

Gestion de l'énergie d'un système de pompage photovoltaïque / éolien / batterie sur une ferme

Oumar CISSE*, Mouhamadou F. NDIAYE et Pape A. NDIAYE

Centre International de Formation et de Recherche en Energie Solaire (CIFRES), Ecole Supérieure Polytechnique (ESP), Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), BP 5085, Sénégal

* Correspondance, courriel : oumar.cisse@univ-thies.sn

Résumé

Ce papier propose une stratégie de gestion de l'énergie sur une ferme, alimentée par un système autonome, hybride photovoltaïque/éolien. Une validation est proposée sur le site de Gandon au Sénégal. La stratégie proposée est basée sur la modulation de la puissance de la pompe par un entraînement à vitesse variable et l'utilisation du réservoir d'eau comme second dispositif de stockage. L'objectif visé est de couvrir au mieux les besoins de la charge et réduire la durée d'utilisation de la batterie. Une étude comparative est faite avec une stratégie basée sur un fonctionnement à puissance constante de la pompe. Les besoins en eau sont couverts à 100 % contre 83,2 %. Le temps de fonctionnement de la batterie est réduit de 13 %, ce qui améliore sa durée de vie.

Mots-clés : *énergie renouvelable, gestion de l'énergie, pompage, puissance variable.*

Abstract

Energy management of a photovoltaic / wind / battery pumping system on a farm

This paper proposes an energy management strategy on a farm, powered by an autonomous solar / wind hybrid system. Validation is proposed on the site of Gandon in Senegal. The proposed strategy is based on the modulation of the pump power by a variable speed drive and the use of the water tank as the second storage device. The aim is to better cover the needs of the load and reduce the operating time of the battery. A comparative study is made with a strategy based on constant power pump operation. Water requirements are 100 % recovered compared with 83.2 %. The operating time of the battery is reduced by 13 %, which improves battery life.

Keywords : *renewable energy, power management, pumping, variable power.*

1. Introduction

Les énergies renouvelables jouent un rôle essentiel dans la réduction de la consommation des sources d'énergie conventionnelles et de leurs impacts environnementaux [1]. En Afrique subsaharienne, le difficile accès à l'eau, à l'énergie et au financement justifie le recours aux énergies renouvelables pour l'irrigation des terres [2]. Le contrôle commande joue un rôle important dans l'utilisation efficace de l'énergie [3], ainsi la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides autonomes est abordée dans de nombreux travaux [4].

Ces systèmes visent la couverture de la demande en énergie et s'appuient sur le contrôle du dispositif de stockage. Certains systèmes n'intègrent qu'un seul dispositif de stockage qui peut être un réservoir de stockage d'hydrogène [5] ou une batterie [6]. D'autres systèmes disposent d'un stockage hybride associant super condensateur et réservoir de stockage d'hydrogène [7], batterie et super condensateur [8]. Des contraintes supplémentaires sont envisagées dans d'autres systèmes. Nous pouvons citer la minimisation du coût de l'énergie résultant du choix de l'unité de stockage [9], la production et la consommation en hydrogène [10], la régulation du niveau d'eau dans le réservoir [11], le coût de l'énergie [12] ou la répartition de la puissance entre les sources [13]. Les stratégies abordées se fixent comme objectif la couverture totale de la charge et l'optimisation des sources [14]. Les approches basées sur la programmation linéaire et l'intelligence artificielle permettent la mise en œuvre de ces stratégies [15]. Ce travail s'inscrit dans la gestion de l'énergie dans les systèmes de pompage d'eau, avec une stratégie basée sur la modulation de puissance de la pompe. L'objectif principal est de répondre aux exigences de la charge par l'utilisation efficace de la batterie, de la pompe et du réservoir d'eau. L'article décrit d'abord le système et présente les modèles mathématiques de ses différentes composantes. Ensuite deux stratégies de pilotage sont élaborées. Elles diffèrent par le mode de fonctionnement de la pompe, à puissance constante ou à puissance variable. Enfin, les résultats de simulation de leurs applications sur le site de Gandon (Sénégal) et leurs interprétations sont présentés.

