

Association d'un générateur éolien à vitesse fixe avec une microcentrale hydroélectrique basée sur un générateur à vitesse variable

Le chapitre trois étudie l'association d'une microcentrale hydraulique et d'une centrale éolienne. Cet ensemble peut être raccordé à un réseau interconnecté ou à un site isolé. D'abord, un état de l'art du système éolien/hydraulique est présenté. Ensuite, la modélisation des différentes sources sous forme de (REM) est effectuée. Les simulations et les résultats expérimentaux du système global permettront de conclure sur la nécessité d'une gestion multi niveaux de ce système complexe et d'outils pour sa réalisation

Chapitre III

Association d'un générateur éolien à vitesse fixe avec une microcentrale hydroélectrique basée sur un générateur à vitesse variable

III. 1. Introduction

Le contexte actuel de dérégulation de l'électricité, les interrogations et les inquiétudes concernant les conséquences environnementales de la production d'énergie électrique au moyen de combustibles fossiles ou radioactifs, a déclenché depuis quelques années un véritable enthousiasme en faveur de l'utilisation des énergies renouvelables comme en témoignent les nombreux articles de recherche et de presse grand public qui paraissent régulièrement.

Les moyens de production basés sur les énergies renouvelables souffrent d'une dépendance à l'égard de la disponibilité d'énergie primaire. L'exemple des générateurs éoliens est significatif parce que le vent est aléatoire et difficilement prévisible d'un jour à l'autre. Les mêmes remarques peuvent être faites pour l'énergie solaire dans les pays où le climat est tempéré. Par contre, les microcentrales hydrauliques peuvent être considérées comme une exception. En effet, le débit d'eau ne change pas généralement aussi vite que la vitesse du vent ou le rayonnement solaire, sauf lors des événements météorologiques exceptionnels comme la tempête. Dès lors, la microcentrale hydraulique a la capacité de compléter utilement une éolienne. Elle peut compenser des fluctuations du vent et soutenir des générateurs éoliens.

Certains lieux géographiques, comme par exemple la petite île de l'archipel des Canaries, El Hierro, en Espagne, va devenir la première île du monde entièrement alimenté en électricité par un ensemble d'éoliennes et petites centrales hydrauliques.

Dans cette étude, nous avons choisi une source hybride composée d'une microcentrale hydraulique à vitesse variable et un générateur éolien à vitesse fixe.

Système hybride éolien/hydraulique à l'éclusé

Tout d'abord, il nous faut définir le terme d'hydraulique à l'éclusé : on classe dans cette catégorie les installations hydrauliques ayant un réservoir de stockage d'une capacité inférieure à 400 heures à puissance nominale. La plupart des installations ont en fait des capacités de stockage de quelques dizaines d'heures, afin de répondre à la pointe journalière d'électricité.

[Gra 05] propose une étude qui permet de prouver l'efficacité du couple hydraulique à l'écluse / éolien pour le passage de la pointe hivernale. Car, en associant ces deux sources, elles peuvent garantir une énergie disponible pour les pointes de consommation bien plus importante que si les deux sources sont prises individuellement.

[Cas 04] montre que l'énergie éolienne peut servir à sécuriser la garantie de puissance de l'hydraulique au moment de l'extrême pointe de consommation hivernale et que le couple hydraulique - éolien permet ainsi d'éviter la consommation de l'énergie thermique.

[Jar 04] présente dans cet article un système hybride hypothétique à Oaxaca au Mexique. Il montre la possibilité de garantir la puissance nominale d'une éolienne en l'associant à une source hydraulique pour compenser le comportement aléatoire du vent.

[Cam 03] donne une autre méthode de contrôle de centrale hybride éolien - hydraulique basée sur des agents intelligents qui représentent un programme autonome, et capable d'observer son environnement, capable de communication de manière intelligente. Ceux-ci fonctionnent tellement vite qu'ils peuvent faire des opérations en temps réel. La puissance peut être commandée rapidement.

III. 1.2. Système hybride éolien/hydraulique à petite échelle

[Som 03] expose l'étude de faisabilité d'une implantation d'une centrale hybride hydraulique - éolienne dans l'île de Crète en Grèce, celle-ci a son propre réseau électrique. La centrale choisie comporte une usine de désalinisation. Cette dernière va pouvoir absorber le surplus d'énergie de la ferme éolienne et pourra desservir quelques zones éloignées dépourvues d'eau. Si par contre, l'énergie éolienne ne peut pas répondre à la demande, c'est le système hydraulique qui va produire de l'énergie utilisant l'eau stockée dans le réservoir supérieur.

Quand le système hybride se retrouve en difficulté (production réduite de la ferme éolienne et faible niveau dans le réservoir), c'est un groupe diesel qui fournira les besoins du réseau.

Pour vérifier la faisabilité de cette installation, une page de travail Excel a été construite pour simuler l'opération de l'ensemble de la centrale hybride. Grâce à cette page, on peut estimer le nombre et la puissance nominale des éoliennes nécessaires, la puissance nominale de la centrale hydraulique et la taille des réservoirs, le nombre d'heures où il manque de l'énergie et les pertes engendrées par cette centrale.

Le tableau Excel prend en compte la vitesse du vent de chaque zone, le nombre et la puissance de chaque pompe, le type de turbine hydraulique et éolienne ainsi que la capacité du réservoir le plus haut. Celui-ci permet d'obtenir toutes les valeurs correspondantes au fonctionnement de la centrale (puissance générée par le parc éolien, puissance à stocker, puissance à générer par les turbines hydrauliques, les pertes engendrées) à partir de données du vent prises toutes les 10 minutes. Les calculs sont basés sur de vraies mesures de vitesse de vent. Ainsi, le programme est réalisé de manière à ce que, quand il y a trop d'énergie éolienne, celle-ci est stockée par l'intermédiaire des pompes d'un réservoir à un autre. Si par contre, l'énergie éolienne ne peut pas répondre à la demande, c'est le système hydraulique qui va produire de l'énergie utilisant l'eau stockée dans le réservoir supérieur.

D'après le programme mis en place, des résultats ont été présentés. La figure 3.1 illustre le nombre d'heures en fonction de chaque mois sur une période d'un an, auxquelles le système éolien / hydraulique ne peut pas répondre à la demande de manière satisfaisante.

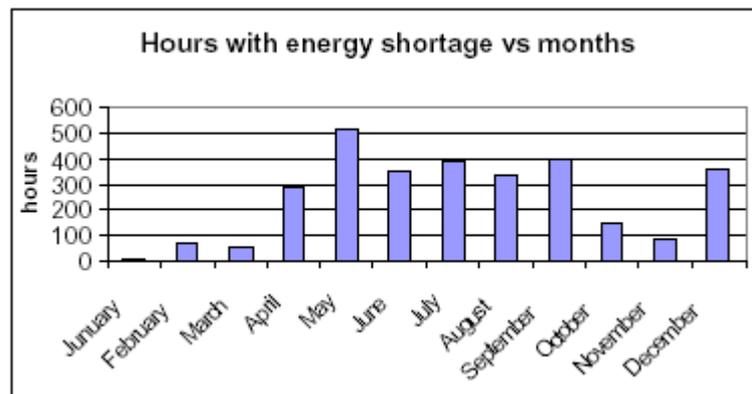


Figure 3.1 Manque d'énergie de la centrale hybride [Som 03]

La figure 3.2 montre que la demande est plus forte en été qu'en hiver et qu'il y a un manque d'énergie. Avec un nombre plus important d'éoliennes, l'apport d'hydraulique est moins important.

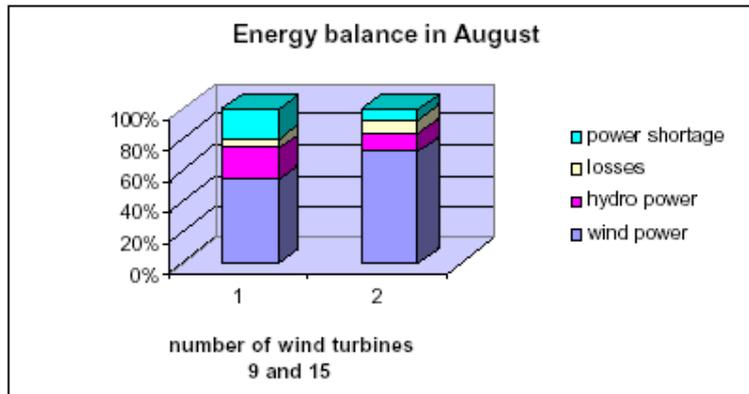
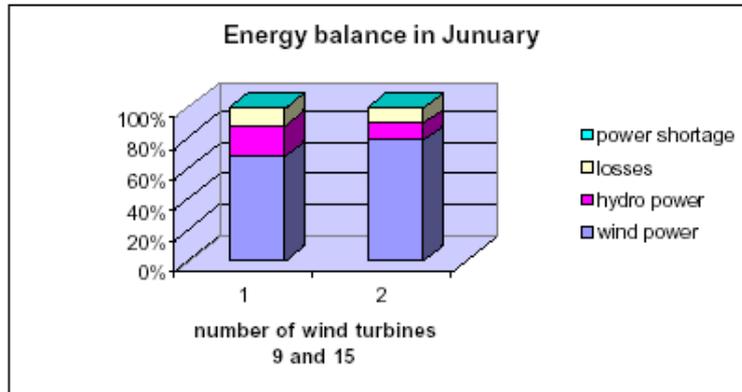


Figure 3.2 Comparaison du nombre des éoliennes [Som 03]

La figure 3.3 présente le manque d'énergie et les pertes totales du système en fonction du nombre d'éoliennes choisies. Le pompage et la génération de la centrale hydraulique sont responsables de la majorité des pertes. On remarque que le manque d'énergie diminue quand le nombre d'éoliennes augmente mais que les pertes augmentent en contrepartie.

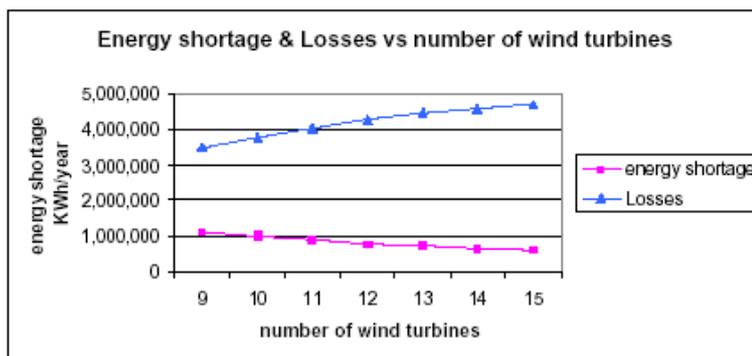


Figure 3.3 Manque d'énergie et pertes en fonction du nombre d'éoliennes [Som 03]

Le système éolien - hydraulique couplé à un groupe diesel, est d'après cette étude un bon moyen de répondre aux besoins énergétiques d'une île isolée d'un point de vue économique et

environnemental. Ce système hybride permettrait alors d'élever le taux de pénétration de l'éolien dans le réseau de puissance.

III. 1.3 Conclusion

Ces études montrent que le couple hydraulique/éolienne permet d'éviter la consommation de l'énergie thermique. Ces articles nous ont permis d'élaborer une synthèse sur la situation actuelle et les perspectives du système multi sources et notamment l'association éolienne et la microcentrale hydroélectrique.

Dans notre étude, nous traitons une microcentrale hydraulique au fil de l'eau couplée à une éolienne à vitesse fixe. La vitesse du vent varie très rapidement alors que le débit d'un cours d'eau varie plus lentement. Ainsi la source hydraulique pourrait compenser le comportement aléatoire de l'éolienne.

III. 2. Modélisation et simulation du système hybride éolien/hydroélectrique

Nous présentons la modélisation du système hybride éolien/hydroélectrique étudié en nous appuyant sur la REM de la microcentrale hydroélectrique présentée dans le chapitre II.

La structure choisie est représentée par la figure 3.4 et est composée d'une micro centrale hydraulique associée à une éolienne à vitesse fixe.

Notre étude portera sur l'apport de puissance à un réseau puissant ou à un site isolé.

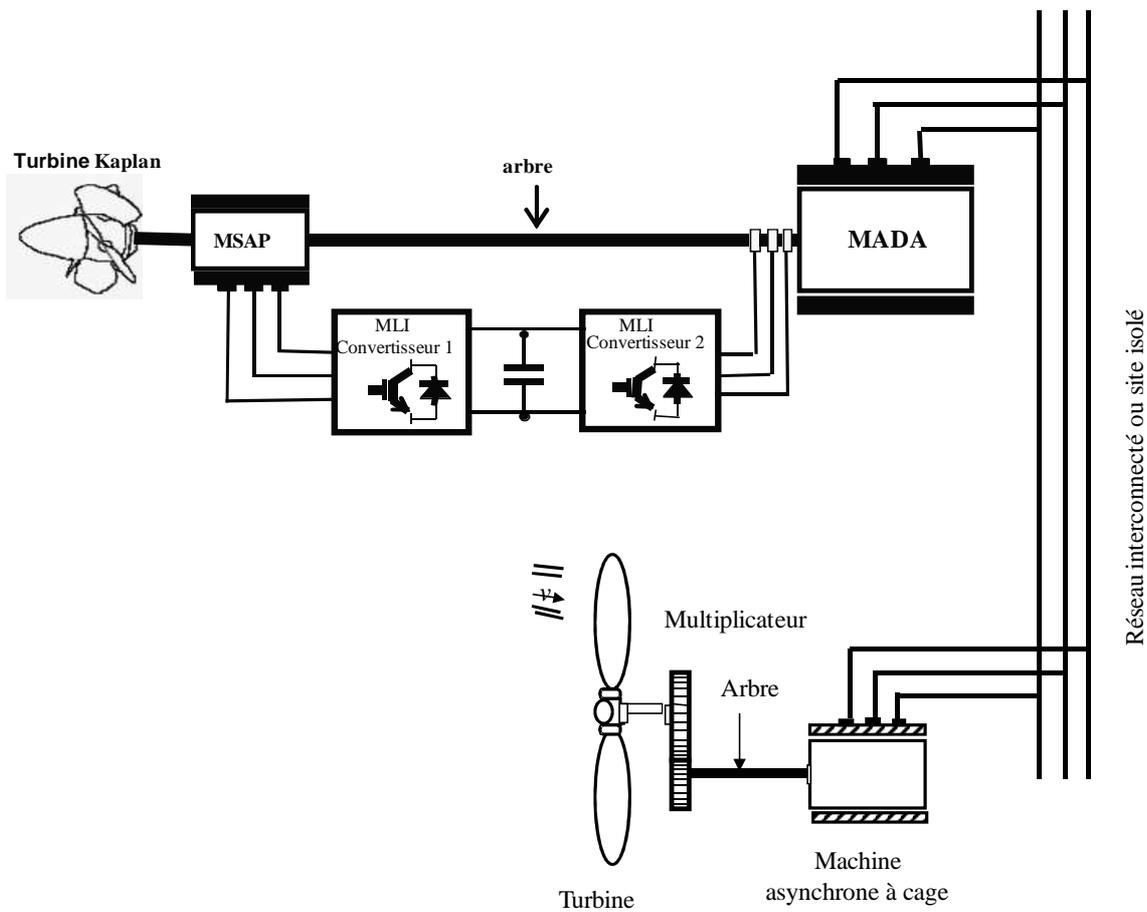


Figure 3.4 Schéma de principe du Système hybride

III. 2.1. Modélisation du vent

On utilisera des mesures de vitesse du vent effectuées sur le site éolien de Dunkerque. Les courbes présentées de la figure 3.5a à la figure 3.5c représentent la vitesse du vent en fonction du temps. La vitesse moyenne du fichier de vent faible est d'environ 6 m/s, pour le vent moyen on a environ 10 m/s et pour le vent fort, environ 12 m/s.

