

Étude expérimentale et économique d'un système hybride solaire photovoltaïque/diesel sans stockage pour une production décentralisée d'électricité.

Daniel YAMEGUEU^{1,2*}, Yao AZOUMAH¹, Xavier PY²

¹ Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 01 BP 594 Ouagadougou 01, Burkina Faso

² Laboratoire Procédés Matériaux et Energie Solaire, Université de Perpignan, Rambla de la thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan cedex, France

* (auteur correspondant : daniel.yamegueu@2ie-edu.org)

Résumé - La dynamique d'un système hybride solaire PV/diesel est fortement influencée par l'ensoleillement et le profil de charge du site considéré. Le dimensionnement d'un tel système devrait permettre au(x) générateur(s) diesel de fonctionner dans leur plage optimale (70-90% de la puissance nominale). Aussi une analyse économique faite sur la base du Life Cycle Cost (LCC) montre que les systèmes hybrides PV/diesel comparativement aux systèmes purement photovoltaïque et diesel peuvent être plus rentables et favoriser par là l'accès à l'énergie pour les populations rurales des pays de l'Afrique sub-saharienne.

Nomenclature

AC *alternating current*

DC *direct current*

GD *générateur diesel*

G *radiation solaire globale, W/m²*

LCC *life cycle cost*

P *puissance, kW*

PV *photovoltaïque*

STC *standard test condition*

1. Introduction

Le taux d'électrification en Afrique subsaharienne est plus faible que dans n'importe quelle région du monde. En effet, plus de 70 % des populations de cette région sont exclus des avantages liés à l'électricité. La situation est plus catastrophique en zones rurales où moins de 12 % des populations ont l'accès à l'électricité [1]. Pour contribuer à l'augmentation du taux d'accès à l'électricité dans cette région, le concept de "flexy- energy" a été développé par Azoumah et al [2]. Ce concept consiste à la production décentralisée d'électricité à partir d'une centrale hybride PV/diesel (gasoil ou biocarburant) sans stockage. Pour évaluer la faisabilité technique et économique de ce concept, une centrale hybride pv/diesel sans stockage a été mise sur pied sur le site de l'institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE) à Kamboinsé (12°22 ' N et 1°31'W), localité située à quinze kilomètres au Nord de la ville de Ouagadougou, capitale du Burkina Faso. Ce prototype consiste en un champ PV de 2.85 kWc couplé à un générateur diesel de 9.2 kW.

L'objectif de ce papier est d'une part de présenter les résultats issus de l'étude expérimentale de l'installation hybride sous des conditions de fonctionnement diverses. Quatre profils de charges constants correspondant à différents pourcentages de la puissance nominale du générateur diesel ont été expérimentés pour des profils d'ensoleillement différents (sur différents jours). Les performances du système sont ainsi présentées et discutées. D'autre part, une analyse comparative pour trois systèmes différents (les générateurs diesel et solaire purs et le système hybride PV/diesel solaire hybride) pour

satisfaire un même profil de charge a été faite et montre la rentabilité du système hybride comparativement aux deux autres systèmes.

2. Expérimentation

2.1. Configuration des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides ont généralement les configurations : série, commuté et parallèle [3]. Le prototype qui est soumis à l'étude dans ce papier a une configuration hybride parallèle (figure 1). Dans cette configuration, le système PV est connecté en parallèle au générateur diesel à travers un convertisseur DC-AC (onduleur). Les générateurs PV et diesel satisfont ainsi ensemble la puissance appelée (charge).

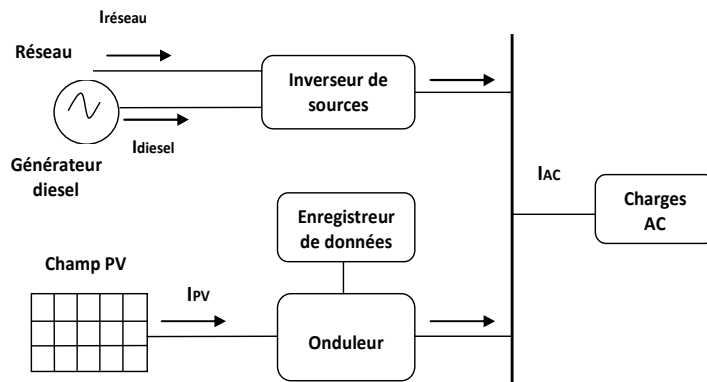


Figure 1 : configuration du prototype

Dans le présent prototype le système PV est composé de 15 modules HIT (Heterojunction with intrinsic Thin layer) de 190 Wc chacun totalisant 2, 85 kWc-DC dans les STC (irradiance=1000 W/m²; température de fonctionnement d'une cellule solaire=25°C et AM=1.5). Le champ PV est Connecté à un onduleur de puissance 3.82 kW. Le générateur diesel a une puissance nominale de 9.2 kW (11, 5 kVA) et fonctionne à 1500 trs/min.

