

Synthèse & implantation pratique d'un système de contrôle intégré pour une unité de production de l'eau douce alimentée par source renouvelable intermittente

Wahib KHIARI⁽¹⁾, Mehdi TURKI^(1,2), Jamel BELHADJ^(1,3)

⁽¹⁾ Université de Tunis El Manar, LR 11 ES 15, Laboratoire des Systèmes Electriques

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, BP 37 – 1002, Tunis le Belvédère, Tunis, Tunisie

⁽²⁾ Université de Jendouba, Ecole Supérieure des Ingénieurs de l'Equipement Rural, 9070, Medjez El Bab, Tunisie.

⁽³⁾ Université de Tunis, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Tunis, BP 56 – 1008, Montfleury, Tunisie.

wahib.khiari@gmail.com, mehdi_turki@yahoo.fr, Jamel.Belhadj@esstt.rnu.tn

RESUME – L'objectif de cet article est la synthèse et l'implantation pratique d'une stratégie de contrôle de puissance électrique pour un processus de dessalement par Osmose Inverse (OI) alimenté par un système hybride à énergies renouvelables (PV-Eolien) sans stockage électrochimique. Pour maîtriser les flux de puissance entre les sources et les motopompes ainsi que la tension du bus continu couplant les deux sources, un contrôle vectoriel en puissance (PFOC: Power Field Oriented Control) a été développé. La stratégie de contrôle adoptée permet de faire fonctionner l'unité de dessalement par OI avec une puissance électrique variable tout en respectant les contraintes liées aux conditions de fonctionnement de la membrane de filtration et des motopompes associées. Des essais expérimentaux ont été effectués pour montrer les performances de partage et de contrôle coopératif "Energie-Eau" et pour étudier le comportement dynamique du système global face aux fluctuations de la puissance électrique fournie par la source renouvelable.

Mots-clés— Dessalement par OI, source d'énergie renouvelable hybride (PV-Eolien), commande PFOC, motopompes triphasées centrifuges, Implantation pratique sur DSpace.

1. INTRODUCTION

L'eau potable est de plus en plus rare et polluée. Elle est devenue un enjeu stratégique. Pour pallier ce manque d'eau, les unités de dessalement par OI représentent une solution efficace qui connaît une forte progression avec l'amélioration des techniques utilisées [1-3]. Le couplage entre la source renouvelable hybride complémentaire "PV-Eolien" et l'unité de dessalement par OI offre une source durable d'eau douce [4-8]. Afin que le système global fonctionne d'une façon autonome avec une meilleure efficacité énergétique, et pour réduire le coût de l'installation tout en assurant une disponibilité d'alimentation en eau potable, nous avons choisi d'éliminer le stockage électrochimique par batterie et de le remplacer par un stockage hydraulique d'eau traitée. Le contrôle des flux de puissance électrique et hydromécanique se base sur l'élaboration d'un contrôle vectoriel en puissance PFOC qui sera appliqué aux onduleurs triphasés alimentant les motopompes centrifuges et en assurant les opérations de pompage et/ou de dessalement. Ce contrôle permettra aussi de

contrôler la stabilité de la tension du bus continu V_{dc} suite à l'élimination du stockage électrochimique.

L'architecture globale du système de dessalement par OI (Fig.1) est composée d'une source d'énergie renouvelable hybride (PV-Eolien) couplée à un bus DC à travers des convertisseurs de puissance. Cette source électrique renouvelable a été remplacée par une alimentation de puissance électrique programmable de puissance maximale de 4 kW. Un système de relevage d'eau composé d'une motopompe triphasée centrifuge basse pression *pump-w* (Tableau 1), un système de dessalement d'eau saumâtre par OI composé d'une motopompe triphasée centrifuge multi-étage haute pression *pump-HP* (Tableau 2) et une membrane de dessalement par OI (Tableau 3). Les deux motopompes sont alimentées par deux onduleurs de tension.

Une maquette de dessalement de capacité 300 l/h a été conçue et réalisée pour valider les différentes lois de commande et analyser le transfert de la puissance électrique produite par la source de puissance équivalente vers les deux sous-systèmes et la production de l'eau dessalée. Des instruments de mesure ont été installés pour mesurer et vérifier les performances des grandeurs hydromécaniques du processus de dessalement par OI [9].

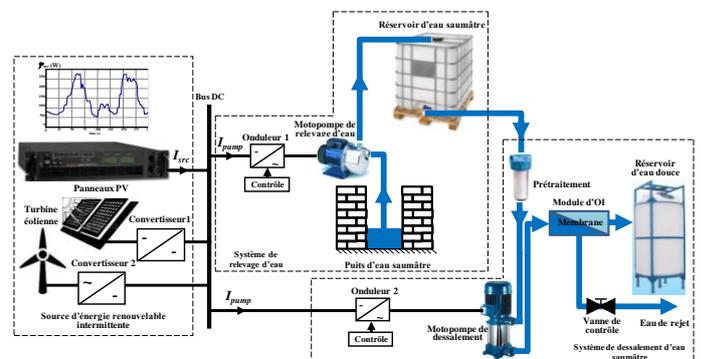


Fig.1 Architecture globale du système de dessalement par OI

Les mesures effectuées permettent d'une part d'étudier l'influence de la variation de la puissance électrique générée sur la production de l'eau douce, et d'autre part de vérifier que toutes les contraintes liées au bon fonctionnement de la membrane de filtration d'OI seront respectées.

