



Adaptation d'un moteur Diesel à l'utilisation
d'huile végétale pure (HVP) comme carburant et Etudes des
performances technico-économiques du système : Application au
prototype « FLEXY-ENERGY »

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER D'INGENIERIE EN EAU ET ENVIRONNEMENT
OPTION : Energie et Procédés Industriels

Présenté et soutenu publiquement le [Date] par

Franck Simon Paul ONDO NANG

Travaux dirigés par : **Dr. Daniel YAMEGUEU (LESEE)**

Dr. Sayon SIDIBE (LBEB)

CENTRE COMMUN DE RECHERCHE-Energie et Habitat Durables (CCR-EHD)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Patrice DANGUANG

Membres et correcteurs : Dr. Daniel YAMEGUEU
Dr. Sayon dit Sadio SIDIBE
David TSUANYO

Promotion [2012/2013]

Citations

«Ad Augusta Per Augusta », Hernani (œuvre de Victor HUGO)

Remerciement

Je tiens à remercier vivement ;

- ❖ **Dr. Yao AZOUMAH**, Directeur du Centre Commun de Recherche Energie et Habitats Durables (CCR-EHD) et Responsable du LESEE, à qui je témoigne toute ma reconnaissance de m'avoir fait l'honneur de diriger ces travaux sur l'une des phases importantes du projet « Flexy-Energy ».
- ❖ Mon encadreur, le **Dr. Daniel YAMEGUEU** pour son soutien, son appui technique et scientifique à tout moment quand j'en avais besoin, sa présence malgré ses nombreuses occupations.
- ❖ Mon Co-encadreur le **Dr. Sayon dit Sadio SIDIBE** pour sa disponibilité, son appui technique, avec qui j'ai passé de très bons moments à être sur la plate-forme moteur au cours du stage pour l'avancement de mon travail.
- ❖ Mes remerciements vont à l'endroit de tout le personnel du LESEE et du LBEB plus particulièrement **Monsieur KOTTIN Henry** , **David TSUANYO** pour leurs suivis et leurs disponibilités, **Mintou SIDIBE** dont le dynamisme m'a été très utile.
- ❖ Que Messieurs **Bruno PECHINE** et **Eric NANTEAU** soient remerciés pour la formation sur l'instrumentation des moteurs qu'ils ont eu à nous donner à travers leur structure EDF.
- ❖ Mon père **NANG BEH Denis**, mes mamans, **MENYENG Helene** et **MOURE OKOGHE Hermance** pour tous les sacrifices consentis à mon égard. Un grand MERCI.
- ❖ Que mes frères et sœurs, Ludivine, Francis, Francisca, Françoise, Franckline, François, Françinet soient remerciés malgré la distance qui nous séparent.
- ❖ Je tiens également à remercier tous mes promotionnaires et plus particulièrement Emmanuel NOULALA, Manu SESHIE, KO Gaelle, DOSSA Anson, BRAHIM. A. Brahim, Ahmed LIMAN avec qui j'ai partagé de bons moments durant ce stage au laboratoire
- ❖ Mes amis, Vermont NANGAH, Cédric BENE, Issah MOUNCHILI, Armel Mandeng, Landry PANING, Thierry FOMEJU, Salim BADOUI, Soumaila GADJI. Merci pour tous vos efforts.
- ❖ Toutes les autres personnes que je n'arrive pas à citer ici.

Résumé

Les systèmes hybrides PV/diesel comparativement aux systèmes purement photovoltaïque et diesel peuvent être plus rentables et favoriser l'accès à l'énergie pour les populations rurales des pays de l'Afrique sub-saharienne. Par ailleurs, la substitution partielle et/ou totale du gazole par de l'huile végétale permettrait de réduire l'impact négatif du diesel sur l'environnement. Le présent mémoire traite de l'adaptation et de l'étude des performances technico-économique du groupe électrogène d'une centrale hybride PV/Diesel sans stockage, (le prototype « Flexy-Energy») installée au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de 2iE à Kamboinsé. Les performances du groupe électrogène sont étudiées en fonctionnement au gazole d'une part et d'autre part aux huiles végétales pures (HVP). Pour l'utilisation des HVP, la solution préconisée est la bicarburation. Des tests réalisés à différentes charges au gazole, en mélange GO/HVP à différents taux et à 100% d'huile de Jatropha ont permis d'évaluer les performances du groupe électrogène (consommation spécifique, rendement énergétique) et d'analyser la qualité de l'électricité produite (THD, déséquilibres de tension et de courant) dans les deux configurations. Il en ressort que la qualité de l'électricité est sensiblement la même indépendamment du type de carburant utilisé (gazole, HVP). La génération électrique à partir d'huile de Jatropha pure ressort un coût de revient moyen du kWh de 161 fcfa/kWh comparé au gazole (176 fcfa/kWh).

Mots Clés :

-
- 1 – Centrale hybride PV/Diesel**
 - 2 – Flexy-Energy**
 - 3 – Huiles végétales pures**
 - 4 – kit de bicarburation**
 - 5 – Qualité de l'énergie électrique**

ABSTRACT

The hybrid PV / diesel systems compared to purely photovoltaic and diesel systems can be more efficient and improve access to energy for rural populations in sub-Saharan Africa countries. Moreover, the partial substitution and / or total diesel with vegetable oil would reduce the negative impact of diesel on the environment. This master thesis discusses the adaptation and the study of technical and economic performance of the generator of the central hybrid PV / diesel (biodiesel) without storage, "Flexy-Energy" prototype with pure vegetable oils as fuel. The recommended solution being bi-fuel. Tests performed at different loads with diesel mixed GO / PPO at different rates and 100% of Jatropha oil were used to evaluate the performance of the generator (specific consumption, energy efficiency) and power quality analysis (THD, imbalances tension and current) in both configurations. It appears that the quality electricity is substantially the same as that produced diesel left. Power generation from pure Jatropha oil spring a cost per kWh of 161 FCFA / kWh compared to diesel (176 FCFA / kWh).

Key words :

-
- 1 - PV hybrid systems / diesel
 - 2 - Flexy-Energy
 - 3 - Pure Vegetable Oils
 - 4 – bi-fuel kit
 - 5 – Power Quality

Liste des abréviations

HVC: Huile végétale carburant

UEMOA : Union Economique et Monétaire Ouest-Africain

2iE : Institut International d'Ingénierie

LESEE : Laboratoire d'Energie Solaire et Economie d'Energie

LBEB : Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant.

HVP : Huile végétale pure

HJP : Huile de Jatropha pure

GO : Gazole et/ou Gasoil

CO : Monoxyde de carbone

NO_x : Nitrate d'azote

NO : Monoxyde d'azote

V_{RMS} : Tension efficace Vraie [V]

A_{RMS} : Courant efficace Vraie [A]

THD : Taux de distorsion harmonique [%]

V_{und} : Déséquilibre de la tension [%]

A_{und} : Déséquilibre du courant [%]

QEE : Qualité de l'énergie électrique

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION	6
1. Contexte :.....	6
2. Problématique :	7
3. Présentation de la structure d'accueil :.....	7
II. OBJECTIFS DU TRAVAIL	8
III. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE :	9
1. Les Huiles Végétales Pures (HVP)	9
2. Utilisation des huiles végétales pures dans les moteurs Diesels:.....	11
3. Solutions d'utilisations des HVPs dans les moteurs Diesels :.....	16
4. La centrale hybride PV/Diesel « FLEXY-ENERGY »:	18
IV. MATÉRIELS ET MÉTHODES	20
1. Matériels:.....	20
2. Méthodes:.....	25
V. RESULTATS.....	26
1. Performances du groupe électrogène:.....	26
2. Analyse de la qualité de l'énergie électrique produite:	34
VI. DISCUSSION ET ANALYSES.....	38
1. Performances du moteur:	38
2. Analyse de la qualité de l'énergie électrique produite:	40

VII. ANALYSE ECONOMIQUE ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL.....	42
1. Analyse économique :.....	42
2. Impact environnemental :.....	45
VIII. CONCLUSIONS	47
IX. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES	49
X. ANNEXES.....	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques de quelques huiles végétales [5]	14
Tableau 2. Consommation spécifique _ Essais GE seul	27
Tableau 3. PCI par type de carburant	28
Tableau 4. Rendement énergétique _ Essais GE seul	28
Tableau 5. Consommation spécifique _ Essais PV/Diesel.....	31
Tableau 6. Rendement énergétique _ Essais PV/Diesel.....	32
Tableau 7. Taux de distorsion harmonique courant et tension GE seul	34
Tableau 8. Déséquilibre de la tension [V] GE seul	35
Tableau 9. Déséquilibre de la tension [%] GE seul.....	35
Tableau 10. Taux de Distorsion harmoniques courant et tension PV/Diesel.....	36
Tableau 11. Déséquilibre de la tension [V] PV/Diesel	36
Tableau 12. Déséquilibre de la tension et du courant [%] PV/Diesel	37
Tableau 13. Coût d'investissement Centrale BILGO	42
Tableau 14. Production électrique de la centrale de BILGO.....	43
Tableau 15. Coût combustibles sur 20 ans	44
Tableau 16. Coûts de la Rentabilité du projet	44
Tableau 17. Coût de revient du kWh électrique	45
Tableau 18. Facteur d'émission de CO2 produit par filière	45
Tableau 19. Quantité de CO2 évitée produit au Gasoil.....	46
Tableau 20. Quantité de CO2 évité produit avec l'HJP.....	46
Tableau 21. Recette d'instrumentation	54
Tableau 22. Résumé et Solutions aux problèmes électriques	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Cycle à 4 temps du Moteur Diesel [12]	11
Figure 2. Moteur à injection directe [13]	12
Figure 3. Moteur à chambre de turbulence.....	13
Figure 4. Schéma de principe de la bicarburation	18
Figure 5. Schéma du prototype Flexy-Energy [17]	19
Figure 6. Consommation spécifique_ Essais GE seul [l/kWh]	27
Figure 7. Rendement énergétique _ Essais GE seul [%].....	29
Figure 8. Courbes de la production PV [kW] par type d'essais	30
Figure 9. Consommation spécifique _ Essais au PV/Diesel	31
Figure 10. Rendement global du moteur _ Essais eu PV/Diesel.....	33
Figure 11. Courbe de charge de BILGO.....	43
Figure 12. Facture proforma du kit de bicarburation 2iE.....	55
Figure 13. Evolution de la T° gaz échappement en fonction de la charge	57

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photo 1. a) Piston injection directe au fioul	15
Photo 3. Boîtier de commande kit de bicarburant (photo 2iE).....	21
Photo 2. Thermo-contact (photo 2iE).....	21
Photo 4. Thermocouple type K (photo 2iE)	23
Photo 5. Débitmètres LSF 40 (photo 2iE).....	24
Photo 6. Local Flexy-Energy (photo 2iE)	53
Photo 7. Centrale d'acquisition de données	56

I. INTRODUCTION

1. Contexte :

Objets d'espoir pour le développement durable à l'échelle mondiale, les agro-carburants ont connu en Afrique une expansion sans précédent depuis les années 2000. Ils sont présentés comme une réponse à un double constat de précarité énergétique pour l'Afrique de l'Ouest : (i) une menace accrue sur les ressources existantes (80% des énergies primaires sont issues du bois[1],[2]) et (ii) une accessibilité critique à l'énergie dans une Afrique Sub-saharienne où seulement 26% de la population a accès à l'électricité [3]. L'huile végétale carburant (HVC) issue de biomasses agricoles représente alors une opportunité de développement des services énergétiques et du monde rural ainsi que de réduction de la dépendance aux importations d'hydrocarbures. Par exemple au Burkina-Faso, portés par le soutien politique régional de l'UEMOA, les projets associatifs ou privés de développement de cultures énergétiques ont vu leur nombre exploser de 2007 à 2009. Ces projets sont majoritairement tournés vers la production d'HVC de *Jatropha curcas* [4]. Cet intérêt est renforcé si l'on considère l'enclavement du pays, l'absence de ressources pétrolières, ainsi que le contexte d'augmentation inéluctable des prix des hydrocarbures; principales sources énergétiques pour la production d'électricité au Burkina Faso, fournie par la société nationale SONABHY [5]. Ainsi, une combinaison des énergies renouvelables avec les énergies fossiles pour la production de l'énergie électrique dans les zones isolées constituerait une solution alternative à la dépendance aux hydrocarbures du point de vue économique et environnemental, incluant des réductions considérables de consommation de carburant d'origine fossile, de la taille des installations et du prix de l'énergie produite. Il ressort de ce paradoxe que les systèmes hybrides solaire/biomasse (biocarburants) sont porteurs d'avenir pour les projets d'électrification des zones rurales en Afrique subsaharienne. Pour ce faire, l'utilisation des huiles végétales pures (HVP) dans les moteurs Diesels (GE) représente une partie de la réponse à ce défi.