2. Méthodologie

2-1. Description du système

Le système pv/éolien avec batterie de stockage est couplé sur un bus continu. La charge est constituée par :

- Un système de pompage d'eau ;
- Un dispositif d'éclairage ;
- Une activité génératrice de revenus (AGER), par exemple transformation de produits agricoles ou séchage de produits agricoles, dans la plage horaire $[t_1; t_2]$;
- Une charge de délestage.

La **Figure 1** illustre l'architecture du système.

Il s'agit pour le système de gestion, à des instants donnés, de :

- commander la connexion ou déconnexion des sources (interrupteur I) ;
- commander la connexion ou déconnexion des charges (interrupteurs I2 et I3) ;
- élaborer la consigne de puissance de la pompe (consigne α).

A partir de :

- la production d'énergie des sources ($P_s(t)$) ;
- la demande en énergie de la charge ($P_{ch}(t)$) ;
- l'état de charge de la batterie ($so_c(t)$) ;
- le débit de consommation d'eau ($Q_s(t)$) ;
- la hauteur d'eau disponible dans le réservoir ($H(t)$).

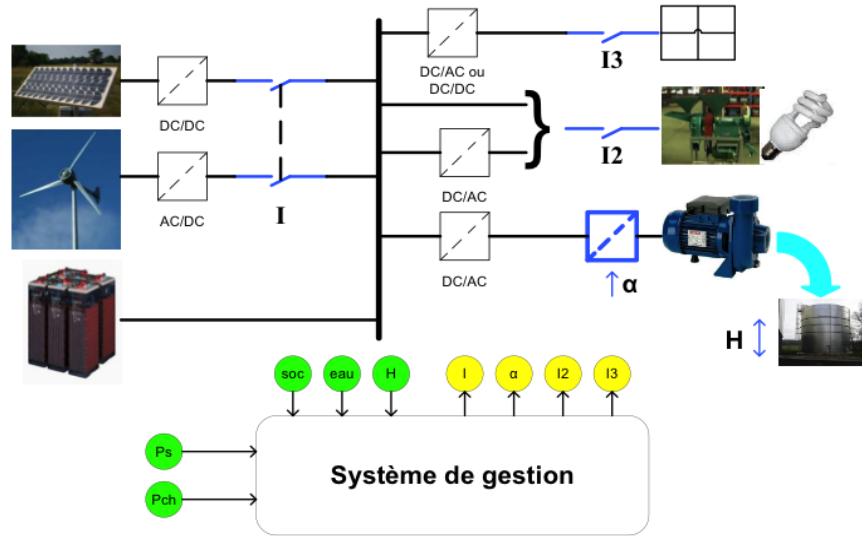


Figure 1 : Synoptique du système

2-2. Modélisation du système

2-2-1. Module PV

La littérature propose de nombreux modèles d'estimation de la puissance produite par un module PV [16]. La puissance disponible à la sortie d'un module PV peut être calculée à partir de l'Équation (1).

$$P_{PV} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (1)$$

V_{mp} et I_{mp} sont calculés à partir des Équations (2) à (7).

$$T_c = T_a + \frac{G}{800} (T_{noct} - 20) \quad (2)$$

$$V_{mp} = V_{mp,T_{ref}} + \mu_V (T_c - T_{ref}) \quad (3)$$

$$I_{mp} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{mp,ref} + \mu_I (T_c - T_{ref})) \quad (4)$$

avec, $V_{mp,ref}$: tension au point maximal de puissance, à la température de référence (V); $I_{mp,ref}$: courant au point maximal de puissance, à la température de référence (A); V_{mp} : tension au point maximal de puissance, à la température de fonctionnement (V); I_{mp} : courant au point maximal de puissance, à la température de fonctionnement (A); T_c : température de fonctionnement de la cellule ($^{\circ}C$); T_{ref} : température de référence ($^{\circ}C$); T_{noct} : température de fonctionnement nominal ($^{\circ}C$); T_a : température ambiante ($^{\circ}C$); μ_V : coefficient de température de la tension de circuit ouvert ($V/^{\circ}C$); μ_I : coefficient de température du courant de court-circuit ($A/^{\circ}C$); G : irradiance (W/m^2); G_{ref} : irradiance de référence (W/m^2)