2. SYNTHÈSE ET SIMULATION DE LA LOI DE COMMANDE PFOC

La loi de commande PFOC contient deux boucles internes pour la régulation des courants I_{sd} et I_{sq} de façon similaire à la commande vectorielle à flux rotorique orienté (Rotor Field Oriented Control) (Fig.2).

La fonction de transfert en boucle ouverte des courants I_{sd} et I_{sq} est donnée par :

$$G_o^I(p) = \frac{1/R_{sr}}{1 + \left(\frac{\sigma \cdot L_s}{R_{sr}}\right)p} \quad (1)$$

$$R_{sr} = R_s + \left(\frac{M_{sr}}{L_r}\right)^2 \cdot R_r \quad (2)$$

$$\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s \cdot L_r} \quad (3)$$

Avec :

- R_s : Résistance statorique
- R_r : Résistance rotorique
- L_s : Inductance statorique
- L_r : Inductance rotorique
- M_{sr} : Inductance mutuelle

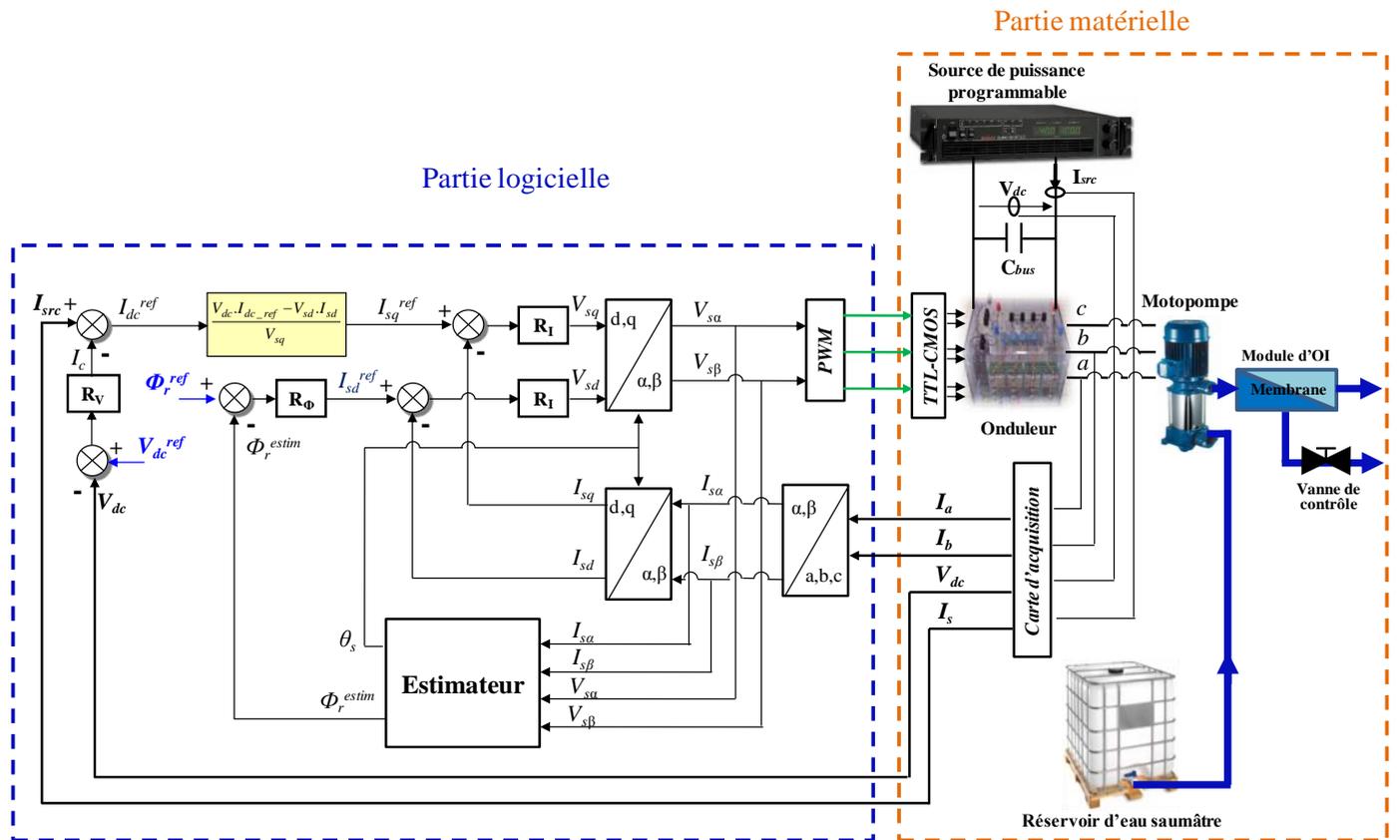


Fig.2 Schéma synoptique de la loi de commande PFOC

Pour la mise en œuvre des deux régulateurs de courant R_I (Fig.3), on a choisi des régulateurs PI parallèle de la forme :

$$R_I(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (4)$$

En choisissant la méthode de compensation des pôles pour la synthèse des régulateurs de courants, on peut calculer les paramètres K_p et K_i :

$$K_i = \frac{R_{sr}}{T_r^i} \quad (5)$$

$$K_p = \left(\frac{\sigma \cdot L_s}{R_{sr}}\right) K_i \quad (6)$$

Avec T_r^i le temps de réponse en boucle fermée choisi égal à 1 ms.

