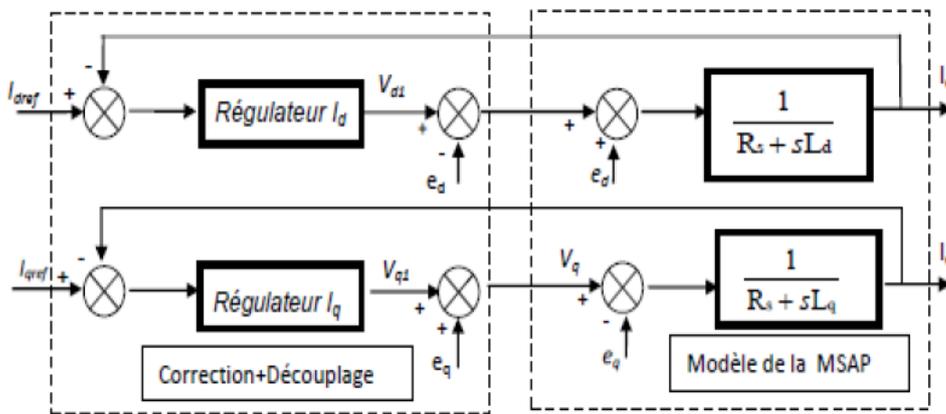


Figure III.6: Schéma des régulateurs des courants avec découplage par compensation.

$$\begin{cases} V_{sd} = V_{sd}^* + e_d \\ V_{sq} = V_{sq}^* + e_q \end{cases} \quad (III.16)$$

Avec e_d et e_q les expressions des F.E.M de compensation qui sont données comme suit

$$\begin{cases} e_d = -\omega_r L_q I_{sq} \\ e_q = \omega_r L_d I_{sd} + \omega_r \phi_f \end{cases} \quad (III.17)$$

III.2.3.c Contrôle des courants de Park par Régulateurs PI

Pour les boucles de courant, on utilise un régulateur (PI): une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité de la dynamique du système et une action intégrale qui permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir.

a) Calcul des paramètres du régulateur PI du courant Id

L'entrée du régulateur est prise comme étant la différence entre le courant de référence i_{dref} avec la valeur du courant i_d mesuré. Le schéma bloc suivant montre la procédure de la commande.

Dans le but d'obtenir un facteur de puissance unitaire (la puissance réactive $Q=0$) on pose le courant direct de référence nul ($i_{dref}=0$)

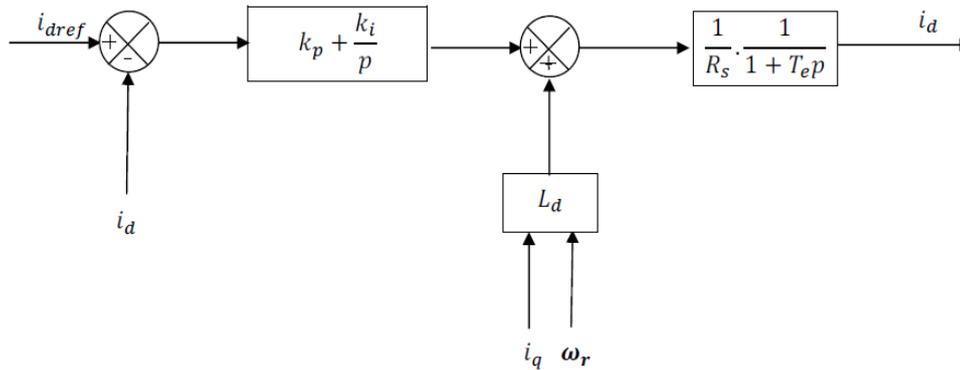


Figure III.7 : Boucle de régulation du courant i_d .

Il faut d'abord calculer la fonction de transfert en boucle fermée pour qu'on puisse calculer les paramètres du régulateur.

$$FTBO = \frac{s.k_{pd} + k_{id}}{s(s.L_s + R_s)} = \frac{s.k_{pd} + k_{id}}{s^2.L_s + s.R_s} \quad (III.18)$$

$$FTBF = \frac{s.k_{pd} + k_{id}}{s(s.L_s + R_s) + s.k_{pd} + k_{id}} = \frac{s.k_{pd} + k_{id}}{s^2.L_s + (R_s + k_{pd})s + k_{id}} \quad (III.19)$$

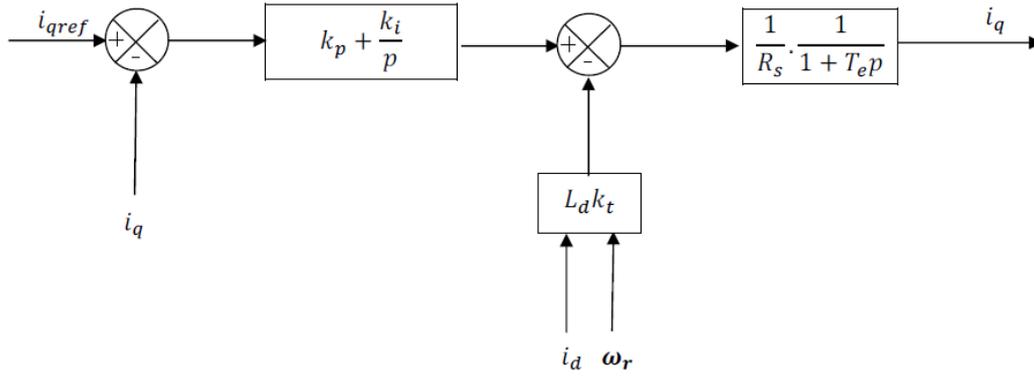
Le choix d'une pulsation propre ω_n et un facteur d'amortissement ξ permet de calculer les coefficients du régulateur PI.