2. Problématique :

Le développement durable des régions isolées et éloignées du réseau électrique est fortement lié à la disponibilité de l'énergie qui est indispensable pour le fonctionnement des structures de base, telles que l'éclairage public, l'éducation, la communication et la santé [6]. L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque ou des groupes électrogènes comme source d'énergie électrique est très largement adoptée pour l'alimentation électrique nécessaire au développement des ces zones isolées.

Conscient de ce fait, le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (**LESEE**) de 2iE a initié le concept « Flexy-Energy » qui consiste en la production de l'électricité décentralisée via une centrale hybride solaire PV/Diesel (gasoil ou biocarburant selon les disponibilités) avec une gestion intelligente de la production et des charges à alimenter.

L'intérêt que revêt la substitution du diesel par une huile végétale locale est d'abord de maximiser le recours aux énergies renouvelables, minimiser les coûts de production, sécuriser l'approvisionnement en carburant et surtout créer des emplois locaux (production et transformation des graines) autour de ces centrales.

Ainsi, le concept « Flexy Energy » devra permettre à terme de proposer aux populations rurales un coût du kWh abordable et indépendant des fluctuations des cours mondiaux des matières premières tout en fournissant une énergie propre et durable.

Dans le cadre de la validation de ce concept une installation pilote constituée d'un champ PV de 2,85 kWc couplé à un générateur Diesel de 9,2 kW a été mise sur pied au LESEE. Les résultats issus de l'expérimentation de ce prototype serviront à la conception et à l'implémentation de deux (02) centrales « Flexy Energy » d'une puissance entre 100- 150 kW chacune, en zones rurales au Burkina Faso et au Mali.

3. Présentation de la structure d'accueil :

Le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (**LESEE**) est l'un des laboratoires du Centre Commun de Recherche Energie et Habitat Durables (**CCREHD**) de 2iE.

Le LESEE a pour objectif de *contribuer à l'innovation industrielle dans le domaine du solaire pour une production et une utilisation rationnelle et durable d'énergies électrique, mécanique et thermique en Afrique.*

Le LESEE est dirigé par Dr. Yao Azoumah. Son équipe actuelle se compose de :

- ❖ **03 enseignants-chercheurs permanents,**
- ❖ **01 post Doctorant, 04 Doctorants,**
- ❖ **11 Ingénieurs de recherche,**
- ❖ **01 assistant d'enseignement et de recherche,**
- ❖ **01 technicienne de labo,**
- ❖ **01 assistante administrative**
- ❖ **03 professeurs associés.**

Le LESEE exerce ses activités à travers deux axes de recherche :

>Axe 1 : *Conversion de l'énergie solaire sous environnements chaud et rude*

Cet axe se décompose en trois sous axes de recherche:

- ❖ **systèmes solaires photovoltaïques en milieu hostile,**
- ❖ **centrales solaires à concentration (CSP) pour mini réseaux,**
- ❖ **habitats solaires.**

>Axe 2 : *Gestion optimale d'énergie durable : production, transport, distribution*

Cet axe se décompose en deux sous axes de recherche:

- ❖ **l'hybridation des systèmes énergétiques,**
- ❖ **l'interaction sources-réseaux intelligents-utilisateurs**

II. OBJECTIFS DU TRAVAIL

Le présent mémoire devra contribuer à la réalisation du volet bicarburant du concept « Flexy-Energy ». Le Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburants (LBEB) a conçu un kit de bicarburant 2iE pour répondre aux spécificités techniques et économiques locales. Sur la base des travaux déjà réalisés au LBEB, il s'agira d'effectuer l'adaptation du groupe Diesel du prototype « Flexy Energy » au kit de bicarburant 2iE afin d'étudier l'impact de la substitution du gasoil par l'huile végétale pure (HVP) sur les performances techniques du moteur et sur la qualité de l'électricité produite.

III. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE :

1. Les Huiles Végétales Pures (HVP)

a) Généralités sur les Huiles végétales carburants :

Les substances à partir desquelles sont produites les huiles sont soit des graines ou des amandes soit des fruits. En fait, toutes les graines, tous les fruits et toutes les amandes contiennent de l'huile, mais seuls sont appelés oléagineux ceux qui servent à produire industriellement de l'huile et qui sont cultivés dans ce but [7].

D'un point de vue « **qualité** » carburant, plus l'huile est saturée ou plus faible est son indice d'iode, meilleure elle est. En revanche, les huiles saturées présentent des températures de solidification élevées et posent des problèmes pratiques d'utilisation. Les huiles végétales ont des caractéristiques similaires à celles du fioul [7-9]. En particulier, un indice de cétane qui indique une aptitude au fonctionnement en cycle Diesel. Plus il est élevé, plus le carburant est apte à l'auto inflammation. Enfin leur utilisation en tant que biocarburant peut se faire selon deux voies :

- ✓ **en tant que carburant industriel** : par trans-estérification à l'aide d'un alcool méthylique ou éthylique ou par cracking catalytique.
- ✓ **en tant que carburant local** en circuit court d'autoconsommation. Dans ce cas on privilégiera l'usage sous leur forme naturelle

Une huile impropre ou toxique à la consommation humaine peut être utilisée comme carburant comme par exemple le Jatropha. Cet aspect de l'utilisation des HVP fait l'objet de ce mémoire de fin d'étude.

b) Les Huiles végétales carburants au Burkina-Faso:

L'Afrique de l'Ouest regorge de nombreux oléagineux, tels que le Jatropha, le karité, le balanitès ; ceux-ci, bien qu'ayant un grand potentiel en huile, sont très peu exploités ou peu industrialisés

Dans la grande majorité des pays de l'UEMOA, la production d'oléagineux reste encore marginale. Pour le Jatropha, la production est au stade expérimental. Elle est très variable et

les rendements sont fonction de l'âge de la plantation, de la provenance des graines, etc. Le *Jatropha Curcas* fait l'objet d'importants programmes de plantation au Burkina-Faso étant donné qu'il apparaît peu exigeant sur le plan agro-écologique [9].

Actuellement, le *Jatropha Curcas* serait cultivé sur près de 70000ha dans tout le pays, 12000 m³ à 48000m³ d'huile végétale pourront être produites au bout de quatre années de cultures.

Présentement, le litre de gasoil au niveau des stations-services est de 732fcfa à la pompe alors que le prix du litre d'huile de *Jatropha* est compris entre [600-700fcfa], cela en fonction de la disponibilité des graines de *Jatropha Curcas*.

c) Généralités sur le *Jatropha Curcas* :

Le *Jatropha* est une plante appartenant à la famille des euphorbiacées dont l'une des espèces très prisée dans les recherches est le *Jatropha Curcas*. Le *Jatropha Curcas* encore appelé pourghère ou plus simplement *Jatropha*, est une plante originaire de l'Amérique du Sud. C'est une plante dont l'aire de distribution naturelle se situe principalement dans les zones arides et semi-arides. [10].

Le *Jatropha* est un grand arbuste à croissance rapide d'une hauteur de 2 à 3m, pouvant atteindre 5m dans les conditions favorables. En outre, le *Jatropha* aime les sols pauvres et ne supportent pas les terrains argileux car les sols trop compactes limitent sa croissance racinaire. Une densité de plantation de 6m² est préconisée pour un bon développement de la plante. Elle commence par être productive au bout de 3 à 4 ans. Avec une durée de vie de 50 ans, le *Jatropha* offre une productivité pouvant aller de 2000 à 5000 kg/ha/an.[10]

La plante produit beaucoup de graines dont la maturité physiologique est atteinte quand la capsule du fruit (initialement verte) se colore en jaune et les graines même en noir au 57^e jour après l'apparition des fleurs. La capsule mûre contient 1 à 3 graines oléagineuses dont la teneur en huile varie de 27 à 40%, ce qui rend la plante de *Jatropha* particulièrement intéressante pour la production d'huile végétale utilisable comme carburant dans les moteurs Diesel.[10]

2. Utilisation des huiles végétales pures dans les moteurs Diesels:

a) Généralités sur les moteurs Diesels :

Les moteurs à combustion sont des machines thermiques émettant de l'énergie utile développée par la combustion de carburant. Le carburant, sous forme gazeuse ou pulvérisé préalablement, doit être bien mélangé à l'air afin de permettre une combustion aussi complète que possible [11]. L'énergie dégagée par la combustion engendre alors un mouvement rectiligne du piston transformé en mouvement rotatif en sortie de vilebrequin par l'intermédiaire du système bielle-manivelle.

b) Cycle Diesel à Quatre temps :

Les moteurs diesels fonctionnent selon le principe du cycle à quatre temps qui comprend les phases suivantes : **admission**, **compression**, **inflammation-détente** et **échappement** (voir Figure 1). Chaque cycle correspond à deux tours de vilebrequin.[7]

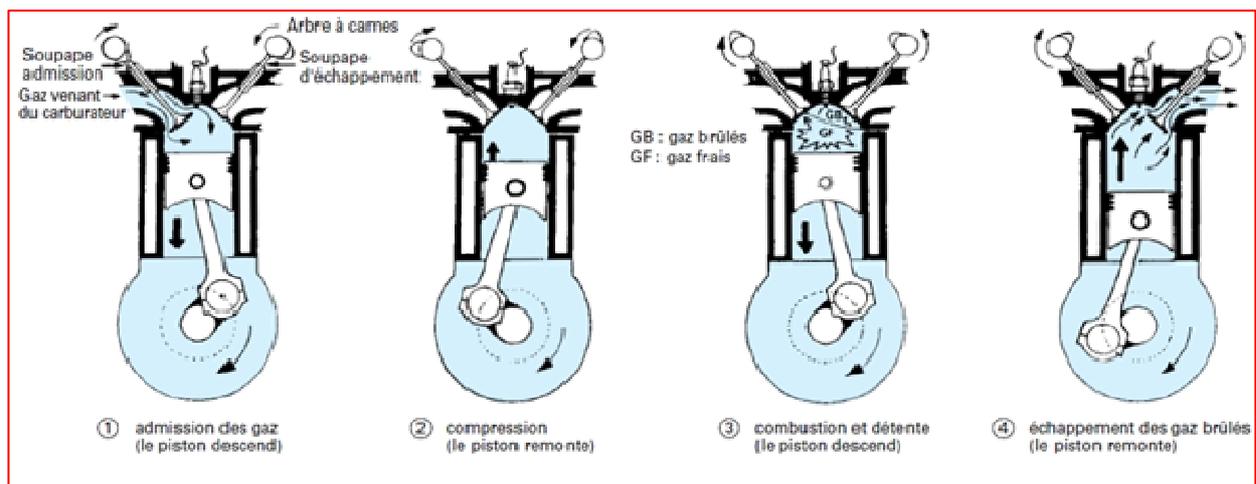


Figure 1. Cycle à 4 temps du Moteur Diesel [12]

c) Technologies des moteurs Diesels:

Selon le mode d'injection du combustible, on distingue deux types de moteurs Diesel : Les moteurs Diesel à injection directe et les moteurs Diesel à injection indirecte.

- **Moteur à injection directe :**

Sur ce type de moteur, l'injecteur, muni de plusieurs orifices de giclage, débouche directement dans la chambre de combustion. Le piston peut être plat ou comporter une cavité selon que l'on désire donner au mélange un mouvement de turbulence. La turbulence de l'air comprimé mais aussi du gazole injecté favorise alors la combustion du gazole. La combustion instantanée du mélange gazole/air engendre une pression maximale élevée [13]. Il en résulte un fonctionnement brutal. En contrepartie, la consommation spécifique est faible et le démarrage de ce type de moteur ne nécessite aucun système auxiliaire d'aide au démarrage [14]. Ces types de moteurs n'acceptent pas les HVP sans modifications. Alimentés avec des huiles végétales non estérifiées, ces types de moteurs connaissent rapidement des problèmes de fonctionnement (rupture ou arrêt de fonctionnement). Ces problèmes sont la formation de dépôts charbonneux à l'intérieur du moteur [7].

