

Simulation de la régulation de débit d'une unité d'ultrafiltration d'eau membranaire alimentée par énergie photovoltaïque

[Simulation of the flow control for a unit of ultrafiltration membrane equipped with photovoltaic energy water]

ERNEST KIATA¹, Ndjiya Ngasop², Haman-Djalo¹, and Kayem Joseph²

¹Department de Physiques,
Faculté des Sciences (FS) de l'Université de Ngaoundéré,
Ngaoundéré, Cameroun

²Département de Génie des Procédés et d'Ingénierie,
Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-Industrielles (ENSAI) de l'Université de Ngaoundéré,
Ngaoundéré, Cameroun

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This work relates to a method of flow control for a unit of ultrafiltration membrane water powered by photovoltaic energy over the Sun in order to better master the sealing time and avoid damage to the filtration module. The complete system modeled and simulated on Matlab/Simulink includes a photovoltaic generator and a floor of adaptation converter-inverter, a single phase Electromagnetic induction motor coupled to a centrifugal pump, constituting the membrane ultrafiltration unit. The chopper booster switch IGBT is controlled by a MPPT controller - P & O that regularly adjusts the duty cycle taking its values in a range restricted to stabilize the voltage at the output of the chopper, and at the same time the flow of the pump.

KEYWORDS: photovoltaic pumping, flow, ultrafiltration membrane, boost converter, controller MPPT - P&O.

RÉSUMÉ: Ce travail porte sur une méthode de régulation de débit d'une unité d'ultrafiltration d'eau membranaire alimentée par énergie photovoltaïque au fil du soleil afin de mieux maîtriser le temps de colmatage et d'éviter l'endommagement du module de filtration. Le système complet modélisé et simulé sur Matlab/Simulink comporte un générateur photovoltaïque et un étage d'adaptation hacheur-onduleur, un moteur monophasé à induction électromagnétique couplé à une pompe centrifuge, constituant l'unité d'ultrafiltration membranaire. L'interrupteur IGBT du hacheur survolteur est commandé par un contrôleur MPPT-P&O qui ajuste régulièrement le rapport cyclique en prenant ses valeurs dans un intervalle restreint permettant ainsi de stabiliser la tension à la sortie du hacheur et par la même occasion le débit de la pompe.

MOTS-CLEFS: Pompage photovoltaïque, débit, ultrafiltration membranaire, hacheur boost, contrôleur MPPT-P&O.

1 INTRODUCTION

L'eau est un aliment de lest. Paradoxalement, c'est la première cause de mortalité dans le monde. Chaque années 3,4 millions de personnes meurent faute d'eau potable, principalement les populations pauvres et surtout les enfants [1]. Environ 2,3 milliards d'autre sont atteints de maladies hydriques qui peuvent être évitées par un accès à de l'eau propre. En

réalité, dans les pays en voie de développement en général et au Cameroun en particulier les populations rurales, majoritaires, occupent une place de choix à travers leur dynamisme et leur contribution à l'économie nationale. Mais il se trouve qu'elles n'ont pas accès à l'eau potable et à l'électricité, principaux signes de développement. Les projets d'adductions et de filtrations d'eau mis en place dans certaines zones rurales par les pouvoirs publics et les organismes non gouvernementaux afin de satisfaire ces populations n'ont pas atteint les objectifs escomptés. En effet, pour la plupart, il nécessite des besoins en carburant ou en électricité et en entretien, ressources rarement disponibles. Ceci étant, la majorité de ces populations se ravitaillent encore au niveau des marigots, des rivières, des puits à manivelles dans les campagnes où les eaux souillées sont à l'origine de nombreuses épidémies (choléra, typhoïde, hépatites, diarrhées et poliomyélites). L'unité d'ultrafiltration membranaire alimentée en énergie photovoltaïque, fonctionnant au fil du soleil pourrait être utilisée comme palliatif. Dans le fonctionnement de ce système, le débit, la pression, la puissance et le rendement en un lieu donné sont fonction de l'ensoleillement qui varie au cours de la journée et au cours des saisons [2], [3], [4]. Ce qui rend impossible la maîtrise du degré de salissure ou colmatage de la membrane filtrante et par la même occasion l'automatisation du processus de son nettoyage. Au vu de tout ce qui précède, l'on est à mesure de se poser la question suivante : comment maintenir constant le débit de l'unité d'ultrafiltration d'eau membranaire quelque soit les conditions climatiques ?

L'objectif de ce travail revient à proposer une technique de régulation du débit et de la pression transmembranaire par rapport au colmatage ou au flux de retentat (eau filtrée) d'un équipement de filtration d'eau localisé dans un site isolé.

Cet article dans ses articulations, présente tout d'abord le titre Matériel et Méthodes qui illustre en détail le modèle Simulink du générateur photovoltaïque (GPV), l'étage d'adaptation (hacheur et onduleur) intégrant la technique du verrouillage du rapport cyclique à travers la commande MPPT-P&O (Maximum Power Point Tracking-Perturb and Observe) et ensuite le modèle Simulink de l'unité de filtration constitué du moteur monophasé à induction couplé à la pompe centrifuge et du module de filtration. Puis une présentation discutée des résultats obtenus par simulation du système complet et enfin la conclusion.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 MATERIEL

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé un ordinateur de marque acer Processeur Intel (R) dual core, 2,3 GHz, le logiciel Matlab R2013b, un module photovoltaïque de marque HeliosH750 afin d'alimenter le groupe moteur-pompe d'un équipement d'ultrafiltration d'eau marque Multi-Inox 34 ES qui utilise le module d'ultrafiltration tangentielle SM1C35-A004.