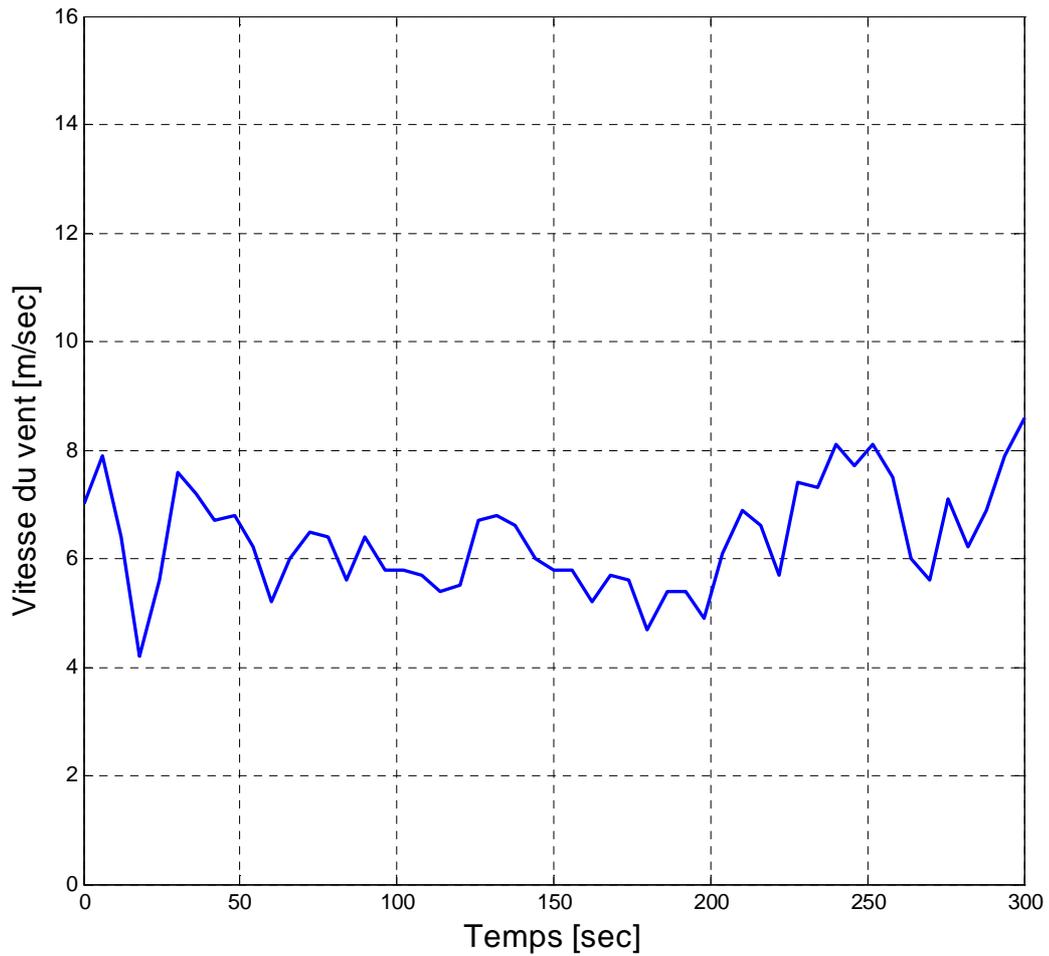


Figure 3.5(a) vent faible

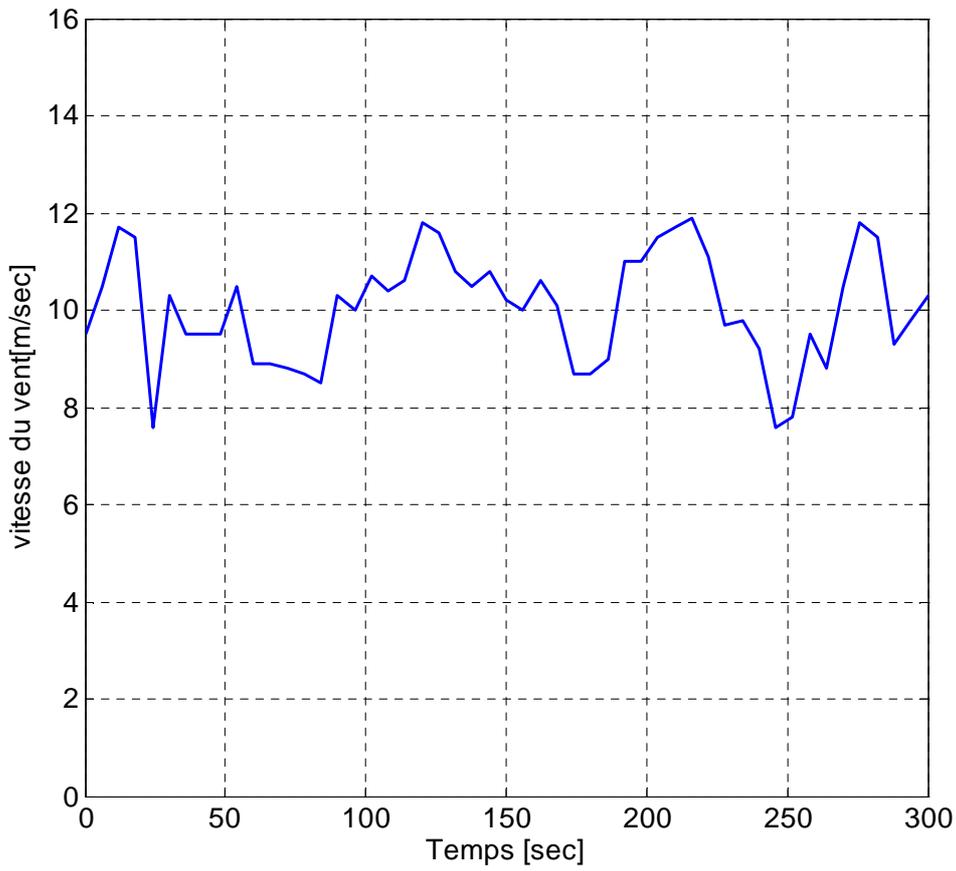


Figure 3.5(b) vent moyen

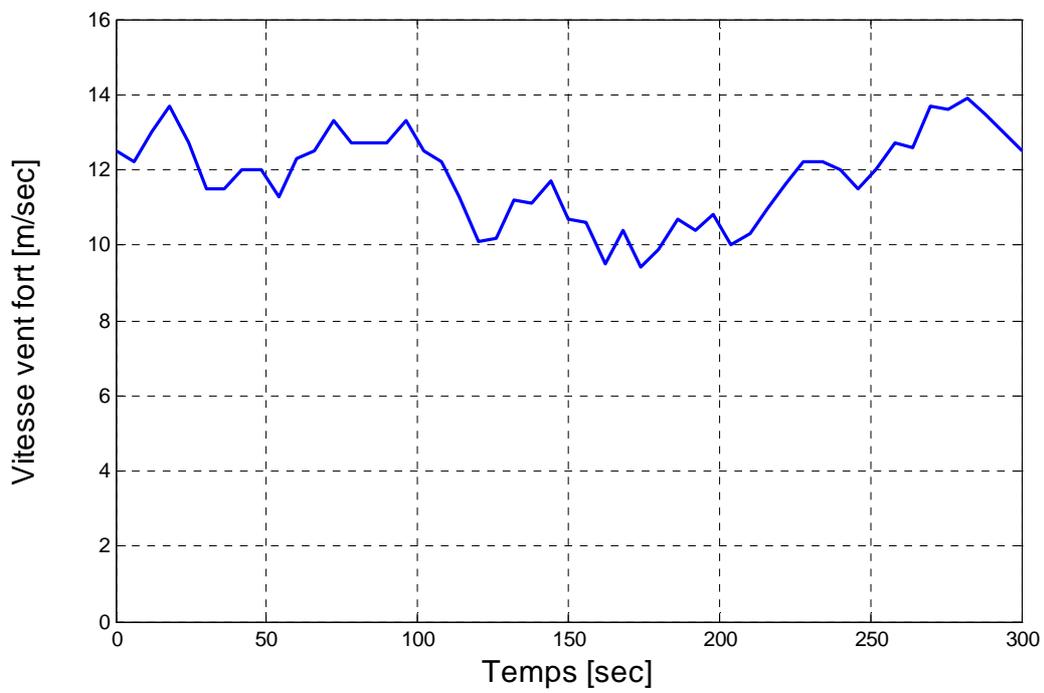


Figure 3.5(c) vent fort

III. 2.2 Modélisation du débit de l'eau

Le graphe ci-dessous représente les variations du débit en fonction du temps d'un cours d'eau. Il est tiré du site Burande à la Tour – d'Auvergne [DIREN 07]. Sur le graphe précédent (figure 3.6), l'échelle de temps est journalière.

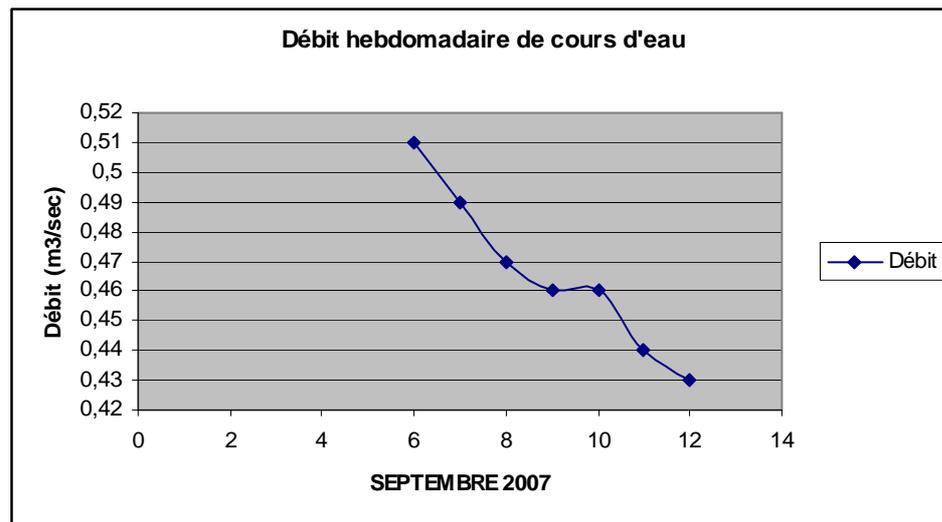


Figure 3.6 Évolution des débits moyens journaliers et mensuels

Cette courbe est étudiée pour déterminer la nécessité ou non de considérer l'aspect dynamique dans le modèle de la turbine. Si l'on fait un parallèle avec l'éolien et la vitesse du vent, les variations du vent sont de l'ordre de la seconde, elles sont brutales et très élevées. Par contre, on remarque que le débit de la rivière évolue très faiblement et très lentement. Pour associer les deux, il faut une échelle de temps commune, qui dans ce cas serait la seconde, il faudrait alors créer un modèle de microcentrale qui s'intéresserait aux variations du débit à la seconde près.

Choix de l'évolution du débit pour les simulations:

Ainsi, des courbes modélisant le comportement de la turbine en régime statique peuvent être utilisées et on peut envisager le fonctionnement de la microcentrale avec une évolution du débit sur plusieurs minutes (figure 3.7), car les principales variations de débit hydraulique ont lieu lors des crues ou de sécheresse.

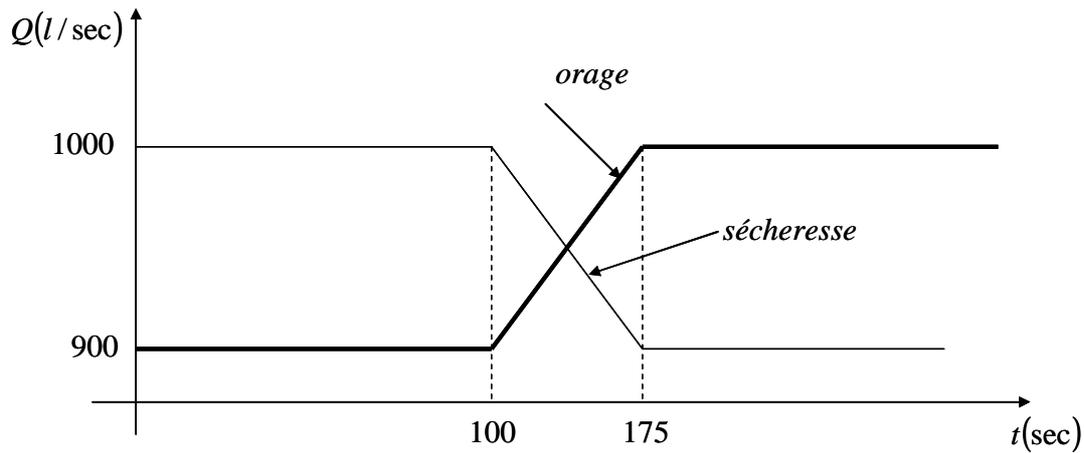


Figure 3.7 Évolution des débits en fonction du temps

III. 2.3. Modélisation d'une éolienne à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont couplées au réseau via une machine asynchrone à cage (MAS). Le couplage entre l'aéroturbine et le générateur asynchrone à vitesse fixe se fait par le biais d'un multiplicateur de vitesse. La puissance produite par ces générateurs est en général limitée par l'effet stall et le pitch. Ce type de concept est réservé aux installations inférieures à 1 MW des réseaux isolés.

La Turbine éolienne

Il existe des modèles de turbine relativement complexes, prenant en compte l'effet de mât, de la pesanteur sur la rotation des pales, de leur élasticité ou encore de la variation de vitesse de vent selon l'altitude.

Pour obtenir un modèle simple et reflétant le comportement dynamique global de la turbine, on peut utiliser une courbe du coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse ($C_p(\lambda)$) du même type que celle représentée à la figure 3.8 [Car 01]. Ce modèle est suffisant pour notre étude.

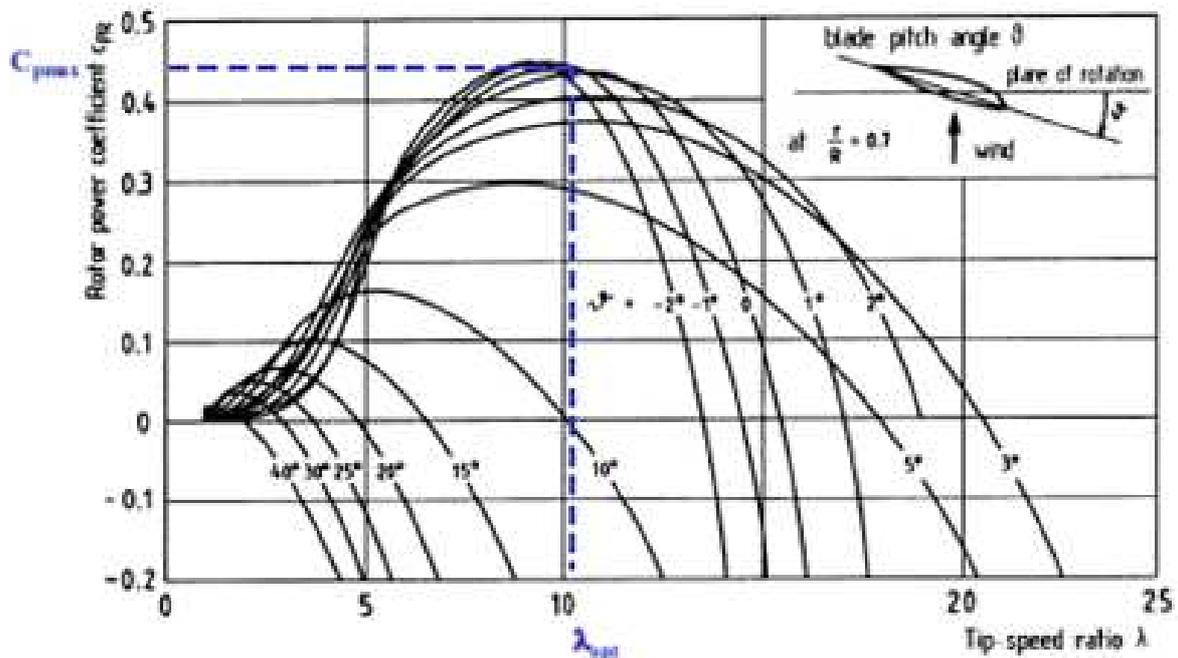


Figure 3.8 Allure du coefficient C_p en fonction du ratio de vitesse λ pour plusieurs angles de calage β

La puissance cinétique extraite du vent s'exprime par la relation suivante :

$$P_w = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S_t v^3 \quad (3.1)$$

Avec :

P_w : Puissance extraite du vent (W)

ρ : Densité de l'air (kg/m^3)

S_t : Surface balayée par le rotor (m^2)

$C_p(\lambda)$: Coefficient de puissance

λ : Vitesse spécifique

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v}$$

Ω_t : Vitesse de rotation de l'arbre de la turbine (rad/sec)

R_t : Rayon de la turbine (m)

v : Vitesse du vent (m/sec)

Le couple de la turbine se déduit directement de (3.1) soit :

$$C_w = \frac{P_w}{\Omega_t} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S_t v^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (3.2)$$

Pour modéliser une éolienne à couplage direct, il suffit de relier le couple éolien C_w à une génératrice asynchrone. Cela suppose donc de disposer d'un modèle d'une machine asynchrone à cage (MAS) adaptée, avec des paramètres réalistes.

La figure 3.9 présente la REM d'une éolienne à vitesse fixe en négligeant ces différents phénomènes.