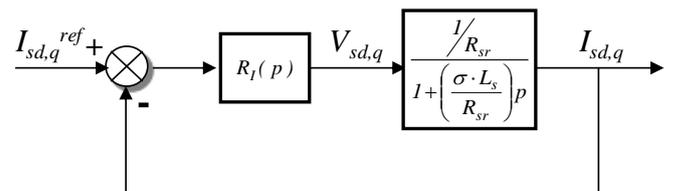


Fig.3 Schéma bloc de la boucle de régulation de courant

La discrétisation de ce régulateur a été réalisée en utilisant la méthode des rectangles inférieurs (Forward Euler) en remplaçant la variable p par $\frac{z-1}{T_d}$ avec T_d la période d'échantillonnage choisie égale à 50 μ s.

L'expression finale des régulateurs de courant discret s'écrit :

$$R_I(z) = \frac{-9.7436 + 10.0728 \cdot z}{z - 1} \quad (7)$$

Deux boucles de régulation externes sont ajoutées pour contrôler soit l'état magnétique de la machine et la puissance électrique consommée \mathcal{P}_{pump} Eq.8, soit pour contrôler l'état magnétique de la machine et la valeur de la tension du bus continu V_{dc} en se basant sur le principe de conservation de puissance Eq.9 [10].

Dans les essais expérimentaux nous avons utilisé la commande PFOC avec la motopompe de dessalement (*pump-HP*) pour la régulation de la tension du bus continu V_{dc} à la valeur de 320 V. La motopompe de relevage d'eau (*pump-w*) est alors commandée par la commande PFOC pour contrôler la puissance électrique consommée \mathcal{P}_{pump-w} . Dans ce cas, la puissance électrique consommée par la première motopompe $\mathcal{P}_{pump-HP}$ sera égale au reste de la puissance fournie par la source Eq.10.

$$\mathcal{P}_{pump} = V_{dc} \cdot I_{pump} \quad (8)$$

$$V_{dc} \cdot I_{dc} = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \quad (9)$$

$$\mathcal{P}_{pump-HP} = \mathcal{P}_{src} - \mathcal{P}_{pump-w} \quad (10)$$

La synthèse du régulateur de flux R_ϕ (Fig.4) et de tension continu R_V est réalisée de façon similaire au régulateur de courant. Le temps de réponse de ces boucles externes a été choisi égal à 10 ms pour être moins rapide que les boucles internes. L'estimation du flux rotorique est basée sur les paramètres rotoriques de la machine et du courant statorique I_{sd} (Eq.11)

$$\phi_r = \frac{M_{sr}}{1 + \frac{L_r}{R_r} p} I_{sd} \quad (11)$$

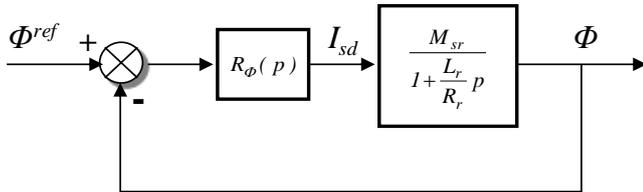


Fig.4 Schéma bloc de la boucle de régulation de flux

La discrétisation des régulateurs R_ϕ et R_V donne les valeurs suivantes :

$$R_\phi(z) = \frac{-2.338 + 2.3399 \cdot z}{z - 1} \quad (12)$$

$$R_V(z) = \frac{-0.011 + 0.11 \cdot z}{z - 1} \quad (13)$$

Un Système de Gestion d'Énergie (SGE) est utilisé pour la répartition de la puissance électrique disponible entre les deux motopompes de façon à considérer les contraintes liées aux fonctionnements des motopompes, les contraintes liées à la membrane d'OI, le niveau de l'eau dans le réservoir d'eau saumâtre et de façon à maximiser la production de l'eau dessalée. Dans ce travail on se limitera à la présentation de la commande PFOC.

Les résultats de simulation de la commande PFOC associée à la motopompe de dessalement (*pump-HP*) sont représentés

ci-dessous. Un profil de puissance électrique avec plusieurs paliers est choisi pour valider les différentes boucles de régulation (Fig.5). La répartition de la puissance entre les deux motopompes est assurée par le SGE selon la puissance disponible. L'objectif n'est pas de valider le SGE mais de montrer les performances et la robustesse de la commande PFOC pour le contrôle de la puissance de la motopompe de relevage d'eau \mathcal{P}_{pump-w} , la régulation de la tension V_{dc} à travers la commande de la motopompe de dessalement et le bon fonctionnement des deux processus de pompage et dessalement.

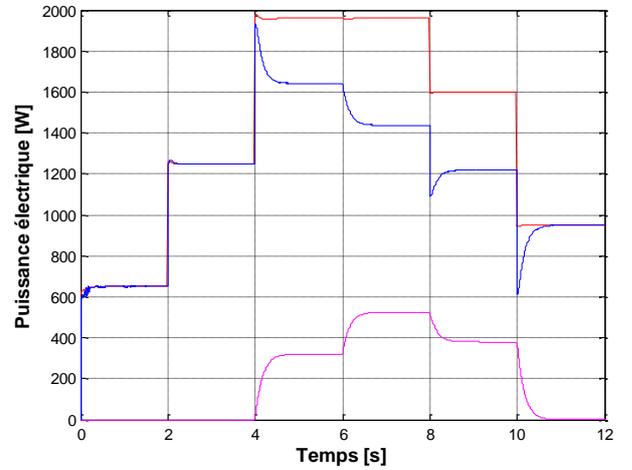


Fig.5 Evolution des puissances électriques

L'équation du débit d'eau d'alimentation Q_a en fonction de la pression P_a (Eq.14) qui représente la charge hydraulique correspondant à la membrane d'OI a été déterminée pratiquement à partir des essais de caractérisation (Fig.6).

