

## Intégration d'une hydrolienne au réseau, MPPT et qualité de l'énergie

M. Andreica\*, S. Bacha, D. Roye et J. Guiraud

Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble, 'G2ELab'  
UMR 5269 CNRS/INPG/UJF, Grenoble, France

(reçu le 30 Novembre 2007 – accepté le 25 Décembre 2008)

**Résumé** - L'étude de l'intégration d'une chaîne de production à base d'hydrolienne est présentée dans cet article. Une turbine hydrolienne à axe vertical est considérée. Le système est d'abord modélisé, puis des contrôles commandés sont synthétisés pour d'une part, assurer classiquement la poursuite du maximum de puissance, puis dans un second temps, d'injecter au réseau des formes d'onde propres. La partie expérimentale est conçue de manière à corroborer les attentes de la théorie: la turbine est émulée à l'aide d'une machine à courant continu commandée en courant. Une génératrice synchrone à aimants permanents est ainsi entraînée. La connexion au réseau électrique est faite via deux onduleurs triphasés têtes bêche. Les résultats expérimentaux obtenus vérifient bien la théorie.

**Abstract** - The study of the integration of a production line based hydrolienne is presented in this article. A vertical axis hydrolienne turbine is considered. The system is modelled first, then control orders are synthesized for a classically ensure the continuation of the maximum power, then in a second time to inject own network waveforms. The experimental part is designed to corroborate expectations theory: the turbine is emulated by using a machine controlled DC current. A permanent magnet synchronous generator is so driven. The electrical grid connection is made through two three-phase UPS heads spade. The experimental results obtained verify the theory well.

**Mots clés:** Hydrolienne - Axe vertical - Injection au réseau - Machine CC - MPPT.

### 1. INTRODUCTION

Les hydroliennes sont très peu étudiées malgré le fort intérêt qu'elles représentent comme leur transparence vis-à-vis de l'environnement (ne nécessitent pas de génie civil ou de barrages), leur large champ d'application dans les pays en voie de développement (alimentation de sites isolés ou soutien aux réseaux faibles) et enfin leurs potentialités de production.

Les hydroliennes sont des turbines installées dans un courant d'eau (fleuve, fonds marins...) afin de récupérer une part de leur énergie cinétique. Le concept en lui-même n'est pas totalement nouveau, mais il représente une des sources d'énergie renouvelable qui a encore besoin d'études exploratoires.

Les travaux présentés dans cet article se situent dans le cadre du projet nommé HARVEST (Hydrolienne à Axe de Rotation Vertical Stabilisé). Ce projet a été lancé par le laboratoire LEGI (INPG, France) en 2001. L'enjeu de ce projet est de mieux comprendre et de développer une technologie fiable pour des fermes hydroliennes marines ou fluviales. Quatre laboratoires participent à ce projet. Les études menées par

---

\* maria.andreica@g2elab.inpg.fr

ces laboratoires concernent: le laboratoire LEGI - les comportements hydrodynamiques, ensuite le laboratoire 3S-R (INPG, France) - la tenue des structures et matériaux et aussi ancrages et natures des sols, et le laboratoire LaMCoS (INSA, Lyon, France) - les comportements dynamiques. Enfin le laboratoire G2ELab fait des études pour les aspects: génération de l'énergie électrique, mise en forme de l'énergie et connexion au réseau électrique.

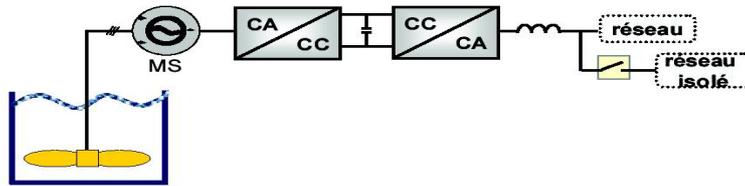


Fig. 1: Architecture de la chaîne de production à base d'hydrolienne

## 2. LE MODELE CONSIDERE ET SA COMMANDE

Cette partie présente la chaîne hydrolienne et les modèles y inhérents.