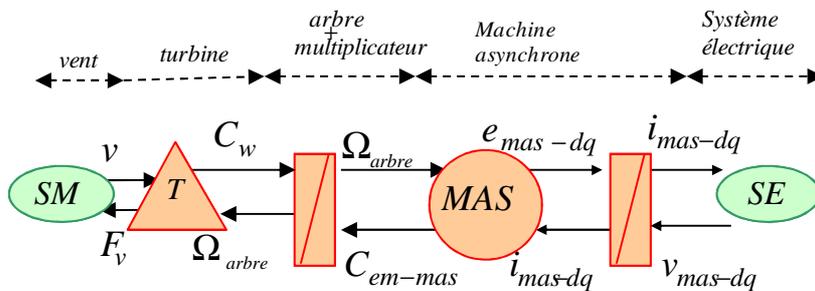


Figure 3.9 REM d'une Éolienne à vitesse fixe

Où :

v : Vitesse du vent

F_v : Effort global de l'éolienne

C_w : Couple mécanique de la turbine éolienne

Ω_{arbre} : Couple total sur l'arbre

C_{em-mas} : Couple électromagnétique de la machine asynchrone à cage (MAS)

e_{mas-dq} : Composantes de Park des forces électromotrices du stator de la (MAS)

i_{mas-dq} : Composantes de Park des courants du stator de la (MAS)

v_{mas-dq} : Composantes de Park des tensions du stator de la (MAS)

III. 2.4. Modèle graphique de la source hybride éolien/hydroélectrique

La REM du modèle de la source hybride éolien/hydroélectrique est obtenu en associant la source éolienne à la source hydraulique. Elle donne une macro-représentation des grandeurs échangées entre la source hybride et le réseau interconnecté ou les sites isolés. La figure 3.10 présente la REM du modèle global du système étudié.

La modélisation et la stratégie de commande de la microcentrale hydraulique a été déjà étudiée en détail dans le chapitre II.

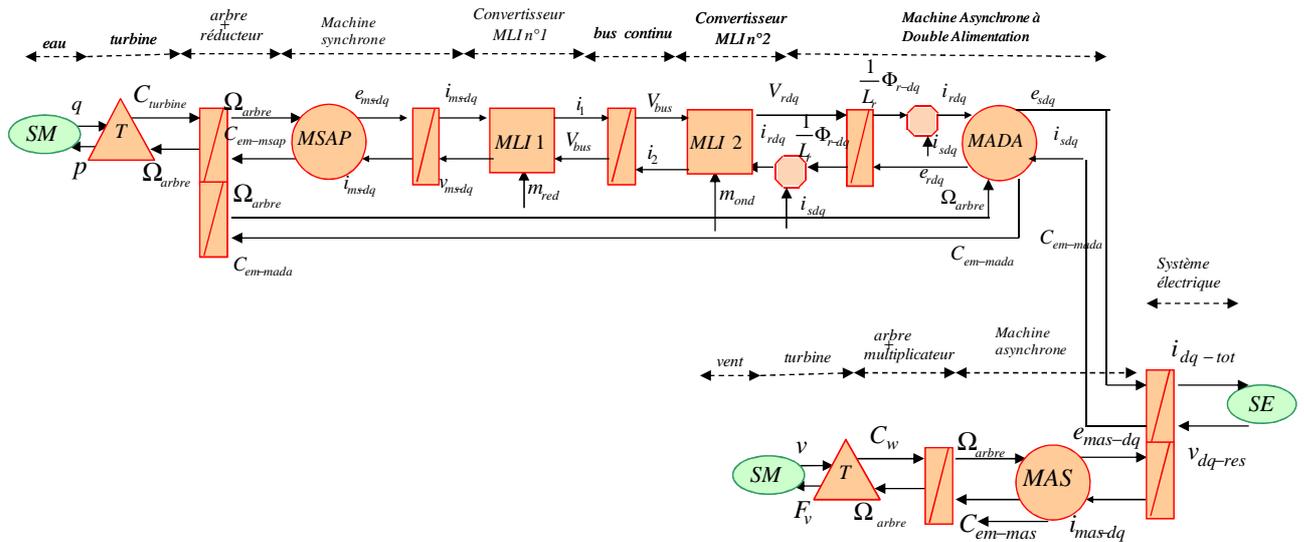


Figure 3.10 REM de la source hybride éolienne/hydroélectrique

III.2.5. Simulations de la source hybride éolien/hydroélectrique connectée sur site isolé

Des simulations ont été effectuées avec le logiciel SimulinkTM. On considère un système composé d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable au fil de l'eau de 3 kW soumise à un débit et à une hauteur fixe et d'une éolienne à vitesse fixe de 3 kW, l'ensemble alimentant un site isolé.

Le site isolé est émulé par des charges résistives variables dont la variation peut être traitée seulement point par point et non pas de manière continue. La tension (composée) efficace de référence entre les phases de la charge résistive est de 225 V.

La tension de référence du bus continu est fixée à 200 V afin de s'adapter aux tensions du rotor de la MADA.

Le débit d'eau est considéré constant pendant l'essai, car son échelle de temps de variation est le jour.

Le scénario simulé est le suivant: A $t = 0$ sec, $P = -420$ W, à $t = 100$ sec, $P = -600$ W, à $t = 200$ sec, $P = -710$ W et à $t = 280$ sec, $P = -462$ W.

Les courbes présentées de la figure 3.11 à la figure 3.16 correspondent aux résultats de simulation.