$$Q_a = 0.0012 P_a^3 - 0.094 P_a^2 + 2.8 P_a + 0.83 \quad (14)$$

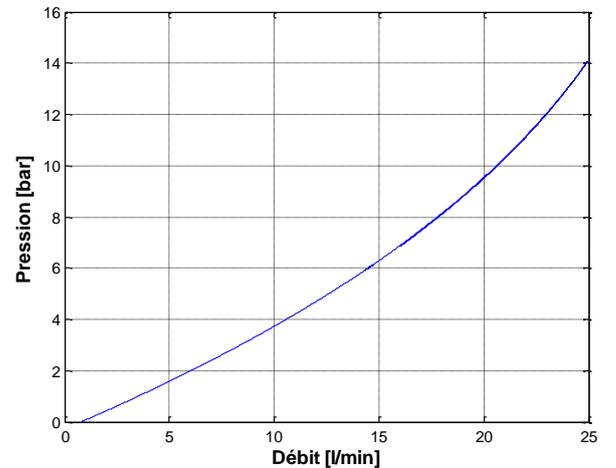


Fig.6 Caractéristique de la membrane d'OI

L'évolution des tensions et courants statoriques dans le plan alpha-bêta de la motopompe *pump-HP* pour une puissance de 1630 W est représentée dans la figure 7. La valeur efficace de la tension et du courant statorique pour cette puissance d'alimentation est égale à 176 V et 6 A avec une fréquence de 40 Hz.

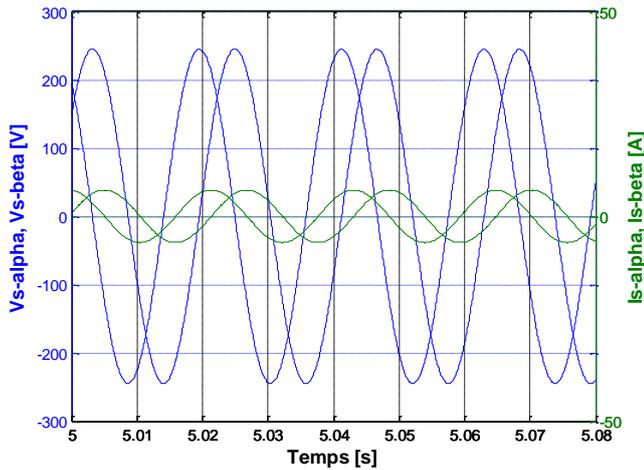


Fig.7 Evolution des tensions et courants statoriques

La régulation de la tension du bus continu V_{dc} (Fig.8) et du flux rotorique (Fig.9) montre les bonnes performances des régulateurs numériques synthétisés R_V et R_ϕ .

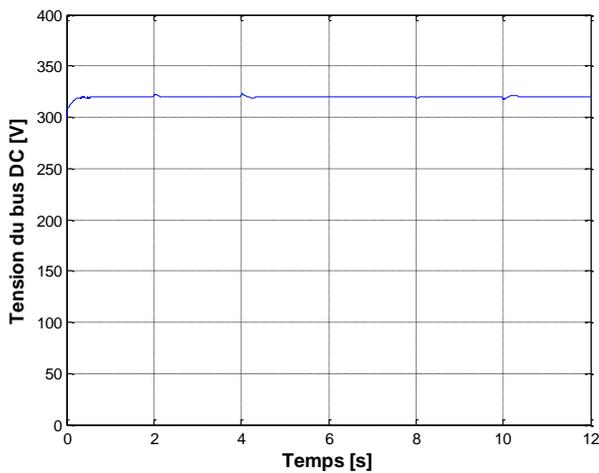


Fig.8 Performance de la régulation de la tension du bus DC

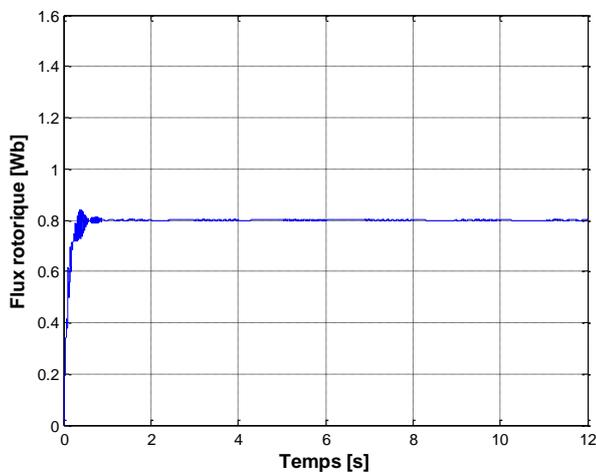


Fig.9 Performances de la régulation du flux rotorique

Le débit Q_a et la pression P_a de l'eau de refoulement de la motopompe de dessalement varient proportionnellement à la puissance électrique consommée $\mathcal{P}_{pump-HP}$ (Fig.10). Ce résultat nous a permis de déterminer deux équations mathématiques qui permettent de déterminer directement ces deux grandeurs

hydrauliques à partir de la puissance électrique de la motopompe (Eq.15 et Eq.16).

$$Q_a = -4 \cdot 10^{-6} \mathcal{P}^2 + 0.018 \mathcal{P} + 4.5659 \quad (15)$$

$$P_a = 0.0073 \mathcal{P} + 1.3936 \quad (16)$$

Ces équations dépendent de la caractéristique de la charge hydraulique (Eq. 14) et permettent de déterminer la plage de variation de la puissance électrique qui respecte les contraintes de fonctionnement de la membrane ainsi que la détermination de la valeur de puissance qui assure un fonctionnement optimal. Ces données seront utilisées par le SGE pour une répartition optimale de la puissance entre les deux motopompes.