### 2.1 Le modèle de la turbine

Le but est de générer de l'énergie électrique en récupérant une partie de l'énergie cinétique d'un courant d'eau (une rivière par exemple) avec une vitesse qui pourrait aller jusqu'à 2 m/s. L'énergie cinétique est récupérée et transformée directement en énergie mécanique de la même façon que pour les éoliennes.

Une turbine hydraulique à trois pales à axe vertical, avec un rayon de 0.25 m et une hauteur de 0.5 m est considérée. La modélisation de la turbine est essentiellement dépendante de son coefficient de puissance  $C_p$  ou de son rendement. Cette modélisation s'appuie sur des données présentées dans [1]. Il s'agit d'une modélisation qui se rapproche de la manière de faire propre aux éoliennes. La figure 1 présente la courbe caractéristique du coefficient de puissance  $C_p$  (-) en fonction de la vitesse spécifique de la turbine, sachant que le coefficient de puissance maximum a été pris à 0.30 et que sa limite théorique est de 0.59 [2].

$$\lambda = \frac{R_T \cdot \Omega_T}{v} \quad (1)$$

Où  $\lambda$  (-) est la vitesse spécifique,  $R_T$  (m) le rayon de la turbine,  $v$  (m/s) la vitesse équivalente de l'écoulement et  $\Omega_T$  (rad/s) la vitesse de rotation de la turbine.

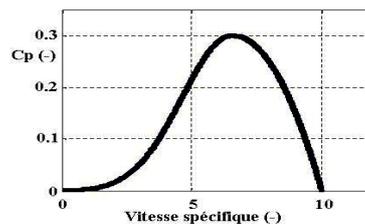


Fig. 2: Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour un courant de 2 m/s

Le point de départ de cette modélisation est la représentation de la puissance extractible  $P$  en fonction de la vitesse incidente du courant d'eau et des conditions de fonctionnement.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot S \cdot v^3 \quad (2)$$

$$S = 2R_T \cdot H_T \quad (3)$$

Où  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) est la densité de l'eau,  $S$  ( $\text{m}^2$ ) la surface balayée par les pales et  $H_T$  (m) la hauteur de la turbine.

Ce modèle ne prend pas en compte de manière exhaustive l'ensemble des phénomènes hydrodynamiques spécifiques à une turbine hydrolienne.

Le couple hydrolien à l'arbre de la turbine  $C_T$  est ainsi déterminé: (4).

$$C_T = \frac{P}{\Omega_T} \quad (4)$$

Le couple fourni à l'arbre d'une telle turbine est caractérisé par un comportement pulsatoire significatif [1, 3]. Les harmoniques présentes sur ce couple sont également dépendantes de la vitesse de la turbine.

Le modèle de la turbine basé sur la courbe de  $C_p$  conduit à l'obtention d'un couple moyen. Pour se rapprocher du couple pulsatoire tiré de l'expérience [1, 3], on a rajouté les harmoniques à l'aide d'une décomposition en série Fourier après une analyse spectrale du signal du couple pulsatoire.

La figure 3 présente le couple moyen d'origine et le couple pulsatoire qui se superpose.

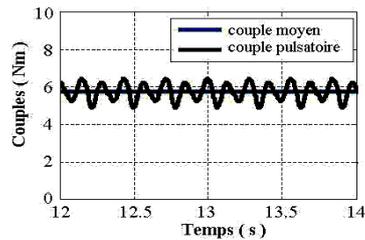


Fig. 3: Variation temporelle du couple moyen et du couple pulsatoire

## 2.2 Le modèle de la machine

Le modèle de la génératrice choisi pour la synthèse de la commande est un modèle vectoriel dans un référentiel tournant (Park). L'utilisation d'une représentation vectorielle des grandeurs électriques est une manière d'obtenir un modèle invariant. cette représentation présente l'avantage de permettre la manipulation des grandeurs continues plutôt qu'alternatives.

## 2.3 Les modèles des deux convertisseurs

Les modèles des convertisseurs doivent être adaptés à une étude en simulation et aussi à la mise en œuvre des commandes. Ainsi les deux onduleurs de tension sont représentés par un modèle moyen dans un référentiel de Park ( $dq$ ).