2.2 METHODES

2.2.1 GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Nous utilisons dans cet article la structure de base d'une cellule photovoltaïque à une diode. Le circuit équivalent du GPV et les différentes équations permettant d'aboutir à l'équation (1) sont fournis dans [5].

$$I_{pv} = I_{cc} - I_s \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t * N_{cs}} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

Le schéma bloc de la figure 1 montre le modèle Simulink d'un module photovoltaïque basé sur l'équation (1) dont les paramètres qui y interviennent sont résolus dans le Matfile.

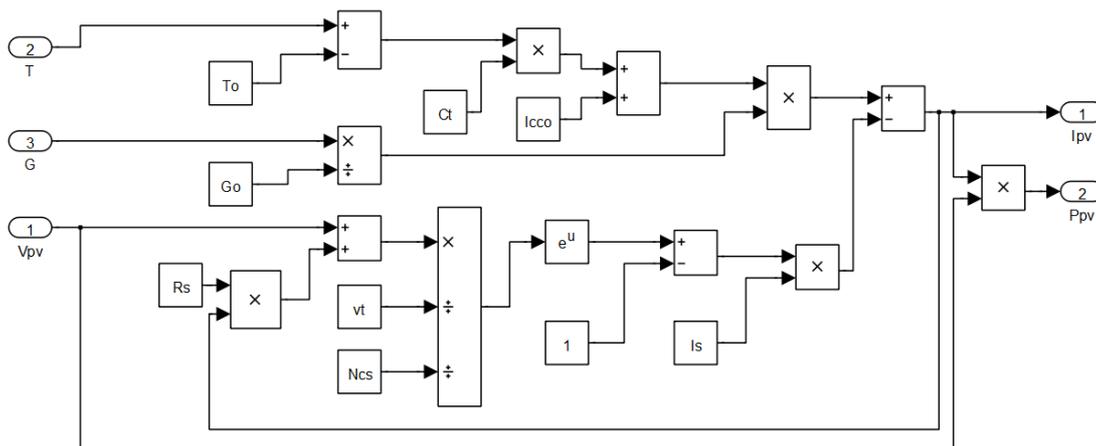


Figure 1 : Modèle Simulink d'un module PV

Pour la simulation du GPV, nous utilisons les données du module photovoltaïque contenues dans [3] en associant en série 3 rangées de 6 modules en parallèles ($N_p = 6, N_s = 3$), pour une puissance disponible de 1559,09 W sous 24,06 A et 64,8 V.

2.2.2 ETAGE D'ADAPTATION DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

2.2.2.1 CONVERTISSEUR DC-DC : HACHEUR BOOST

Le modèle Simulink du hacheur survolteur présenté à la figure 2 a pour rôle principale de faire passer la tension d'une valeur basse à une valeur plus élevée en faisant varier le rapport cyclique d dans les relations (2) et (3) suivantes.

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-d} \quad (2)$$

$$I_{out} = (1 - d)I_{in} \quad (3)$$

V_{in} et I_{in} représentent respectivement la tension et le courant à l'entrée du hacheur et V_{out}, I_{out} ceux de la sortie.

Les valeurs de l'inductance L et de la capacité C du convertisseur sont calculées comme suite

$$L = d \frac{V_{in}}{f \cdot \Delta I} \quad (4)$$

$$C = d \frac{I_{out}}{f \cdot \Delta V} \quad (5)$$

Utilisant les valeurs maximales du courant et de la tension, l'application numérique des relations (3) et (4) donnent respectivement 30 μ H et 470 μ F.

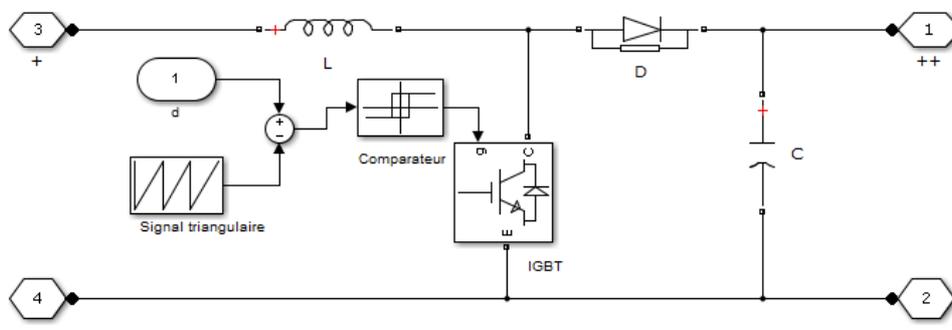


Figure 2 : Modèle Simulink du hacheur survolteur.

A l'entrée du signal de commande, un comparateur permet de faire l'analyse entre un signal triangulaire de fréquence 100 kHz et le rapport cyclique fourni par l'algorithme de commande MPPT.

2.2.2.2 ALGORITHME DE COMMANDE MPPT-P&O ET TECHNIQUE DE REGULATION DE DEBIT

Afin de réguler le débit de l'unité d'ultrafiltration, notre technique consiste à stabiliser la tension issue du GPV afin de permettre au moteur-pompe d'absorber une puissance constante et de fournir un débit d'eau constant, quelque soit les conditions climatiques. Pour y parvenir, nous utilisons la commande MPPT en intégrant à la fin de l'algorithme perturbation et observation (P&O) classique le verrouillage du rapport cyclique.