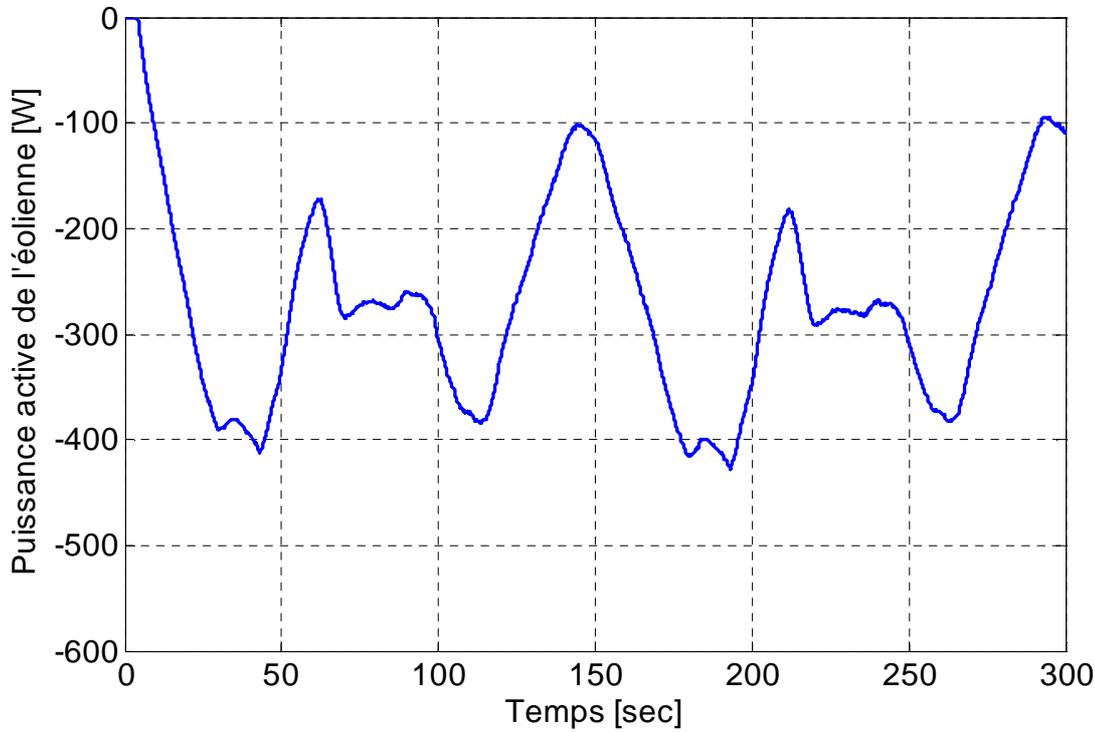


Figure 3.11 Puissance active de l'éolienne

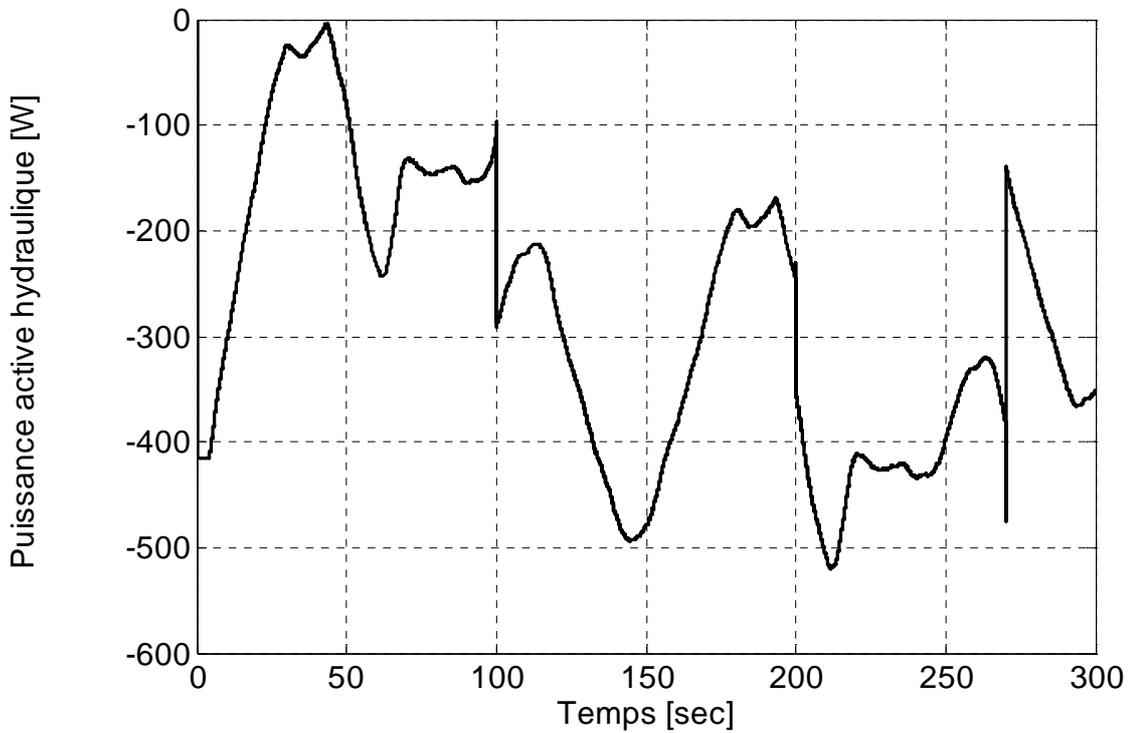


Figure 3.12 Puissance active de la microcentrale hydraulique

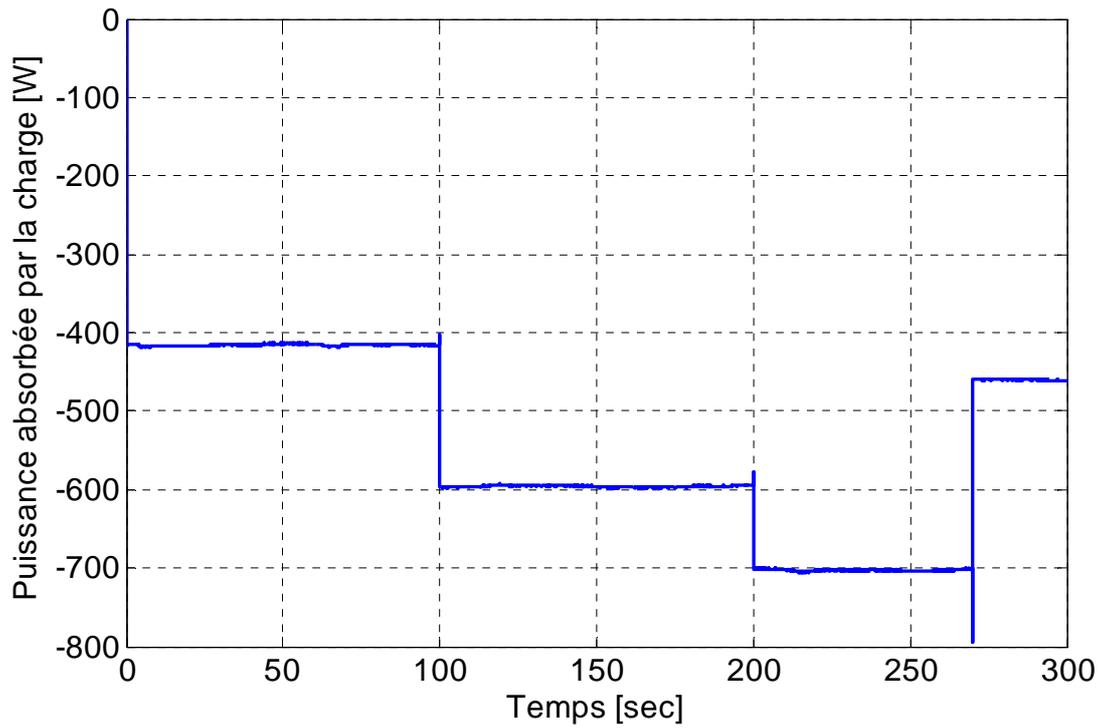


Figure 3.13 Puissance active absorbée par le site isolé

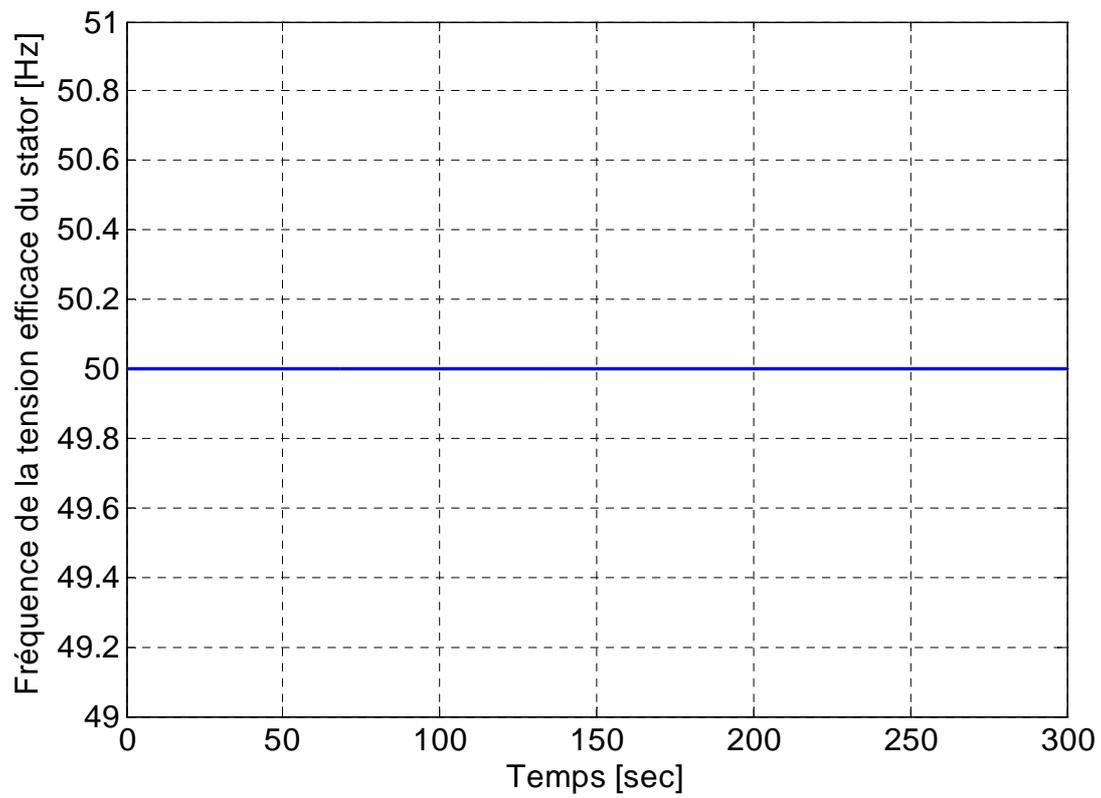


Figure 3.14 Fréquence de la tension efficace du site isolé

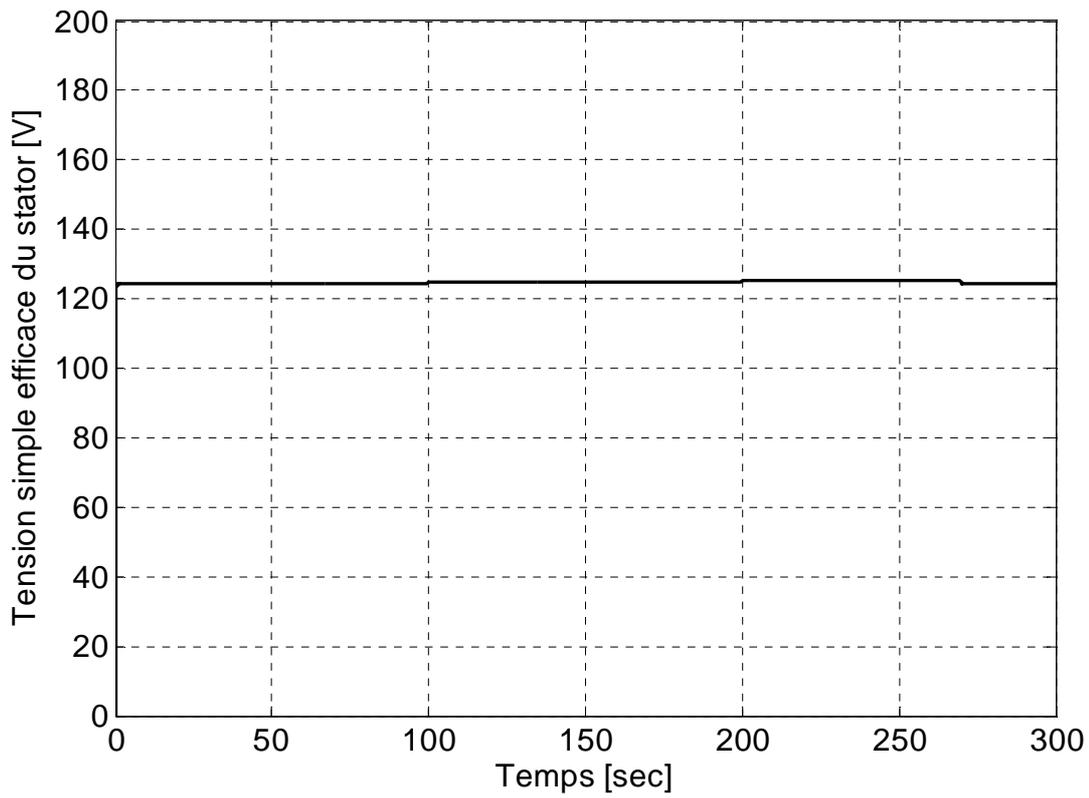


Figure 3.15 Tension simple efficace du site isolé

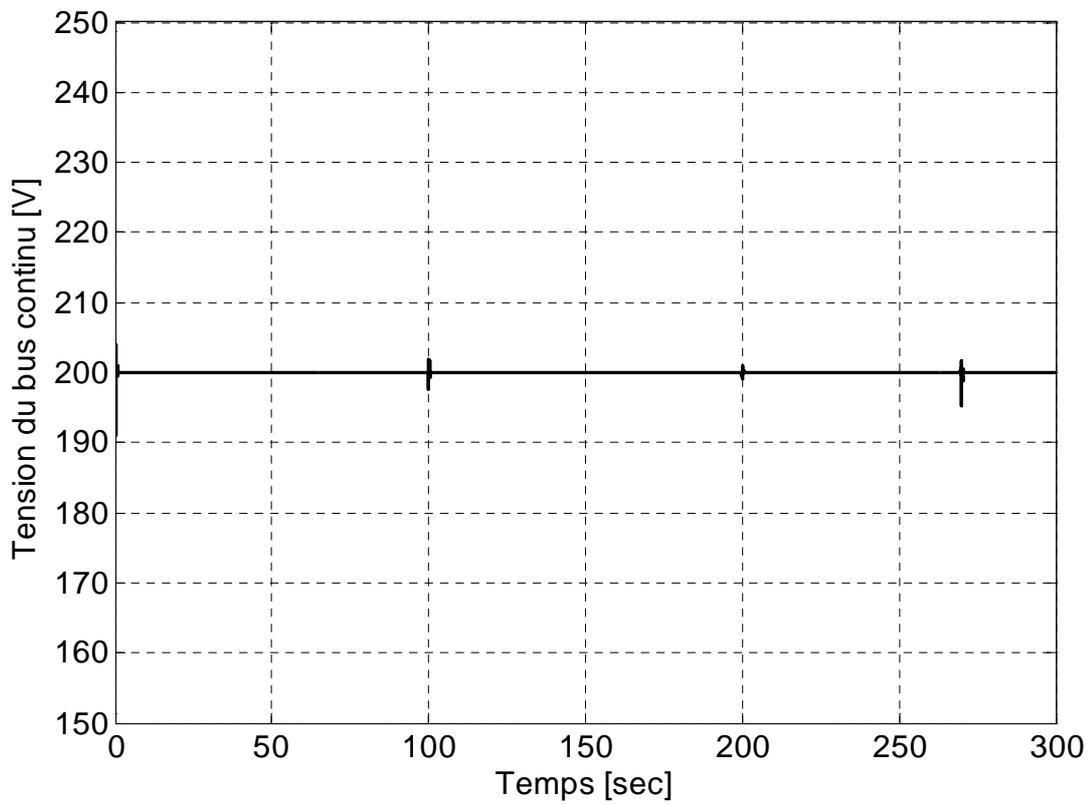


Figure 3.16 Tension du bus continu

III. 2.6. Interprétation des résultats

La figure 3.11 et la figure.3.12 montrent respectivement les puissances actives générées respectivement par la turbine éolienne et la microcentrale hydraulique. La figure 3.13 montre la puissance fournie à la charge isolée, la figure 3.14 montre la fréquence de la tension aux bornes de la charge isolée, la figure 3.15 montre la tension simple efficace de la charge isolée et la Figure3.16 montre la tension du bus continu.

La centrale hydroélectrique compense les fluctuations de l'énergie éolienne en contrôlant la tension et la fréquence de la charge. La figure.3.14 et la figure.3.15 confirment l'efficacité de la stratégie de commande de la centrale hydroélectrique pour réguler la tension efficace et la fréquence, même si la puissance active du vent (figure 3.11) est très fluctuante et la charge est variable (figure 3.13). Un autre avantage de ce système hybride est la capacité de la centrale hydroélectrique à fournir la puissance réactive nécessaire pour magnétiser le générateur asynchrone, et d'éliminer la nécessité d'installer des bancs de condensateurs.

III. 2.7. Validation expérimentale [Nas 08]

Les enroulements du stator et du rotor de la MADA sont en couplage étoile. Le point neutre du rotor est inaccessible, la mesure de deux courants du rotor et du stator est donc nécessaire. En effet, les valeurs des courants du stator sont nécessaires pour évaluer les termes de perturbation de la MADA. Les valeurs des courants du rotor sont aussi bien utiles pour calculer les flux du rotor. La tension instantanée du stator est également mesurée pour calculer les puissances active et réactive transmises par la MADA aux charges isolées, afin de maintenir la valeur efficace de la tension constante et réguler la fréquence. La centrale éolienne est à vitesse fixe, elle est émulée à l'aide d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) contrôlée en couple. La MSAP est soumise à un couple variable, dépendant de la vitesse du vent, et elle entraîne une génératrice asynchrone à cage (MAS). Pour les essais sur charges isolées, la MADA fournit la puissance réactive nécessaire à l'aimantation de la MAS [Annexes 1 et 2].

La photo de la plateforme expérimentale est présentée à la figure 3.17.

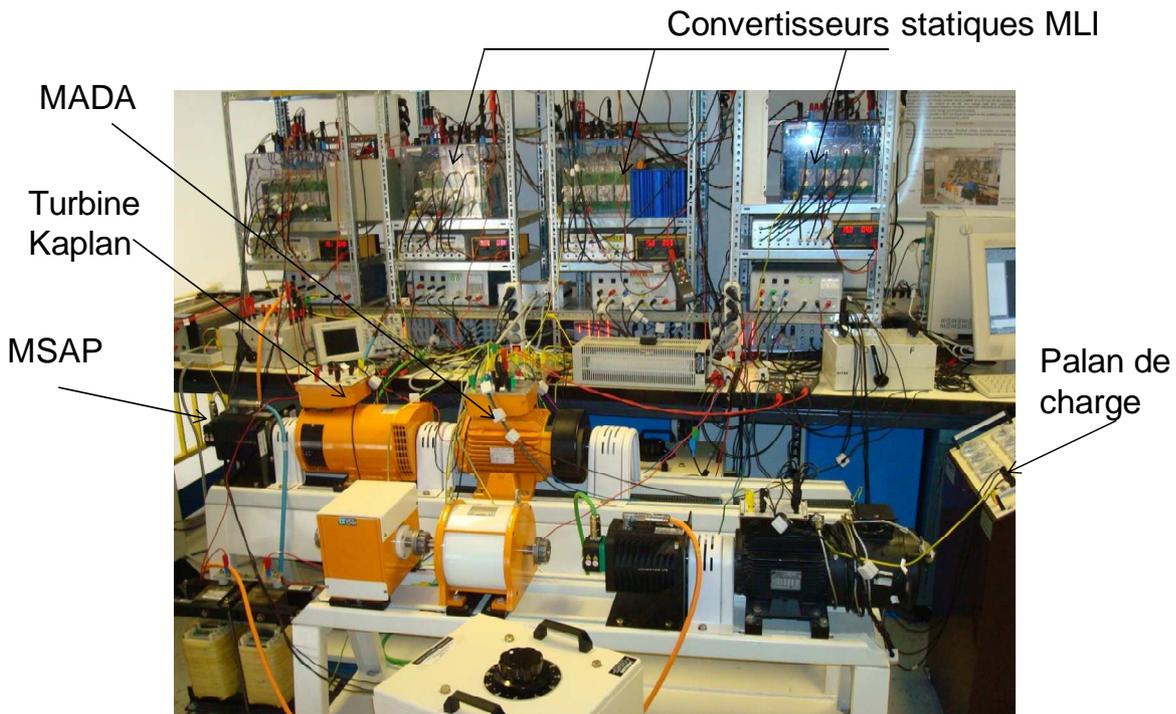


Figure 3.17 Photo de la plateforme expérimentale

La figure 3.18 représente le schéma du banc d'essai adapté à l'étude.

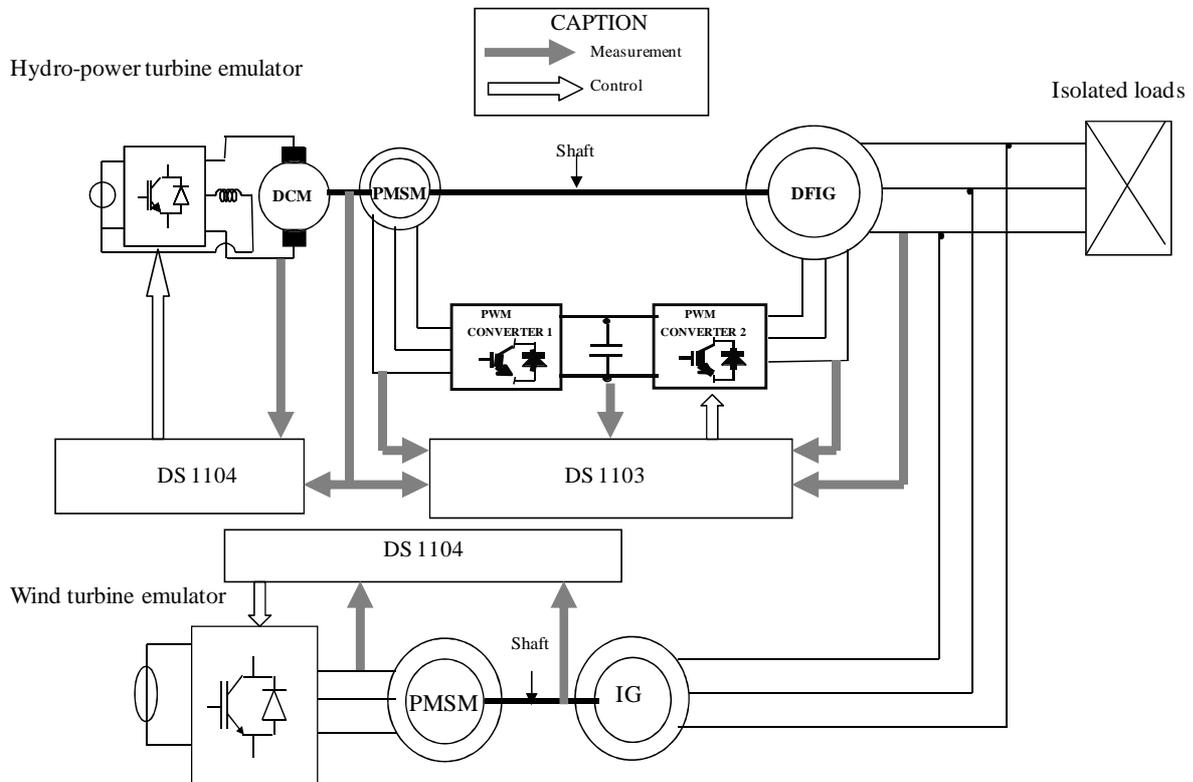


Figure 3.18 Schéma du banc d'essai adapté à l'étude d'une source hybride éolien/hydroélectrique connecté sur site isolé

Les courbes présentées de la figure 3.19 à la figure 3.27 correspondent aux résultats obtenus sur le banc expérimental.