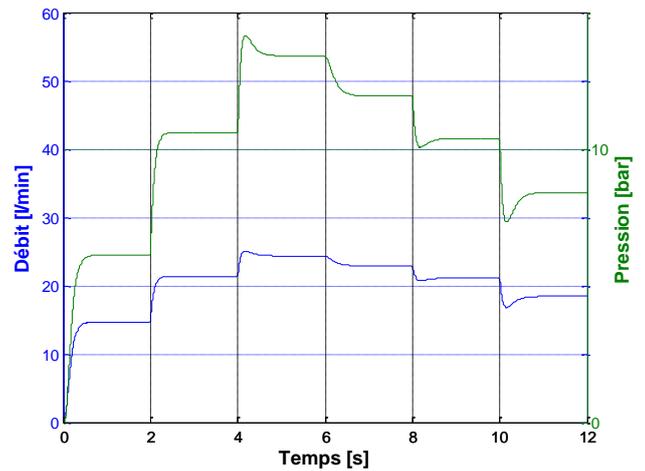


Fig.10 Evolution du débit et de la pression de la motopompe de dessalement

3. IMPLANTATION PRATIQUE ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

La loi de commande PFOC a été implémentée sur la carte de contrôle DSpace *DS1104* et testée sur la maquette de dessalement d'eau saumâtre de capacité 300 l/h (Fig.11).

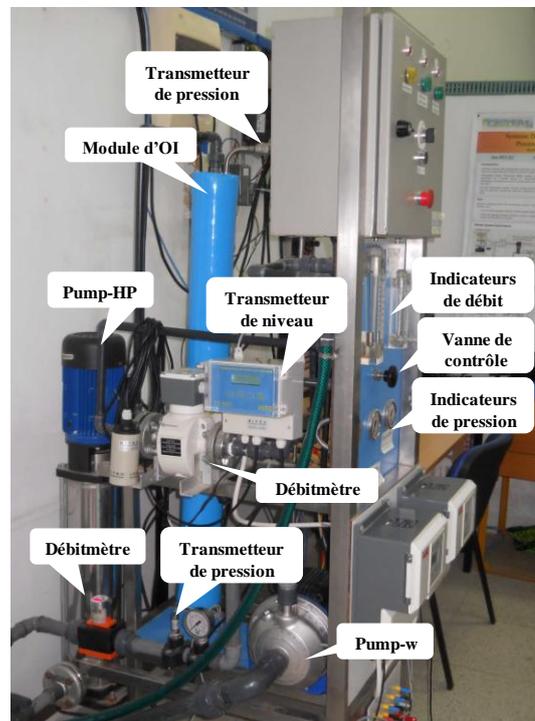


Fig.11 Maquette expérimentale

La source renouvelable a été émulée par une alimentation de puissance programmable qui peut générer un profil variable de puissance qui peut atteindre les 4 kW. Les essais expérimentaux sont effectués à travers un SGE qui permet de déterminer la puissance optimale pour chaque motopompe [11].

Le même profil de puissance électrique utilisé dans la simulation a été programmé sur l'alimentation de puissance. L'évolution de la puissance électrique fournie ainsi que les puissances partagées entre les deux motopompes sont représentées dans la figure 12.

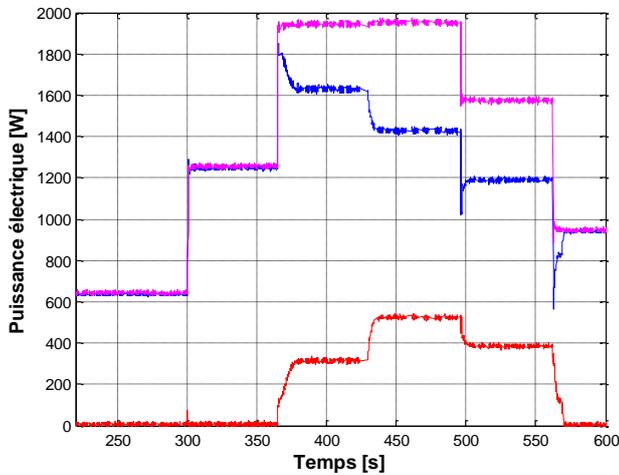


Fig.12 Evolution des puissances électriques

On remarque dans cet essai que la motopompe *pump-w* a fonctionné en puissance nominale dans le deuxième palier puisque la puissance électrique fournie est suffisante et il n'y a pas de contrainte particulière limitant son fonctionnement (le niveau d'eau saumâtre dans le réservoir n'est pas pris en considération dans cet essai). Par contre la motopompe *pump-HP* fonctionne à puissance réduite car d'une part la puissance électrique disponible n'est pas suffisante, et d'autre part il faut s'assurer que la pression et le débit à la sortie de la motopompe ne dépassent pas les limites tolérées par la membrane d'OI pour cette concentration d'eau saumâtre. La décision sur les valeurs des puissances électriques est prise par le SGE et appliquée par la loi de commande PFOC.