La MPPT permet au GPV de fonctionner à la puissance maximale en dépit de la variation de l'ensoleillement, de la température et de la charge [3],[6], [7]. On retrouve dans la littérature différents types d'algorithme basés sur la commande MPPT. Au-delà de ses inconvénients, l'algorithme perturbation et observation (P&O) est précis, rapide et facile à mettre en œuvre [8]. A travers une boucle, l'algorithme lit la puissance délivrée instantanément par le GPV, la compare à une valeur précédente et agit sur le rapport cycle en l'augmentant ou en le réduisant suivant le signe obtenu de la comparaison. Le pas du rapport cyclique est fixé à la valeur 0,44% pour minimiser la variation du rapport cyclique et pour rendre presque constant la tension aux bornes du hacheur. Le rapport cyclique prend ses valeurs dans un intervalle restreint défini comme suit. Déterminer la valeur minimale et la valeur maximale de la tension aux bornes du GPV soit $V_{max} = 55,22 V$ et $V_{min} = 33,88 V$ puis en tirant d dans la relation (2), nous obtenons la plus petite valeur du rapport cyclique D_L pour $V_{in} = V_{max}$ et sa plus grande valeur D_H pour $V_{in} = V_{min}$. On obtient respectivement 0,79 et 0,90 correspondant à l'intervalle [0,78 ; 0,90] de verrouillage du rapport cyclique.

2.2.2.3 CONVERTISSEUR DC-AC : ONDULEUR MONOPHASE

L'objectif principal de l'inverseur statique continu-alternatif (Figure 3) est de permettre la fabrication de la tension alternative à partir de la tension continue issue du hacheur. Un des objectifs de ce travail est de permettre le choix de débit entre le besoin et une valeur de pression limite à ne pas atteindre pour ne pas endommager le module d'ultrafiltration. Pour parvenir à le faire, on fait varier la vitesse de rotation du moteur à induction monophasé en fixant soi-même la fréquence de la tension d'alimentation en utilisant la technique de la MLI (Modulation de la Largeur Impulsion) pour commander le pont en commutateur de l'onduleur. Le principe de base de la commande MLI est le rapport tension/fréquence qui doit être constant et refléter les propriétés de l'inductance des enroulements du moteur.

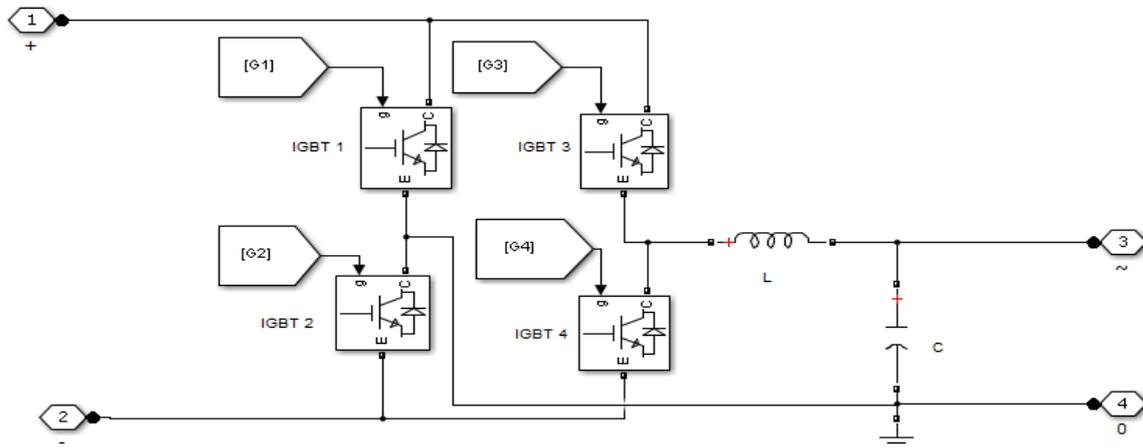


Figure 3 : Modèle Simulink de l'onduleur monophasé

Les impulsions (G_1, G_2, G_3 et G_4) des interrupteurs (IGBT) sont générées par la commande MLI implémentée dans un dispositif que représente le figure 4 suivante.

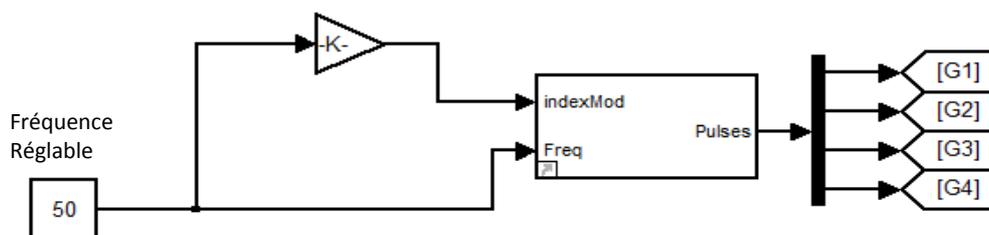


Figure 4 : Implémentation de la MLI

Afin de permettre à l'utilisateur de fixer soi-même la fréquence du groupe moteur-pompe, nous avons fait ressortir la fréquence. Dans la pratique, la variation de la fréquence peut être actionnée par un microcontrôleur qui reçoit les valeurs de référence par un clavier.

2.2.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'UNITE D'ULTRAFILTRATION MEMBRANAIRE

Nous appelons unité d'ultrafiltration membranaire, l'ensemble formé du moteur monophasé à induction couplé à la pompe centrifuge et au module ultrafiltration tangentielle.

Le schéma synoptique de l'unité de filtration membranaire utilisé dans le cadre de ce travail est donné à la figure 5 [9].