2.2. Résultats et discussion

2.2.1. Caractéristiques du générateur diesel étudié

Un générateur diesel est généralement caractérisé par sa consommation (horaire en l/h ou spécifique en l/kWh). D'après Reinigher et al., cité par Skarstein et al. [4], la consommation horaire d'un générateur diesel peut être exprimée comme suit :

$$q(t) = a.P(t) + b.P_n \quad (1)$$

Où a (l/kWh) et b (l/kWh) sont des constantes caractéristiques du générateur diesel, $P(t)$ (kW) est la puissance générée par le générateur diesel à un instant t donné et P_n (kW) est la puissance nominale du générateur diesel.

Comme illustré par la figure 2, la relation (1) a été validée dans le cas du générateur diesel étudié ici. Les coefficients obtenus sont : $a = 0.2476 \text{ l/kWh}$ et $b = 0.0739 \text{ l/kWh}$ avec un coefficient de détermination (R^2) égal à 0.9895. Aussi on peut observer sur la figure 2 que lorsque le générateur diesel est sollicité pour une charge autour de 20 % de sa puissance

nominale, sa consommation spécifique est très élevée (environ 0.64 l/kWh) ce qui correspond à un faible rendement de ce dernier. Cependant, pour les charges élevées (au-delà de 80% de la puissance nominale du générateur diesel), la consommation spécifique du générateur diesel est d'environ 0.324l/kWh ce qui signifie que des économies considérables en carburant peuvent être réalisées lorsque le générateur diesel fonctionne à ces niveaux de charge.

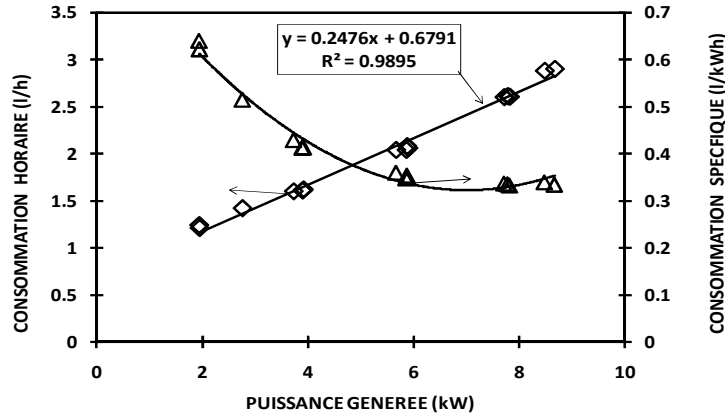


Figure 2: Consommation du générateur diesel en fonction de la puissance produite.

Ces résultats correspondent à ce qui a été trouvé par des auteurs tels que Ashari et al [5] et El-Hefnawi [6] qui stipulent qu'un générateur diesel a une efficacité maximale d'environ 0.33l/kWh quand il fonctionne à environ 80 % de sa puissance nominale (d'après les premiers auteurs) et entre 70 à 89% de sa puissance nominale (d'après les deuxièmes auteurs).

Dans la section suivante le comportement du générateur diesel dans le système hybride sera analysé.

2.2.2. Comportement du système hybride sous différentes charges

Dans cette section, le comportement du système hybride PV/diesel dont les caractéristiques ont été présentées plus haut est étudié. La contribution des générateurs PV et diesel, la consommation spécifique du générateur diesel pour une charge donnée sont évaluées.