La figure 13 représente l'évolution des tensions et courants statoriques dans le plan alpha-bêta de la motopompe *pump-HP* pour une puissance de 1630 W. Les courants sont déterminés à partir de la mesure des courants statoriques dans le repère triphasé et en appliquant la transformation de Clarke. Les tensions affichées sont les tensions calculées par la loi de commande. La valeur efficace de la tension et du courant statoriques ainsi que la fréquence sont très proches des valeurs trouvées lors de la simulation. Ces résultats pratiques montrent les bonnes performances de la commande en régime statique et dynamique face à des variations brusques de la puissance issue des sources renouvelables.

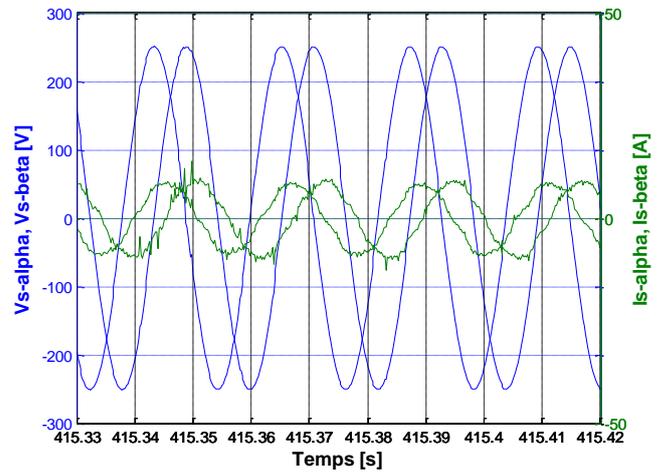


Fig.13 Evolution des tensions et courants statoriques

La régulation de la tension du bus DC et du flux rotorique est représentée dans les figures 14 et 15 respectivement. La tension de référence V_{dc} a été choisie égale à 320V pour assurer une tension nominale de 230V avec un couplage triangle. La valeur du flux de référence est égale à 0.8 Wb pour assurer une bonne magnétisation de la machine quel que soit la valeur de la puissance électrique imposée. On constate dans la figure 14 les bonnes performances de la régulation de la tension V_{dc} malgré la fluctuation de la puissance électrique fournie par la source. Ce résultat permet de valider la boucle de régulation du courant I_{sq} utilisé pour la régulation de V_{dc} ainsi que les paramètres des deux régulateurs PI.

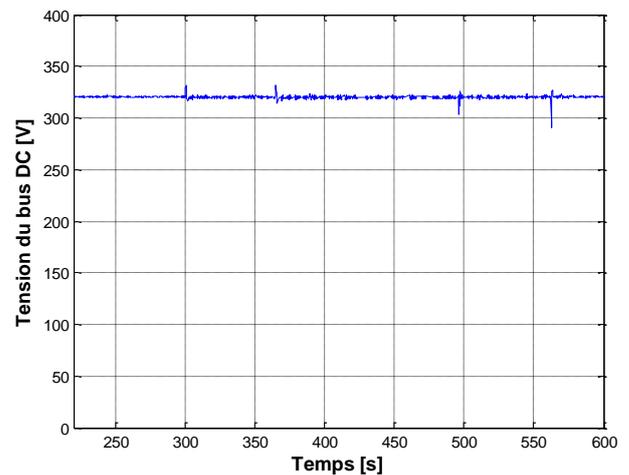


Fig.14 Régulation de la tension du bus DC

Le flux rotorique est estimé à partir de la mesure des tensions et courants statoriques. La régulation du flux se fait à travers le courant I_{sd} . Les bonnes performances de la boucle de régulation du flux (Fig.15) permettent de valider l'estimateur et les régulateurs utilisés.

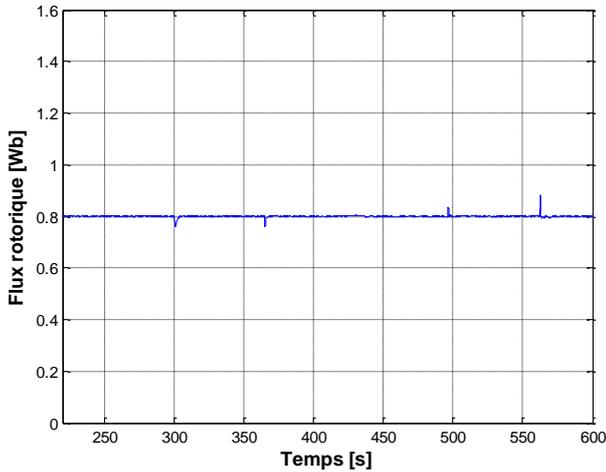


Fig.15 Régulation du flux rotorique

La figure 16 montre l'évolution du débit et de la pression de l'eau à la sortie de la motopompe de relevage d'eau (*pump-w*). Le réservoir de stockage d'eau est placé à une hauteur de 5 m. Cette motopompe est contrôlée en puissance par la commande PFOC. La variation des grandeurs hydrauliques à la sortie de la motopompe a la même allure que la puissance électrique imposée par la commande (Fig.12).