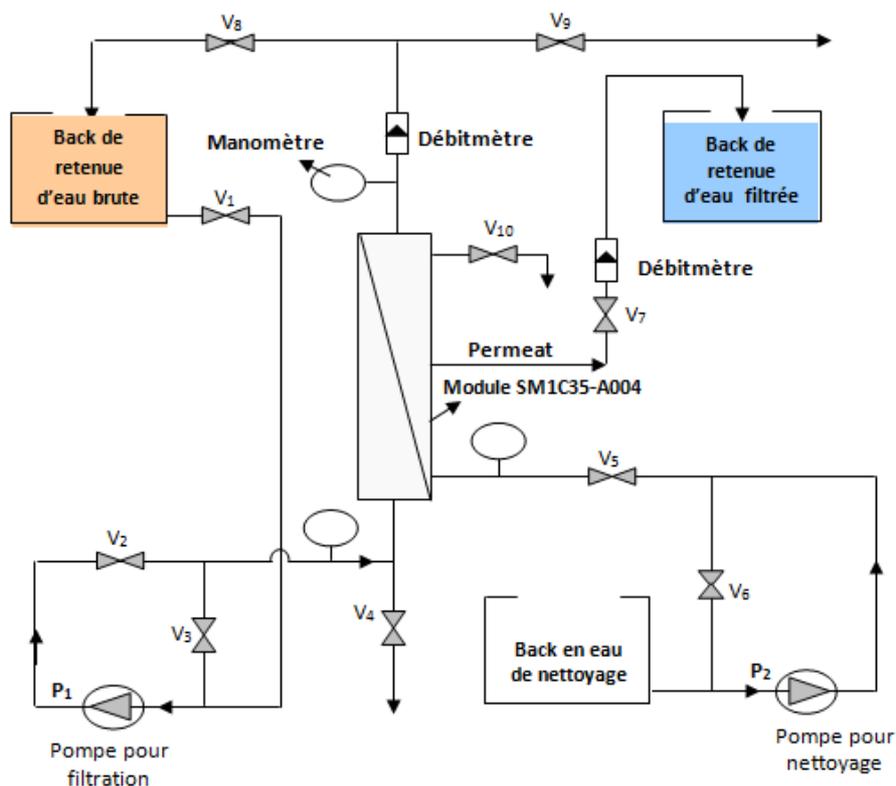


Figure 5 : Schéma de principe de l'unité d'ultrafiltration tangentielle.

Lorsque l'énergie solaire est assez suffisante, la pompe P_1 (P_2 à l'arrêt) est actionnée et refoule l'eau brute dans le module de filtration pour le traitement. Le filtrat (eau filtrée) est récupéré dans le réservoir de retenu grâce à l'ouverture de la vanne V_7 . La filtration étant tangentielle, la perte de charge à l'intérieur de la membrane peut augmenter jusqu'à une certaine limite, improprement appelée encrassement maximal. Le module nécessite ainsi un nettoyage (décolmatage) afin de déboucher les pores de la membrane filtrante. Pour parvenir à le faire, la pompe P_1 est temporairement mise à l'arrêt et la pompe P_2 en marche. L'eau de nettoyage circule de l'extérieur vers l'intérieur, destinée à détacher les impuretés et les entraîner dans la goulotte d'évacuation via la vanne V_4 . Le décolmatage terminé, le fonctionnement de la pompe P_2 sera

supprimé en actionnant à nouveau la pompe P_1 et le cycle de fonctionnement du système recommence. Afin de simuler l'unité de filtration, nous supposons que l'eau à traiter a un écoulement laminaire avec une viscosité cinématique $\eta = 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, et 0,073 bar comme perte de charge totale du dispositif [9].

2.2.3.1 MODELE DU MOTEUR MONOPHASE A INDUCTION COUPLE A LA POMPE CENTRIFUGE

Nous représentons à la figure 6 suivante le modèle Simulink du moteur monophasé couplé à la pompe centrifuge.