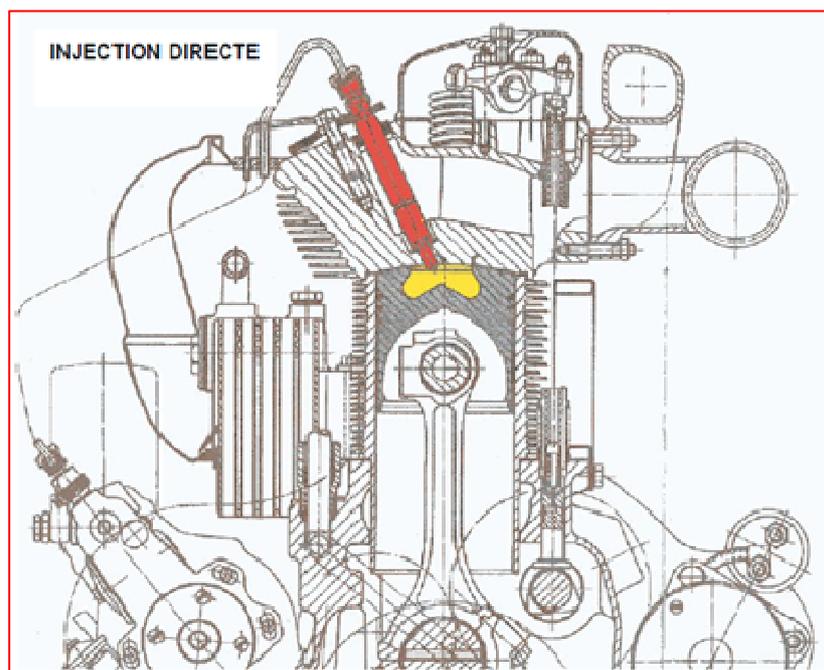


Figure 2. Moteur à injection directe [13]

- **Moteur à injection indirecte :**

Afin de remédier aux défauts du moteur diesel liés à l'injection directe à savoir : brutalité, cognement, manque de souplesse- les constructeurs ont été amenés à concevoir un moteur à injection indirecte. Ici, l'injecteur débouche alors dans une préchambre dont le volume représente une partie de la chambre de combustion [13]. Cela permet d'avoir un rapport volumétrique moins élevé ainsi qu'une pression d'injection plus faible. Ses seuls défauts sont : une consommation légèrement plus élevée que celle d'un moteur à injection directe, et la nécessité d'utiliser des bougies de préchauffage lors du démarrage du moteur car le rapport volumétrique employé ne permet pas l'auto inflammation du gazole lorsque le moteur est froid [14]. Il est possible d'utiliser jusqu'à 100% d'huile végétale pure dans ce type de moteur diesel. On distingue deux types de moteurs à injection indirecte : les moteurs à chambre de turbulence et les moteurs à préchambre de combustion. Mais seuls les moteurs à chambre de turbulence seront détaillés dans cette étude.

- ❖ **Moteur à chambre de turbulence :**

La chambre de turbulence représente la presque totalité du volume de la chambre de combustion. Cette préchambre communique avec le cylindre par un orifice de large section de forme tronconique; comme dans le cas précédent, l'injecteur débouche dans la chambre. Pour ces moteurs, le rapport volumétrique est compris entre 15/1 et 18/1, et la pression d'injection est de 110 à 130 bars.

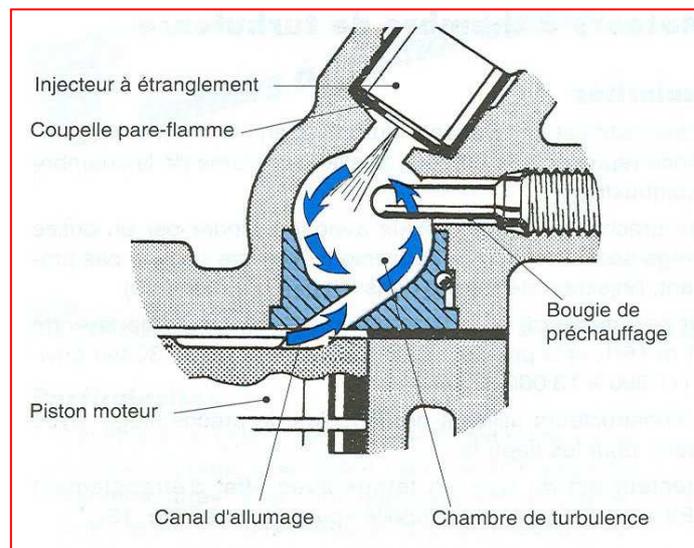


Figure 3. Moteur à chambre de turbulence.

d) Problèmes rencontrés lors de l'utilisation de l'huile végétale carburant :

Les conditions d'utilisation des huiles végétales pures dans les moteurs diesel sont étroitement liées aux propriétés physico-chimiques des huiles, et aux conditions thermiques dans la chambre de combustion du moteur (qui dépend de la technologie du moteur). Le **tableau 1** donne les principales caractéristiques physiques et chimiques de quelques huiles végétales

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques de quelques huiles végétales [5]

	Carburant		(*) viscosité à 20 °C		
	Colza	Coton	Tournesol	Jatropha	Gasoil
Densité à 20 °C (kg/m³)	916	919	925	920	836
Viscosité à 40 °C (mm²/s)	35,7	35,7	58(*)	55(*)	3,3
Point éclair (°C)	320	230	316	240	63
Pouvoir calorifique inférieur (kJ/kg)	36800	36400	38100	38850	43700
Indice de cétane	37	38	37	45	50

Au regard de ces valeurs, on constate que les huiles végétales diffèrent fondamentalement du gasoil par :

- **La viscosité :**

La viscosité des huiles est nettement plus élevée que la viscosité du gasoil à température ambiante ce qui pose des problèmes de pompage de carburant et d'écoulement à travers les tuyaux et les filtres. Mais également une détérioration des caractéristiques du jet injecté et d'atomisation du carburant dans la chambre de combustion du moteur [8]. On observe enfin des problèmes de combustion qui conduisent à des encrassements dans la chambre de combustion. Dans le cas le plus défavorable, l'encrassement est limité à la zone environnant les trous d'injecteurs sinon au pire des cas, on observera la formation de dépôts goudronneux sur la culasse, les injecteurs, les pistons, les soupapes [9].



Photo 1. a) Piston injection directe au fioul

b) après 21 heures fonctionnement à l'huile végétale (Photo Cirad)

- **Influence de la composition chimique des huiles :**

Le délai d'inflammation est plus long pour une majorité des huiles quand la température de la chambre de combustion est inférieure à **500°C**. Cela est dû en partie à un faible indice de cétane des HVP. Néanmoins, des récentes études menées par le *Dr. S. SIDIBE et le Dr. J. BLIN* [15] ont démontré que quelque soit le régime du moteur (faible ou élevé), le préchauffage de l'huile de Jatropha ou de coton (**pour une utilisation à 100% d'HVP dans le moteur diesel, la température de préchauffage est de 100°C**) diminuait les délais d'inflammation. Aussi, une charge élevée sur le réseau contribuerait également à réduire les délais d'inflammation et cela peut importe que l'huile végétale soit réchauffée ou non.[15]

Par ailleurs, la combustion de l'huile, même réchauffée, purifiée et raffinée, ne s'effectue pas complètement ce qui entraîne des pertes de puissance et de rendement et des rejets en CO, NOx et HC plus importants que pour le gasoil [8]. Il se produit également une dégradation et un encrassement des nez d'injecteurs, des segments et des cylindres conduisant à des détériorations mécaniques. Enfin, l'énergie calorifique des HVC étant faible par rapport au gasoil, on constate une surconsommation de l'HVC par rapport au gasoil pour délivrer la même puissance.[9]

3. Solutions d'utilisations des HVPs dans les moteurs Diesels :

Bien que les HVP posent des problèmes en tant que carburant, des solutions ont été développées. A savoir :

- **Utilisation directe de HVP (Bicarburant)**
- **Les mélanges huile/gazole;**
- **La trans-estérification de l'HVP.**
- **Modification complète de la chambre de combustion.**

Dans notre cas d'étude, nous retiendrons les deux premières solutions, mais comme nous voulons apporter une solution locale et qui permette de s'affranchir au maximum des produits pétroliers, la première solution fera l'objet d'une étude plus approfondie.

a) Adaptation type « mélange Gasoil/HVP » :

L'une des voies d'utilisation des HVP dans les moteurs diesels consiste à mélanger ces dernières avec du gasoil à différents taux d'incorporation. Cette méthode a comme avantage qu'elle permet de s'affranchir dans une moindre mesure des produits pétroliers.

L'utilisation de mélanges significatifs d'huile végétale et de fioul dans les moteurs diesels à injection directe (contenant plus de 10 % d'huile) ne résout pas les problèmes d'encrassement des pistons. L'encrassement existera toujours, seul le temps de formation est fonction du taux d'huile végétale [16].

En revanche, les moteurs à injection indirecte semblent bien tolérer les huiles végétales brutes dès 10% de la puissance nominale du moteur. Mais celles-ci doivent être filtrées efficacement. Dans de tels cas de figures, le taux de mélanges HVP/gasoil peut être compris **entre 70% de GO et 30% d'HVP à 25% de GO et 75% d'HVP.**

b) Adaptation type « bicarburation » sur les moteurs à injection indirecte :

Une autre voie d'utilisation des HVP dans les moteurs Diesel sans toutefois modifier ces derniers est l'utilisation d'un kit de bicarburation. Ce procédé a été mis en place et appliqué par le CIRAD dans les années 1990 sur des tracteurs, des camions et des groupes électrogènes. Il consiste à installer un second circuit d'alimentation pour l'huile végétale pure en parallèle à celui du gazole. Sur ce circuit, on trouve en série[7]:

- ✓ **un filtre à carburant** adapté à l'huile végétale,
- ✓ un réchauffeur, pour réduire la viscosité de l'huile et se rapprocher de celle du gazole (pas nécessaire dans notre contexte)
- ✓ **une pompe de circulation et de gavage** de la pompe à injection,
- ✓ **deux électrovannes** qui permettent de basculer d'un carburant à un autre ; c'est-à-dire permettant de fonctionner soit au gazole soit à l'HVP.

Le principe de la bicarburation est simple : tant que les chambres de combustion n'ont pas les niveaux de température suffisants pour une bonne combustion de l'huile végétale, le moteur reste alimenté en gazole. Dès que la température des chambres est suffisante le système de bascule pilote l'électrovanne qui alimente alors le moteur grâce au circuit huile végétale.

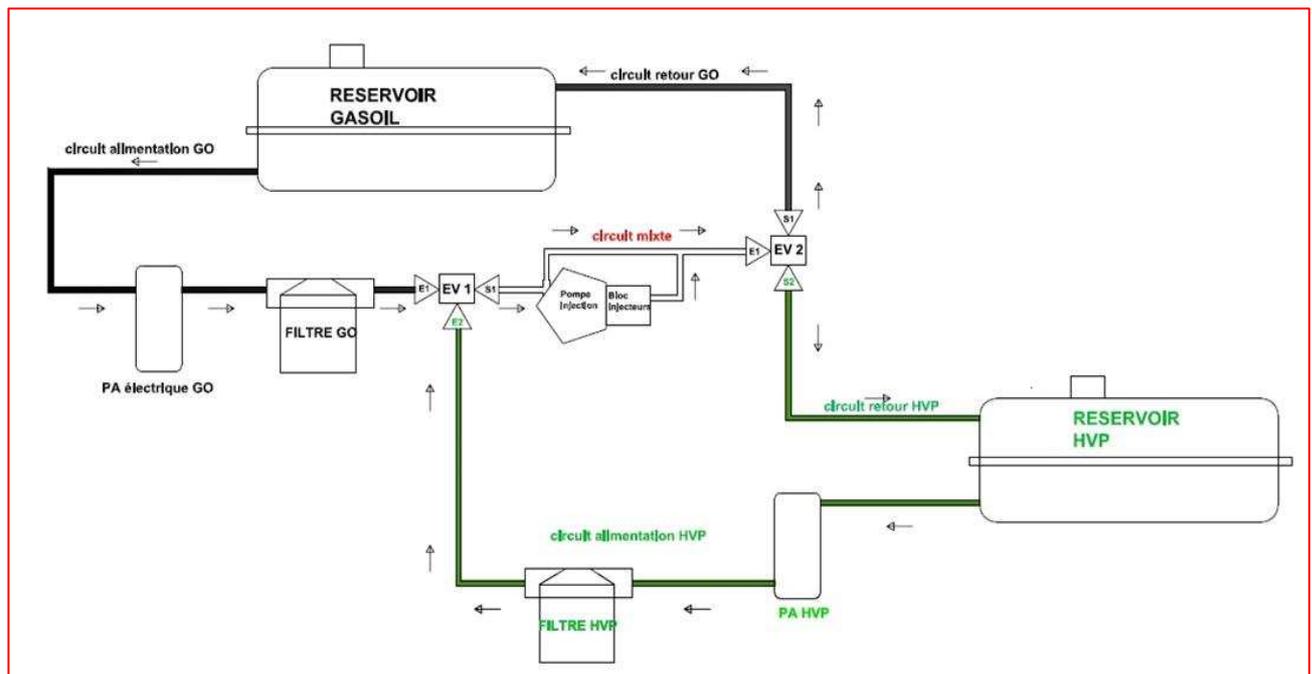


Figure 4. Schéma de principe de la bicarburant

4. La centrale hybride PV/Diesel « FLEXY-ENERGY »:

Le concept de « Flexy-Energy » consiste en la production décentralisée de l'énergie électrique à partir d'une centrale hybride solaire photovoltaïque/groupe électrogène diesel ou biocarburant sans batteries de stockage avec une gestion intelligente de la production et des charges. Le but visé par ce concept est de pouvoir assurer la disponibilité de l'électricité en toute heure et à un coût abordable pour les populations

Il faut noter que les systèmes hybrides ont généralement les configurations : série, commuté et parallèle. Le prototype « FLEXY-ENERGY » a une configuration **hybride parallèle** [17]. Dans cette configuration, le système PV est connecté en parallèle au générateur diesel ou au réseau électrique local basse tension (230V/380V) à travers un convertisseur DC-AC (onduleur) monophasé (**la puissance électrique du système PV est injecté sur une seule phase du générateur Diesel ou du réseau SONABEL**). Un inverseur de source placé en aval de l'onduleur assure ce choix et évite le fonctionnement simultané des trois sources. Les générateurs PV et diesel satisfont ainsi ensemble la puissance appelée (charge).