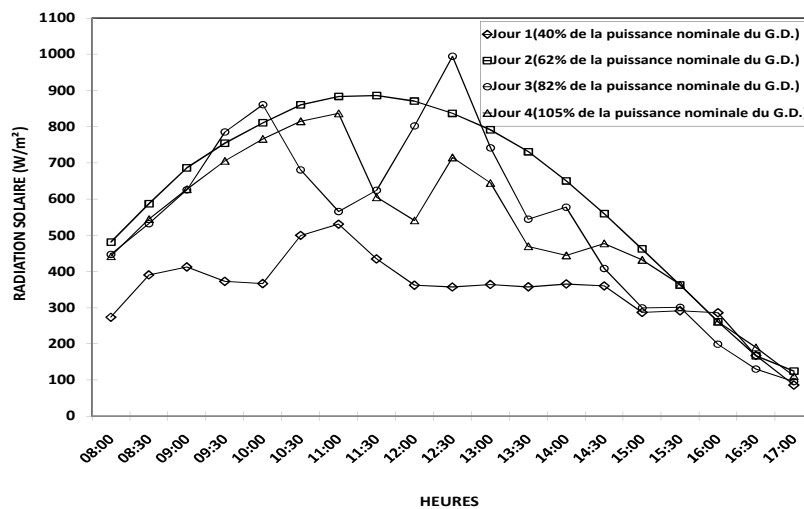


Figure 3 : courbes d'éclairement sur les 4 jours d'expérimentation considérés

Comme mentionné précédemment, pendant quatre jours (dont les courbes de radiations solaire illustrées à la figure 3), nous avons considéré quatre profils de charge constants (3.7 kW, 5.7 kW, 7.6 kW et 9.7 kW) correspondant respectivement à 40 %, 62 %, 82 % et 105 % de la puissance nominale du générateur diesel.

Les comportements des générateurs diesel et photovoltaïque dans le système hybride sont interdépendants. En effet, une charge (demande) donnée est satisfaite à la fois par les deux générateurs.

Il peut être observé de la figure 4 à la figure 7 que pour les charges dans l'ordre mentionné ci-dessus, la consommation spécifique de carburant du générateur diesel varie respectivement entre : 0.45 à 0.51 l/kWh (voir figure 4), 0.35 à 0.41 l/kWh (Voir figure 5), 0.33 à 0.36 l/kWh (voir figure 6) et 0.33 à 0.34 l/kWh (voir figure 7).

Ces résultats montrent que pour des faibles charges (moins de 62 % de la puissance nominale du générateur diesel), la contribution du générateur PV qui va de 4 à 38 % pour les valeurs de charge de 3.7 kW et 5.7 kW ne permet pas un fonctionnement optimal du générateur PV. En fait, comme mentionné par Ashari et Al [5] et aussi vérifié par les résultats obtenus dans la présente expérimentation, la consommation spécifique optimale d'un générateur diesel est d'environ 0.33 l/kWh, mais pour ces faibles charges, la consommation spécifique est loin de cette valeur optimale.

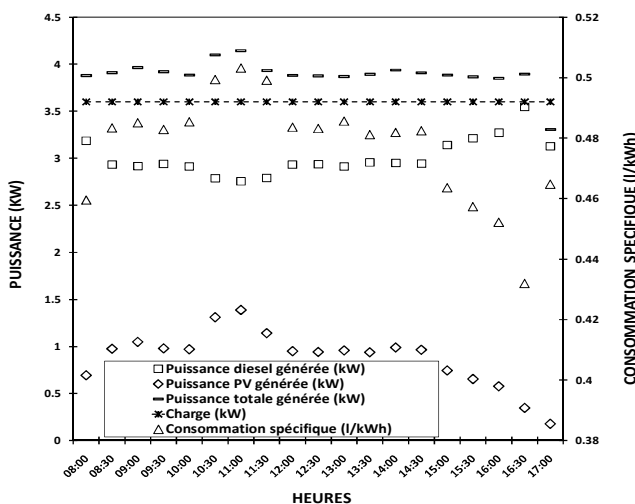


Figure 4 : comportement du système pour une charge égale à 40% de la puissance nominale du générateur diesel

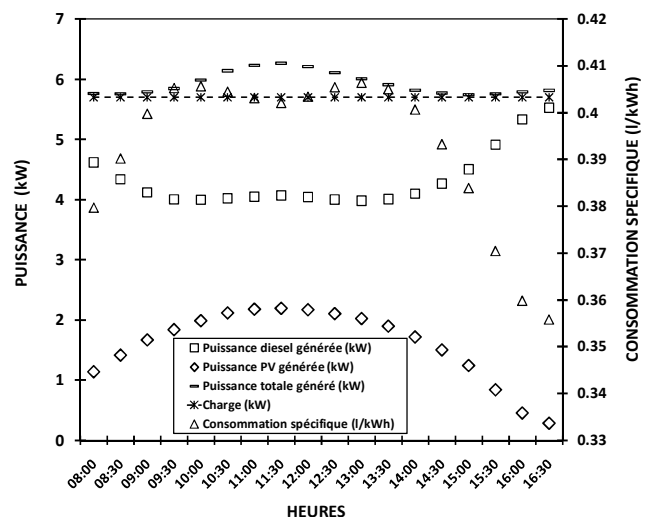


Figure 5 : comportement du système pour une charge égale à 62% de la puissance nominale du générateur diesel

Cependant, pour des charges élevées (voir figure 6 et figure 7), la contribution du générateur PV qui va de 1.5 % à 33 % pour une charge de 7.6 kW et de 2.5 % à 22 % pour une charge de 9.7 kW n'affecte pas considérablement l'efficacité du générateur diesel.