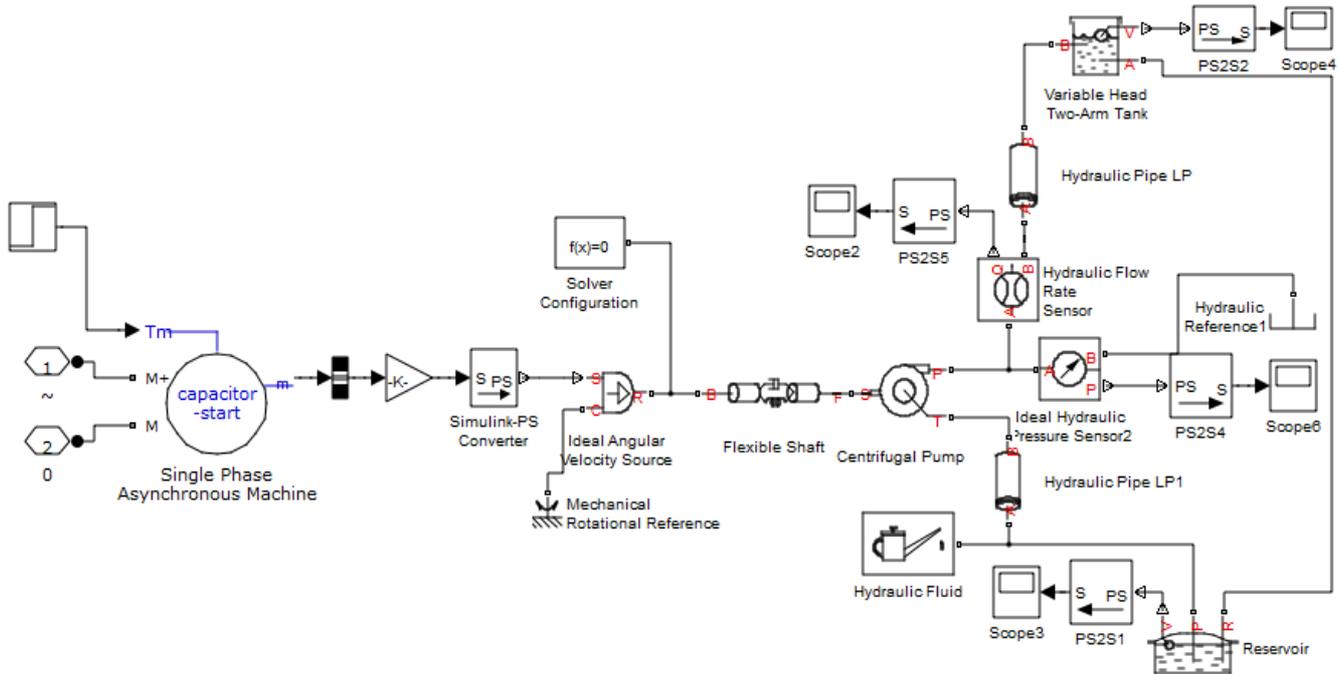


Figure 6 : Modèle Simulink du moteur monophasé couplé à la pompe centrifuge

2.2.3.2 MODULE D'ULTRAFILTRATION MEMBRANAIRE

Dans le schéma bloc représentant le modèle Simulink du module d'ultrafiltration illustré à la figure 7, nous prenons en compte uniquement les pertes de charge dans le dispositif, facteurs qui influencent majoritairement la pression et le débit du système.

Un interrupteur automatique placé entre le moteur et les pompes permet de basculer du processus de filtration à celui de son nettoyage.

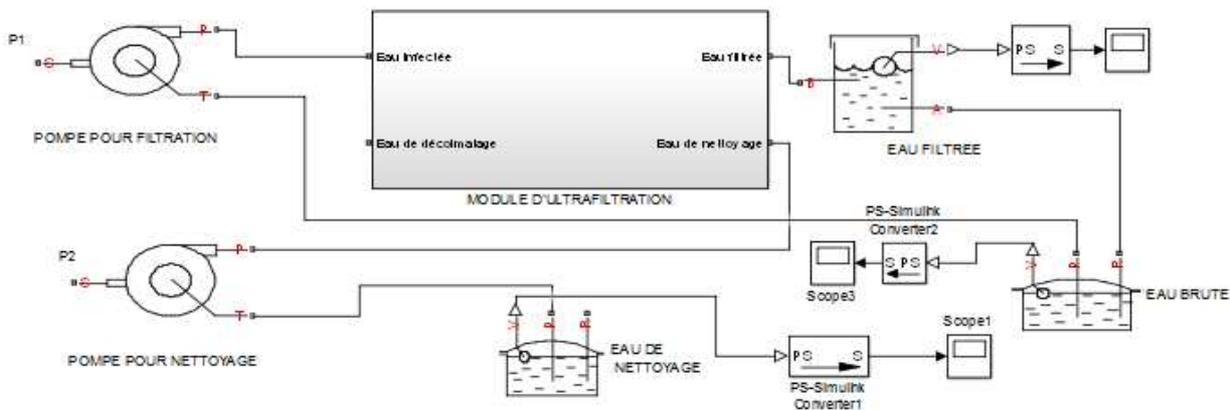


Figure 7 : Modèle Simulink du module d'ultrafiltration membranaire

2.2.4 SIMULATION DU SYSTEME COMPLET

La figure 8 représente le module complet du système proposé. La simulation de ce modèle est effectuée par le solveur ode 45t.