2-2-2. Eolienne

L'Équation (5) permet d'évaluer la puissance de sortie d'une éolienne [7]

$$P_{eol} = \begin{cases} a \cdot v^3 - b \cdot P_{n_{eol}} & \text{si } v_d \leq v < v_n \\ P_{n_{eol}} & \text{si } v_n \leq v \leq v_c \\ 0 & \text{si } v < v_d \text{ ou } v > v_c \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} a = \frac{P_{neol}}{v_n^3 - v_d^3} \\ b = \frac{v_d^3}{v_n^3 - v_d^3} \end{cases} \quad (6)$$

avec, P_{neol} : puissance nominale de l'éolienne (W) ; V : vitesse du vent à la hauteur projetée ($m.s^{-1}$) ; V_d : vitesse de démarrage de l'éolienne ; V_n : vitesse nominale de l'éolienne ; V_c : vitesse de coupure de l'éolienne.

2-2-3. Batterie

L'Équation (7) traduit La variation de l'état de charge de la batterie pendant la charge ou la décharge est [17].

$$soc(t) = \begin{cases} soc(t - \Delta t) + P_{Bat} \cdot \frac{\eta_{ch}}{C_n \cdot U_{bus}} \cdot \Delta t \\ soc(t - \Delta t) + P_{Bat(t)} \cdot \frac{1}{\eta_{dis} \cdot C_n \cdot U_{bus}} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

avec, P_{Bat} : puissance de la batterie (W) ; C_n : capacité de la batterie (Ah) ; η_{ch} : rendement batterie durant la charge ; η_{dis} : rendement batterie durant la décharge ; U_{bus} : tension nominale du bus DC ; Δt : pas de temps.

2-2-4. Pompe

Les pompes centrifuges vérifient les lois d'affinité [18]. La puissance de la pompe et le débit sont liées, ainsi que l'illustre l'Équation (8).

$$P(t) = \left(\frac{Q(t)}{Q_{nom}} \right)^3 \cdot P_{nom} \quad (8)$$

avec, P_{nom} : puissance nominale de la pompe (W) ; P : puissance de fonctionnement de la pompe (W) ; Q_{nom} : débit nominal de la pompe (W) ; Q : débit de fonctionnement de la pompe (W).

2-2-5. Réservoir

L'Équation (9) permet de déterminer le niveau d'eau dans le réservoir [17].

$$H(t) = \frac{Q_e(t) - Q_s(t)}{S} \cdot \Delta t + H(t - \Delta t) \quad (9)$$

avec, Q_e : débit d'entrée d'eau du réservoir (W) ; Q_s : débit de sortie d'eau du réservoir (W) ; S : section du réservoir (m^2) ; Δt : pas de temps.

2-3. Stratégie de gestion

La stratégie de gestion du système proposée est basée sur une de gestion de la charge, la pompe en particulier. Les objectifs visés sont la réduction de taux de non couverture de la charge et la réduction du temps de fonctionnement de la batterie.

Il s'agit de :

- Choisir les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs ;
- élaborer la consigne de puissance de la pompe.

Les charges sont classées en charges principales et charges de délestage. Le degré de priorité des charges est dynamique. Il dépend du moment de la journée, du niveau d'eau dans le réservoir et des besoins en eau à court terme. Dans la plage horaire $[t_1 ; t_2]$ réservé à l'AGER

- ✓ Lorsque le niveau d'eau dans le réservoir est bas, la pompe et l'AGER sont des charges principales. La pompe est prioritaire sur l'AGER.
- ✓ Lorsque le niveau d'eau dans le réservoir n'est pas bas, l'AGER seule est une charge principale. La pompe devient une charge de délestage.

Hors de la plage horaire réservée à l'AGER

- ✓ Lorsque le niveau d'eau dans le réservoir est bas, la pompe est la seule charge principale.
- ✓ Lorsque le niveau d'eau dans le réservoir n'est pas bas, il n'y a pas de charge principale.

Deux stratégies sont définies :

- Stratégie 1 : entraînement à puissance variable de la pompe.
- Stratégie 2 : entraînement à puissance nominale de la pompe.

L'état (ouvert ou fermé) des trois interrupteurs et la valeur de la consigne de puissance de pompe définissent théoriquement 24 configurations. Une analyse fonctionnelle permet d'en éliminer certaines. Par exemple :

- Déconnecter les sources alors que la demande est non nulle.
- Alimenter uniquement la charge de délestage.