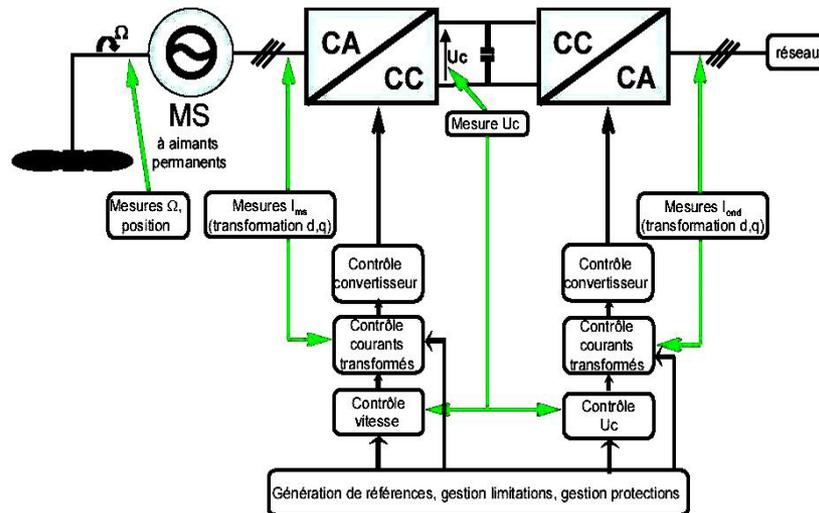


Fig. 4: Schéma électrique des convertisseurs et de la commande

## 2.4 La commande

En ce qui concerne la stratégie de commande, les tâches de l'onduleur côté machine sont: atteindre le MPPT (Maximum Power Point Tracking – maximisation de la puissance extraite de l'eau), solliciter la machine vers son facteur de puissance unitaire, réduire au minimum les taux de distorsion harmoniques.

En mode opératoire, l'onduleur côté machine doit assurer le réglage du couple, ainsi de la vitesse pour d'une part fixer le point de fonctionnement, régler les déphasages courant/tension et enfin poursuivre une trajectoire sinusoïdale des courants extraits de la génératrice. Pour le réglage de la vitesse un correcteur PI a été choisi et pour le réglage des courants un correcteur PI tournant [5].

L'onduleur côté réseau doit, quant à lui, assurer le réglage de la tension du bus continu. Il gère aussi le transfert de puissance, tel que la puissance active moyenne entrante soit égale à la puissance active sortante (aux pertes près). Par ailleurs, la qualité des courants injectés se doit d'être la meilleure possible. Le réglage de la tension du bus continu est réalisé avec un correcteur PI et le contrôle des courants avec un correcteur PI résonant [6].

## 3. LE BANC EXPERIMENTAL

Afin de pouvoir tester cette chaîne hydrolienne, le banc expérimental hybride temps réel présenté dans la figure 4 a été utilisé.

La génération du couple hydrolien est réalisée à l'aide d'une machine à courant continu dont le couple est programmable via un DSP. Le modèle de la turbine et le profil d'écoulement choisis sont implantés à l'aide d'un xPC Target [7].

La génératrice est une machine synchrone (MS) à aimants permanents, pour laquelle le stator est connecté au réseau électrique via l'interface d'électronique de puissance AC-DC-AC. Les commandes des deux onduleurs de tension sont générées par un système dSPACE de type RTI1005 [8].