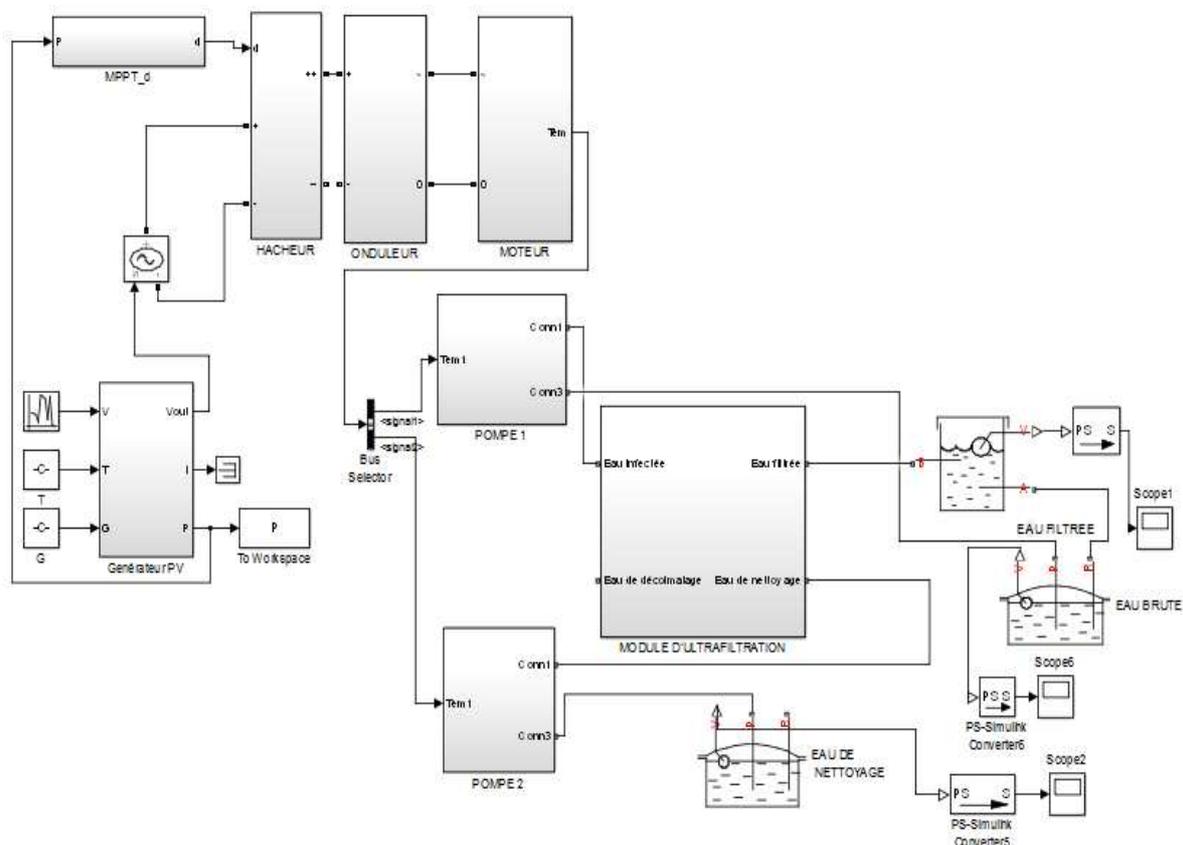


Figure 8: Simulation du système couplet

3 RESULTATS ET DISCUSSION

Le générateur n'étant pas connecté à une charge, nous avons fait varier l'irradiance (G) à température (T) fixe et en suite la température à irradiance fixe. Les résultats obtenus aux figures 9 et 10 nous permettent de conclure que la simulation du module PV sous l'environnement Simulink de logiciel Matlab fonctionne normalement et que la variation de l'irradiance (température) influence le courant PV (tension de circuit ouvert).

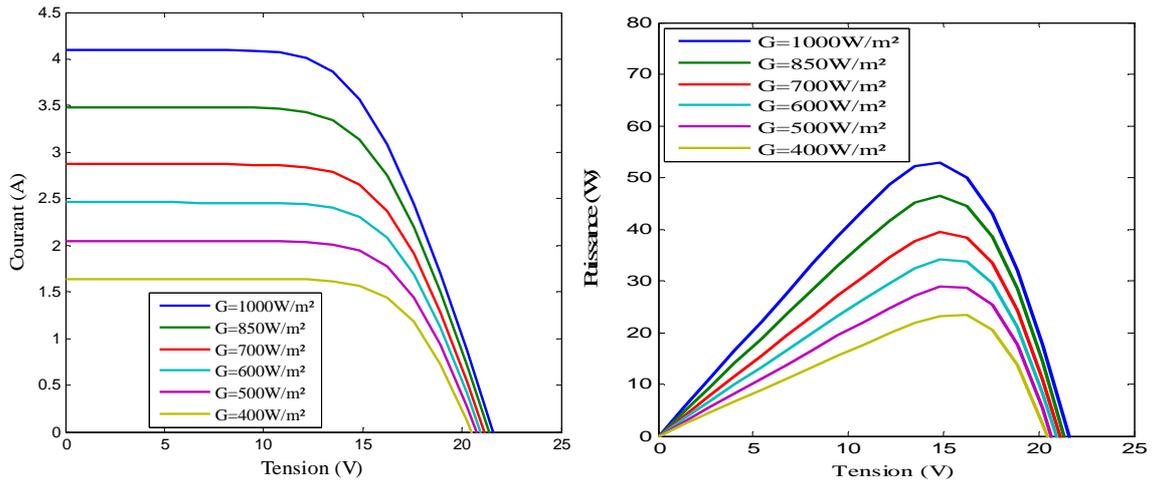


Figure 9 : Influence de la variation de l'ensoleillement sur le courant

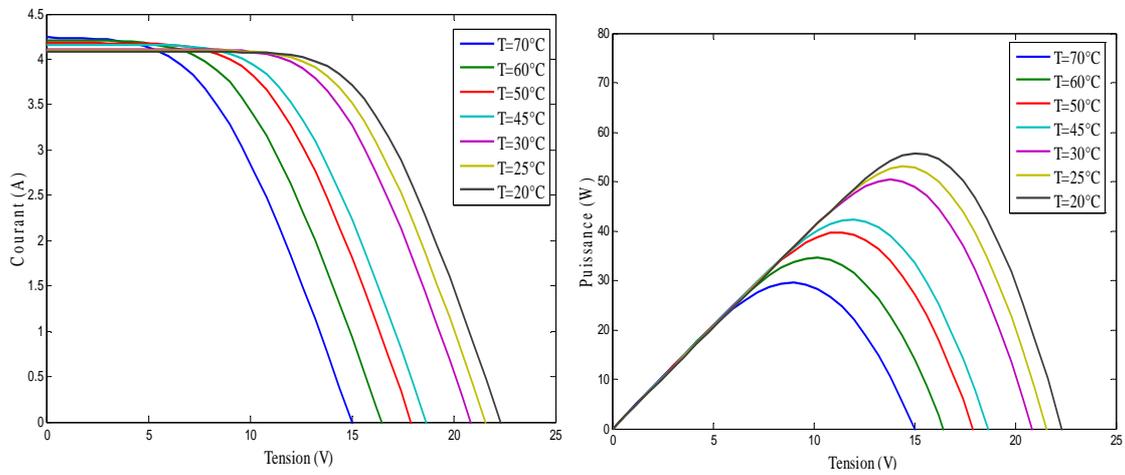


Figure 10 : Influence de la variation de la température sur la tension

Ayant la certitude que le GPV fonctionne normalement, on peut ainsi alimenter le système complet. La fluctuation de la tension aux bornes du GPV entre 38,88 V et 55,22 V comme le montre la figure 11 nous permet de conclure dans un premier temps qu'alimenter un moteur-pompe au fil du soleil et s'attendre à un débit régulier était presque impossible. Mais grâce à la commande MPPT-P&O effectuée à l'entrée du hacheur, la tension a été boostée et rendue stable à la valeur de 236,5 V (figure 12).