Dix (10) modes de fonctionnement sont retenus. Leurs caractéristiques sont définies dans **Tableau 1**.

Tableau 1 : Différents modes de fonctionnement du système

		Etat des interrupteurs I.I2.I3				
		0.0.0	1.0.0	1.0.1	1.1.0	1.1.1
Valeur de consigne de puissance	$\alpha = 0$	M0	M6		M5	M9
	$\alpha = 1$		M2	M8	M1	M7
	$0 < \alpha < 1$		M4		M3	

Soient, $t_{début}$: l'instant de mise en marche du système ; t_{fin} : l'instant de mise à l'arrêt du système ; $Pch(t)$: la charge principale du système ; $\varepsilon(t)$: écart de puissance entre l'offre et la demande.

L'Équation (9) permet de déterminer cet écart de puissance.

$$\varepsilon(t) = P_s(t) - P_{ch}(t) \quad (10)$$

L'algorithme de **Figure 2** décrit le fonctionnement du système. Les **Tableau 2 et Tableau 3** décrivent les algorithmes de choix du mode de fonctionnement pour les stratégies respectivement 1 et 2.

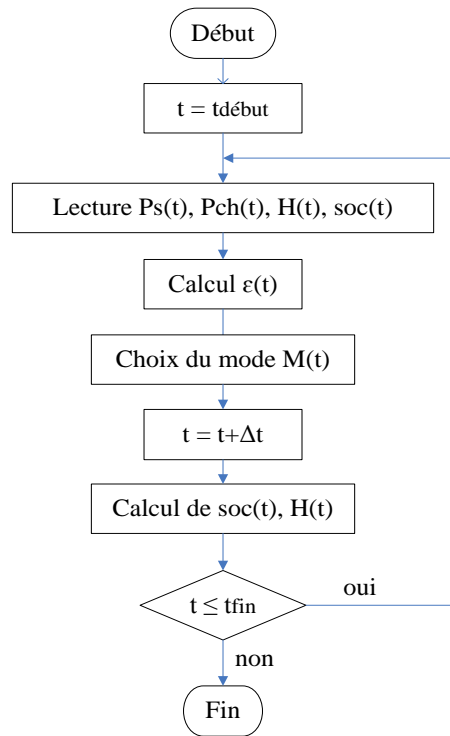


Figure 2 : Algorithme de gestion

Tableau 2 : Sous-programme de configuration pour la stratégie 1

		$\varepsilon(t) > 0$		$\varepsilon(t) = 0$	$\varepsilon(t) < 0$	
		$soc(t)$			$soc(t)$	
		$< soc_{max}$	$= soc_{max}$		$\leq soc_{min}$	$> soc_{min}$
$t \in [t_1; t_2]$	$H(t) < H_{min}(t)$	M1	M7	M1	M2 if $Ps(t) > Pnom$ M4 if $Ps(t) \leq Pnom$	M1
	$H(t) \geq H_{min}(t)$ et $H(t) < H_{max}$	M5	M1 if $\varepsilon(t) = Pnom$ M3 if $\varepsilon(t) < Pnom$ M7 if $\varepsilon(t) > Pnom$	M5	M6	M5
	$H(t) = H_{max}$	M5	M0 if $Pch(t) = 0$ M9 if $Pch(t) > 0$	M5	M6	M5
$t \notin [t_1; t_2]$	$H(t) < H_{min}(t)$	M2	M8	M2	M4	M2
	$H(t) \geq H_{min}(t)$ et $H(t) < H_{max}$	M6	M2 if $Ps(t) = Pnom$ M4 if $Ps(t) < Pnom$ M8 if $Ps(t) > Pnom$	M0		
	$H(t) = H_{max}$	M6	M0	M0		