Par l'identification, on trouve les valeurs comme suit :

$$\begin{cases} k_{pd} = 2.\xi.\omega_n.L_s - R_s \\ k_{id} = L_s.\omega_n^2 \end{cases}$$

b) Calcule des paramètres du régulateur PI du courant I_q

L'entrée du régulateur est prise comme étant la différence entre le courant de référence i_{qref} avec la valeur du courant i_q mesuré. Le schéma bloc suivant montre le schéma fonctionnel de la commande.

Figure III.8 : Boucle de régulation du courant i_q .

Puisque la boucle de régulation du courant quadratique i_q est la même que celle du courant direct i_d à l'exception de la référence on déduit qu'ils ont les mêmes paramètres du régulateur *PI*.

Le courant de référence i_{qref} est calculé comme suit :

$$C_{emref} = \frac{3}{2} P \varphi_f i_{sqref} \Rightarrow i_{sqref} = \frac{2}{3} P \varphi_f C_{emref} \quad (III.20)$$

$$\begin{cases} k_{pq} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot L_s - R_s \\ k_{iq} = L_s \cdot \omega_n^2 \end{cases} \quad (III.21)$$

III.3 Contrôle du convertisseur coté Réseau (CCR)

La tâche principale du CCR est de synchroniser le système de conversion d'énergie éolienne avec le réseau en assurant une haute qualité de l'énergie fournie et de contrôler la tension du bus continu.

La structure de commande à tension orientée pour le *CCR* est constituée de deux boucles de régulation en cascade comme le montre les parties 2 et 3 de la figure (III.1): une boucle de régulation de courant interne du réseau et une boucle de contrôle de tension du bus continu externe.

La tension du bus réelle V_{dc} est comparée à la valeur de référence V_{dc-ref} , et l'erreur est renvoyée au contrôleur PI qui génère le courant du réseau d'axe d et de référence i_{dg-ref} .

III.3.1 Conception des contrôleurs PI des courants du réseau

Pour déterminer le dispositif pour calculer les paramètres des régulateurs de courants, on doit d'abord modéliser la connexion de l'éolienne au réseau électrique, cette connexion est assurée par un filtre RL , comme on peut le voir sur la figure (III.8) ci-dessous.

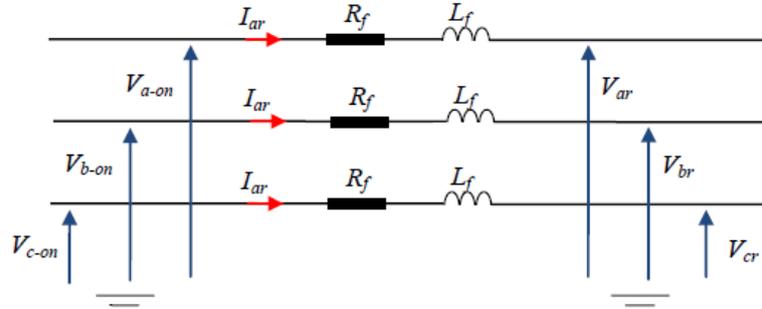


Figure III.9 : Modèle du filtre dans le repère abc

$$\begin{cases} V_{a-on} = R_f i_{ar} + L_f \frac{d}{dt} i_{ar} + V_{ar} \\ V_{b-on} = R_f i_{br} + L_f \frac{d}{dt} i_{br} + V_{br} \\ V_{c-on} = R_f i_{cr} + L_f \frac{d}{dt} i_{cr} + V_{cr} \end{cases} \quad (III.22)$$

Avec :

$V_{a-on}, V_{b-on}, V_{c-on}$: Tension à la sortie de l'onduleur.

V_{ar}, V_{br}, V_{cr} : Tension du réseau.

i_{ar}, i_{br}, i_{cr} : Courant du réseau.

Le modèle de la connexion au réseau dans le repère (dq) est obtenu on appliquant la transformée de PARK à l'équation (III.23) :

$$\begin{cases} V_{d-on} = R_f i_{dr} + L_f \frac{d}{dt} i_{dr} - L_f i_{qr} \omega_r + V_{dr} \\ V_{q-on} = R_f i_{qr} + L_f \frac{d}{dt} i_{qr} + L_f i_{dr} \omega_r + V_{qr} \end{cases} \quad (III.23)$$

On définit deux grandeurs de commande V_{dr-reg}, V_{qr-reg} comme suit :

$$\begin{cases} V_{dr-reg} = R_f i_{dr} + L_f \frac{d}{dt} i_{dr} \\ V_{qr-reg} = R_f i_{qr} + L_f \frac{d}{dt} i_{qr} \end{cases} \quad (III.24)$$

Dans le formalisme de Laplace de l'équation (III.25) s'écrit :

$$\begin{cases} V_{dr-reg} = (R_f + L_f s)i_{dr} \\ V_{qr-reg} = (R_f + L_f s)i_{qr} \end{cases} \quad (III.25)$$

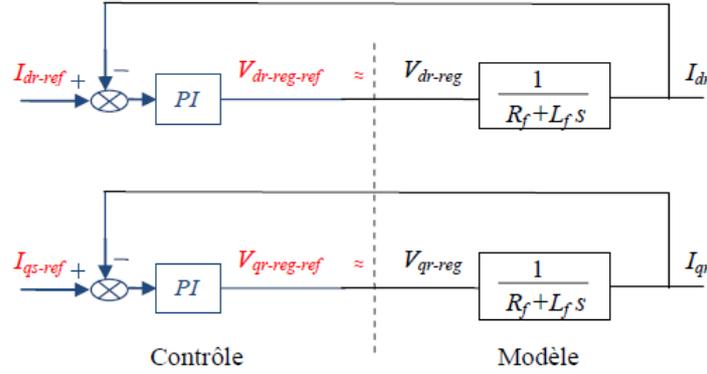


Figure III.10 : boucle de contrôle de courant du réseau.