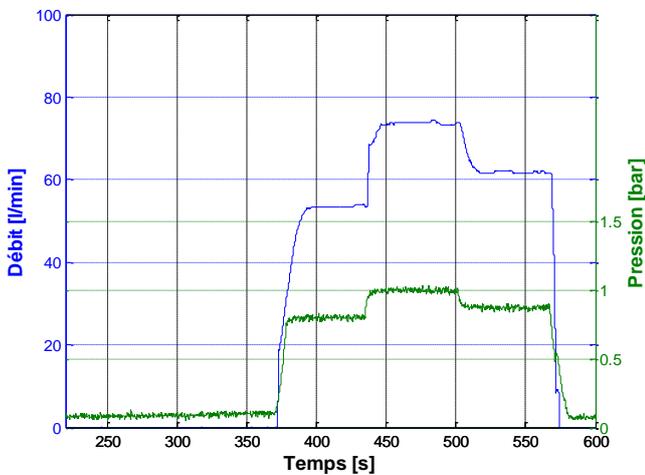


Fig.16 Evolution du débit et de la pression de la motopompe de relevage d'eau

Les expressions du débit Q_{PBP} et de la pression P_{PBP} en fonction de la puissance électrique \mathcal{P}_{pump-w} sont données par Eq.17 et Eq. 18.

$$Q_{PBP} = -0.0003 \mathcal{P}^2 + 0.3555 \mathcal{P} - 29.598 \quad (17)$$

$$P_{PBP} = 0.001 \mathcal{P} + 0.487 \quad (18)$$

Les résultats pratiques de l'évolution du débit et de la pression de l'eau à la sortie de la motopompe de dessalement (*pump-HP*) sont très proches des résultats de simulation (Fig.17). Il faut noter deux différences majeures pour la commande de cette motopompe par rapport à la précédente. La commande PFOC utilisée avec la *pump-HP* ne contrôle pas la puissance électrique mais régule la tension du bus DC. La puissance $\mathcal{P}_{pump-HP}$ est la conséquence de l'application de la commande PFOC avec la première motopompe selon l'Eq.10.

La charge hydraulique utilisée avec la *pump-HP* est la membrane d'OI ce qui présente des contraintes additionnelles qui n'étaient pas présentes dans le premier cas de pompage de l'eau dans le réservoir (la seule contrainte dans ce cas est le niveau de l'eau dans le réservoir). La vérification des contraintes liées au bon fonctionnement du système et la répartition optimale de la puissance disponible entre les deux motopompes sont assurés par le SGE.

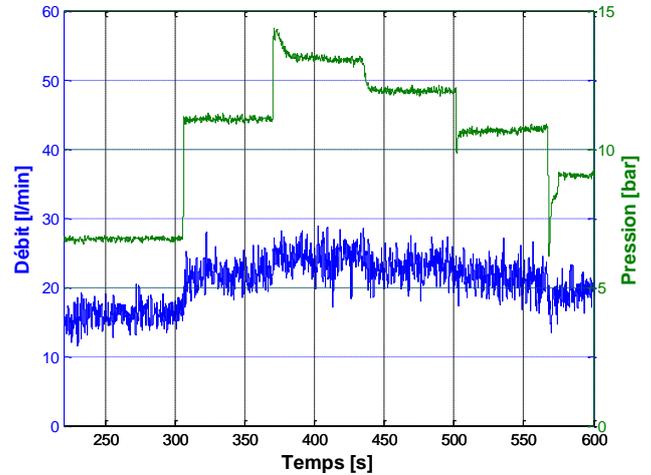


Fig.17 Evolution du débit et de la pression de la motopompe de dessalement

La fluctuation dans la mesure du débit est due à l'écoulement turbulent de l'eau dans les conduites.

Le dimensionnement des deux motopompes a été judicieusement calculé. La motopompe de relevage d'eau (Tableau 1) permet de pomper un débit qui peut atteindre 80 l/min avec une faible pression ce qui satisfait bien son rôle de pompage. La motopompe de dessalement (Tableau 2) peut atteindre une pression de 18 bar avec un débit de 20 l/min ce qui permet de créer le phénomène d'OI sans dépasser les limites de fonctionnement de la membrane (Tableau 3).

Tableau 1. Caractéristiques de la motopompe *pump-w*

Modèle	LOWARA CEA70/3
Puissance nominale	370 W
Tension nominale	230 V
Courant nominal	2.51 A
Fréquence nominale	50 Hz
Vitesse nominale	2820 tr/min
Débit nominal	30-80 l/min
Pression nominale	1.3-2 bar

Tableau 2. Caractéristiques de la motopompe *pump-HP*

Modèle	EBARA EVM2 22F/2.2
Puissance nominale	2200 W
Tension nominale	230 V
Courant nominal	8.71 A
Fréquence nominale	50 Hz
Vitesse nominale	2860 tr/min
Débit nominal	20-60 l/min
Pression nominale	8.2-18.6 bar

Tableau 3. Caractéristiques de la membrane d'OI

Modèle	TORAY TM710
Rejet de sel minimum	99.7 %
Débit nominal d'eau produite	379 l/h (9.1 m3/j)
Pression de service maximale	21 bar
Température maximale de l'eau	45°C
Gamme de pH de l'eau saumâtre	2-11

La figure 18 représente la variation du débit d'alimentation de la membrane de dessalement Q_a et le débit de l'eau douce à la sortie de la membrane de dessalement Q_p selon la puissance électrique disponible.