En effet, pour ces charges, les valeurs de la consommation spécifique de carburant varient entre 0.33 à 0.36 l/kWh ce qui est proche du point de fonctionnement optimal du générateur diesel.

Comme la consommation spécifique en carburant et par conséquent le coût d'opération du générateur diesel augmente considérablement quand le système hybride opère en dessous des charges représentant moins de 62 % de la puissance nominale du générateur diesel, le dimensionnement d'un tel système doit être fait de sorte que le générateur diesel fonctionne dans sa plage optimale (70-90 % de sa puissance nominale).

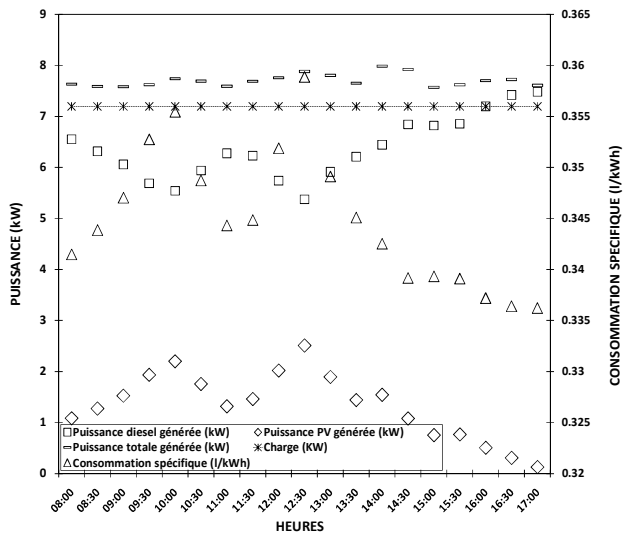


Figure 6 : comportement du système pour une charge égale à 82% de la puissance nominale du générateur diesel

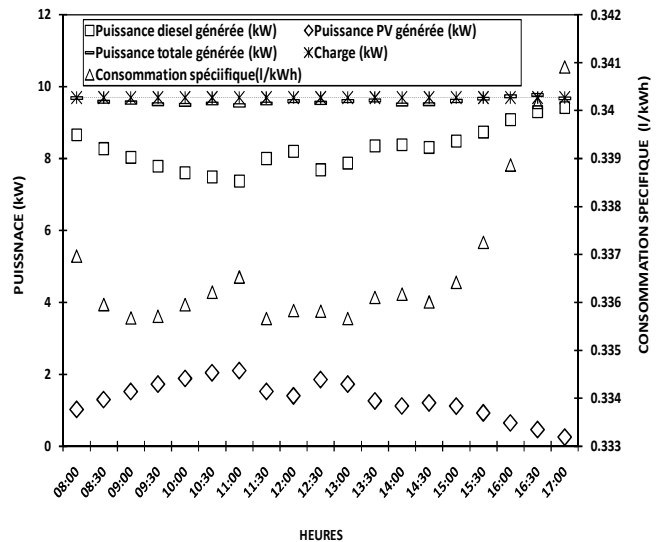


Figure 7 : comportement du système pour une charge égale à 105% de la puissance nominale du générateur diesel

Aussi, nous avons généré à partir des résultats de l'expérimentation la figure 8 suivante qui montre que l'énergie injectée par l'onduleur (photovoltaïque) sur le réseau est fonction de la charge appelée. Cependant, on peut remarquer que même pour une charge nulle, l'onduleur continue d'injecter sur le réseau s'il ya un certain ensoleillement ce qui peut constituer un danger pour les groupes diesel (réseau local constitué par des groupes diesel). On pourrait donc prévoir des charges de délestage ou même un faible stockage pour palier à ce genre de situation.