Les valeurs de K_{p-Idqr} et de K_{i-Idqr} des régulateurs de courants injectés au réseau sont obtenues de la même manière que ceux des courants de la génératrice.

$$\begin{cases} K_{p-Idqr} = L_f \omega_n^2 \\ K_{i-Idqr} = 2\xi L_f \omega_n - R_f \end{cases}$$

III.3.2 Conception du contrôleur PI de la tension du bus continu

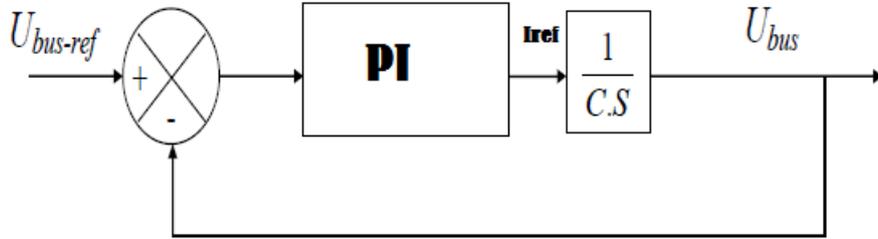


Figure III.11 : régulation du bus continu.

$$\begin{cases} k_{p-v_{dc}} = \sqrt{2} \cdot \omega_n \cdot C \\ k_{i-v_{dc}} = C \cdot \omega_n^2 \end{cases} \quad (III.26)$$

Référence du courant du réseau i_{d-ref} et i_{q-ref} :

$$\begin{aligned} i_{d-ref} &= \frac{P_{R-ref} \cdot V_{Rd} + Q_{R-ref} \cdot V_{Rq}}{V_{Rd}^2 + V_{Rq}^2} \\ i_{q-ref} &= \frac{P_{R-ref} \cdot V_{Rq} - Q_{R-ref} \cdot V_{Rd}}{V_{Rd}^2 + V_{Rq}^2} \end{aligned} \quad (III.27)$$

En n'imposant Q_{R-ref} nulle

$$i_{d-ref} = \frac{P_{R-ref}}{V_R} \quad (III.28)$$

$$i_{q-ref} = 0$$

Avec :

$$P_{ref} = P_r - P_{ref-bus} \quad (III.29)$$

Où :

$$P_r = i_{red} \cdot U_{bus} \quad (III.30)$$

$$P_{ref-bus} = i_{ref} \cdot U_{bus}$$

III.4 Résultats de simulation de contrôle du convertisseur coté machine.

a) Résultat de simulation de la commande MPPT avec différents régulateurs

Pour tous les résultats de simulation on utilise le profil du vent de la figure III.5.

Les paramètres du système ainsi que les gains des différents régulateurs sont présentés dans l'annexe.