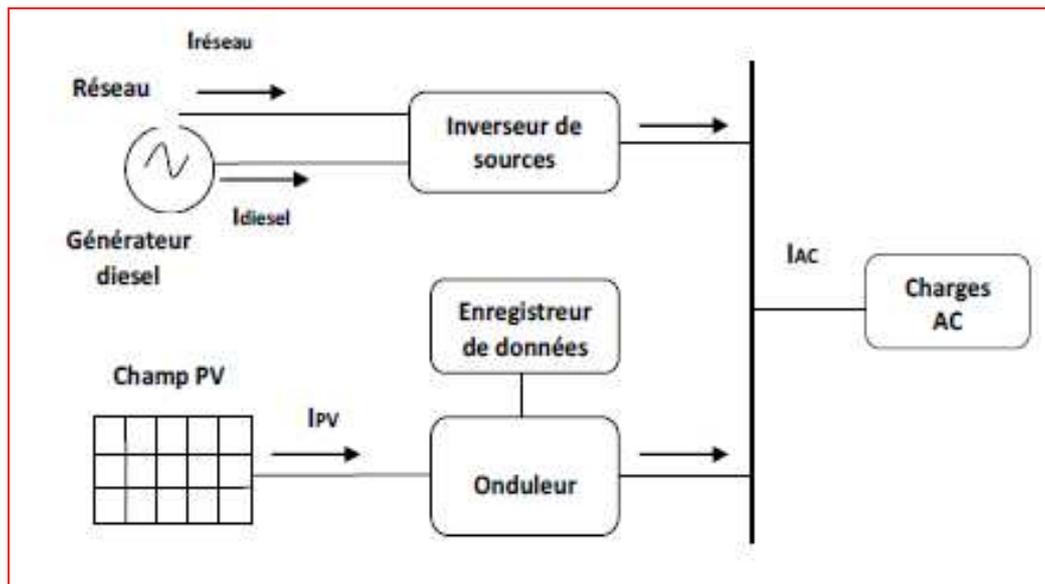


Figure 5. Schéma du prototype Flexy-Energy [17]

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 de marque SDMO a une puissance nominale de 9.2 kW (11, 5 kVA) et fonctionne à 1500 trs/min [17]. L'acquisition de données se fait à l'aide d'un Sunny webbox et d'un afficheur de données (Sunny Matrix). Enfin, deux bancs d'essais de 4kW chacun (soit 8kW) permettent de simuler les profils de charges (**voir Annexe I**).

IV. MATERIELS ET METHODES

Dans cette partie, nous allons recenser les matériels qui nous ont permis d'adapter le moteur du groupe électrogène du Flexy-Energy aux HVC. Nous allons également faire le détail des méthodes utilisées pour réaliser les tests technico-économiques lors de la production d'électricité par le générateur diesel pour diverses charges.

1. Matériels:

a) Test d'utilisations des HVC dans un moteur diesel:

- **Le groupe électrogène SDMO :**

Pour utiliser l'huile de Jatropha comme carburant, on dispose d'un générateur diesel à refroidissement par air de puissance maximale 9,2 kW.

Ce groupe électrogène qui est un générateur comportant un moteur diesel à injection indirecte, de la marque SDMO a servi pour les différents tests. Ce moteur tourne à une vitesse constante de 1500 tr/min. Un alternateur électrique couplé au moteur, délivre une tension de 220V monophasé ou une tension de 410V en triphasé. Des charges résistives de puissance maximale 8kW (en triphasé) sont connectées à l'alternateur et permettent de charger le moteur jusqu'à sa charge maximale.

Pour produire cette électricité avec une huile végétale pure de Jatropha, il faut adapter le moteur à l'huile en effectuant des modifications. Notre choix est de l'adapter en utilisant la méthode de bicarburation parce qu'elle ne nécessite aucune modification de la chambre de combustion.

- **Réalisation du kit de bicarburation:**

Après avoir effectué une recherche bibliographique sur les différentes technologies d'adaptation des moteurs Diesels aux HVPs existantes, il en ressort que peu de ces kits de bicarburation soient adaptés au contexte africain car très onéreux (**prix de vente variant de 500€ à 2000€**) au regard du ratio qualité/prix.

Suite à cela, nous avons décidé d'installer sur le groupe électrogène du Flexy-Energy, une solution adéquate sur un plan technico-économique. Il s'agit du kit de bicarburation labélisé

2iE qui est actuellement installé sur la plateforme moteur du LBEB (coût de réalisation compris entre 400€ et 600€), voir Annexe III

Enfin, cela permettra à l'occasion, de valider l'utilisation de ce kit de bicarburation sur des moteurs de fortes puissances tel qu'un groupe électrogène (à injection indirecte).

- **Conception du kit de bicarburation labélisé 2iE :**

Le kit de bicarburation labélisé 2iE présente la particularité d'utiliser un thermo-contact (bilame) comme inverseur (Photo 3). Ce type de composant se dilate lorsqu'il est mis en contact avec une surface chaude (ici il s'agira de la tuyauterie des gaz d'échappement)

Lorsque la température de déclenchement est atteinte, le composant ne laisse plus passer le

courant [18]. Le thermo-contact s'ouvre, le circuit de commande n'est plus alimenté. Le voyant lumineux vert (HVP) s'allume indiquant ainsi que le moteur tourne avec de l'huile végétale. Pour revenir à un fonctionnement au gasoil, il suffira d'actionner l'interrupteur « Force GO ».

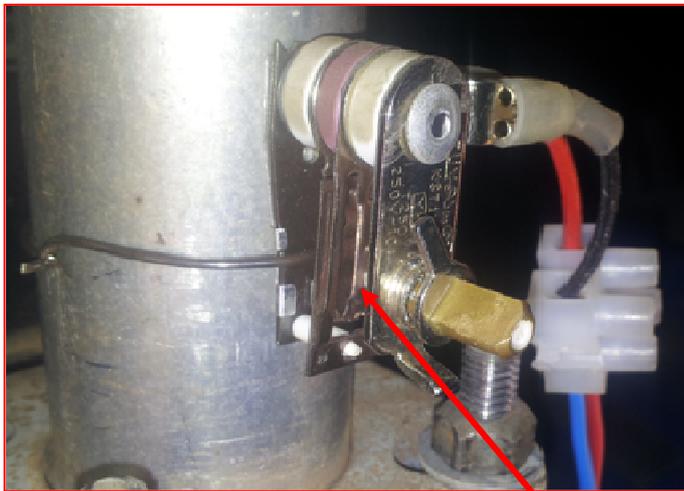


Photo 2. Thermo-contact (photo 2iE) Thermo-contact

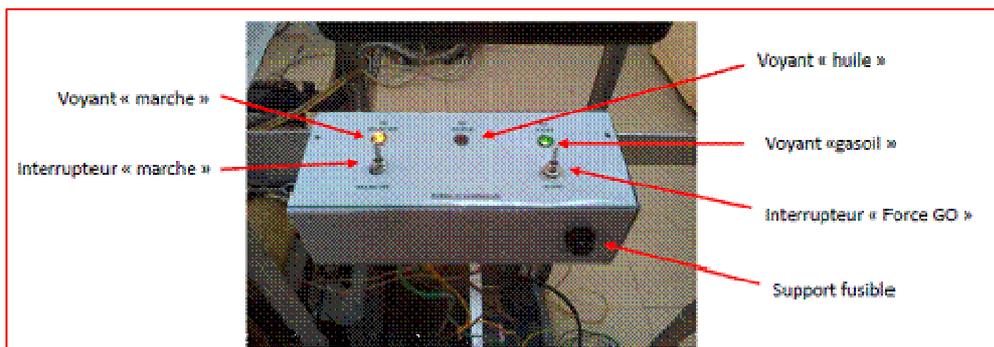


Photo 3. Boîtier de commande kit de bicarburation (photo 2iE)

L'asservissement du choix de notre carburant se fera en fonction des deux paramètres suivants :

- **Température de la chambre de combustion ($T^{\circ} > 500^{\circ}\text{C}$).**
- **Charge supérieure au seuil fixé :** Ici le seuil est fixé à **20%** de la puissance nominale du groupe électrogène.

b) Instrumentation et suivi moteur:

En sciences, l'instrumentation est une technique de mise en œuvre d'appareils de **mesures**, d'actionneurs, de **capteurs**, de **contrôleurs** en vue de créer un système d'**acquisition de données** ou de **commande**.

Afin de réaliser différents essais de fonctionnement in-situ, une instrumentation spécifique a été élaborée dans le souci de qualité de la mesure et de limitation des incertitudes tout en ayant un rapport qualité/prix acceptable.

- **Recette d'instrumentation :**

L'instrumentation du groupe électrogène a été dimensionnée suivant la méthode simplifiée dite du « **fil rouge** » établie par **EDF R&D**. Celle-ci se décline comme suit :

- ❖ **Contexte :** Il s'agit ici de faire une présentation générale de l'étude. Dans notre cas, il s'agit de l'adaptation d'un moteur Diesel à l'utilisation d'HVP comme carburant et de faire des études technico-économiques des performances du système.
- ❖ **Finalité de l'étude :** Faire une évaluation du coût du kWh ainsi qu'une étude de la qualité de l'électricité de l'électricité produite en fonction des différents types de carburant ;
- ❖ **Les données nécessaires :**
 - Température ambiante et température des gaz d'échappement
 - Consommation de carburant
 - Mesures électriques

La recette d'instrumentation obtenue est définie en **Annexe II** . Dans la suite du document, nous allons définir quelques équipements importants qui constituent le système de supervision.

- **Température des gaz d'échappement :**

Nous avons mesuré, à l'aide d'une sonde thermocouple type K, la température des gaz d'échappement à vide et en charge. Ces mesures vont s'effectuer sur un orifice pratique sur le collecteur des gaz d'échappement du groupe électrogène.

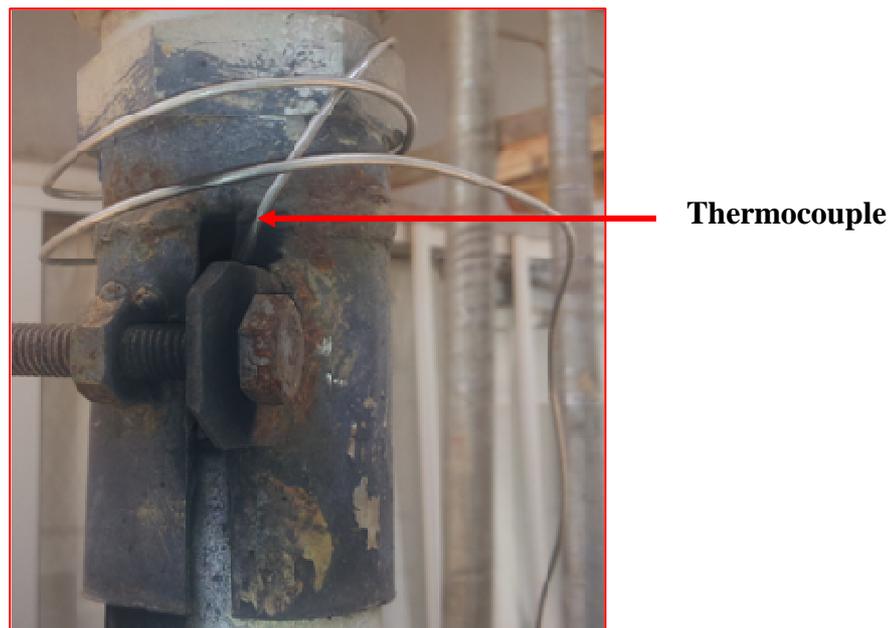


Photo 4. Thermocouple type K (photo 2iE)

- **Température de l'air ambiante :**

Nous avons mesuré, à l'aide d'une sonde Pt 100 la température ambiante de la zone d'essai. Ces mesures vont s'effectuer sur un orifice percé dans la structure du local Flexy-Energy.