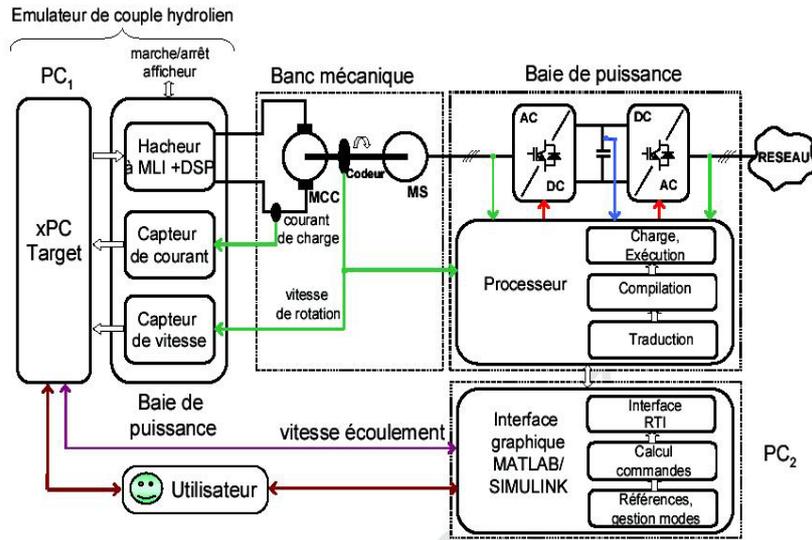


Fig. 5: Schéma synoptique du banc d'essai

#### 4. LA STRATEGIE DE CONTROLE APLIQUEE

Les courbes, donnant la variation de la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation, ont la même allure que les courbes du coefficient de puissance  $C_p$  (Fig. 1). Ces courbes-là passent par un unique maximum. Le contrôle a donc pour but la recherche de ce maximum.

La commande en rapport de vitesse a été choisie à partir seulement de l'observation de la courbe de  $C_p$  en fonction de la vitesse spécifique, qui passe par un unique maximum. Ce maximum correspond à la vitesse spécifique optimale,  $\lambda_{opt}$ . Le but est alors de rester au point optimal de fonctionnement ( $\lambda_{opt}, C_{p\text{ maximum}}$ ).

De la relation (1) et si la vitesse de l'écoulement évolue, la vitesse de référence est établie avec l'expression (5).

$$(\Omega_T)_{\text{référence}} = \frac{\lambda_{opt}}{R_T} \cdot v \quad (5)$$

C'est une méthode assez simple, mais qui dépend fortement de la mesure de vitesse d'écoulement. Pour les études présentées, un profil légèrement variable autour de la vitesse de 2 m/s a été choisi.

#### 5. RESULTATS

Cette partie présente en parallèle les résultats expérimentaux et ceux issus de la simulation.

Pour le contrôle du bus continu, la valeur de référence de la tension continue a été établie à 450 V. Cette valeur est un compromis satisfaisant entre les contraintes

électriques sur l'onduleur et la qualité du réglage de l'interface réseau. La référence de vitesse est celle correspondante au point optimal de fonctionnement de la turbine.

Les objectifs envisagés sont: le fonctionnement optimal, le rejet de perturbations introduites par le couple pulsatoire et une bonne qualité de l'énergie électrique fournie.

La machine à courant continu émulateur est commandée en courant. Ce courant est une image du couple qui lui est renvoyé comme consigne à travers les cartes de sortie numérique/analogique du xPC Target.

Les modules de simulation ont été implantés sous Matlab/Simulink.

En simulation tous les éléments du banc d'essai sont modélisés afin que les résultats obtenus soient comparables. Une première configuration testée est celle avec le modèle d'une turbine unique.

Le couple pulsatoire ( $C_{puls}$ ) renvoyé par cette turbine est celui de la figure 4,  $V_{éc}$  est notée la vitesse de l'écoulement telle qu'elle est envoyée du xPC vers le dSpace.

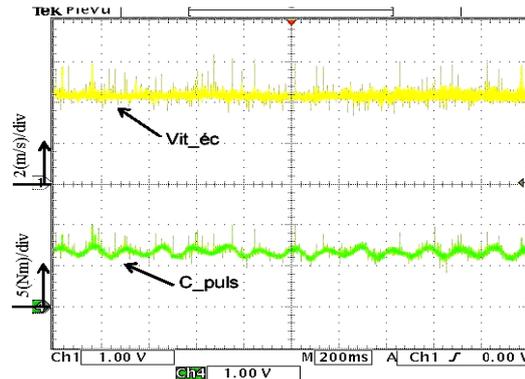


Fig. 6: Variation temporelle du couple pulsatoire et la vitesse de l'écoulement – cas d'une turbine