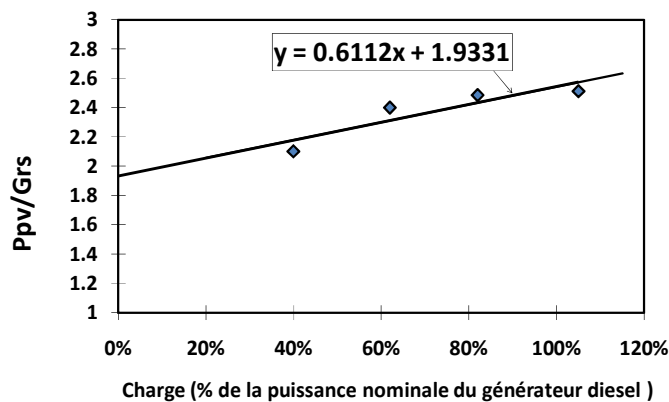


Figure 8 : production du générateur PV en fonction de la charge.

3. Avantages des systèmes hybrides : Analyse comparative de trois systèmes différents (Diesel, PV et hybride PV/diesel) pour satisfaire le même profil de demande [2]

Pour évaluer les avantages économiques de systèmes hybrides pour les zones rurales et périurbaines, il est effectué ici une analyse comparative pour trois types de générateurs à savoir : le générateur diesel, le générateur PV et le générateur hybride diesel/PV. Les trois types de générateurs sont sollicités pour satisfaire la même charge. Pour cette étude le profil

de charge journalier du village de Sabou au Burkina Faso est considéré (situé au sud-ouest du pays, 12°3 N et 21°3 O). Ce village a 45000 habitants, soit environ 6429 ménages (en considérant sept personnes par ménage).

L'analyse économique faite ici est basée sur le life cycle cost (LCC) [2]. Le life cycle cost est le coût total des dépenses effectuées sur le système le long de sa durée de vie. Il est exprimé comme suit :

$$LCC = C + PW_R + PW_{NR} - PW_S \quad (2)$$

Où C est le coût d'acquisition des équipements, PW_R , le coût actualisé des dépenses courantes, PW_{NR} le coût actualisé des dépenses non courantes et PW_S le coût actualisé de la valeur résiduelle des équipements sur la période d'analyse considérée.

Il ressort de l'analyse faite que pour la même demande d'énergie évaluée à 3 423 700 kWh sur une période de 20 ans, le coût de production de l'électricité via le système hybride PV/diesel (LCC=983,865 Euros) est inférieure à celui du générateur PV seul (LCC=992,000 Euros) qui est à son tour plus bas que celui du générateur diesel pure (LCC=996,000 Euros).

Cette étude montre bien que les systèmes hybrides PV/diesel peuvent être une solution pour réduire le coût de production de l'électricité dans les pays de l'Afrique subsaharienne.

D'un point de vue environnemental, l'étude de cas faite ici montre que le système hybride PV/diesel permet d'une part d'éviter le rejet dans l'environnement d'environ 445 tonnes de CO2 comparé à une centrale purement diesel. D'autre part, comparativement avec le scénario PV pure, on évite avec le système hybride le rejet de 441 batteries de 100 Ah (12V) dans l'environnement ce qui constitue un atout majeur vu qu'il n'existe quasiment pas de structure de recyclage des batteries dans les pays de l'Afrique subsaharienne.

4. Conclusion

Ce papier présente dans sa première partie, les résultats expérimentaux d'un système hybride PV/diesel le système sans stockage (champ PV de 2,85 kWc et groupe diesel de 9.2 kW). Ces résultats offrent des pistes de solutions assez importantes pour une conception optimale de systèmes hybrides PV/DIESEL. Dans la deuxième partie, l'analyse économique faite, montre que les systèmes hybrides pourraient fournir des solutions technologiques rentables et appropriées pour l'électrification de zones rurales et péri-urbaine (de l'Afrique subsaharienne en particulier).

Références

- [1] World Energy Outlook (WEO), www.iea.org/weo/electricity.asp.
- [2] Y. Azoumah, D. Yamegueu, P. Ginies, Y. Coulibaly, P. Girard, Sustainable electricity generation for rural and peri-urban populations of sub-Saharan Africa: the "flexy-energy" concept. *Energy Policy* 39 (2001), 131–141.
- [3] C. V. Nayar, Recent developments in decentralised mini-grid diesel power systems in Australia, *Applied Energy* 52 (1995), 229- 242.
- [4] O. Skarstein, K. Uhlen, Design considerations with respect to long-term diesel saving in wind/diesel plants. *Wind Engineering* 13(1989), 72–87.
- [5] Ashari, M. & Nayar, C.V., An optimum dispatch strategy using set points for a Photovoltaic (pv) diesel–battery hybrid power system. *Solar Energy* 66-1 (1999), 1–9.
- [6] El-Hefnawi, S.H., Photovoltaic diesel–generator hybrid power system sizing. *Renewable Energy*, 13-1 (1998), 33–40.