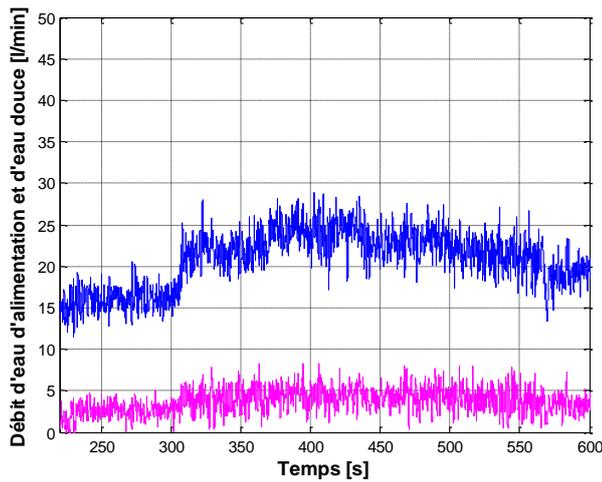


Fig.18 Evolution des débits au niveau de la membrane

Le rendement hydraulique de la membrane de dessalement ne peut pas dépasser 20 % et le débit d'eau dessalée ne peut pas dépasser 6.3 l/min. Cette limitation ne permet pas d'augmenter la puissance électrique de la motopompe *pump-HP* pour accroître la production.

Pour améliorer le rendement et augmenter la production on utilise généralement plusieurs membranes branchées en série de telle sorte que l'eau de rejet sera filtrée une deuxième fois avant d'être évacuée.

4. CONCLUSIONS

La synthèse et l'implantation pratique de la stratégie de contrôle PFOC ont permis d'étudier le comportement dynamique de l'unité de dessalement face aux variations brusques de la puissance électrique fournie par les sources renouvelables. Les résultats pratiques montrent les bonnes performances de la commande utilisée pour la régulation du bus DC et pour la commande des motopompes en puissance tout en contrôlant l'état magnétique des machines. Cette commande assurera donc la production de l'eau dessalée en utilisant une source d'énergie renouvelable intermittente sans stockage électrochimique. Pour canaliser les flux d'énergie qui transitent des diverses sources vers la charge hydromécanique (unité de dessalement par OI) à travers le bus continu, il est nécessaire d'utiliser un SGE qui doit exploiter le système de contrôle développé dans cet article pour optimiser le fonctionnement et maximiser la production de l'eau douce.

5. NOMENCLATURE

P_a	Pression d'alimentation
Q_a	Débit d'alimentation
P_p	Pression du perméat
Q_p	Débit du perméat
P_r	Pression de rejet
Q_r	Débit de rejet
V_{dc}	Tension du bus DC
I_{dc}	Courant dans le bus DC
\mathcal{P}_{pump}	Puissance électrique de la motopompe
\mathcal{P}_{src}	Puissance électrique de la source

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Tunisien dans le cadre du projet de collaboration ERANETMED "Energy and Water Systems Integration and Management" Numéro d'identification 044.

7. REFERENCES

- [1] A. Dubreuil, E. Assoumou, S. Bouckaert, S. Selosse, N. Maizi, « Water modeling in an energy optimization framework – The water-scarce middle east context », *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 268-279, 2013.
- [2] L. F. Greenlee, D. F. Lawler, B.D. Freeman, B. Marrot, P. Moulin, « Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges », *Water Res.*, vol. 43, no. 9, pp. 2317-2348, 2009.
- [3] S. Burn, M. Hoang, D. Zarzo, F. Olewniak, E. Campos, B. Bolto, et al., « Desalination techniques — A review of the opportunities for desalination in agriculture », *Desalination*, vol. 364, pp. 2-16, 2015.
- [4] H. Sharon, K. S. Reddy, « A review of solar energy driven desalination technologies », *Renew. Sustainable Energy Rev.*, vol. 41, pp. 1080-1118, 2015.
- [5] N. Ghaffour, J. Bundschuh, H. Mahmoudi, M. F. A. Goosen, « Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems », *Desalination*, vol. 356, pp. 94-114, 2015.
- [6] M. C. Garg, H. Joshi, « A Review on PV-RO Process: Solution to Drinking Water Scarcity due to High Salinity in Non-Electrified Rural Areas », *Separ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 8, pp. 1270-1283, 2014.
- [7] V. G. Gude, « Energy storage for desalination processes powered by renewable energy and waste heat sources », *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 877-898, 2015.
- [8] M. G. Buonomenna, J. Bae, « Membrane processes and renewable energies », *Renew. Sustainable Energy Rev.*, vol. 43, pp. 1343-1398, 2015.
- [9] M. Turki, A. B. Rhouma, J. Belhadj, « Experimental characterization of a Reverse Osmosis desalination process fed by hybrid power source », *SSD 2009, Djerba (Tunisie)*.
- [10] W. Khiari, A. B. Rhouma, M. Turki, J. Belhadj, « DSPACE implementation and experimentation of Power Field Oriented Control for motor-pump fed by intermittent renewable sources », *CISTEM 2014, Tunis (Tunisie)*.
- [11] M. Turki, J. Belhadj, X. Roboam, « Water/Energy management approaches of an autonomous water desalination unit fed by a hybrid (Photovoltaic-Wind) system », *CISTEM 2014, Tunis (Tunisie)*.