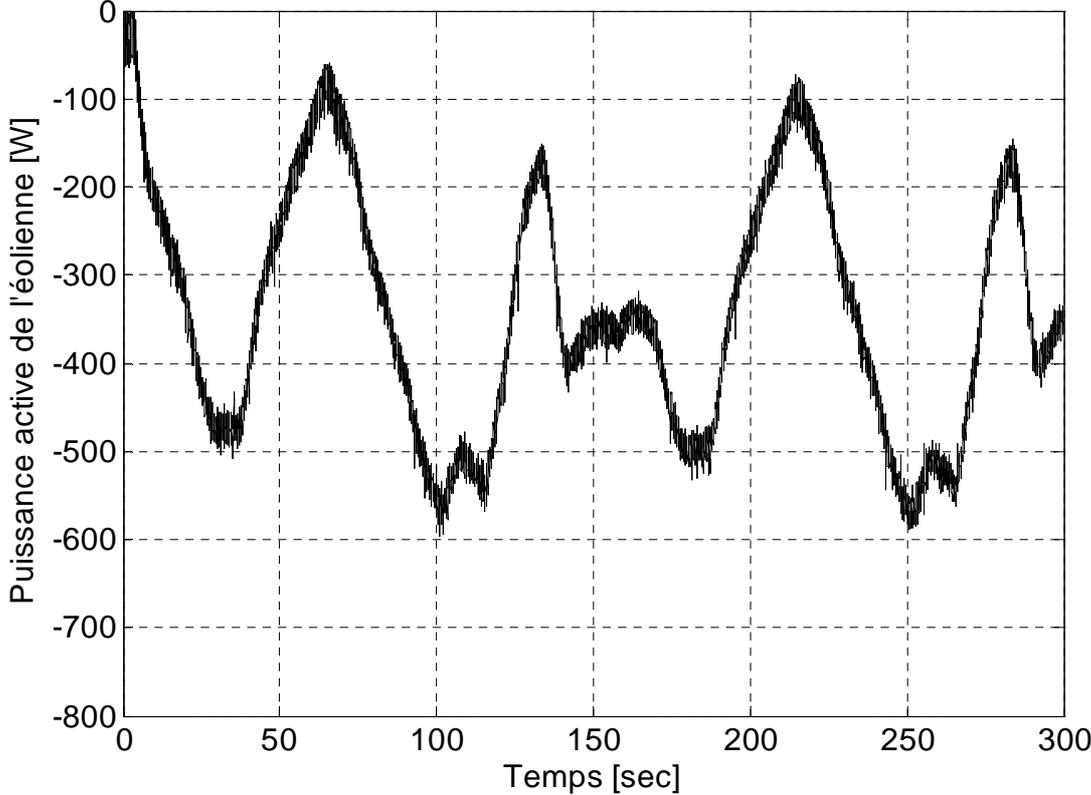


Figure 3.19 Puissance active de l'éolienne

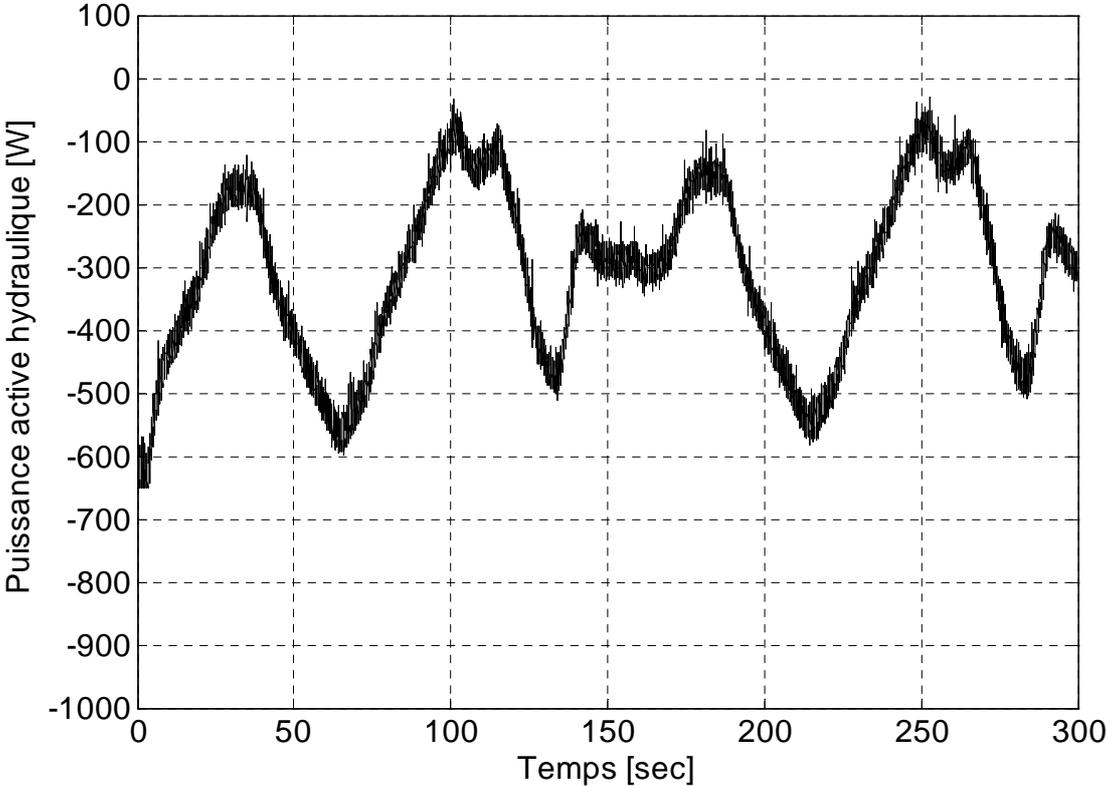


Figure 3.20 Puissance active de la centrale hydraulique

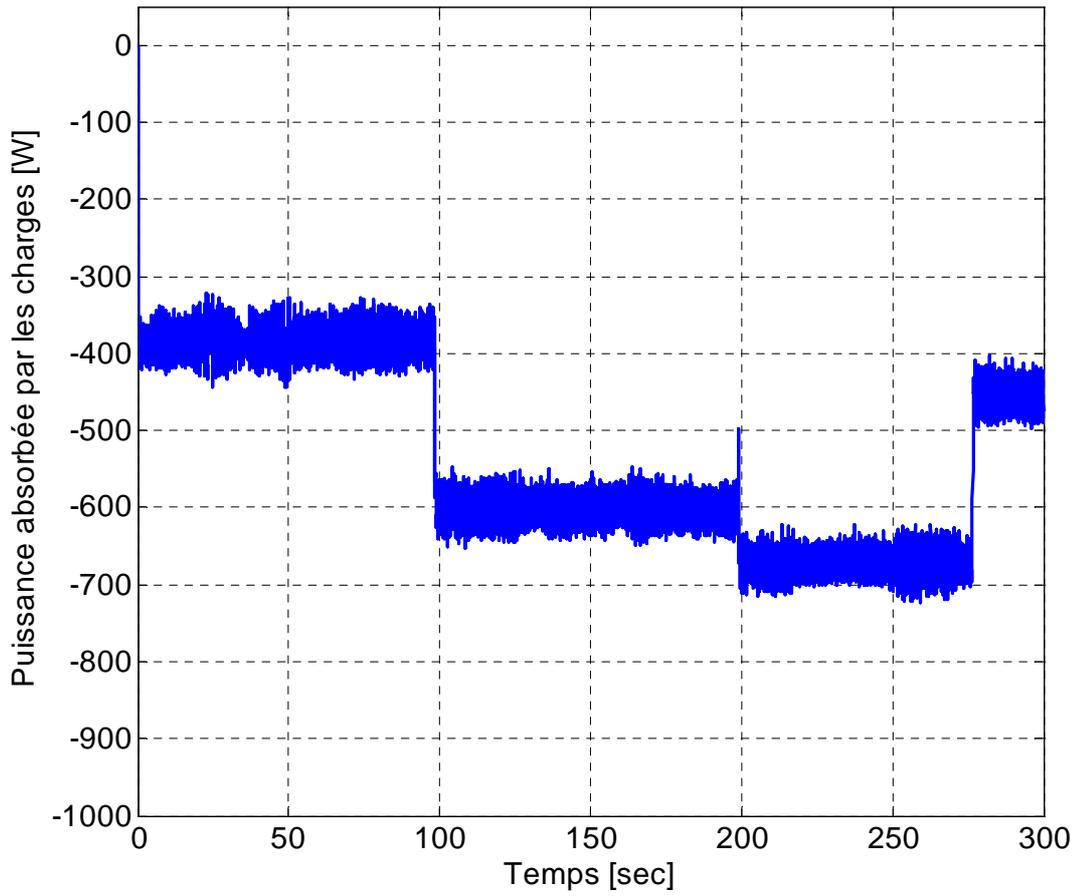


Figure 3.21 Puissance active absorbée par les charges isolées

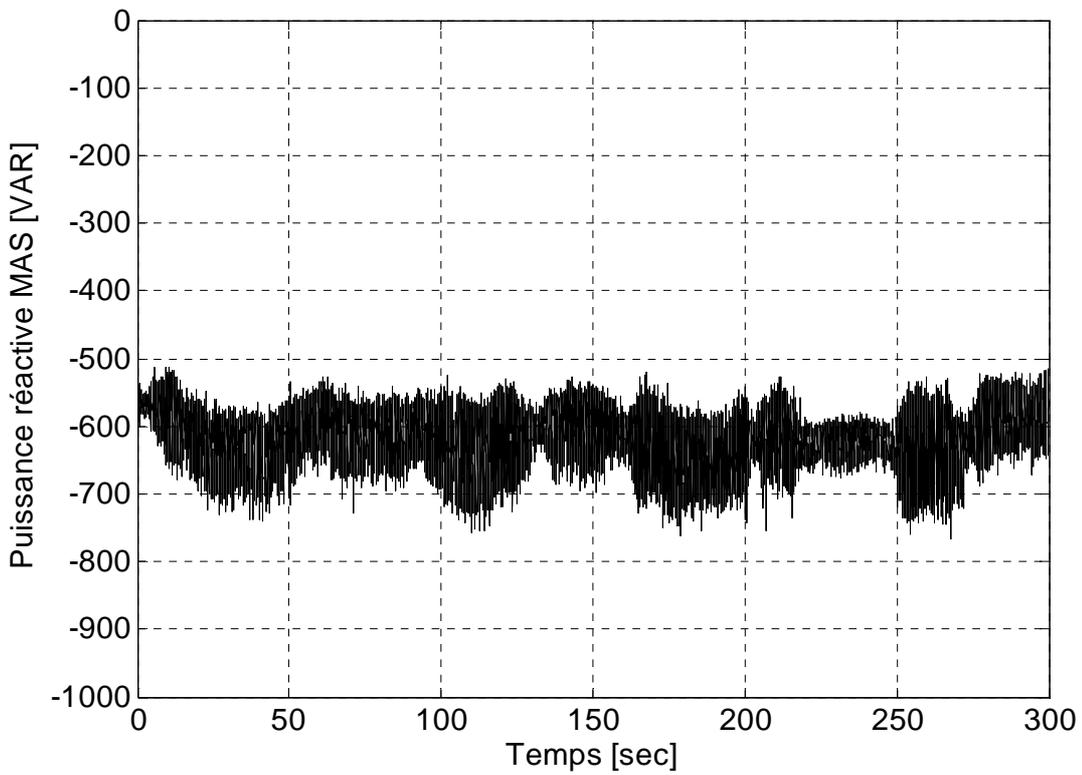


Figure 3.22 Puissance réactive absorbée par le générateur éolien

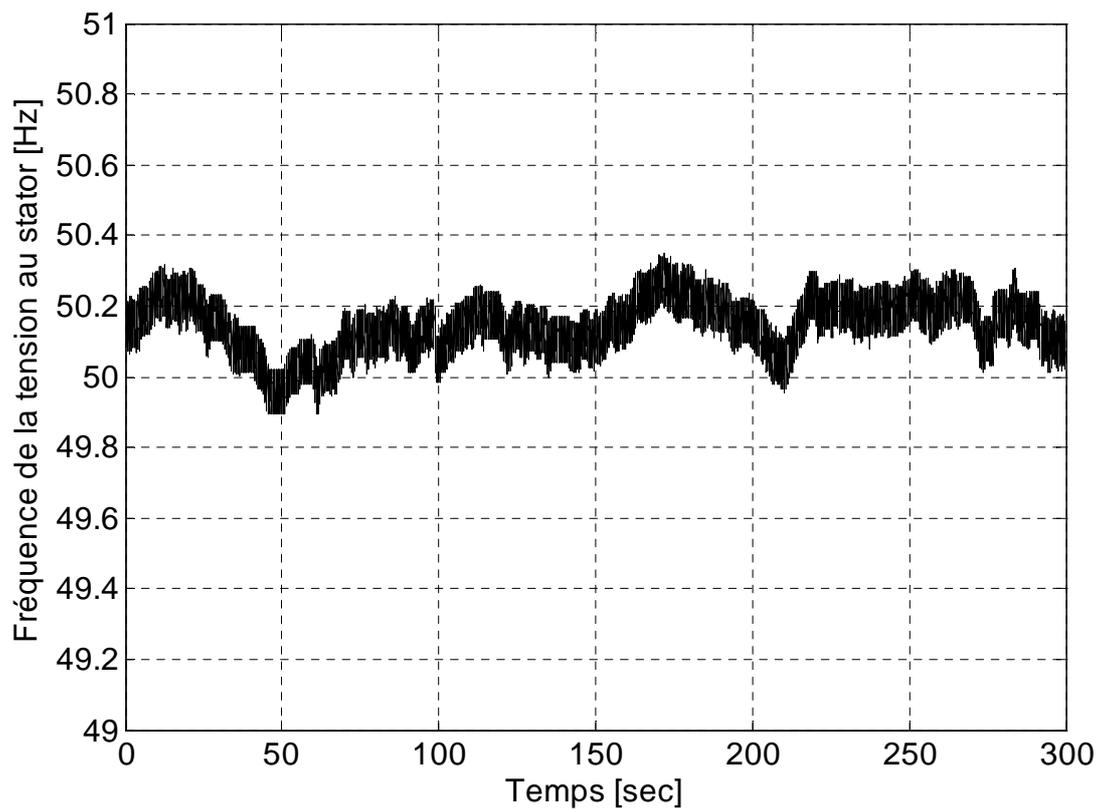


Figure 3.23 Fréquence de la tension efficace des charges isolées

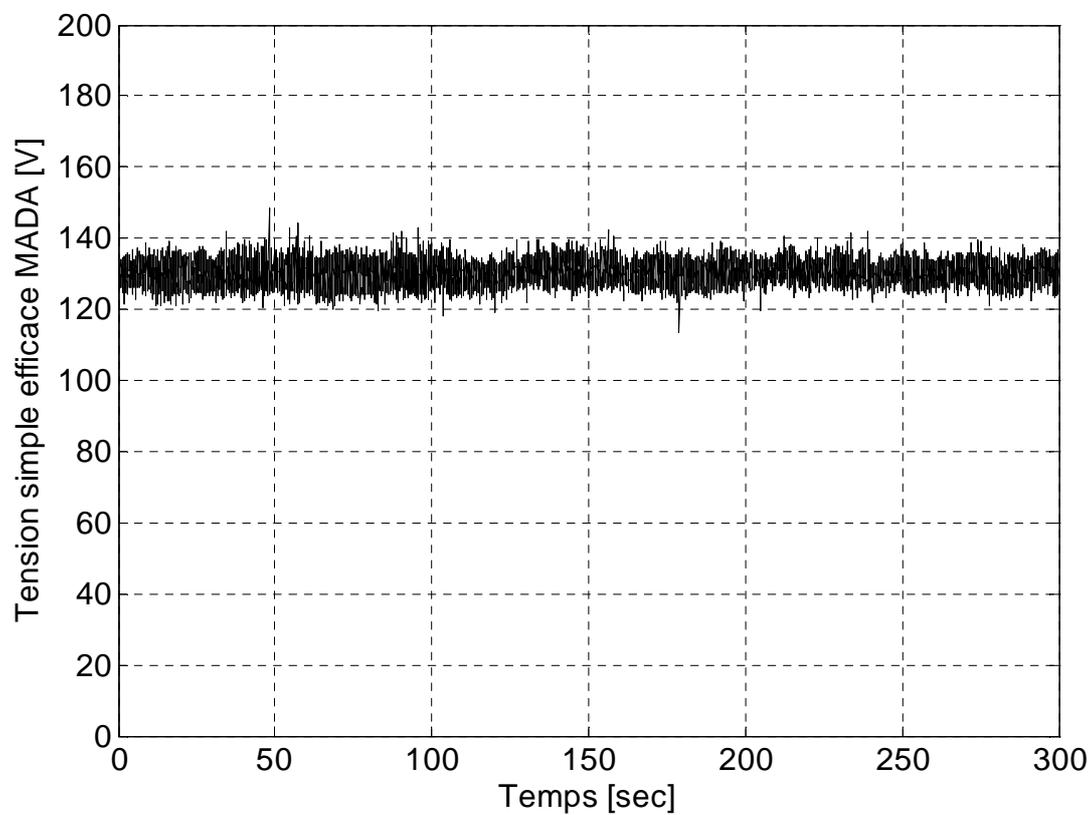


Figure 3.24 Tension efficace des charges isolées

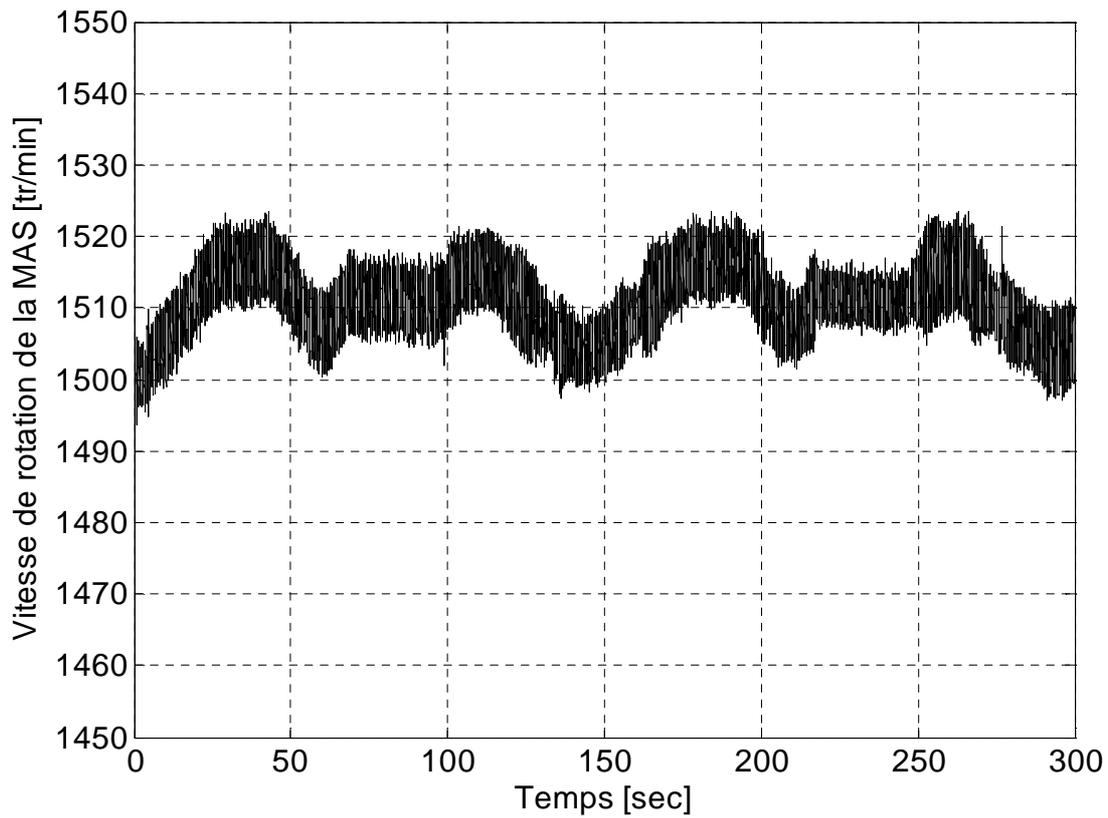


Figure 3.25 Vitesse de rotation du générateur éolien

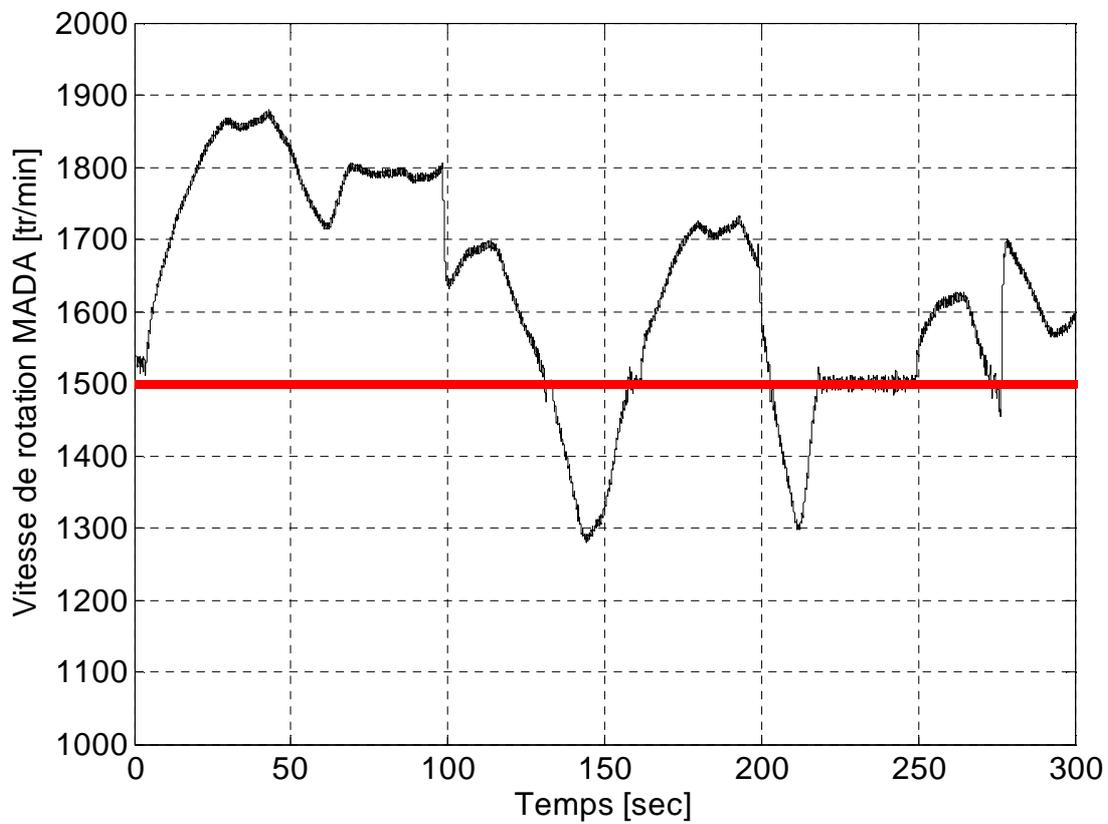


Figure 3.26 Vitesse de rotation de la MADA

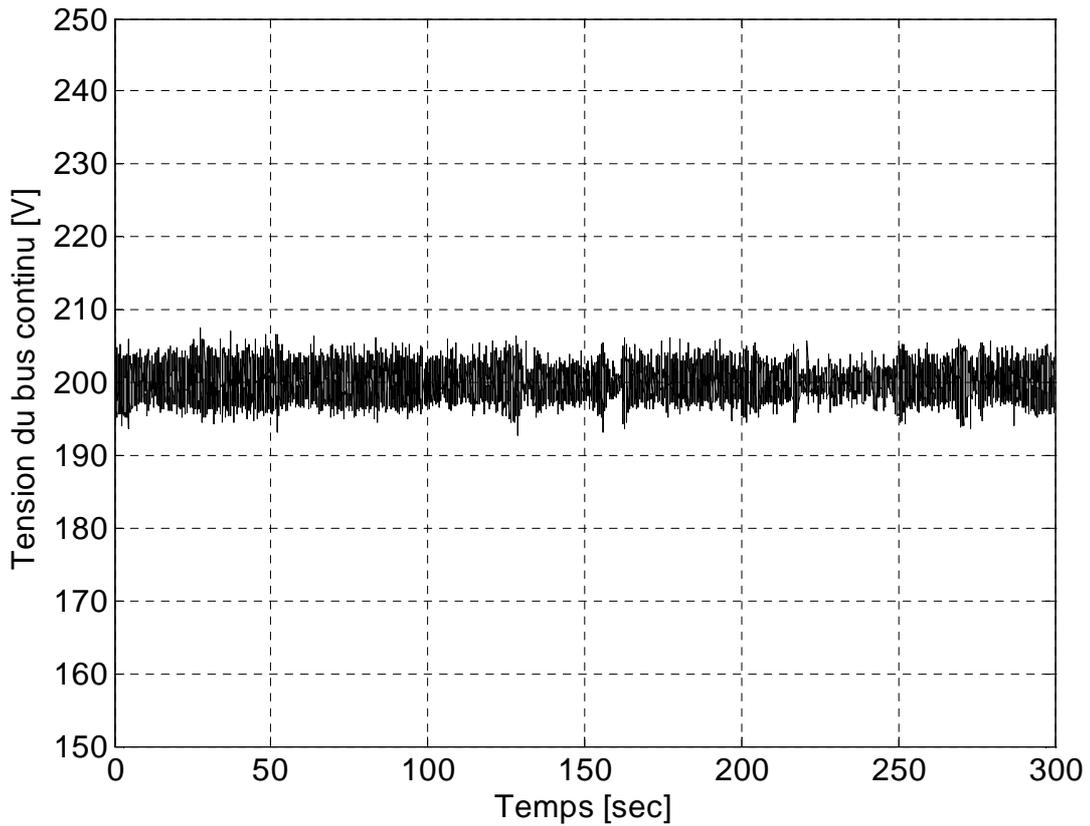


Figure 3.27 Tension du bus continu

III. 2.8. Interprétation des résultats

Ces figures montrent respectivement les puissances actives générées par l'éolienne et la centrale hydroélectrique (figure 3.19 et figure 3.20) et fournie à la charge isolée (figure 3.21), la puissance réactive absorbée par le générateur éolien représentée par la figure 3.22, la fréquence de la tension aux bornes de la charge isolée est représentée par la figure 3.23, la tension efficace de la charge est représentée par la figure 3.24, la vitesse de rotation de la MADA et le générateur éolien sont représentées respectivement par la figure 3.25 et la figure 3.26, la tension du bus continu est représentée par la figure 3.27.

La centrale hydroélectrique compense les fluctuations de l'énergie éolienne en contrôlant la tension et la fréquence de la charge. La figure 3.26 confirme la possibilité pour la stratégie de commande de faire fonctionner la centrale hydroélectrique en vitesse variable (en dessous et au-dessus de la vitesse de synchronisme). Les figures 3.23 et figure 3.24 confirment l'efficacité de la stratégie de commande de la centrale hydroélectrique pour réguler la fréquence et la tension efficace aux bornes de la charge, même si la puissance active du vent (figure 3.20) est fluctuante et la charge est variable

(figure 3.21). La puissance réactive nécessaire pour magnétiser le générateur asynchrone est fournie par la MADA.

III. 2.9. Conclusion

La structure présentée dans la figure 3.4 a été testée par simulations et sur le banc d'essai. La centrale éolienne se comporte comme un perturbateur pour la microcentrale hydroélectrique. La MADA doit compenser ces perturbations et assurer les paramètres nominaux d'alimentation des charges isolées.