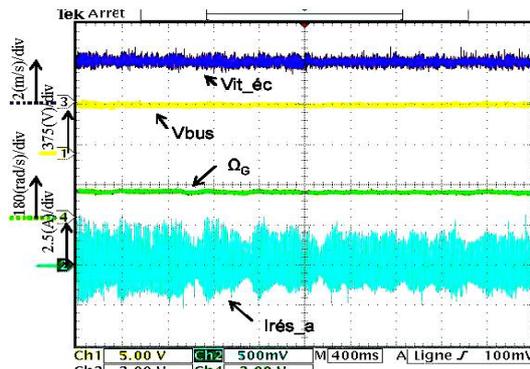


Fig. 7: Fonctionnement général – cas d'une turbine

Les figures 6 et 7 montrent un bon fonctionnement général de la turbine, les boucles de régulation agissent proprement en maintenant le bus continu ( $V_{bus}$ ) à sa valeur de référence, la vitesse de la génératrice ( $\Omega_G$ ) suit bien la vitesse de l'écoulement (sachant que  $(\Omega_G)_{référence}$  est calculée en fonction de  $V_{éc}$ ).  $I_{rés\_a}$  représente le

courant sur la *phase a* renvoyé vers le réseau, lui aussi il suit les variations du  $V_{éc}$ . Au même temps, les perturbations initiales du couple pulsatoire sont rejetées.

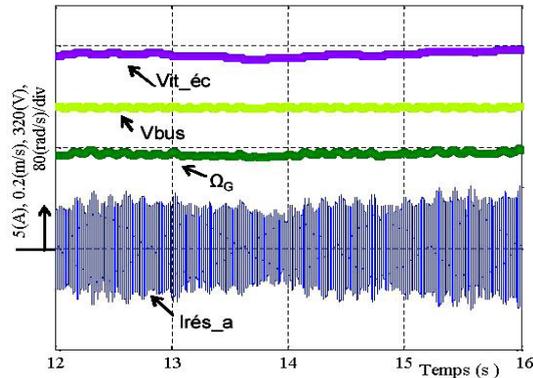


Fig. 8: Fonctionnement général simulé – cas d'une turbine

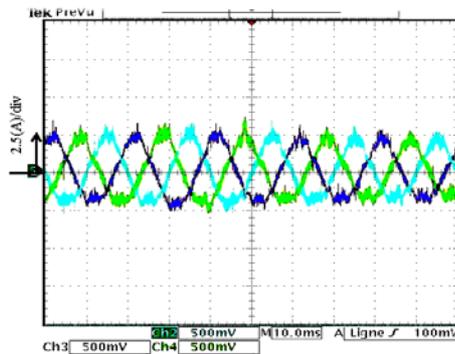


Fig. 9: Courants renvoyés au réseau – cas d'une turbine

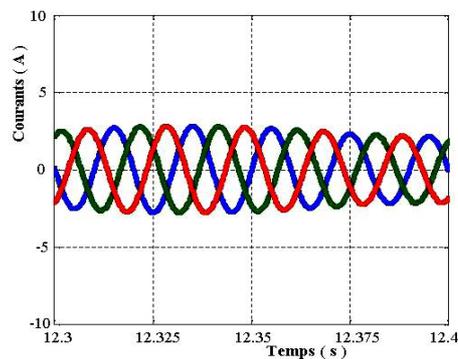


Fig. 10: Courants simulés renvoyés au réseau – cas d'une turbine

Les courants simulés et expérimentaux renvoyés vers le réseau sont montrés dans les figures 9 et 10. La similitude est évidente, les courants sont propres, ce qui mène aux courbes bien sinusoïdales conformes à la qualité requise.

La deuxième configuration testée est celle avec un modèle, qui comporte ce qui s'appelle une tour de turbines hydroliennes, c'est-à-dire plusieurs turbines du même type que la première, mais empilées et décalées géométriquement. Quatre turbines empilées de même type sont considérées.

Un 'déphasage' de chaque couple pulsateur d'un angle de  $2\pi/N$  (où  $N$  est le nombre de turbines) est considéré. Cette structure amène un lissage important du couple pulsatoire sans pour autant le rendre négligeable.

Les analyses de qualité d'énergie fournie et de la stabilité de fonctionnement sont vérifiées sur ce concept.