Tableau 3 : Sous-programme de configuration pour la stratégie 2

		$\varepsilon(t) > 0$		$0 = \varepsilon(t)$	$\varepsilon(t) < 0$	
		$soc(t)$			$soc(t)$	
		$< soc_{max}$	$= soc_{max}$		$\leq soc_{min}$	$> soc_{min}$
$t \in [t_1; t_2]$	$H(t) < H_{min}(t)$	M1	M7	M1	M2 if $Ps(t) > Pnom$ M6 if $Ps(t) \leq Pnom$	M1
	$H(t) \geq H_{min}(t)$ et $H(t) < H_{max}$	M5	M1 if $\varepsilon(t) = Pnom$ M9 if $\varepsilon(t) < Pnom$ M7 if $\varepsilon(t) > Pnom$	M5	M6	M5
	$H(t) = H_{max}$	M5	M0 if $Pch(t) = 0$ M9 if $Pch(t) > 0$	M5	M6	M5
$t \notin [t_1; t_2]$	$H(t) < H_{min}(t)$	M2	M8	M2	M4	M2
	$H(t) \geq H_{min}(t)$ et $H(t) < H_{max}$	M6	M2 if $Ps(t) = Pnom$ M0 if $Ps(t) < Pnom$ M8 if $Ps(t) > Pnom$	M0		
	$H(t) = H_{max}$	M6	M0	M0		

2-4. Cas étudié

Le site d'étude pour l'implantation du système est Gandon, une communauté rurale du nord-ouest du Sénégal. Le système est destiné à une ferme couvrant 10 Ha de terre agricole et utilisant 20 personnes pour son exploitation. Les travaux de recherche [19] estiment les besoins journaliers en eau à 1200 m³. En se référant à la courbe typique de demande en eau d'un village d'Afrique de l'ouest [20], le profil de consommation d'eau de la **Figure 3** est obtenu. La **Figure 4** montre le profil considéré de la charge AGER. Le dimensionnement de la pompe donne une puissance nominale 8 kW, fonctionnant 8 h/jour avec un débit de 150 m³/h [19].

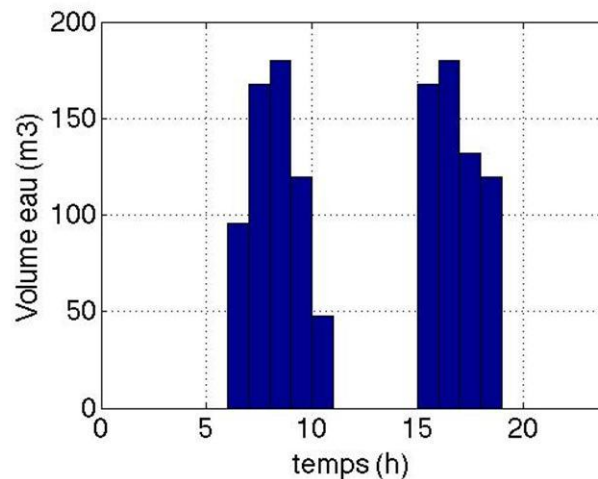


Figure 3 : Répartition de la consommation journalière d'eau

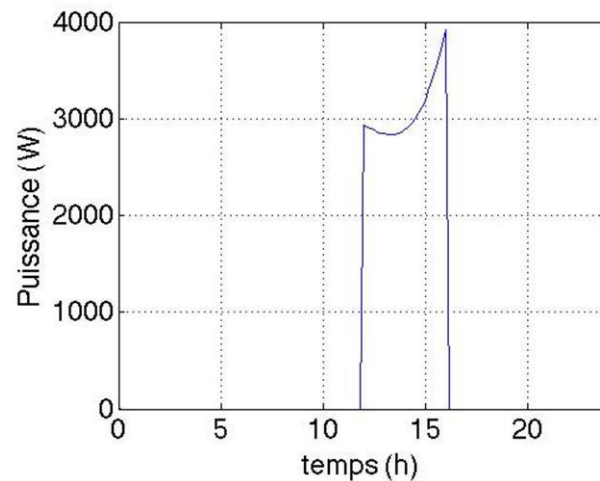


Figure 4 : Profil de charge AGER

Les résultats du dimensionnement avec le logiciel Homer sont présentés dans **Tableau 4**. Les spécifications techniques des composantes du système ainsi que les paramètres utilisés pour la simulation sont précisés dans **Tableau 5 à Tableau 8**.