La vitesse variable d'une centrale hydroélectrique permet de compenser et de lisser les fluctuations de l'énergie éolienne lors de l'alimentation des charges isolées. Cela est démontré expérimentalement à l'aide d'un banc d'essai de 3 kW capable d'émuler un système hybride éolien/hydroélectrique. Le banc d'essai est équipé d'un générateur asynchrone à double alimentation (MADA) à vitesse variable, d'un émulateur d'une petite centrale hydroélectrique associé à un générateur asynchrone à cage (MAS) émulateur d'une éolienne à vitesse fixe. Ce type d'éolienne est souvent utilisé dans les petites ou moyennes puissances des réseaux isolés. Les tests ont montré que la fréquence et la tension efficace sont bien maîtrisées en dépit des variations de la charge.

Dans le chapitre IV nous proposons la supervision de ce système complexe.

III. 2.10. Simulations d'une source hybride éolien/hydroélectrique connecté sur réseau de puissance

Des simulations ont été réalisées. On considère un système composé d'une petite centrale hydro-électrique au fil de l'eau de 3 kilowatts soumise à un débit et à une hauteur fixe et d'une éolienne de 3 kilowatts à vitesse fixe, l'ensemble alimentant une source de puissance.

- La MADA et le générateur éolien sont branchés sur réseau interconnecté.
- Un vent fort a été considéré pour la simulation.

Les courbes présentées de la figure 3.28 à la figure 3.30 correspondent aux résultats de simulation.

Elles montrent respectivement les puissances actives générées (figure 3.28 et figure 3.29) et celle fournie au réseau (figure 3.30).

La centrale hydroélectrique compense les fluctuations de l'énergie éolienne en contrôlant la puissance active et la puissance réactive fournie au réseau.

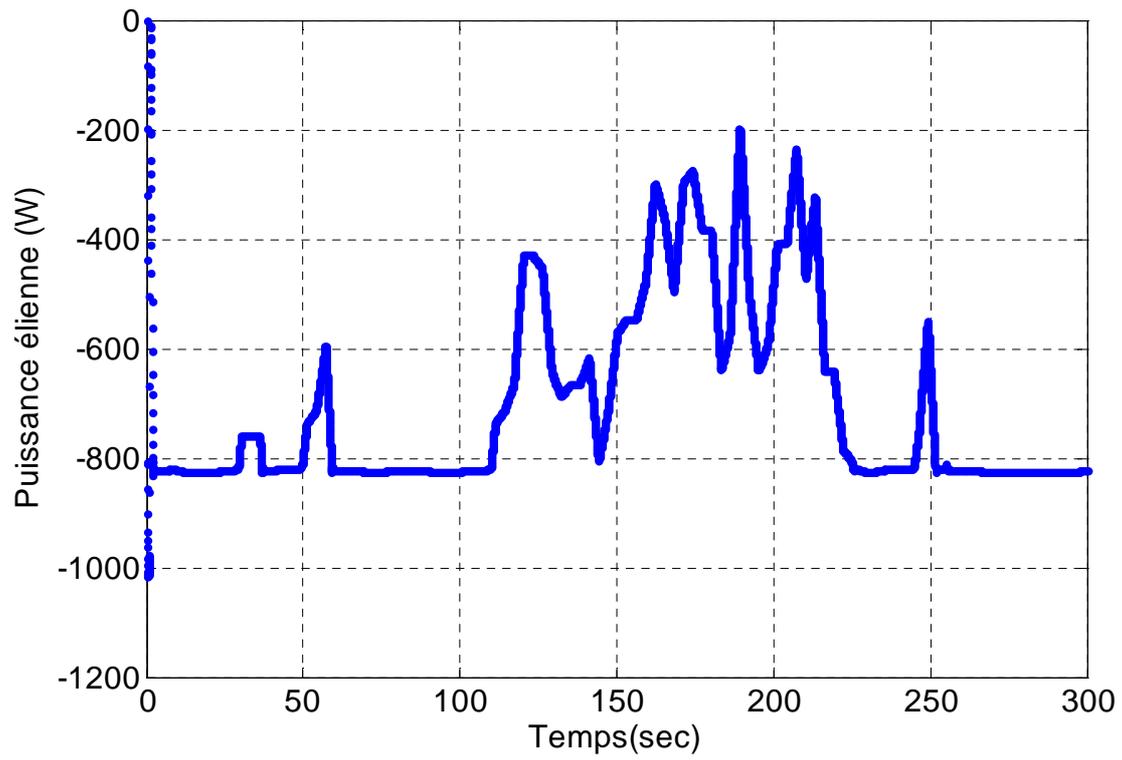


Figure 3.28 Puissance active de l'éolienne

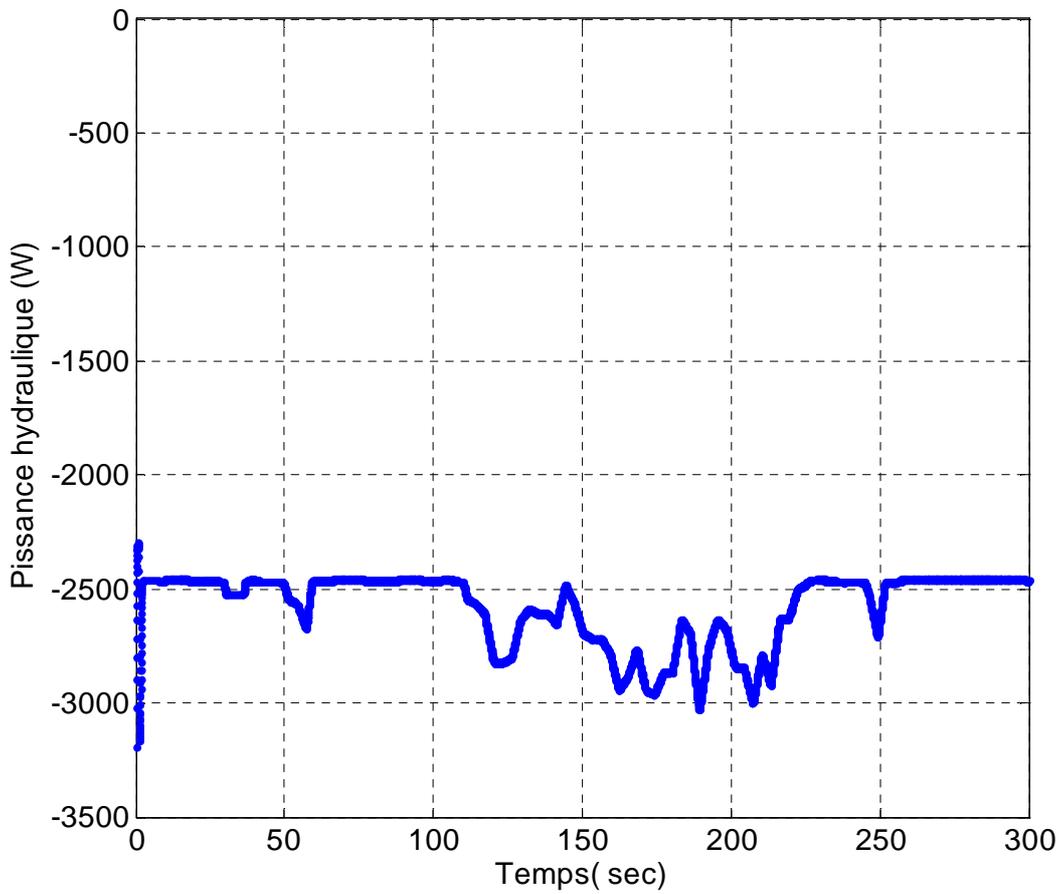


Figure 3.29 Puissance active de la centrale hydraulique

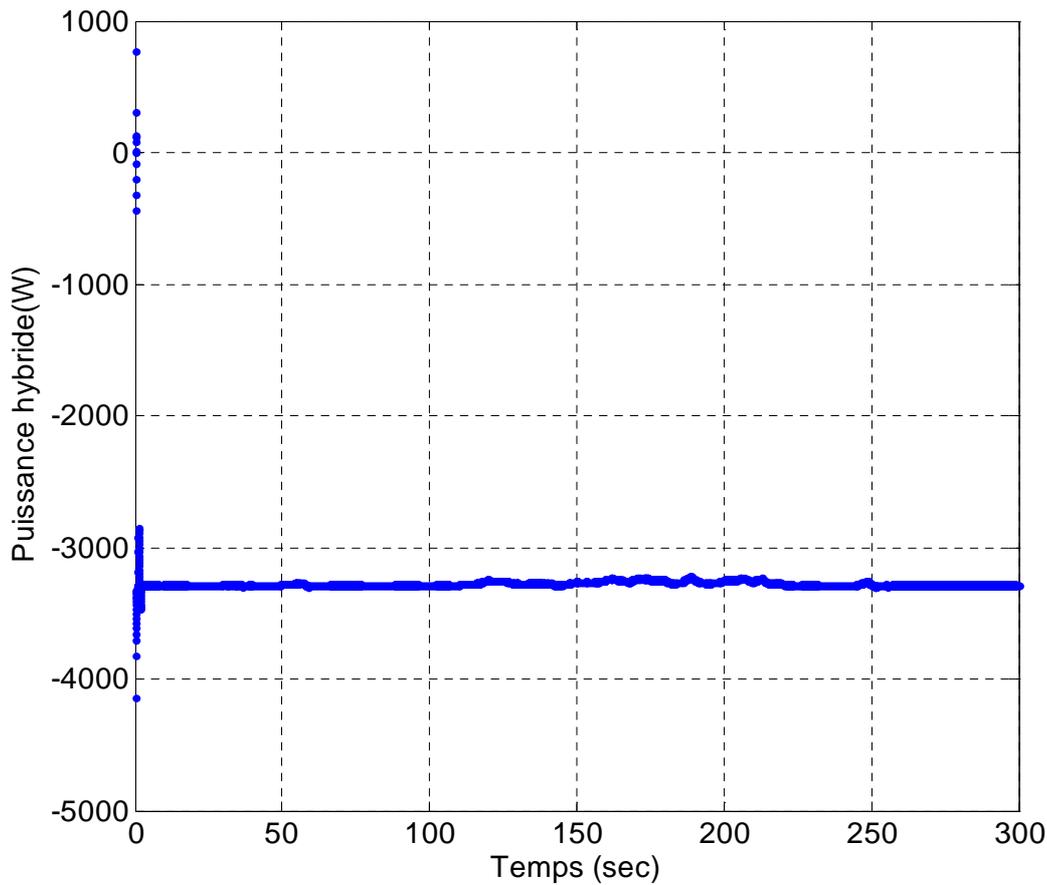


Figure 3.30 Puissance active hybride fournie au réseau

III. 2.11. Validation expérimentale [Bre 08a], [Bre 08b]

Les tests expérimentaux suivent la même voie que celle décrite dans la section III.3.2.7. La figure 3.18 présente la structure de la plateforme expérimentale [Annexes 1 et 2] utilisée pour les essais. Dans le présent essai le convertisseur MLI n°2 permet de régler le transit des puissances actives et réactives entre la MADA et le réseau.