- **Débits d'entrées et de sortie du carburant :**

La consommation spécifique est une caractéristique importante pour un moteur, elle représente la consommation de carburant par unité de puissance et de temps. Pour l'évaluer, nous avons installé sur le circuit d'admission et le circuit retour carburant deux débitmètres de marque LSF 40 du fabricant OVAL M-3 (404 impulsions/l).

Débitmètre N°2 (retour carburant)

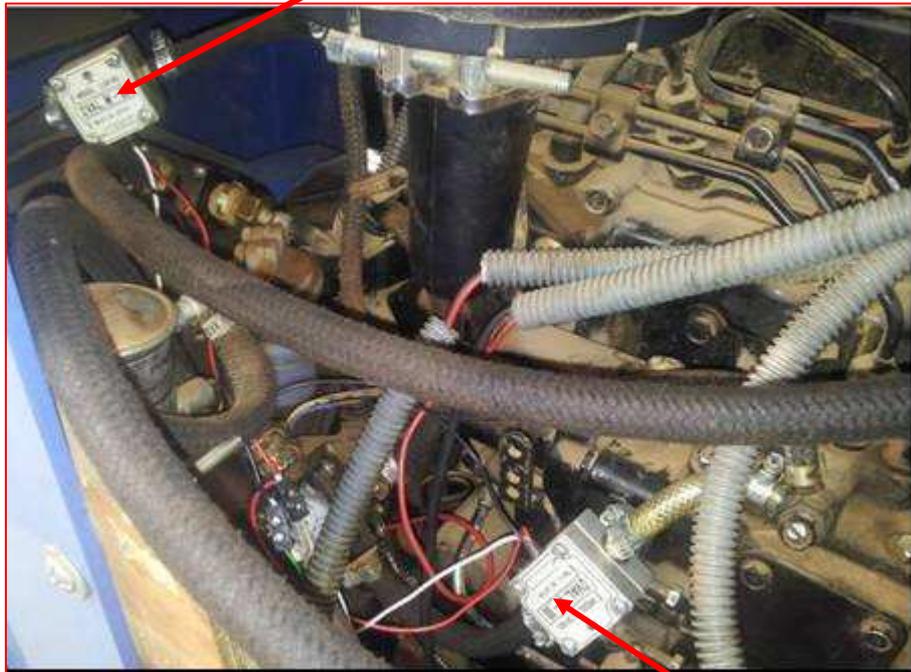


Photo 5. Débitmètres LSF 40 (photo 2iE)

Débitmètre N°1 (entrée carburant)

- **Les mesures électriques :**

L'analyse des paramètres électriques a été effectuée à partir d'un analyseur de réseau électrique triphasé de marque **Chauvin-Arnoux 8335**. Ces mesures permettront par la suite de pouvoir analyser le réseau électrique et d'en juger la qualité de l'énergie électrique produite à travers les mesures suivantes :

- (1) Puissances transitées apparente (S), active (P) et réactive (Q) (VA , W , VAR)
- (2) Valeurs de tension efficace vraie (RMS) et de courant
- (3) Creux et pics de tension, coupures (Transitoires)
- (4) Taux de distorsion harmonique tension (TDH U) (éventuellement taux de distorsion harmonique courant)
- (5) Déséquilibre de phase

- **Mesure de la composition des gaz d'échappement:**

L'analyse des différents constituants des gaz d'échappements a été effectuée à partir d'un analyseur de gaz de marque TESTO. Ces mesures nous permettront de caractériser l'impact environnemental de cette étude.

2. Méthodes:

Pour s'assurer d'obtenir des résultats qui ne souffrent d'aucunes ambiguïté, nous avons établi un protocole de manipulation valable dans les deux modes de fonctionnement de la centrale (Groupe électrogène seul ou système hybride PV/Diesel) et qui peut être résumé en cinq étapes:

- **Etape 1:** Inspection de la zone de travail,
- **Etape 2:** Installation de l'analyseur de réseau, de l'analyseur de gaz et mise en service de la centrale d'acquisition de données (e-reader).
- **Etape 3:** Démarrage du groupe électrogène. Attendre 10 min (le groupe électrogène fonctionne à vide).
- **Etape 4:** Charger le groupe électrogène progressivement de 20% à 80% de sa puissance nominale. Le délai entre chaque palier de charge peut varier de 10min à 30min par essais.
- **Etape 5:** A la fin des expérimentations, on décharge également le groupe de façon progressive. On laisse tourner le groupe à vide durant 5min. Enfin, arrêt du groupe électrogène.

Pour les essais en mélange Gazole/HVP, le principe aura été de faire fonctionner le moteur en régime stabilisé par palier de puissance avec un mélange gazole/HVP fixé. L'évolution du pourcentage d'incorporation d'huile de Jatropha est progressive +**25%** entre chaque essai jusqu'à atteindre **100% HJP**.

Pour un fonctionnement à **100% HJP**, il est nécessaire d'avoir un kit de bicarburation. Le fonctionnement courant est de démarrer le groupe électrogène au gazole afin de chauffer l'huile végétale à une température lui permettant d'avoir une viscosité acceptable. L'arrêt se faisant après re-basculement au gazole.

V. RESULTATS

Les tests techniques réalisés sur le moteur en fonctionnement, donnent pour des taux de charges variées, les résultats relatifs aux performances du moteur et à la qualité de l'électricité produite.

1. Performances du groupe électrogène:

Ces performances concernent la consommation spécifique C_s en gazole, en mélange GO/HVC et en huile de Jatropha du moteur ainsi que le rendement énergétique lors de la combustion de ces carburants à différentes charges.

a) Test sur le groupe électrogène:

- **La consommation spécifique:**

La consommation spécifique C_s d'un moteur en fonctionnement est la quantité de carburant consommée par le moteur pour produire **1 kWh**. Elle s'exprime en **g/kWh** ou en l/kWh généralement:

$$C_s = \frac{m(\text{kg ou L})}{t(\text{h}) * P(\text{kW})}$$

Avec : **m (kg ou L)** : masse de combustible consommée ; **t (h)** : durée de l'essai et **P (kW)** : la puissance de la charge.

Les consommations spécifiques obtenues à chaque essai (**Tableau 2**) nous ont permis de tracer les courbes présentées à la **Figure 6**

Tableau 2. Consommation spécifique _ Essais GE seul

Cs [l/kWh] par type de carburant	Charge à 20%	Charge à 40%	Charge à 60%	Charge à 80%
100% Gazole	1,85	0,80	0,38	0,34
75%GO-25%HJP	1,90	0,82	0,45	0,29
50%GO-50%HJP	1,77	0,76	0,45	0,30
25%GO-75%HJP	1,56	0,64	0,40	0,29
100%HJP	1,91	0,76	0,55	0,37

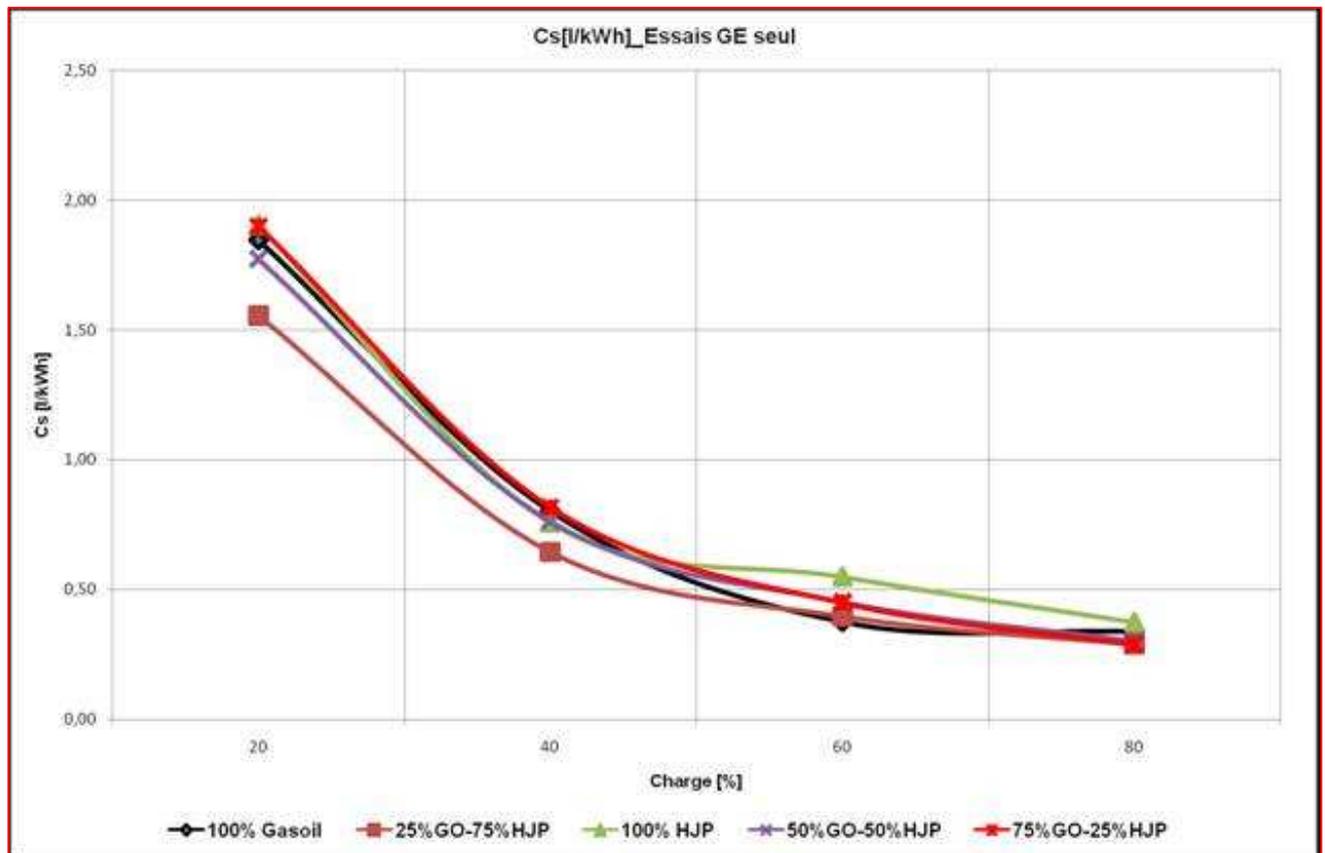


Figure 6. Consommation spécifique_ Essais GE seul [l/kWh]

- **Rendement énergétique:**

Ce rendement permet de caractériser au mieux les performances globales du groupe électrogène. Les résultats du **Tableau 4** permettent de réaliser le graphe de la **Figure 7**.

$$\eta_s = 100 * \frac{P \text{ (kW)} * t \text{ (h)}}{PCI_{\text{combustible}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right) * m \text{ (kg)}}$$

Les valeurs des PCI des différents combustibles utilisés sont indiquées dans le **Tableau 3**. Les résultats des rendements énergétiques obtenus sont mentionnés dans le **Tableau 4**.