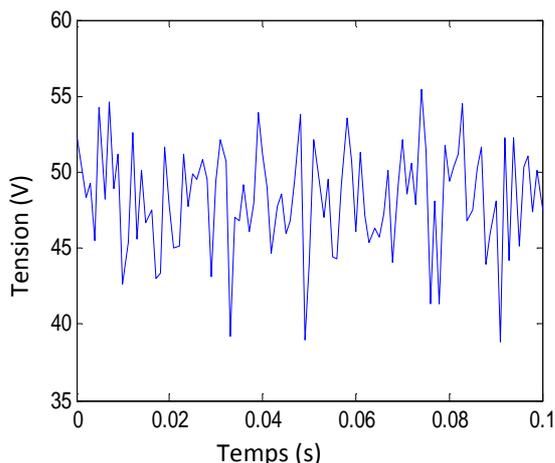


Figure 11 : Tension à la sortie du GPV

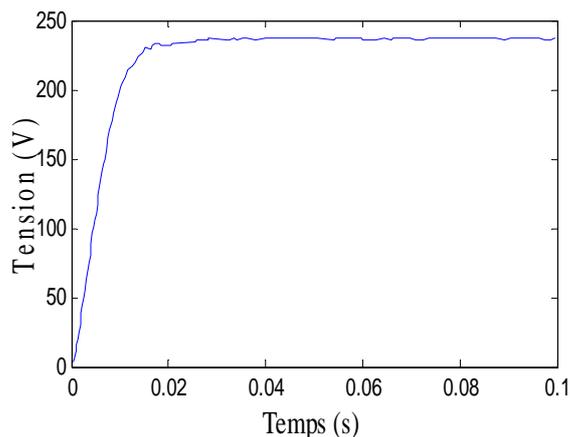


Figure 12 : Tension à la sortie du hacheur

La tension issue du hacheur est convertie en tension alternative, d'amplitude 231 V avec un indice de modulation de 0,98 et une période de 0,02 s (figure 13). Le filtre passe bas placé à la sortie de l'onduleur permet d'avoir une tension sinusoïdale à la fréquence de 50 Hz conforme à la fréquence nominale de fonctionnement du moteur utilisé dans le cadre de ce travail. La figure 14 représente l'allure du courant absorbé par le moteur qui entraîne la pompe centrifuge. Cette courbe est sinusoïdale et de même fréquence que la tension précédente. Ce qui permet de conclure que la tension d'alimentation et la pompe sont en phase avec le courant absorbé. Au démarrage du moteur, l'amplitude du courant maximal appelé par la charge atteint une valeur de 18 Ampères. Cette valeur est environs 6 fois la valeur nominale de la plaque signalétique de la pompe utilisée dans ce travail. Ce résultat est conforme aux travaux de [10] qui situent ce rapport entre 6 et 7.

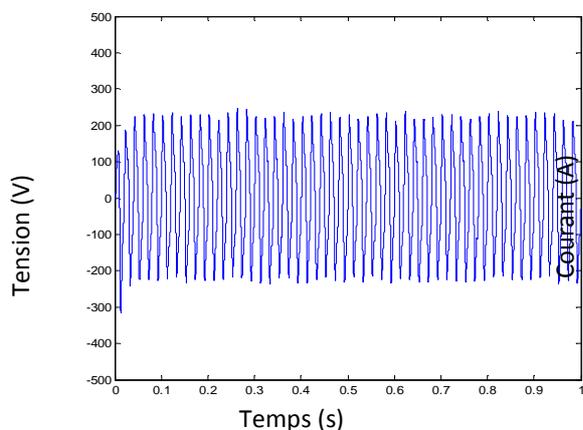


Figure 13 : Tension à la sortie de l'onduleur

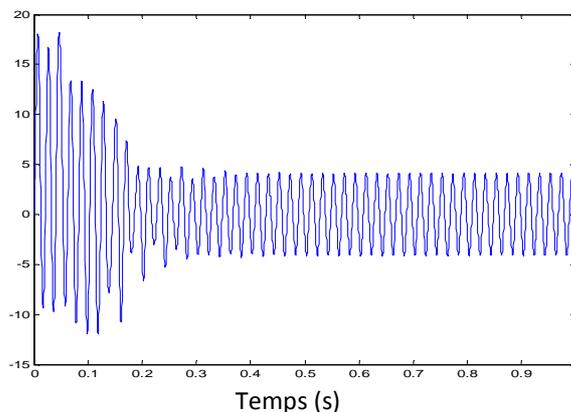


Figure 14 : Courant absorbé par le moteur

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par la puissance absorbée pendant son fonctionnement. Sur la caractéristique de la puissance absorbée ci-dessous (figure 15), nous nous rendons compte qu'au démarrage la pompe absorbe une grande puissance. Puis, lorsque l'état d'équilibre est atteint, la puissance absorbée par la pompe varie autour de 554,9 VA. Cette puissance est inférieure à celle prescrite par le fabricant qui est de 644 VA. Cette différence se justifie par le fait que la tension appliquée au générateur est inférieure à celle prescrite pour la pompe en fonctionnement nominal. La figure 17 représente respectivement la pression et le débit du système. Lorsque le moteur atteint le régime permanent, la pression d'eau garde une valeur d'environ 5,7 bars pour un débit de 1,07 l/s quelles que soient les conditions climatiques. Comparées aux valeurs indiquées par le constructeur sur les courbes de performances qui sont de 6 bars et 1,3 l/s, on constate respectivement une différence de pression et de débit de 0,30 bar et 0,23 l/s. On peut attribuer ces écarts aux pertes de charge totale dans le module de filtration et aux coefficients d'erreur de calcul dans Simulink.