Les courbes présentées de la figure 3.31 à la figure 3.36 correspondent aux résultats obtenus sur le banc expérimental.

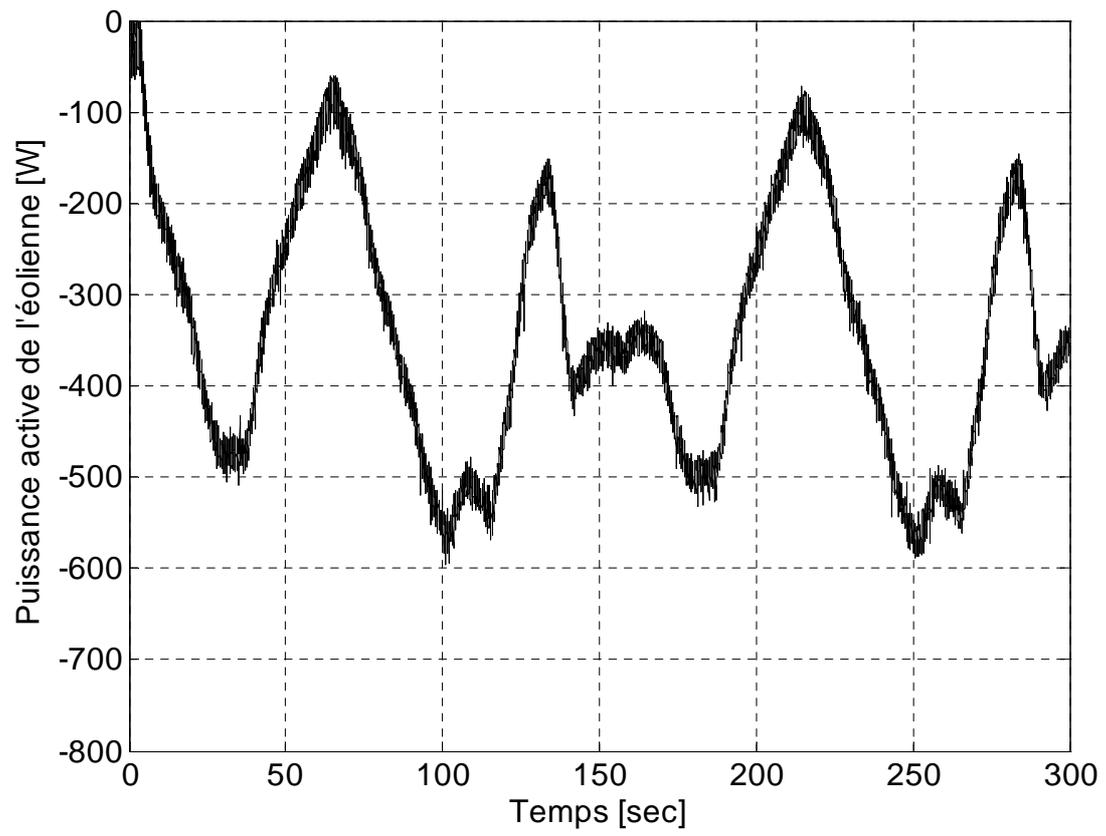


Figure 3.31 Puissance active de l'éolienne

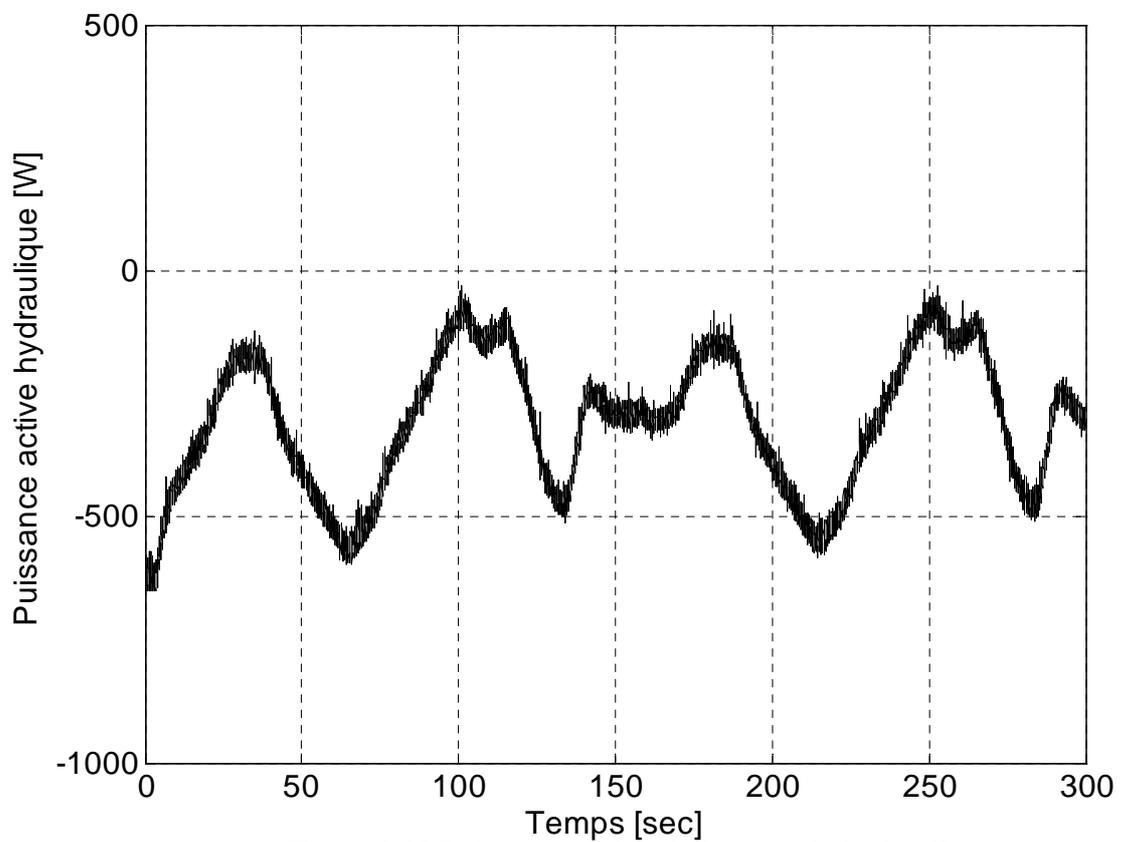


Figure 3.32 Puissance active de la centrale hydraulique

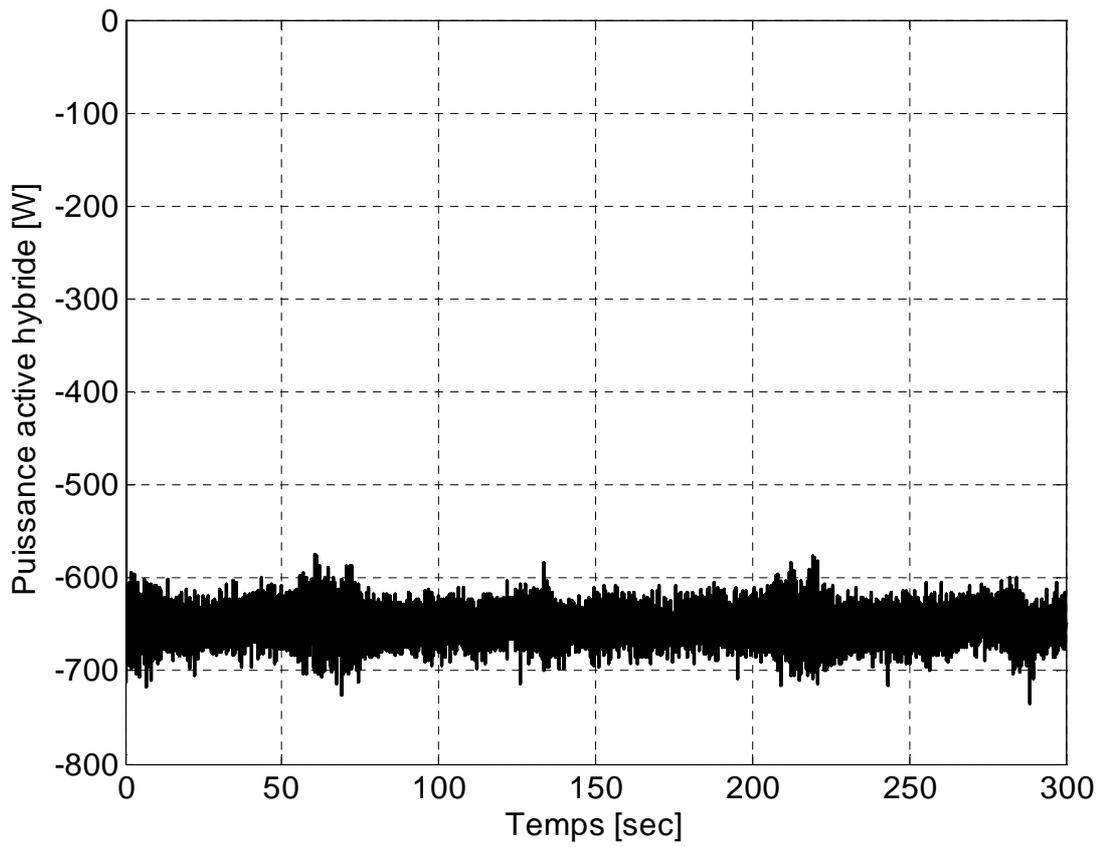


Figure 3.33 Puissance active hybride fournie au réseau

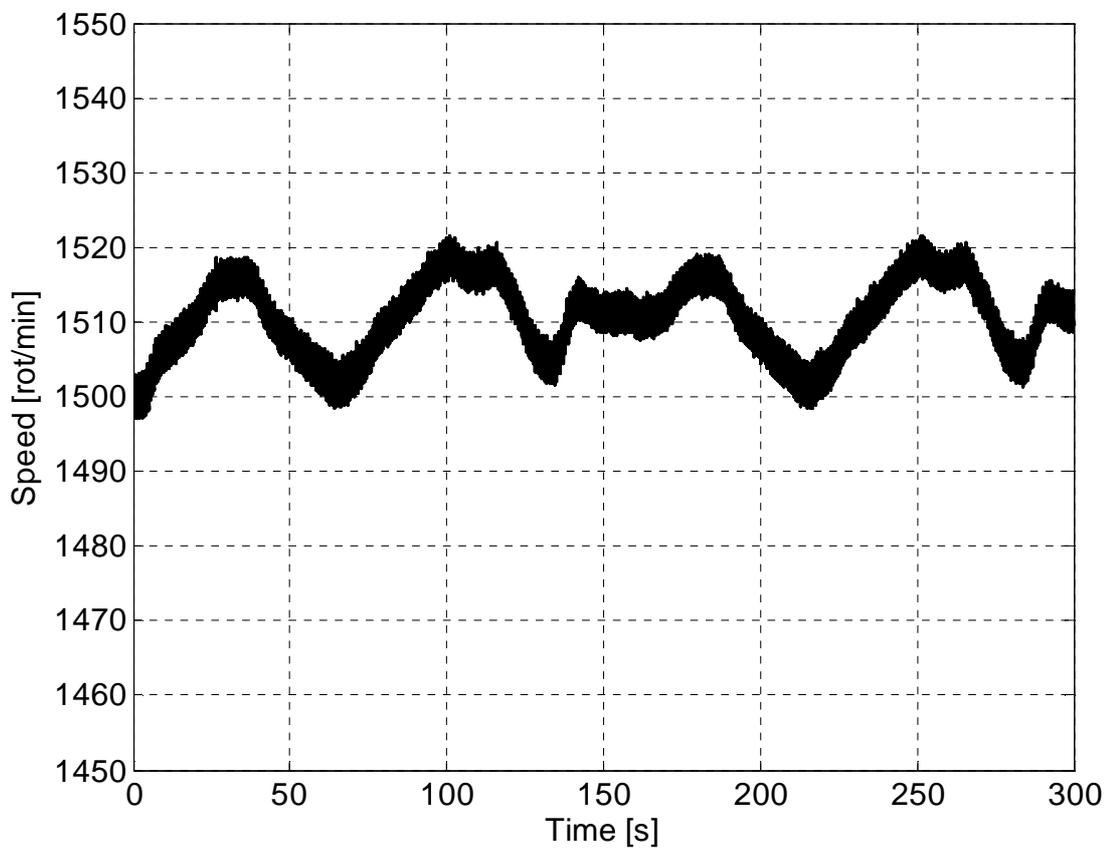


Figure 3.34 Vitesse de rotation du générateur éolien

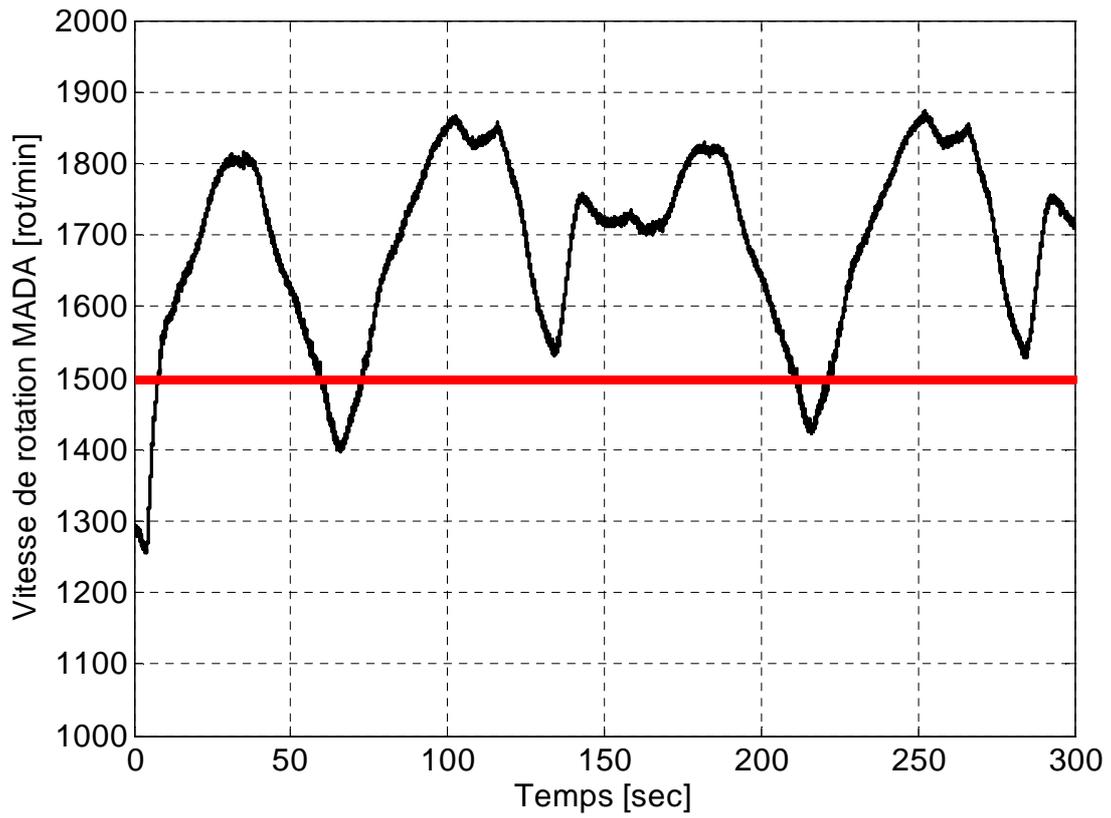


Figure 3.35 Vitesse de rotation de la MADA

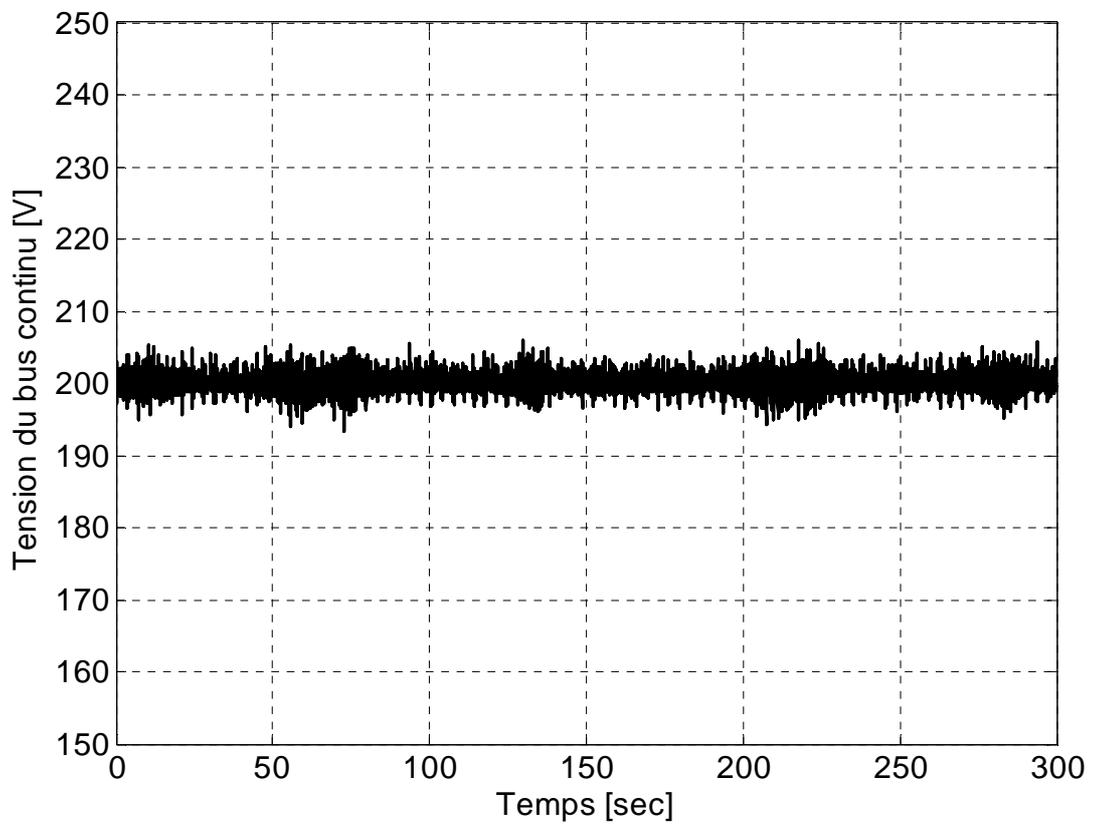


Figure 3.36 Tension du bus continu

III.2.12. Interprétation de résultats

Ces figures montrent respectivement les puissances actives générées éolienne et hydraulique (figure 3.31 et figure 3.32) et celle fournie au réseau (figure 3.33), la vitesse de rotation du générateur éolien et de la MADA (figure 3.34 et figure 3.35) et la tension du bus continu (figure 3.36).

La centrale hydroélectrique compense les fluctuations de l'énergie éolienne en contrôlant le transit des puissances actives et réactives entre la MADA et le réseau.

La figure 3.35 confirme la possibilité pour la stratégie de commande de faire fonctionner la centrale hydroélectrique en vitesse variable (en dessous et au-dessus de la vitesse de synchronisme).

III.2.13. Nécessité d'une gestion multi niveaux

Du point de vue des gestionnaires des réseaux de transport et de distribution, ce type de source hybride reste aléatoire et non prévisible. Comme la problématique de l'éolien se retrouve à tous les niveaux temporels de gestion, il est nécessaire de mettre en place une supervision multi niveaux de la centrale intégrée éolienne/hydraulique. On peut envisager ce type de structure qui a besoin d'une échelle de temps multiple [Cou 08], [Abb 05].

A chaque niveau correspond des objectifs et des moyens à définir pour répondre à ces exigences.

La supervision du système hybride étudié peut être divisée en quatre niveaux selon l'échelle de temps comme le montre le Tableau 3.2. Le tableau montre les problématiques associées l'échelle de temps et les services rendus.

La supervision court-terme (niveau 1) permet de fournir la puissance de référence de chaque élément constituant la centrale multi source de manière à garantir les engagements pris sur la fourniture de puissance et les services système. La supervision temps réel nous oblige à limiter le temps de calcul des algorithmes de supervision et à limiter au maximum le nombre de grandeurs à mesurer.

La supervision moyen-terme (niveau 2) permet de fournir la puissance de référence de la source hybride, tout en maximisant et en diminuant la fluctuation de la puissance fournie au réseau.

La supervision long-terme (niveau 3) permet d'affiner la puissance de référence à partir d'une prévision réactualisée. La planification de la production sera basée sur :

- Prévision de la charge par rapport au prix du marché;
- Prévision météorologique (à 24 h dans le cas de l'éolien);
- Structure du marché;

- Capacité à jouer sur la demande.

La supervision pluriannuelle (niveau 4) prévoit la production de chaque élément de la source hybride en fonction des cycles annuels de demande et des programmes de maintenance.

<u>Échelle du temps</u>	<u>Système hydraulique</u>
Niveau 4 Plan pluriannuel (années)	<ul style="list-style-type: none"> • Prévission de la charge • Prévission pluviométrique • Prévission des opérations de maintenance • Prévission des recharges de combustible
Niveau 3 Long-terme (quelques heures à 1 jour)	<p>Grande hydraulique</p> <p><u>Exemples de problématiques associées :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Prévission de consommation pour le lendemain • Gestion journalière de réserve • Coordination avec les moyens de production externes (centrales thermiques.) • Optimisation économique du système
Niveau 2 Moyen terme (Quelques min à 1 h)	<p>Petite hydraulique</p> <p><u>Exemples de problématiques associées :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Participation à l'ajustement du marché • Gestion de réserve secondaire • Gestion de l'îlotage
Niveau 1 Temps réel (Quelques secs à quelques min)	<p>Petite hydraulique</p> <p><u>Exemples de problématiques associées :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Lissage de la puissance instantanée • Réglage primaire de fréquence et de tension • Performance du système en cas de défaut • Gestion de l'îlotage : possibilité d'alimenter des charges localement en cas de nécessité

Tableau 3.2 Gestion de l'énergie d'un système hybride, sur plusieurs niveaux selon l'échelle de temps

III.3. Les outils pour la construction d'un superviseur multi niveaux

III. 3.1. Différents types de formalisme

Trois familles d'outils émergent de la littérature pour développer la supervision d'une centrale multi sources.

III. 3.1.1. Méthodes causales

[Li 08], [Mor 06], [Bou 00] proposent une approche qui consiste à identifier les flux de puissance dont l'inversion permet de déterminer des puissances de référence. Inconvénients, elle nécessite un modèle mathématique détaillé des sources et des systèmes de stockage ainsi qu'une bonne connaissance en temps réel de ces différents flux et des pertes associées

III. 3.1.2. Méthodes implicites

[Cim 06], [Esk 06], [Bouk 07] et [Lec 03] proposent un outil bien adapté à la gestion de systèmes « complexes » dépendant de grandeurs ou d'états difficilement prévisibles et mal connus en temps réel (vent, ensoleillement, fréquence et état du réseau, variation de la consommation...). Par exemple la logique floue nous permet d'introduire de variables floues pour prendre en compte l'état de certaines parties d'un système (par exemple le niveau de stockage) et les grandeurs d'entrée. La définition des fonctions d'appartenance est basée sur des choix stratégiques ou l'expérience. Cependant, jusqu'à présent, il n'existe pas de méthode systématique pour le développement de ce type de superviseur. A partir de ce constat une méthodologie implicite améliorée et basée sur la logique floue a été développée au sein du laboratoire L2EP [Spr 09].

III. 3.1.3. Méthodes explicites

Des méthodes explicites ont été développées par [Cal 04], [Ver 07]. Cet outil peut assurer le choix optimum permettant de garantir la maximisation, par exemple de l'énergie produite d'origine renouvelable. Inconvénients, elle nécessite de prévoir les données du vent pour établir les paramètres de la fonction objective afin de maximiser la puissance hybride à produire. La minimisation d'une fonction de coût bien formulée est cependant difficile à mettre en œuvre en particulier en temps réel.

Ces trois types de formalisme détaillés seront testés et analysés pour la supervision de la centrale virtuelle dans le chapitre IV.

III. 3.2. Méthodologie retenue pour la construction du superviseur multi niveaux

La centrale multi sources étudiée dans cette thèse est constituée d'une éolienne couplée à une source hydraulique et à des systèmes de stockage. Les objectifs de la supervision seront d'une part de respecter une puissance de consigne de la source hybride demandée tout en maximisant l'utilisation de

la source hydraulique et d'autre part de fournir les puissances de référence de la source hydraulique et des systèmes de stockages.

Pour la résolution de ce type de problème, une supervision à base de logique floue paraît bien adaptée du fait de :

- la complexité du système à contrôler;
- la difficulté de quantifier la réponse du réseau à la variation des productions et des charges qui y sont raccordées.
- La nature aléatoire des sources d'énergie renouvelable.