Tableau 3. PCI par type de carburant

	Gazole	75%GO- 25%HJP	50%GO- 50%HJP	25%GO- 75%HJP	100% HJP
PCI (kWh/kg)	1,18	1,14	1,15	1,05	1,02

Tableau 4. Rendement énergétique _ Essais GE seul

Rendement [%] par type de carburant	Charge à 20%	Charge à 40%	Charge à 60%	Charge à 80%
100% Gazole	5,35	12,33	26,32	30
75%GO-25%HJP	5,24	11,84	21,56	33,45
50%GO-50%HJP	5,74	13,33	22,46	33,67
25%GO-75%HJP	6,77	16,35	26,53	36,45
100%HJP	5,67	14,26	19,67	28,87

Les différentes valeurs obtenues ont permis de tracer les courbes de la **Figure 7**



Figure 7. Rendement énergétique _ Essais GE seul [%]

b) Test sur le système hybride:

- **Performances du champ PV :**

Les puissances solaires électriques P_{ac} (en kW), ont été relevées entre 8h et 17h lors de nos essais sur la surface du champ PV de notre système hybride. Nous avons relevé pendant cette période (entre le 16 Mai et le 28 Mai), une puissance maximale de **2,3 kW** (Figure 8). Malheureusement, nous ne disposons pas d'un solarimètre pour mesurer l'ensoleillement journalier. Sachant que nous avons considérés quatre profils de charges différents (**20% ; 40% ; 60% ; 80%**) nous avons obtenus des puissances électriques comprises respectivement **0,2 à 1 kW ; 0,14 à 1,05 kW ; 0,17 à 1,03 kW et 0,17 à 1,3 kW.**

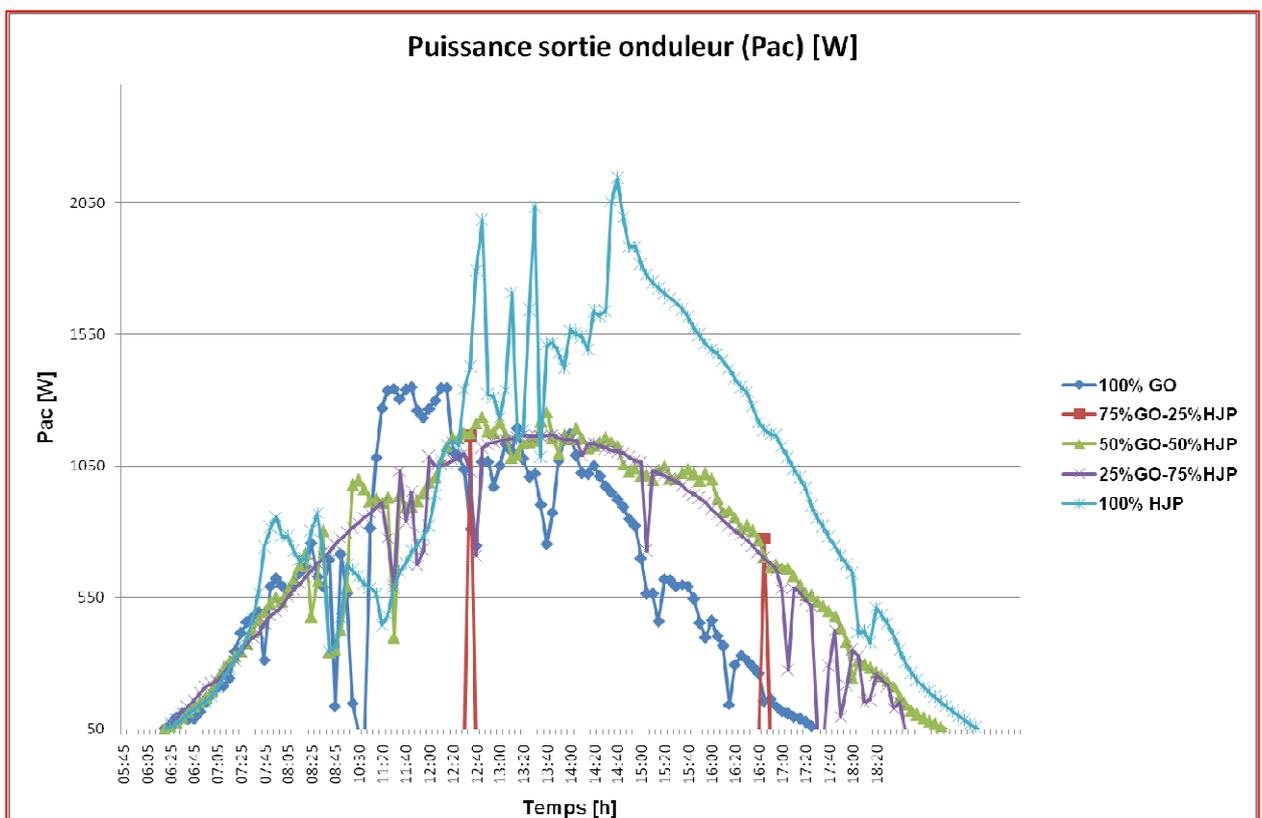


Figure 8. Courbes de la production PV [kW] par type d'essais

Les comportements des générateurs diesel et photovoltaïque dans le système hybride sont interdépendants. Une charge (demande) donnée est satisfaite à la fois par les deux générateurs. Compte tenu de cela, nous avons donc pu évaluer des paramètres tels que la consommation spécifique et le rendement global du générateur électrique. Les résultats sont détaillés dans la suite du document.

- **La consommation spécifique C_s [l/kWh]:**

La consommation spécifique est la quantité de carburant consommée pour produire 1 kWh. Les résultats obtenus et consignés dans le **Tableau 5** ont permis de réaliser le graphe de la **Figure 9**

Tableau 5. Consommation spécifique _ Essais PV/Diesel

Cs [l/kWh] par type de carburant	Charge à 20%	Charge à 40%	Charge à 60%	Charge à 80%
100% Gazole	1,80	0,71	0,40	0,29
75%GO-25%HJP	1,18	0,81	0,52	0,49
50%GO-50%HJP	0,92	0,58	0,38	0,29
25%GO-75%HJP	1,44	0,68	0,43	0,36
100%HJP	1,51	0,86	0,67	0,41

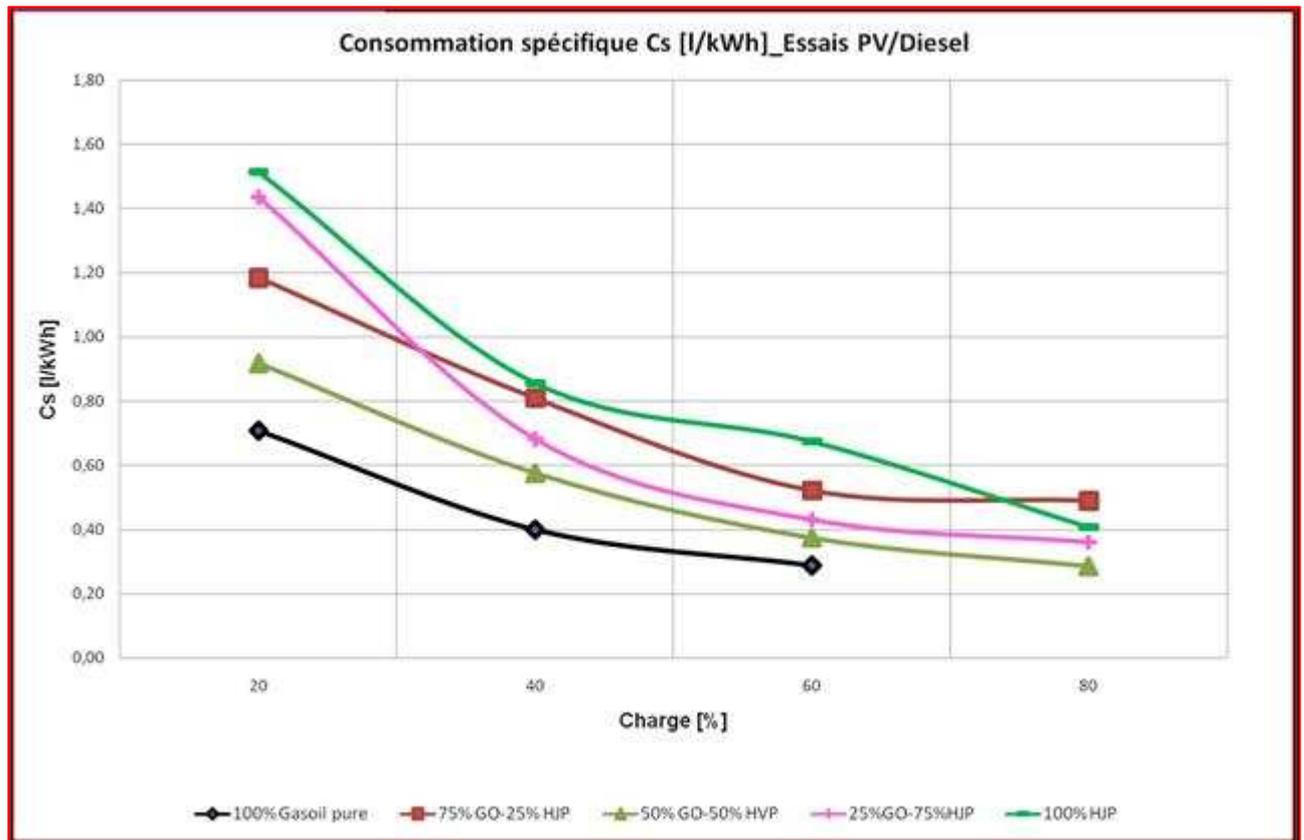


Figure 9. Consommation spécifique _ Essais au PV/Diesel

- **Le rendement global du moteur :**

Ce rendement permet de caractériser au mieux les performances globales du groupe électrogène. Les résultats permettent de réaliser le graphe de la **Figure 10**

$$\eta_g = 100 * \frac{P (kW) * t(h)}{PCI_{combustible} \left(\frac{kWh}{kg} \right) * m (kg)}$$

Les valeurs des PCI des différents combustibles utilisés sont indiquées dans le **Tableau 6**

Tableau 6. Rendement énergétique _ Essais PV/Diesel

Rendement [%] par type de carburant	Charge à 20%	Charge à 40%	Charge à 60%	Charge à 80%
100% Gazole	6,9	15,028	20,699	31,089
75%GO-25%HJP	7,106	15,871	24,599	34,933
50%GO-50%HJP	7,4	13,6	21,409	27,560
25%GO-75%HJP	7,09	14,93	23,57	28,12
100%HJP	6,50	12,65	16,07	26,52

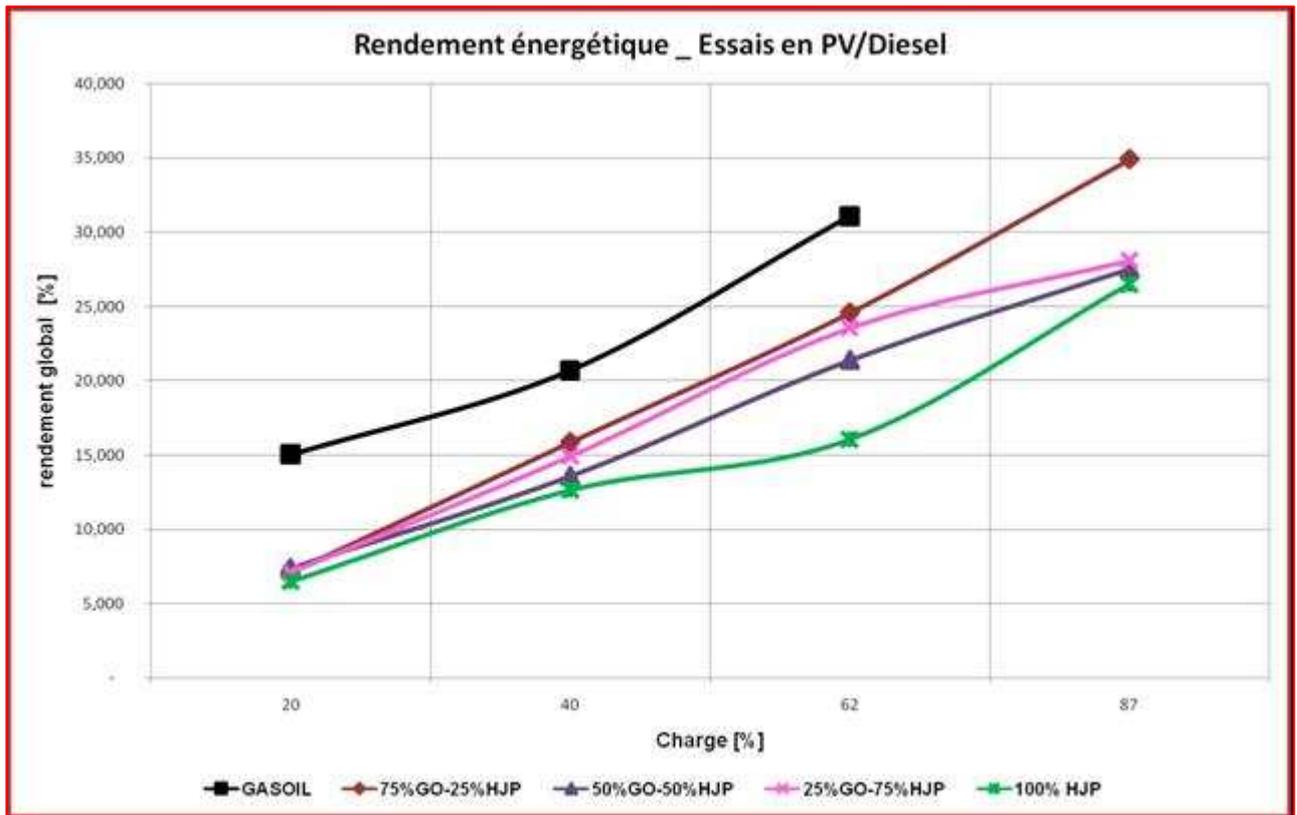


Figure 10. Rendement global du moteur _ Essais PV/Diesel

2. Analyse de la qualité de l'énergie électrique produite:

La mesure de la qualité de notre électricité produite consiste à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence telles que les distorsions harmoniques et les déséquilibres de tension et courant.

a) Test sur le groupe électrogène :

- **Les distorsions harmoniques**

Le taux de distorsion, encore appelé distorsion harmonique totale est défini comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace vraie (RMS) de la composante fondamentale. Il peut s'appliquer soit au courant ou à la tension. Cette grandeur permet de caractériser la pollution harmonique que provoquent les différents utilisateurs dans un réseau triphasé.