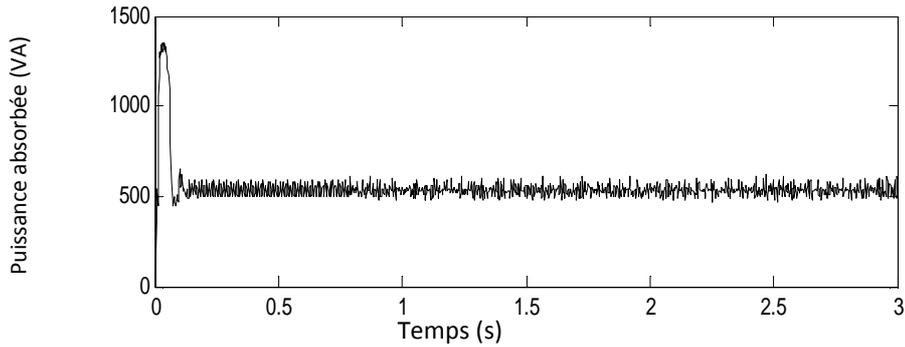


Figure 15 : Caractéristique de la puissance absorbée dans le temps

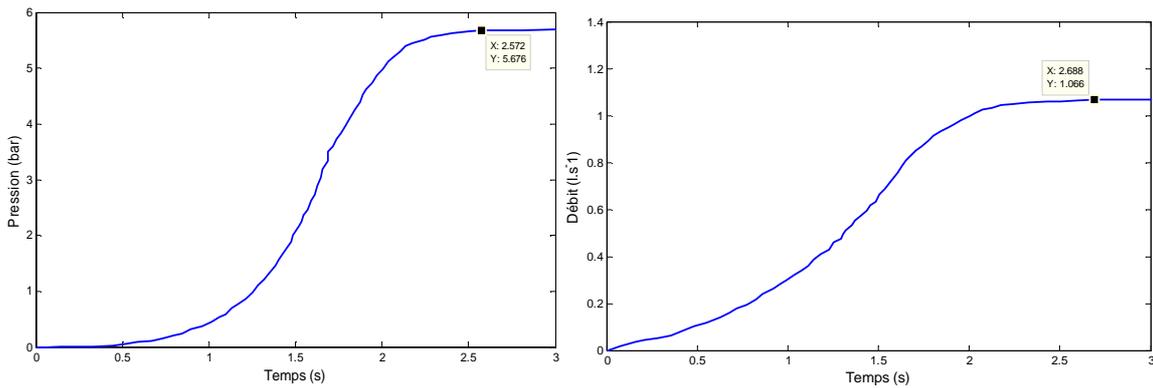


Figure 16 : Caractéristique de la pression et du débit dans le temps

L'allure des courbes obtenues plus haut nous permettent de conclure que la commande MPPT-P&O utilisant le verrouillage du rapport cyclique aux bornes du hacheur permet de stabiliser la pression et le débit du filtrat. Lorsque le moteur fonctionne à fréquence nominale (50Hz), la pression d'eau est d'environ 5,7 bars pour un débit de 1.07 l/s. Lorsqu'on passe à 45 Hz, la pression baisse à environs 4.6 bar pour un débit de 0.87 l/s et lorsque la fréquence est de 40 Hz, la pression passe à 3,58 bars pour 0,83 l/s. Ainsi donc, en variant la fréquence, nous réglons le débit et la pression entre les valeurs maximales prescrites par le constructeur et les valeurs minimales représentant le besoin d'eau potable.

4 CONCLUSION

Cet article présente une approche permettant de maintenir constant le débit d'eau sous une pression constante à la sortie d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil couplé à une unité ultrafiltration. Un modèle de tout le système a été simulé dans Matlab/Simulink et les résultats de simulation permettent de dire que l'algorithme MPPT-P&O utilisant le verrouillage du rapport cyclique pour la commande de l'interrupteur du hacheur semble être une solution à la fluctuation du débit des systèmes installés au fil du soleil. Cette approche est importante pour la maîtrise du degré de salissure et le prolongement de la durée avant colmatage du module d'ultrafiltration. Moins d'arrêt/démarrage pour les moteurs impliquent une meilleure durée de vie et plus de production d'eau potable.

REFERENCES

- [1] ONG-UNESCO, «L'accès à l'eau pour tous en Afrique,» Forum International, Yamoussoukro, 30-31 juillet 2014.
- [2] H. Ammar , M.T. Bouziane et Y. Bakelli, «Influence de la variation de débit sur les performances d'une pompe solaire,» *Revue des Energies Renouvelables*, pp. 20-28, 2012.
- [3] A.Boussaïb, M.Kamta, J.Kayem, D.Toader, S.Haragus et A.Maghet, «Characterization of photovoltaic pumping system model without battery storage by Matlab/Simulink,» *IEEE*, vol. 8, n°11, pp. 37-41, May 2015.
- [4] A.Zaatri et S.Belhour, «Etude et réalisation d'un hacheur PWM,» *Revue des énergies renouvelables*, vol. 13, n°11, pp. 187-198, 2010.
- [5] M. Kamta, A. Boussaïbo, B. Late, F.T. Tchatchueng et G.J.Kayem, «load parameters-based approach for improving the efficiency of photovoltaic water pumping system,» *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, n°19, pp. 37-43, 2011 .
- [6] F.Z.Zerhouni, M.H.Zerhouni, M.Zegrar et A.B.Stambouli, «Recherche du maximum de puissance d'un générateur photovoltaïque,» *ACTA ELECTROTEHNICA*, vol. 53, n°12, pp. 130-133, Mars 2012.
- [7] N. Aouchiche, M.S. A. Cheikh et A. Malek, «Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 16, n°13, p. 485 – 498, 30 Septembre 2013.
- [8] H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi et M. Abid, «Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 17, n°13, p. 435 – 445, 30 Septembre 2014.
- [9] N.Ngasop, «Régulation d'un équipement de filtration d'eau alimenté en énergie solaire,» *Mémoire de DEA-GP, Université de Ngaoundéré*, pp. 16-34, 2005.
- [10] M.Subramanian, D.Nanjundappan, M.D.Subbarayan et R.Gopalakrishnan, «Review of Efficiency Improvement in Squirrel Cage Induction Motor By Using DCR Technology,» *Journal of Electrical Engineering*, vol. 60, n°14, pp. 227-236, 2009.