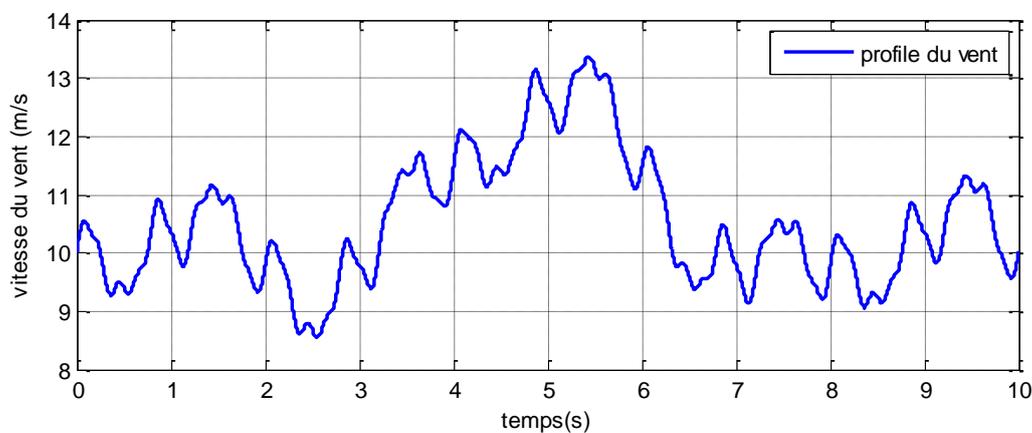
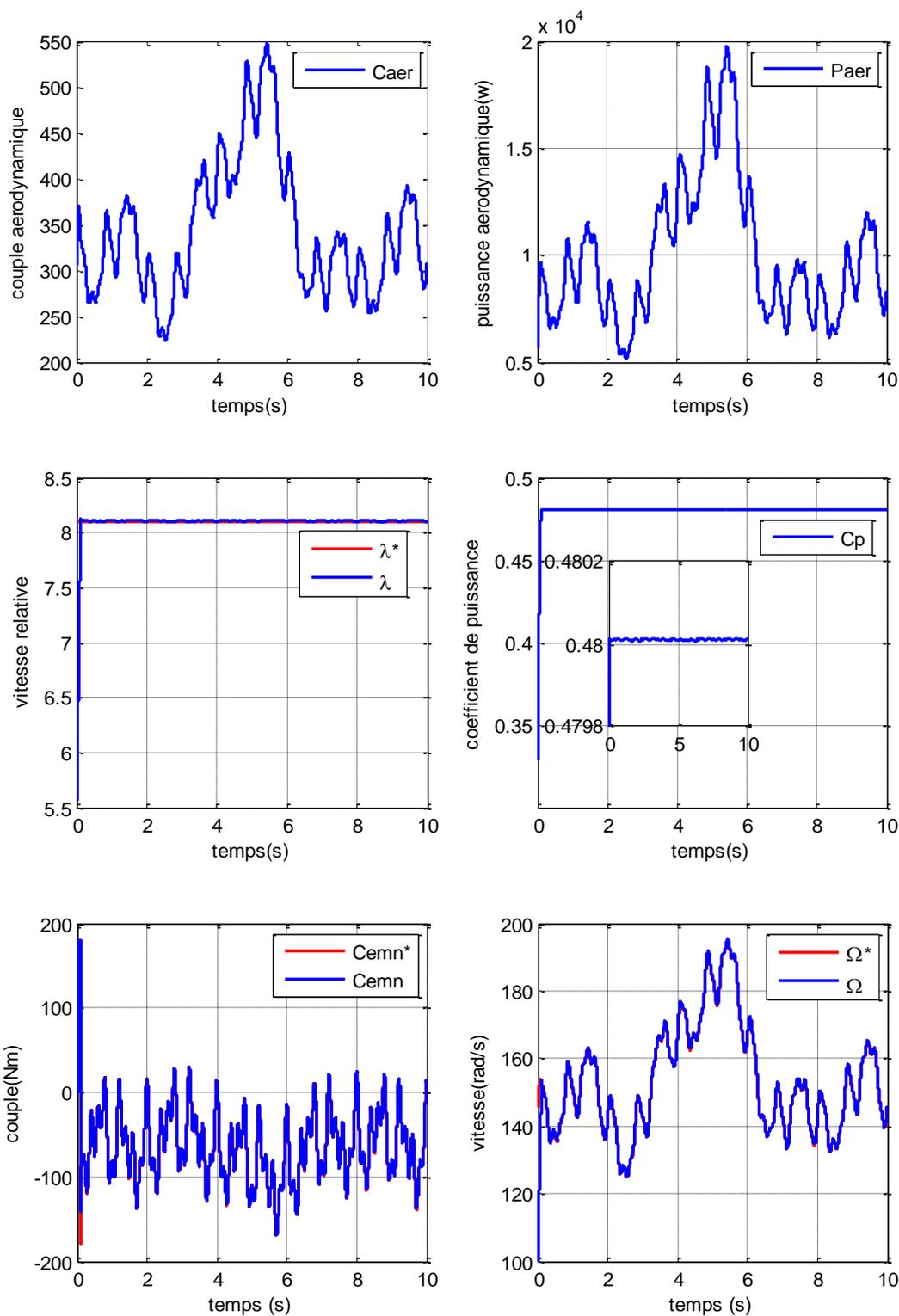


Figure III.12 : profil du vent.