Tableau 4 : Résultats du dimensionnement par Homer

	Type	Puissance	Nombre
Module PV	Bp SX 150	150 W	67
Eolienne	Eol sénégal	500 W	30
Batterie		168 Ah	159

Tableau 5 : Paramètres du générateur PV

$V_{mp,ref}$	$I_{mp,ref}$	G_{ref}	T_{ref}	T_{noct}	μ_v	μ_i
34,5 V	4,35 A	1000 W/m ²	25 °C	47 °C	-0,16 V/°C	3,1 mA/°C

Tableau 6 : Paramètres du générateur éolien

$P_{n_{eol}}$	V_d	V_n	V_c	N_{eol}
500 W	3 m/s	7 m/s	10 m/s	30

Tableau 7 : Paramètres du système de pompage

P_{nom}	Q_{nom}	S
8 kW	150 m ³ /h	240 m ²

Tableau 8 : Paramètres de simulation

$t_{début}$	t_{fin}	t_1	t_2	soc_{min}	soc_{max}	H_{min}	H_{max}
5 h	23 h	12 h	16 h	0,6	1	1 m	3 m

3. Résultats

La **Figure 5** montre les courbes de puissances éolienne, solaire et totale des deux sources.

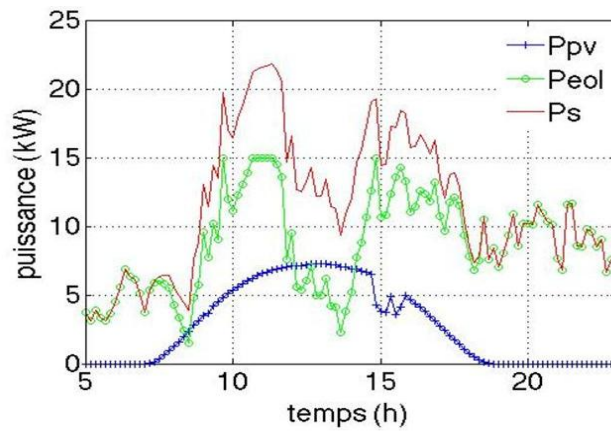


Figure 5 : *Profil de puissances des sources d'énergies renouvelables*

La **Figure 6** montre les modes de fonctionnement obtenus en appliquant la stratégie 1. Les histogrammes de la **Figure 7** indiquent l'état des interrupteurs et la consigne de puissance de la pompe pour les modes de fonctionnement obtenus.

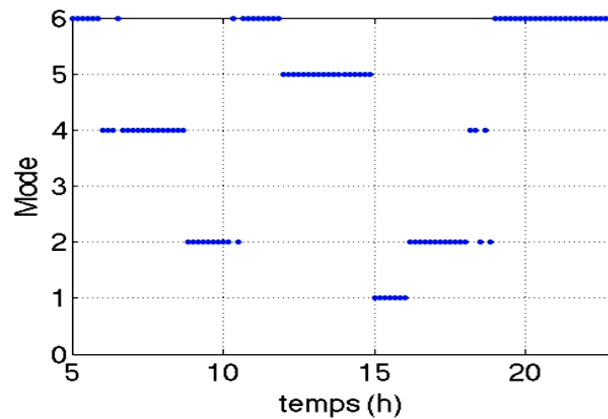


Figure 6 : *Mode de fonctionnement du système pour la stratégie 1*

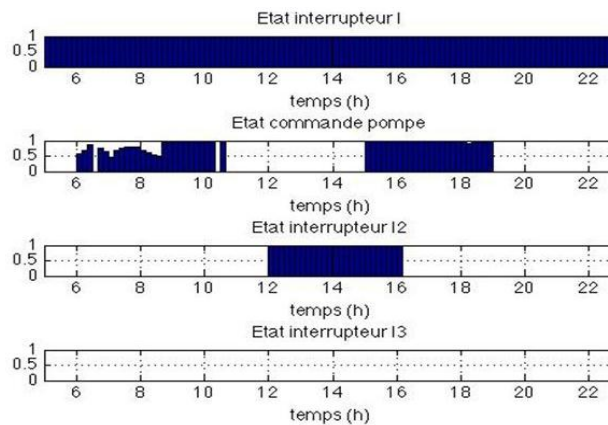


Figure 7 : *Etat des interrupteurs et consigne de puissance pompe*

Le fonctionnement du système couvre 5 modes et n'a pas recours à la charge de délestage, ni à la mise à l'arrêt du système. La **Figure 8** montre les modes de fonctionnement obtenus en appliquant la stratégie 2. La **Figure 9** indique l'état des interrupteurs et la consigne de puissance de la pompe pour les modes de fonctionnement obtenus.