Nous présentons une méthodologie systématique pour l'élaboration d'un superviseur à base de logique floue. Cette méthode est une extension des méthodes couramment utilisées pour la conception du contrôle de processus industriels ; les réseaux de Petri [Zur 94] et les GRAFCET [Gui 99]. Ces derniers permettent de construire graphiquement et « étape par étape » le contrôle du système, de manière à en faciliter l'analyse et l'implantation. Ils sont particulièrement bien adaptés aux systèmes logiques séquentiels. Cependant, dans le cas d'unité de production hybride incluant des variables aléatoires et des états continus, ce type d'outil atteint ses limites. La méthode proposée est donc une extension de cette approche graphique pour y inclure des grandeurs floues et mal connues.

Cette méthodologie proposée permet :

- d'éviter le recours à des modèles précis et complexes des différentes sources et des systèmes de stockage ;
- de déterminer de manière systématique le superviseur ;
- d'assurer des transitions progressives entre les différents modes de fonctionnement du système hybride ;
- de minimiser le nombre de lois floues et de simplifier son implantation en temps réel.

III. 3.3. Présentation d'une méthodologie implicite améliorée et basée sur la logique floue

La méthodologie de conception du système de supervision retenue est basée sur six étapes:

1. La détermination du cahier des charges du système; les caractéristiques et les objectifs du système doivent être clairement explicités.
2. La structure du superviseur; les entrées et les sorties nécessaires du superviseur sont déterminées.

3. La détermination des « graphes fonctionnels »; une représentation graphique des modes de marche est proposée. Cette représentation est basée sur la connaissance du système.
4. Les fonctions d'appartenance du superviseur flou sont déterminées.
5. La détermination des « graphes opérationnels »; une représentation graphique des modes de fonctionnement flous est proposée.
6. Les règles floues, caractéristiques du superviseur flou sont extraites des « graphes opérationnels ».

Dans le chapitre IV, nous utiliserons la méthodologie implicite à base de logique floue pour concevoir la supervision d'une centrale multi sources à base d'énergie renouvelable intégrant une source éolienne, une source hydraulique sans stockage d'énergie.

III.4. Conclusion

Ce chapitre a développé l'association d'une microcentrale hydraulique à vitesse variable à une centrale éolienne à vitesse fixe. Cet ensemble peut être raccordé à un réseau interconnecté ou à un site isolé. Les simulations et les résultats expérimentaux du système global ont permis de conclure sur la nécessité d'une gestion multi niveaux de ce système complexe et d'outils pour sa réalisation. La gestion de ce système complexe est divisée en plusieurs niveaux travaillant à des échelles de temps différentes. Le chapitre suivant nous permettra de proposer la supervision d'un ensemble hybride éolien/hydraulique sans stockage et connecté à un réseau puissant.

III.5. Bibliographies

- [Abb 05] C. Abbey, G. Joos, « Energy management strategies for optimization of energy storage in wind power hybrid system ». Power Electronics Specialists Conference (PESC2005), June 2005, pp. 2066-2072.
- [Bou 00] A. Bouscayrol, X. Guillaud, Ph. Delarue, "Macro modélisation des conversions électromécaniques. Application à la commande des machines électriques », Revue International de Génie Electrique 3, 2000, n° 2, pp. 257-282.
- [Bouk 07] G. Boukettaya, L. Krichen, A. Ouali, « Fuzzy logic supervisor for power control of an isolated hybrid energy production unit ». International Journal of Electrical and Power Engineering, 2007, p. 279-285.
- [Bre 08a] Breban S. « Étude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable », thèse présentée en décembre 2008, ENSAM.

- [Bre 08b] S. Breban, M. Nasser, A. Vergnol, V. Courtecuisse, B. Robyns, M. Radulescu, « Study of a grid-connected hybrid wind/micro-hydro power system”. Optim’08. May 22-24, 2008, Brasov, Romania.
- [Cal 04] R. Caldon, A. Patria, R., Turri, « Optimal Control of a Distribution System with a Virtual Power Plant », International conference on Bulk Power System Dynamics and Control, 2004, p. 278-284.
- [Cam 03] C. Potter and M. Negnevitsky, Intelligent agent application for hydro-wind electricity generation control, AUPEC, 28 September-1 October 2003, Christchurch, New Zealand.
- [Car 01] R. Cardenas, R. Pena, G. Asher et J. Clare – Control strategies for enhanced power smoothing in wind energy systems usings a flywheel driven by a vector-controlled induction machine, vol. 48, issue 3 IEEE Trans. Ind. Electronics, june 2001, pp. 625-635.
- [Cas 04] E.D. Castronuovo, J.A.P. Lopes, “On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant”, Inst. de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto, Portugal, Power Systems, IEEE Transactions on Aug. 2004, Volume: 19, Issue: 3, pp. 1599–1606.
- [Cim 06] G. Cimuca, C. Saudemont, B. Robyns, M. Radulescu, « Control and performance evaluation of a flywheel energy storage system associated to a variable speed wind generator », IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, N°4, pages. 1074-1085, 8-2006.
- [Cou 08] V. Courtecuisse, B. Robyns, M. Petit, B. Francois and J. Deuse “Performance comparison of different wind generator based hybrid systems”, EPE -PEMC. September 1-3, 2008, Poznan, Poland.
- [Dir 07] Directions Régionales de l'Environnement (DIREN), site Burande à la Tour – d’Auvergne, 2007.
- [Esk 06] M. N. Eskander, T. F. El-Shatter, M. T. El-Hagry, « Energy flow management of a hybrid Wind/PV/Fuel cell generation system », Energy Conversion and Management, vol. n° 47, 2006, pp. 1264-1280.
- [Gra 05] J.Y. Grandidier, « Eolien et Hydraulique des fiançailles réussies », Système Solaires n°165, 2005, pp. 39-42.
- [Gui 99] L. Guillemaud, H. Guegen, “Extending GRAFCET for the specification of control of hybrid systems”. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1999, pp. 171-175.
- [Jar 04] O.A. Jaramillo, M.A. Borja, J.M. Huacuz Using hydropower to complement wind energy: a hybrid system to provide firm power. Mexico Elsevier, Renewable Energy 29, 2004, pp. 1887–1909.

- [Lec 03] L. Leclercq, B. Robyns, J-M. Grave “Control based on fuzzy logic of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators”, *Mathematics and Computers in Simulation* n°63, June 2003, pp. 271–280.
- [Li 08] P. Li, B. Francois, P. Degobert, B. Robyns, « Multi-level representation for control design of a super capacitor storage system for a microgrid connected application », *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 2008, CD-ROM.
- [Mor 06] J. Morren, W.H. de Haan, J.A. Ferreira, « Primary Power/Frequency control with wind turbine and fuel cells », *IEEE PES General Meeting*, 2006.
- [Nas 08] M. Nasser, S. Breban, V. Courtecuisse, A. Vergnol, B. Robyns, M. Radulescu, “Experimental results of a hybrid wind/hydro power system connected to isolated loads. EPE-PEMC. September 1-3, 2008, Poznan, Poland.
- [Ser 06] I. Serban, C. Marinescu and M. Cirstea “Hybrid Power System based on Micro-Hydro and Wind Turbine Generation”, *Optim* 2006, May 18-19-2006, Brasov, Romanie.
- [Som 03] M. Somaraki, “A Feasibility Study of a Combined Wind - Hydro Power Station in Greece”, A thesis submitted for the degree of Master in Science In (Energy Systems and the Environment), University of trathclyde, Department of Mechanical Engineering, Glasgow, October 2003.
- [Spr 09] J. Sprooten, V. Courtecuisse, B. Robyns, J. Deuse "« Méthodologie de développement de superviseurs à logique floue de centrales multi source à base d'énergie renouvelable ». *EJEE* vol. 12, N°5-6, pp.553-583, 12-2009.
- [Ver 07] A. Vergnol, « Supervision d'une centrale de production hybride éolienne / hydraulique », *Rapport de Master présenté en Juillet 2007, USTL.*
- [Zur 94] R. Zurawski “Petri net and industrial application: A tutorial”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. n° 41, 1994, pp 567-583.