Le **Tableau 7** présente les valeurs du THD par type de carburant utilisé.

Tableau 7. Taux de distorsion harmonique courant et tension GE seul

	V THD [%]	A THD [%]
100% GAZOLE	2,40	2,85
75%GO-25% HJP	2,26	2,64
50%GO-50% HJP	2,27	2,62
25%GO-75% HJP	2,49	3,43
100% Huile Jatropha Pure	2,29	2,60

- **Déséquilibre de la tension et du courant:**

Le déséquilibre de tension n'est pas une distorsion de forme d'onde. Cependant, il est essentiel d'être attentif aux déséquilibres de tension lors de l'évaluation de la qualité de l'alimentation. Schneider Electric a élaboré une méthode simple pour évaluer un déséquilibre de tension. Il s'agit de calculer la différence entre la tension la plus élevée et la plus basse sur les trois tensions d'alimentation. La valeur trouvée ne devrait pas dépasser 4% de la valeur de la tension la plus basse.

Tableau 8. Déséquilibre de la tension [V] GE seul

	Tension Max RMS [V]	Tension Min RMS [V]	4% * Tension Min RMS [V]	Déséquilibre RMS [V]
100% GAZOLE	234,83	231,31	9,25	3,52
75%GO-25%HJP	284,83	231,21	9,25	3,62
50%GO-50HJP	234,93	231,31	9,25	3,62
25%GO-75%HJP	238,15	231,21	9,25	6,93
100%HJP	234,15	230,11	9,20	4,04

En pourcentage, cela nous donnerais des ordres de grandeurs des déséquilibres de tensions suivants :

Tableau 9. Déséquilibre de la tension [%] GE seul

	V und [%]	A und [%]
100% GAZOLE	0,59	1,18
75%GO-25% HJP	0,53	0,98
50%GO-50HJP	0,57	1,05
25%GO-75% HJP	0,81	2,72
100% HJP	0,59	1,27

b) Test sur le système hybride:

- **Les distorsions harmoniques:**

Nous avons évalué la pollution harmonique de notre réseau lorsque le PV est couplé au générateur électrique. Le **Tableau 10** donne un récapitulatif des différents résultats obtenus.

Tableau 10. Taux de Distorsion harmoniques courant et tension PV/Diesel

	V THD [%]	A THD [%]
100% GAZOLE	2,30	2,47
75%GO-25% HJP	4,68	4,86
50%GO-50% HJP	3,74	4,06
25%GO-75% HJP	2,45	2,77
100% Huile Jatropha Pure	3,22	3,58

- **Déséquilibre de la tension et du courant:**

Le **Tableau 11** donne un aperçu des différentes valeurs du déséquilibre obtenues par type de carburant utilisé lors des essais.

Tableau 11. Déséquilibre de la tension [V] PV/Diesel

	Tension Max RMS [V]	Tension Min RMS [V]	4% * Tension Min RMS [V]	Déséquilibre RMS [V]
100% GAZOLE	236,64	231,21	9,25	5,43
75%GO-25%HJP	248,3	229,41	9,18	18,89
50%GO-50HJP	241,16	229,79	9,19	11,46
25%GO-75%HJP	232,52	231,41	9,26	4,02
100%HJP	241,46	228,71	9,15	12,76

En pourcentage, cela nous donnerais des ordres de grandeurs des déséquilibres de tensions et de courants du **Tableau 12**.

Tableau 12. Déséquilibre de la tension et du courant [%] PV/Diesel

	V und [%]	A und [%]
100% GAZOLE	1,12	2,04
75%GO-25%HJP	4,13	4,99
50%GO-50HJP	2,12	2,76
25%GO-75%HJP	0,56	1,21
100%HJP	1,65	2,27

VI. DISCUSSION ET ANALYSES

Les analyses et discussion se feront en deux grands volets : à savoir celles portant sur les performances du moteur et sur la qualité de l'énergie électrique produite.

1. Performances du moteur:

a) Test sur le groupe électrogène seul :

Ces performances concernent la consommation spécifique, le rendement global lors de l'utilisation du moteur au gasoil, en mélange GO/HJP et à 100% HJP.

Ainsi, nous observons sur la **Figure 6**; selon la nature du carburant utilisé, lorsque le groupe électrogène est sollicité pour des charges inférieures à 40% de sa puissance nominale, sa consommation spécifique est très élevée (**environ 1,9 l/kWh**) ce qui correspond à un faible rendement du moteur compris entre **8% et 12%** (**Figure 7**). Nous avons obtenu une surconsommation de près de **4%** compte tenu du PCI plus faibles des différents carburants (**Tableau 3**). La différence est plus ou moins faible par rapport à celles trouvées par certains auteurs [7], [8], [13] qui stipule que cette surconsommation peut atteindre près de 8%.

Cependant, pour des charges supérieures à 80%, la consommation spécifique du groupe électrogène est d'environ **0,35 l/kWh**. Cela correspond à de bons rendements pour le groupe électrogène compris entre **29% et 33%** (**Figure 7**).

Nous retiendrons donc que les valeurs élevées de la consommation spécifique de l'huile de Jatropha est attribuée à sa son faible PCI [8], [13], [16]. De même, le rendement énergétique de l'huile de Jatropha et des différents mélanges est relativement faible comparé à celui du gasoil entraînant par moment une baisse d'efficacité de près de **6%** ou une hausse d'efficacité de près de **1,2 %**. Les chercheurs expliquent cette baisse de puissance par le fait que le PCI des huiles végétales est inférieur à celui du gazole [8] (**voir Tableau 1**).

Enfin, Il est à constater que la différence de ces résultats s'explique par le type de moteur utilisé (il s'agit ici d'un moteur à injection indirecte), les conditions de fonctionnement et la nature des huiles végétales (propriétés physico-chimiques).

b) Test sur le système hybride :

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 sont évaluées.

Comme mentionné précédemment, les comportements du groupe électrogène et photovoltaïque dans le système hybride sont interdépendants.

A partir des **Figure 9** et **Figure 10** nous constatons que pour des charges de **20%, 40% ; 60% ; 80%** et selon la production PV (**Figure 8**), la consommation spécifique de carburant du groupe électrogène varie respectivement entre : **1,51 à 0,96 l/kWh, 0,6 à 0,9 l/kWh, 0,38 à 0,40 l/kWh** et **0,3 à 0,4 l/kWh**. Pour une production PV élevée, la consommation spécifique des mélanges gasoil/huile de Jatropha augmentent considérablement comparée à celle du gasoil.

De plus, nous remarquons que le rendement du moteur est très élevé pour un fonctionnement au gasoil.

En somme, les résultats obtenus démontrent que pour des faibles charges (moins de 60 % de la puissance nominale du générateur diesel), la contribution du générateur PV qui va de **10% à 39%** en matinée (entre 8h à 12h) et de **15% à 31%** (entre 14h et 17h) pour des valeurs de charge de 1,8 kW et 3,7 kW ne permet pas un fonctionnement optimal du groupe électrogène. Cependant, pour des charges élevées (**supérieure à 80%**), la contribution du générateur PV qui va de **4 % à 21 %** pour une charge de 7.6 kW (durant les mêmes plages horaires que précédemment) n'affecte pas considérablement l'efficacité du groupe électrogène car la consommation spécifique est comprise entre **0,38 à 0,40 l/kWh** et **0,3 à 0,4 l/kWh**.

En fait, comme mentionné par le *Dr. Daniel YAMEGUEU et Al* [17] 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.

En revanche, elles sont assez proche du point de fonctionnement d'un groupe électrogène dans un système hybride (0.33 à 0.36 l/kWh) [17]. La différence de ces résultats peut s'expliquer par un encrassement éventuel de la chambre de combustion du groupe électrogène (voir **Annexe V**).

2. Analyse de la qualité de l'énergie électrique produite:

a) Distorsion harmoniques :

Le THD représente sensiblement l'augmentation de l'effet Joule dans les lignes et les dispositifs.

Au regard, des données issues du **Tableau 7** et **Tableau 10**, nous constatons que pour un fonctionnement au gasoil selon que l'on soit dans les deux configurations, le taux de distorsion harmonique en tension et courant est sensiblement le même. Cependant, ce dernier tend à augmenter lorsque l'on fonctionne partiellement ou totalement avec l'huile de Jatropha dans les deux configurations.

Toutefois, les valeurs du THD dans le système hybride sont élevées comparativement à celles obtenues dans la première configuration (GE seul). Il existe donc une relation entre l'ensoleillement journalier et le taux de distorsion harmonique. Les essais ayant été réalisés en matinée (entre 8h et 12h) et dans l'après-midi (entre 14h et 17h), nous constatons que pour une faible contribution du champ PV, le THD est faible.

Selon la norme **CEI 61000-2-2 [19]**, le taux de distorsion du réseau électrique doit être presque partout inférieur à **2% en HTB, 5% en HTA et 7% en BT [19]**. Dans notre cas d'étude, nous sommes bien en dessous de **7%**. La plus grande valeur du THD obtenu est de **4,70% (cas du mélange 75%GO-25%HJP)**.

Retenons donc que pour un fonctionnement du groupe électrogène seul, le taux de distorsion harmonique est indépendant de la nature du carburant utilisé. Elle ne dépend que de la nature de la charge. En revanche dans le système hybride, le THD est lié à la nature de la charge du réseau, à la production du champ PV et à la nature du carburant utilisé. Pour de faibles charges, si la contribution du PV est grande alors le taux de distorsion harmonique sera plus élevé et l'inverse se produira avec de fortes charges.

b) Déséquilibres de la tension et du courant :

Un système triphasé est dit équilibré ou symétrique si les tensions et les courants triphasés ont la même amplitude et présentent un déphasage de 120° les uns par rapport aux autres. Les causes les plus probables du déséquilibre sont **[20]** :

- Les tensions aux bornes des alternateurs de production,
- Les impédances du système de distribution,
- Les courants absorbés par les charges à travers tout le réseau de distribution.

Les ratios V_{und} (tension) et A_{und} (courant) entre l'amplitude des composantes inverses et directes respectivement de tension et de courant constituent une mesure du déséquilibre (en %). [20].

Ainsi, au regard des résultats consignés dans le **Tableau 9** et le **Tableau 12**, nous constatons que le déséquilibre de la tension et du courant sont plus importants dans le système hybride comparé au fonctionnement du groupe électrogène seul à des charges identiques. Le **Tableau 8** et le **Tableau 11** permettent de mieux apprécier ce déséquilibre en volts selon la méthode préconisée par Schneider-Electric.

Ces écarts du déséquilibre dans les deux configurations sont attribués à l'injection monophasée de la production du champ PV. Durant les périodes de fort ensoleillement, les déséquilibres des phases en tension et intensité seront élevés.

Enfin, notons que les déséquilibres de la tension et du courant peuvent être également liés aux faibles caractéristiques de la combustion (**voir Annexe V**) des huiles végétales, conséquence de leur viscosité élevée et leur faible volatilité (**voir Tableau 1**). La combustion des mélanges GO/HJP et de 100% d'HJP dans le groupe électrogène étant mauvaise (comparée à celle du gazole dans les mêmes conditions) engendre par moment une baisse de la vitesse de rotation du générateur électrique ce qui a pour effet de provoquer une discontinuité sur la production de l'électricité à la sortie de l'alternateur du groupe électrogène.

VII. ANALYSE ECONOMIQUE ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL

1. Analyse économique :

Pour juger de l'intérêt économique de l'huile en génération électrique donc du coût du kWh électrique, une analyse exhaustive de faisabilité n'est pas toujours simple à élaborer par manque de données précises. Afin de permettre une analyse simplifiée d'un projet sans ignorer un des aspects très particuliers relatifs à ce secteur, nous présentons une démarche simplifiée qui permet de vérifier que le projet dégage bien une marge, permettant d'espérer une rentabilité minimum.