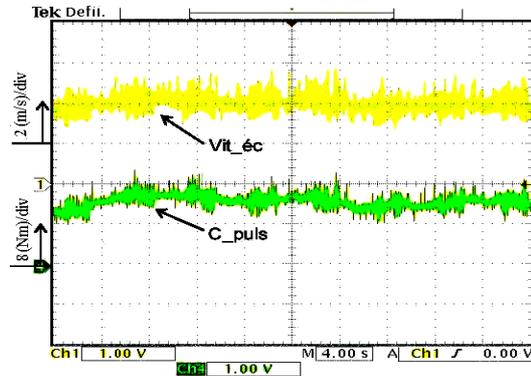


Fig. 11: Variation temporelle du couple pulsatoire et la vitesse de l'écoulement – cas de quatre turbines

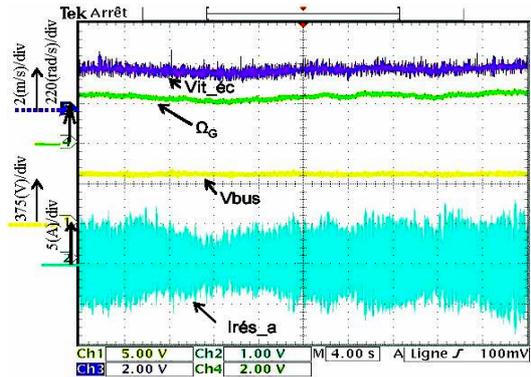


Fig. 12: Fonctionnement général – cas de quatre turbines

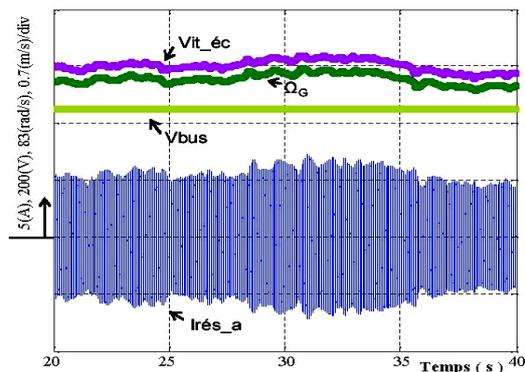


Fig. 13: Fonctionnement général simulé – cas de quatre turbines

Les notations sur les figures sont les mêmes que pour le cas précédent. Le même comportement est constaté, mais cette fois avec un meilleur fonctionnement et un niveau de puissance fournie plus élevé (Fig. 14 et 15) qui s'approche de 2 kW.

Les allures des courbes de courant (Fig. 12 et 13), le niveau de puissance fournie sont des résultats encourageants et montrent une bonne qualité de l'énergie fournie.