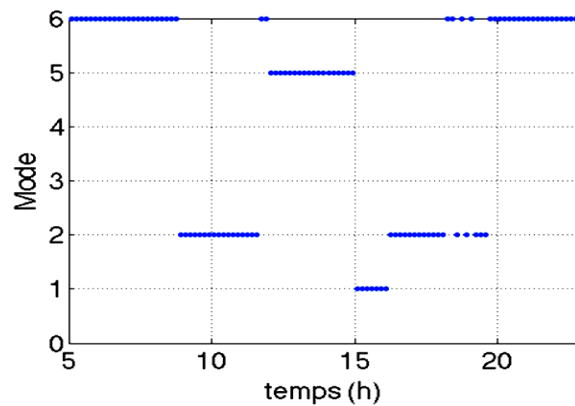


Figure 8 : Mode de fonctionnement du système pour la stratégie 2

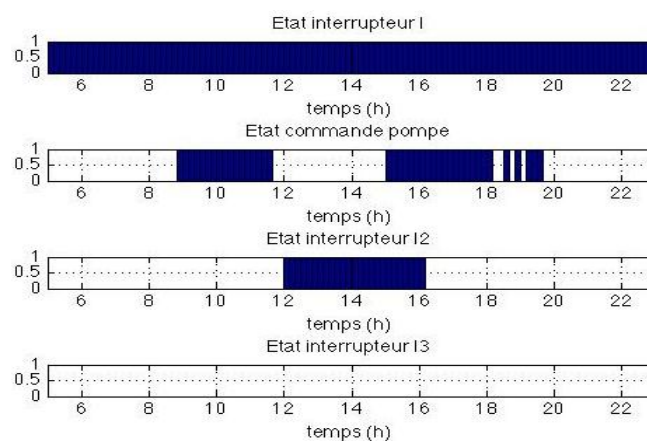


Figure 9 : Etat des interrupteurs et consigne de puissance pompe

Le fonctionnement du système couvre 4 modes et n'a pas recours à la charge de délestage, ni à la mise à l'arrêt du système. La **Figure 10** représente la variation du niveau d'eau dans le réservoir pour les deux stratégies.

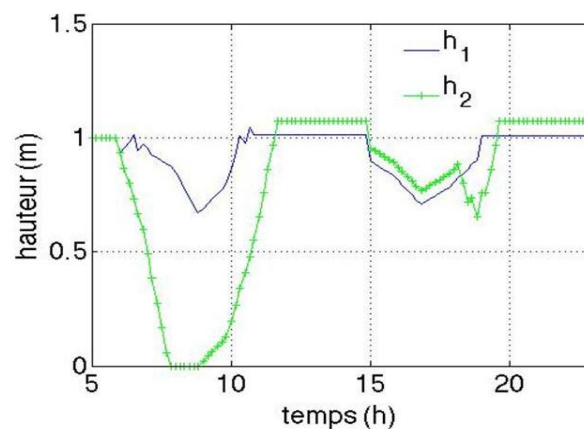


Figure 10 : Variations du niveau d'eau du réservoir pour les deux stratégies

Il apparaît que pour la stratégie 2, le réservoir est vide de 7 h 50 mn à 9 h 00 alors que la demande est de 202 m³. Une situation évitée avec la stratégie 1. La **Figure 11** représente la variation du niveau de charge de la batterie pour les deux stratégies.

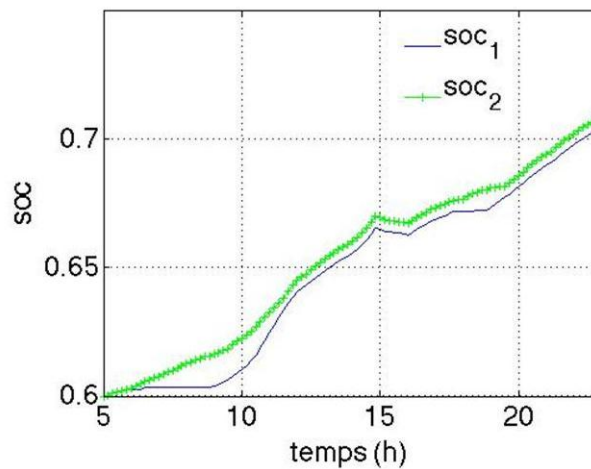


Figure 11 : Variations du niveau de charge de la batterie pour les deux stratégies

On note que pour la stratégie 2, la batterie est toujours sollicitée (charge ou décharge). Pour la stratégie 1 la batterie reste 3 heures sans être sollicitée (stockage) de 5 h 10 mn à 5 h 40 mn, ensuite de 8 h 00 à 10 h 10 mn, puis de 17 h 50 mn à 18 h 10 mn.