1. Régulateur PI de vitesse pour MPPT



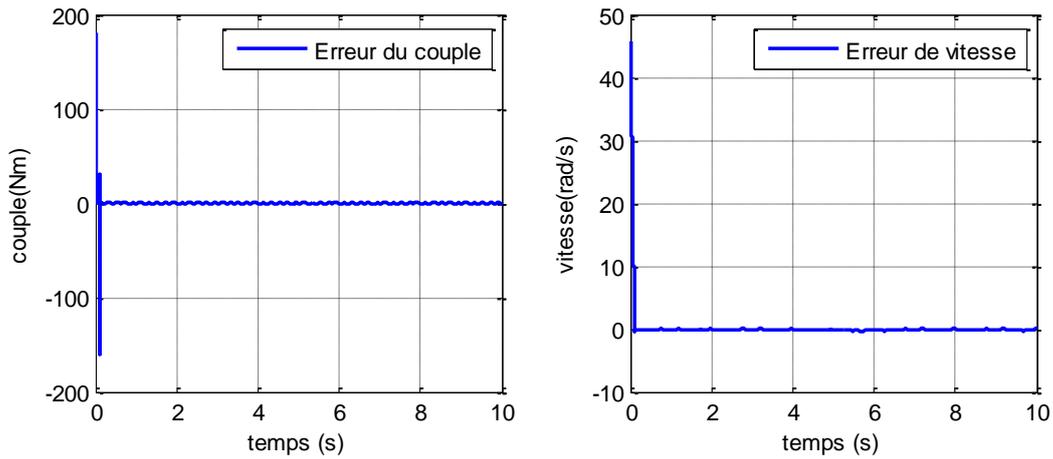
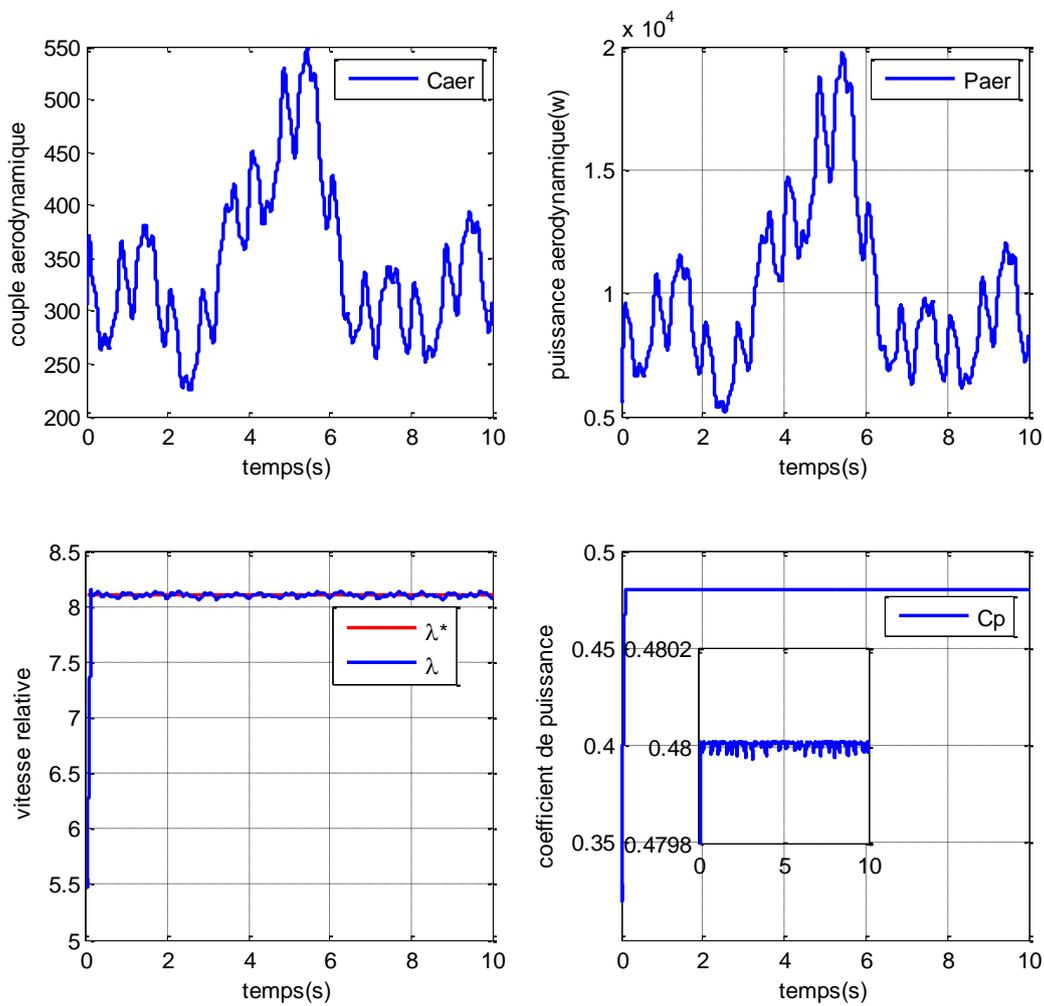


Figure III.13 : Résultats de simulation de la MPPT utilisant un régulateur PI pour le réglage de vitesse.