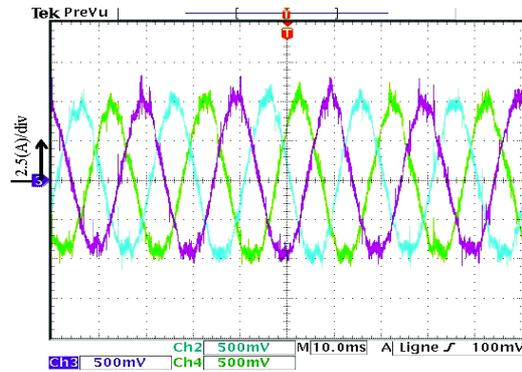


Fig. 14: Courants renvoyés vers le réseau – cas de quatre turbines

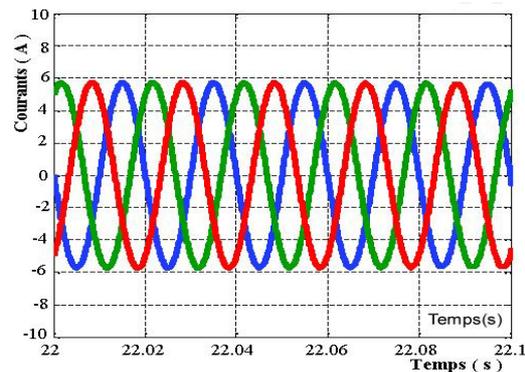


Fig. 15: Courants simulés renvoyés vers le réseau - cas de quatre turbines

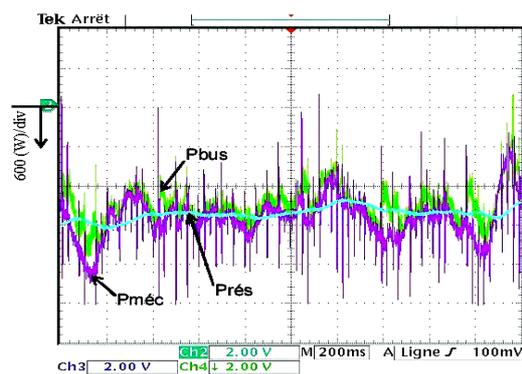


Fig. 16: Bilan de puissance – cas de quatre turbines

Sur les figures 16 et 17, un bilan de puissance a été réalisé. Il s'agit d'une évolution temporelle.  $P_{mec}$  est la puissance mécanique, aux bornes de la machine,  $P_{bus}$  la puissance calculée au niveau du bus continu et  $P_{rés}$  la puissance effectivement renvoyée vers le réseau. En simulation, le niveau de puissance est plus élevé, l'explication vient du fait que sur le banc expérimental, il existe des éléments réels avec

les pertes afférents, au niveau mécanique, au niveau de l'électronique de puissance et dans les câbles de liaison. Un calcul plus précis de ces pertes n'a pas été réalisé.

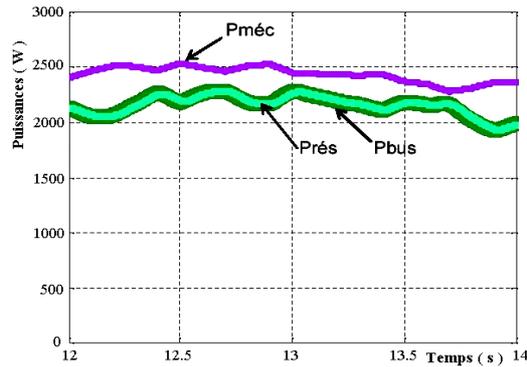


Fig. 17: Bilan de puissance simulé – cas de quatre turbines

## 6. CONCLUSION

Les résultats expérimentaux confirment les résultats de simulation en permettant la validation du banc expérimental hybride temps réel.

Des études en dynamique et l'élaboration d'un modèle en dynamique propre à la turbine s'avèrent intéressants à développer.

Au niveau des lois de commande, une recherche plus approfondie reste à réaliser surtout en ce qui concerne le MPPT.

Enfin, un dimensionnement du bus continu de la conversion devra se faire afin d'absorber les transferts du couple pulsatoire dans une certaine mesure à définir.

## REFERENCES

- [1] S. Antheaume, 'Simulations Numériques Macroscopiques de Turbines Hydrauliques à Axe de Rotation Verticale', Mémoire DRT, LEGI, INPG, Septembre 2007.
- [2] B.G. Newman, 'Actuator Disc Theory for Vertical Axis Wind Turbines', Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp. 347 - 355, 1983.
- [3] M. Shiono, K. Suzuki and S. Kiho, 'An Experimental Study of the Characteristics of a Darrieus Turbine for Tidal Power Generation', Electrical Engineering in Japan, Vol. 132, N°3, pp. 38 - 47, 2000.
- [4] R. Datta and VT. Ranganathan, 'A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, N°1, 2003.
- [5] I. Etxeberria-Otadui, A. López de Heredia, H. Gaztañaga, S. Bacha and R. Reyer, 'A Single Synchronous Frame Hybrid (SSFH) Multi-Frequency Controller for Power Active Filters', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, N°5, pp. 1640 – 1648, 2006.
- [6] I. Etxeberria-Otadui, U. Viscarret, M. Caballero, A. Rufer and S. Bacha, 'New Optimized PWM VSC Control Structures and Strategies under Unbalanced Voltage Transients', IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 54, N°5, pp. 2902 – 2914, 2007.
- [7] <http://www.mathworks.com>
- [8] <http://www.dspace.de/ww/en/pub/start.cfm>