4. Conclusion

Dans le cadre de ce travail, une stratégie de gestion de l'énergie dans un système hybride solaire/éolien autonome est proposé. Le système est destiné à l'alimentation d'un dispositif de pompage, d'une unité de transformation de produits agricoles et de l'éclairage. La stratégie proposée est basée sur la modulation de la puissance de la pompe par un entraînement à vitesse variable. En repose également sur l'utilisation du réservoir d'eau comme second dispositif de stockage. Pour la stratégie basée sur le fonctionnement à puissance constante de la pompe, les besoins en eau ne sont pas couverts à tout instant et la batterie est toujours sollicitée. La stratégie adoptée permet de couvrir les besoins en eau. Comparativement au mode de gestion précédent, elle réduit le taux de non couverture de 16,8 % ainsi que la durée d'utilisation de la batterie de 13 %.

Références

- [1] - C. GOPAL, M. MOHANRAJ, P. CHANDRAMOHAN and P. CHANDRASEKAR, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25 (2013) 351 - 370
- [2] - D. MASHNIK, H. JACOBUS, A. BARGHOUTH, E. JIAYU WANG, J. BLANCHARD and R. SHELBY, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22 (2017) 220 - 227
- [3] - S. ABEDI, A. ALIMARDANI, G. B. GHAREHPETIAN, G. H. RIAHY and S. H. HOSSEINIAN, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (3) (2012) 1577 - 1587
- [4] - A. CHAUHAN and R. P. SAINI, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38 (2014) 99 - 120
- [5] - CAISHENG WANG and M. H. NEHRIR, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23 (3) (2008) 957 - 967

- [6] - S. G. MALLA and C. N. BHENDE, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 56 (2014) 361 - 373
- [7] - O. C. ONAR, M. UZUNOGLU and M. S. ALAM, *Journal of Power Sources*, 185 (2) (2008) 1273 - 1283
- [8] - N. BIZON, *Energy Conversion and Management*, 77 (2014) 763 - 772
- [9] - J. P. TORREGLOSA, P. GARCÍA, L. M. FERNÁNDEZ and F. JURADO, *Energy Conversion and Management*, 77 (2014) 514 - 526
- [10] - D. IPSAKIS, S. VOUTETAKIS, P. SEFERLIS, F. STERGIOPOULOS and C. ELMASIDES, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (16) (2009) 7081 - 7095
- [11] - A. KHIAREDDINE, C. BEN SALAH and M. F. MIMOUNI, *Solar Energy*, 112 (2015) 319 - 338
- [12] - F. VALENCIAGA and P. F. PULESTON, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20 (2) (2005) 398 - 405
- [13] - A. M. DIZQAH, A. MAHERI, K. BUSAWON and A. KAMJOO, *IEEE Transactions on Power Systems*, 30 (5) (2015) 2278 - 2287
- [14] - C. SERIR, D. REKIOUA, N. MEZZAI and S. BACHA, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (45) (2016) 20974 - 20986
- [15] - L. OLATOMIWA, S. MEKHILEF, M. S. ISMAIL and M. MOGHAVVEMI, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62 (2016) 821 - 835
- [16] - R. RAWAT, S. C. KAUSHIK and R. LAMBA, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57 (2016) 1506 - 1519
- [17] - M. ZAIBI, G. CHAMPENOIS, X. ROBOAM, J. BELHADJ and B. SARENI, *Mathematics and Computers in Simulation*, (2016)
- [18] - D. H. MUHSEN, T. KHATIB and F. NAGI, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68 (2017) 70 - 86
- [19] - A. K. TRAORE, "Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles," Mémoire Maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, (2016)
- [20] - J. ROYER et al., "Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens", *Ed. MultiMondes*, Québec, (1998)