2. Régulateur IP de vitesse pour MPPT



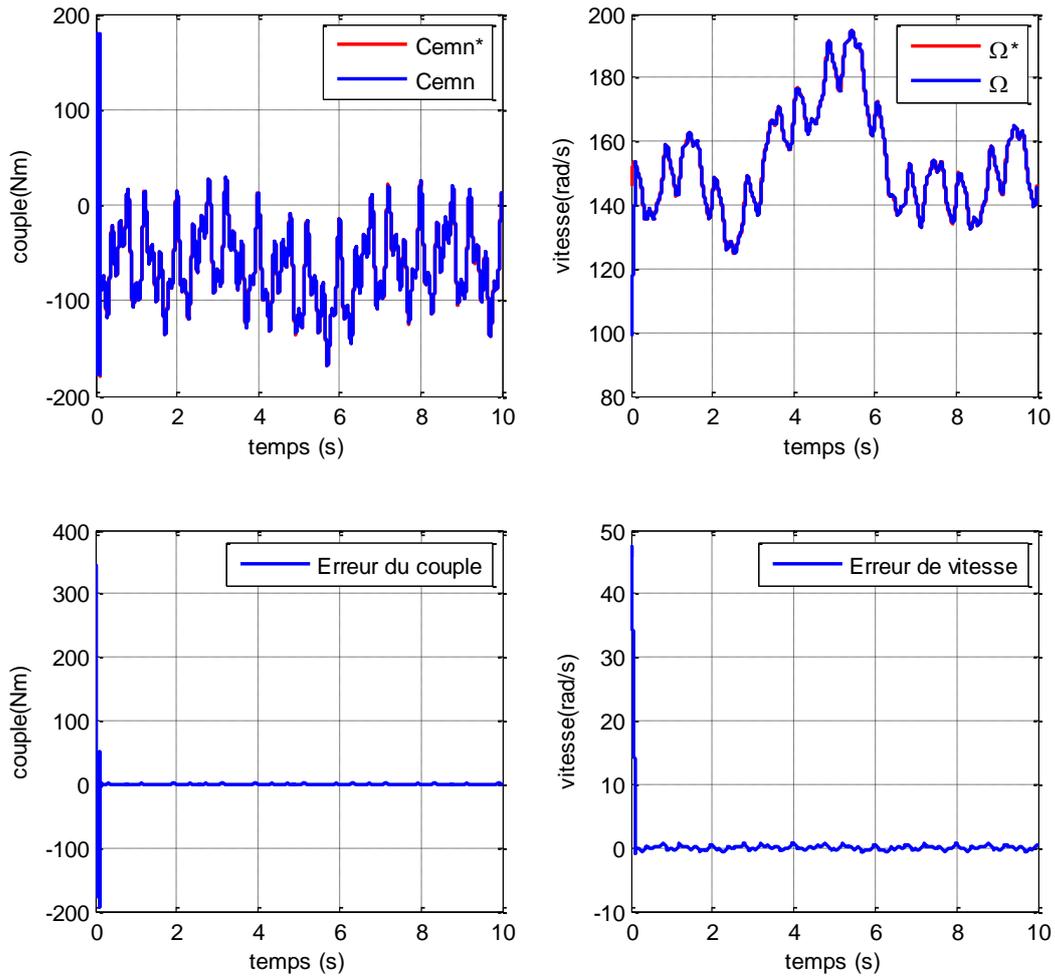
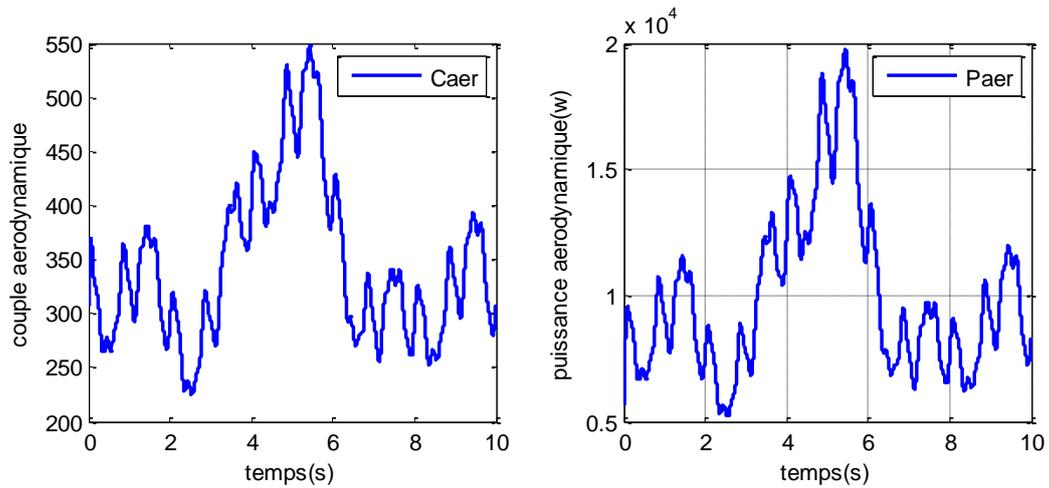


Figure III.14 : Résultats de simulation de la MPPT utilisant un régulateur IP pour le réglage de vitesse.

3. Régulateur à MG de vitesse pour MPPT



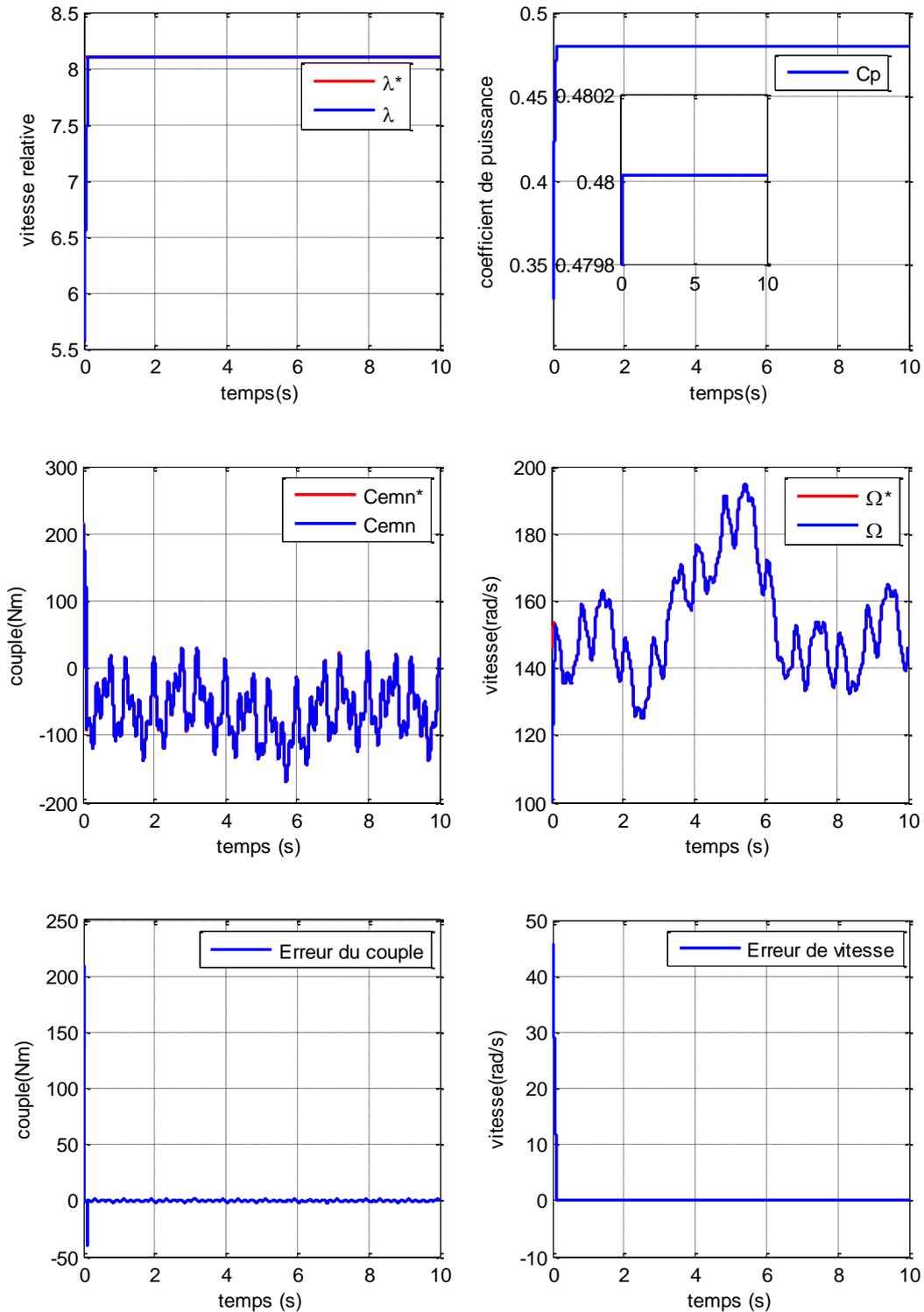


Figure III.15 : Résultats de simulation de la MPPT utilisant un régulateur à MG pour le réglage de vitesse..

Interprétations des résultats

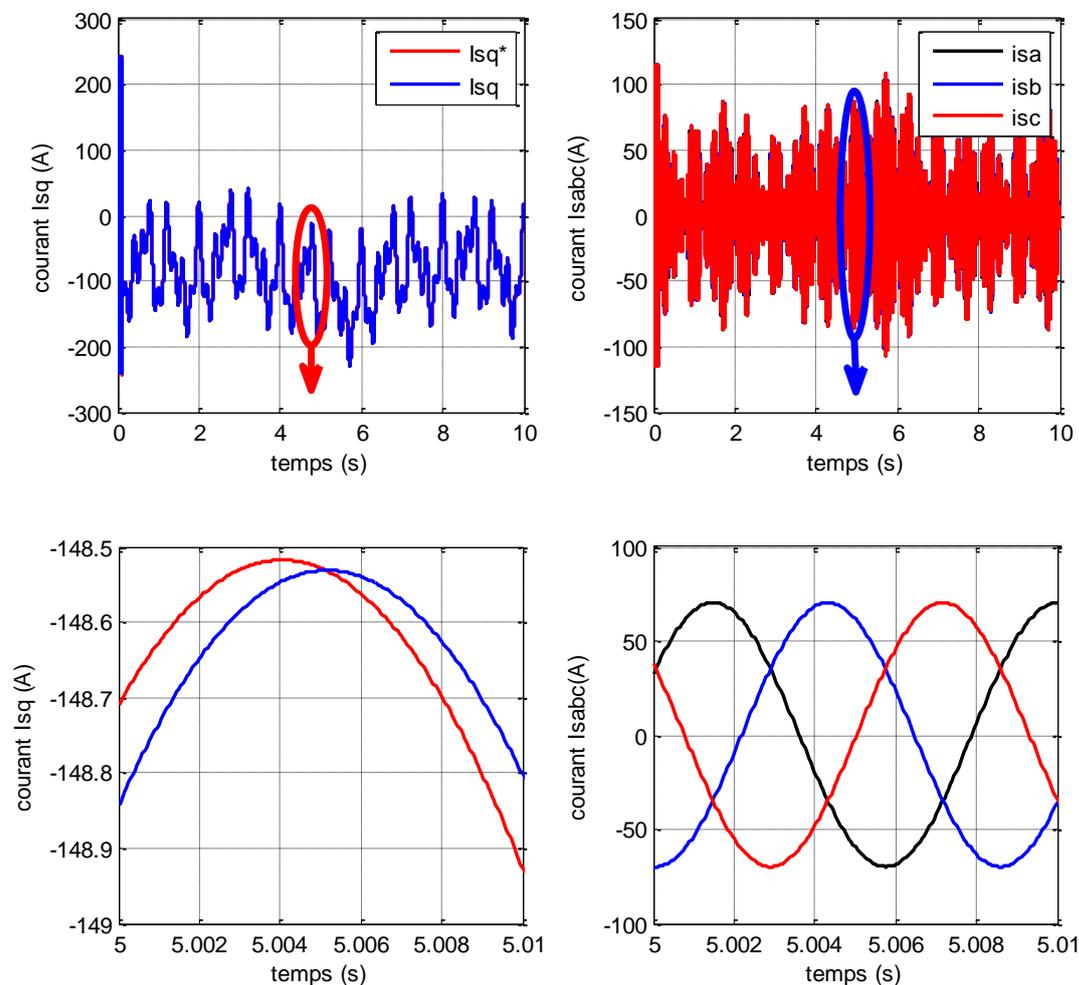
Le couple aérodynamique et le couple électromagnétique de la machine sont des signes opposés, ceux qui confirment le fonctionnement de la machine en génératrice.

On observe aussi que la puissance et le couple aérodynamique varient proportionnellement avec la variation de la vitesse du vent pour les trois régulateurs de vitesse PI, IP et MG utilisés pour la MPPT.

Le coefficient de puissance C_p , pour les trois stratégies de commande étudiées prend une valeur maximale de 0,48 environ pour un angle de calage des pales $\beta = 0^\circ$.

D'autre part, les réponses du système mettent en évidence un léger dépassement pour la vitesse relative et la vitesse mécanique au démarrage pour le contrôle avec le régulateur PI, alors que pour les deux autres stratégies le suivi des trajectoires se fait sans aucun dépassement.

c) Résultats de contrôle du convertisseur coté machine



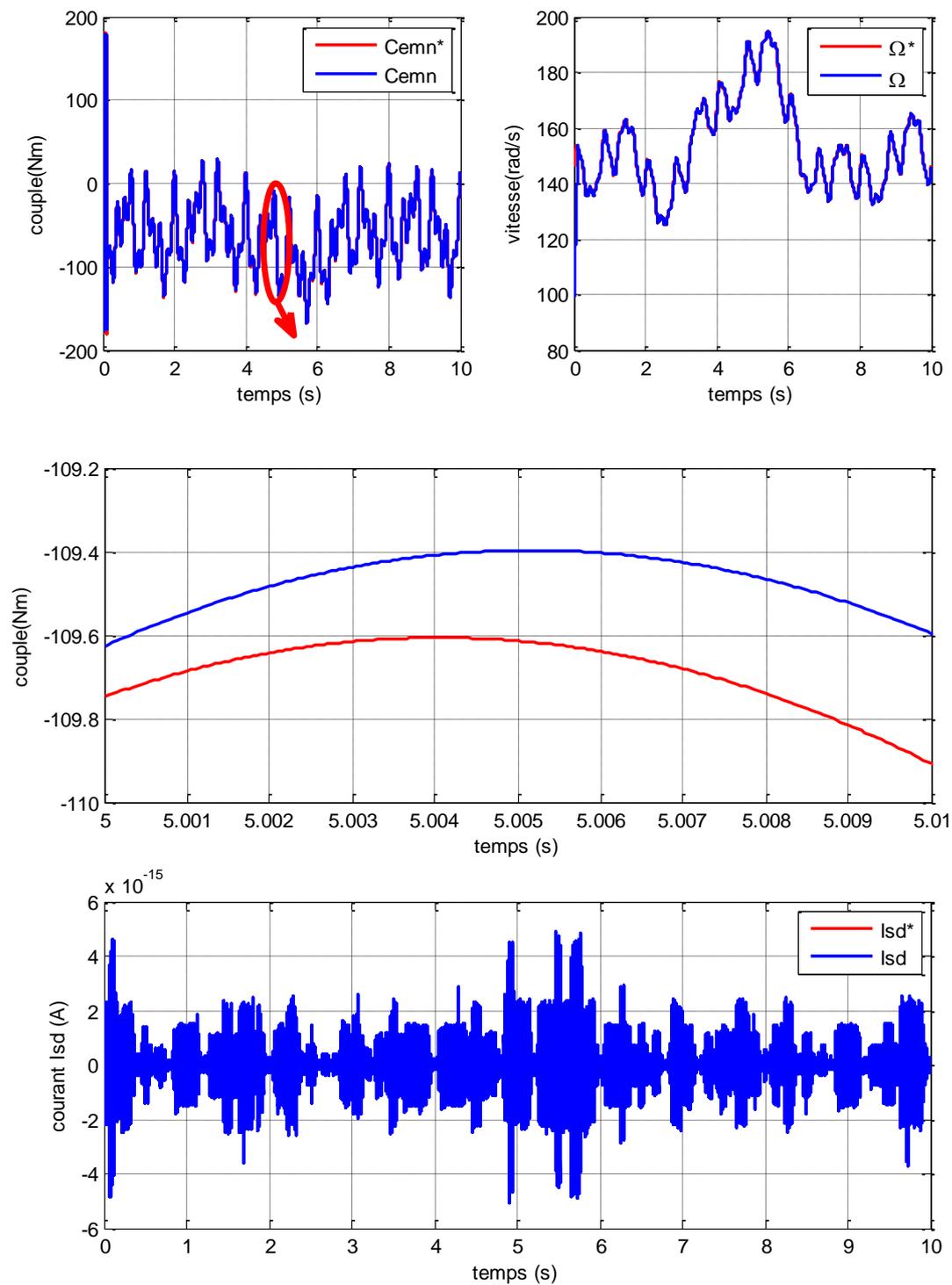


Figure III.16 : Résultats de contrôle du convertisseur coté machine par contrôle de vitesse par IP et réglages des courants statorique de la GSAP par PI.

Interprétations des résultats

Le courant i_{sq} et le couple électromagnétique ont la même allure qui prouve leur relation linéaire.

On constate que l'allure de la vitesse suit intégralement sa référence et très rapidement et sans dépassement, ce qui permet l'extraction d'une puissance maximale. La forme du couple électromagnétique est identique à celle du courant en quadrature i_{sq} , ce qui montre bien l'effet de que la commande vectorielle est bien réalisée.

III.5 Conclusion

Nous avons développé dans ce chapitre les loi de contrôle des différentes parties de la chaîne de conversion à savoir la commande du convertisseur coté machine, la régulation du bus continu, et celle du convertisseur coté réseau à base des régulateurs PI classique.

Les performances des régulateurs IP, et à MG pour le suivi du point maximum de puissance (MPPT) sont sensiblement égales, avec une légère différence avec le régulateur PI.

Les résultats de simulation obtenus pour le contrôle du convertisseur coté machine en utilisant le régulateur IP pour la MPPT et le régulateur PI pour la regulation des courants statorique de la machine montrent que la stratégie de contrôle utilisée permet une extraction de puissance maximale car la vitesse de la machine suit les variations du vent.

Le prochain chapitre est consacré au control de la chaîne à base des régulateurs à mode glissant d'ordre 1.