Pour ce faire, nous allons estimer le coût du kWh électrique qui sera produit par la centrale hybride de BILGO qui sera située à 16 km de Kamboinsé (Burkina-Faso).

Les coûts d'investissement actualisés des différents composants sont contenus dans le **Tableau 13**

Tableau 13. Coût d'investissement Centrale BILGO

Désignation	Quantité	Prix Unitaire	Coût total TTC (fcfa)	Coût d'investissement total TTC (fcfa)
Groupe électrogène de 22kVA	2		111.184.712	112.230.896
Groupe électrogène de 30kVA	1			
Champ PV de 30 kWc	1			
Kit de bicarburation	3	348.728	1.048.184	

Selon le profil de la courbe de charge journalière du village de BILGO, avec un ensoleillement moyen de 5,32kWh/j (du mois le plus défavorable), nous aurons une répartition de fonctionnement journalier

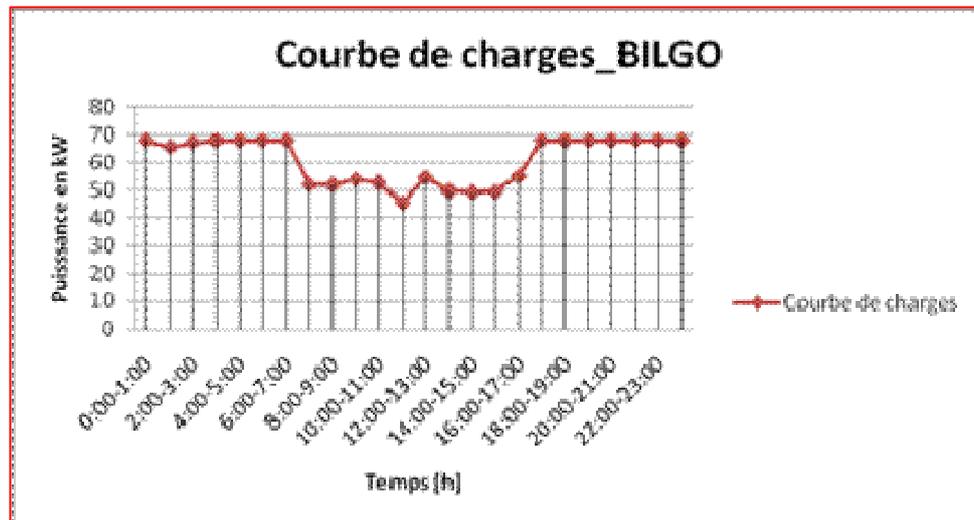


Figure 11. Courbe de charge de BILGO

Nous avons décidé que la répartition des différentes unités de production de la centrale s'effectuera comme définit dans le **Tableau 14**.

Tableau 14. Production électrique de la centrale de BILGO

Sources	Nombre de source en fonctionnement	Plage de fonctionnement journalier [h]	Energie produite journalière [kwh]	
GE 2*22kVA	1	10h-13h	3h	52,8
	2	17h-7h	16h	563,2
GE 30kVA	1	8h-10h & 14h-6h	20h	480
Champ PV 30kWc		8h-16h	8h	504,6

N.B : Le champ PV couvrira 30% de la charge journalière de BILGO qui est de 1.682 kWh soit donc une énergie journalière de 504,6kWh/j. Le litre de gasoil à la pompe est de 732fcfa/l. Nous prendrons le litre d'huile de Jatropha à 650 fcfa/l. Nous supposons que les groupes électrogènes sont en bon

état de marche lors de leurs achats. Par conséquent, la consommation spécifique sera de **0,33l/kWh** [17] pour un fonctionnement au gasoil tandis que pour un fonctionnement à l'huile de Jatropha, il sera de **0,35 l/kWh**.

Nous avons évalué la consommation de gasoil et d'huile végétale consommée au cours de la première année de fonctionnement de la centrale :

Tableau 15. Coût combustibles sur 20 ans

Sources	Nombre d'années de production (ans)	Coût consommation GO (fcfa)	Coût consommation HJP (fcfa)	Coût consommation mélange (25%GO-75%HJP)
GE de 2*22kVA	1	54.461.151	51.562.947	24.224.603
GE 30kVA	1	42.437.261	39.967.200	68.647.610
GE de 2*22kVA	3	163.383.454	154.688.840	72.673.809
GE 30kVA	3	127.311.782	119.901.600	205.942.830
GE de 2*22kVA	20	1.089.223.027	1.031.258.934	484.492.061
GE 30kVA	20	848.745.216	799.344.000	1.372.952.200

En prenant le coût de la maintenance des différents de la centrale à **4%** de l'investissement total du projet sur une période respectivement de **1ans, 3 ans et 20 ans** ainsi qu'un taux de **10 %** pour d'autres coûts spécifiques aux fonctionnements de la centrale.

Tableau 16. Coûts de la Rentabilité du projet

Nombre d'années de production (ans)	Amortissement par année de production (fcfa)	Coût maintenance par année de production (fcfa)	Autres coûts spécifiques (fcfa)	Energie produite par année de production (kWh)
1 ans	111.184.712	4.447.388	5.559.236	585.820
3 ans	37.061.571	1.482.463	1.853.079	1.757.459
20 ans	5.559.236	222.369	277.922	11.716.392

Le coût de revient du kWh électrique est obtenu en sommant les coûts de maintenance, d'amortissement et autres coûts spécifiques sur la capacité de production de la centrale par année. Les différentes valeurs du kWh sont consignées dans le **Tableau 17**.

Tableau 17. Coût de revient du kWh électrique

Nombre d'années de production	PV/Diesel	PV/Huile de Jatropha	Mélange 25%GO75%HJ P
1 ans	182 fcfa/kWh	171 fcfa/kWh	176 fcfa/kWh
3 ans	167 FCFA/kWh	158 FCFA/kWh	160 FCFA/kWh
20 ans	165 FCFA/kWh	156 FCFA/kWh	159 FCFA/kWh

2. Impact environnemental :

Pour estimer la quantité de CO₂ produite lors de l'utilisation d'HVP Jatropha à la centrale de BILGO, nous allons calculer **la quantité de CO₂ produit par kWh**.

Nous avons consigné dans le **Tableau 18**, les différentes valeurs du facteur d'émissions de CO₂ produit par filière.

Tableau 18. Facteur d'émission de CO₂ produit par filière

	Gazole	Biocarburant
Facteur d'émission de CO₂ par filière	1,18 kgCO_{2eq}/kWh	2,7 kgCO_{2eq}/l

Nous obtenons ainsi les résultats suivants :

Tableau 19. Quantité de CO2 produite au Gasoil

Nombre d'années de fonctionnement de la Centrale	Energie produite (kWh)	Quantité de CO2 produite (t CO _{2eq})
1 ans	585.820	691
3 ans	1.757.459	2.074
20 ans	11.716.392	13.825

Pour estimer la quantité de CO2 produite lors de l'utilisation d'HVP Jatropha, nous allons considérer un facteur d'émission de **2,7 kg de CO₂/litre de gazole brûlé [26]** lors de la combustion. Ce volume correspond au volume d'huile que l'on a utilisé pour produire 1kWh électrique. Le **Tableau 20** nous donne les résultats obtenus

Tableau 20. Quantité de CO2 produite avec l'HJP

Nombre d'années de fonctionnement de la Centrale	Energie produite (kWh)	Volume d'huile de Jatropha consommé (l)	Quantité de CO2 produite (t CO _{2eq})
1 ans	585.820	383,6	1,036
3 ans	1.757.459	1150,8	3,11
20 ans	11.716.392	23016	62,14

La quantité de CO2 évitée par l'utilisation d'huile de Jatropha en génération électrique est définie dans le :

Tableau 21. Quantité de CO2 évitée

Nombre d'années de fonctionnement de la Centrale	Quantité de CO2 évitée (t CO _{2eq})
1 ans	689,9
3 ans	2 071
20 ans	13 773

VIII. CONCLUSIONS

La réduction de la pauvreté passe inéluctablement par l'accès aux services énergétiques. De nos jours, les systèmes hybrides solaire/biomasse (biocarburants) sont porteurs d'avenir pour les projets d'électrification des zones rurales en Afrique subsaharienne. Pour ce faire, l'utilisation des HVP dans les moteurs Diesels aura constitué une partie de la réponse à ce défi.

L'utilisation de l'huile végétale dans la centrale hybride FLEXY-ENERGY s'est faite dans un moteur (groupe électrogène) diesel SDMO de puissance maximale 9,2 kW. Ce moteur n'étant pas adapté à l'huile, des modifications ont été effectuées sur le moteur à travers la réalisation d'un kit de bicarburant. La technologie utilisée à cet effet est simple et son prix de revient est dérisoire (350.000FCFA) par rapport au coût onéreux des kits industriels proposés par différentes sociétés et dont les technologies sont difficilement accessibles à des populations rurales.

Des tests techniques ont été réalisés sur le moteur diesel avec des charges résistives. Il ressort de ces tests que la consommation spécifique du moteur en huile de Jatropha pure comme en gazole décroît avec l'augmentation des charges tandis que le rendement énergétique du moteur et la température des gaz d'échappement croît avec les charges du moteur. Toutefois dans le système hybride PV/Diesel (HVP) la consommation spécifique et le rendement ainsi que la production du PV sont étroitement liés. Une forte contribution du champ PV impactera négativement sur les performances du groupe électrogène pour des charges faibles tandis que pour des charges élevées, la contribution du générateur PV (faible ou élevée) n'influencera pas considérablement les performances du groupe diesel.

Enfin, la qualité de l'énergie électrique et les façons de la contrôler sont au centre des préoccupations des entreprises d'énergie. La génération d'électricité à partir du gazole et/ou de l'huile végétale a permis de montrer que le taux de distorsion harmonique qui caractérise sensiblement l'augmentation de l'effet Joule dans les lignes et les dispositifs électriques dépend de la nature de la charge appliquée au générateur électrique, et de la production du PV (dans un fonctionnement en système hybride PV/Diesel). Il ressort également que les déséquilibres de la tension et du courant sont relativement faibles (**1,8 % lors d'un**

fonctionnement du GE seul et 2,6% lors du fonctionnement en hybride) comparé aux valeurs prescrites par la norme EN 50160 dans les deux types de configurations. Même si nous avons constaté que ces derniers sont largement importants dans la configuration hybride car influencé par la production du PV qui est injectée sur une seule phase du réseau.

L'estimation du coût de production électrique, a permis de constater que l'utilisation à 100% d'huile de Jatropha pure est économiquement plus intéressante (**171 FCFA/kWh**) que celui obtenu en mélange [25%Gazole-75% huile de Jatropha] (**176 FCFA /kWh**) ou au gazole (**182 FCFA/kWh**) pour la première année de fonctionnement de la centrale. Tandis que sur une période de production de 20ans, ces coûts s'élèveront à **156 FCFA/kWh** à 100% d'HJP, **159 FCFA/kWh** en mélange et **161 FCFA/kWh** pour un fonctionnement au gazole.

Enfin, l'huile utilisée à la place du gazole dans le moteur permet d'économiser d'énormes quantités de CO₂ qu'aurait engendrée l'utilisation du gazole. L'utilisation d'huile de Jatropha dans un moteur diesel pour la production d'électricité est très intéressante à plus d'un titre : économiquement, à travers son prix du kWh compétitif par rapport au gazole. Sur le plan social, elle engendre la création de nombreux emplois sur le site de production d'huile et sur le plan environnemental permet de réduire l'impact environnemental causé par l'utilisation des énergies fossiles et en terme de production d'électricité que la qualité de l'énergie électrique produite est relativement la même que celle avec le gazole à court terme.

IX. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

La méthode de bicarburation utilisée exige pour une utilisation continue du moteur, un opérateur pour la surveillance des temps de basculement au HJP-gazole lors de la fin des manipulations. L'automatisation de ces paramètres ainsi que la mise en place d'une signalisation lumineuse sur le boîtier de commande du kit de bicarburation reste envisageable. Ainsi, L'utilisation d'huile à la place du gazole est bénéfique mais oblige une rigueur au niveau de l'entretien du moteur qui nécessite une vidange après 200h. Après le démarrage du moteur au gazole, il est nécessaire d'attendre cinq minutes pour atteindre la stabilisation du régime électrique du moteur avant de mettre en marche le boîtier du kit de bicarburation. Il faudra encore attendre cinq minutes avant de charger le groupe électrogène.

Pour régler le thermo-contact, il suffit de charger le moteur à la charge voulue ensuite il faudra tourner la molette du thermo-contact jusqu'à trouver l'optimum de basculement.

Le réseau électrique des sites ou le système d'acquisition/supervision sera installé n'est pas forcément alimenté en continu. Par conséquent, le système d'acquisition/supervision devra pouvoir fonctionner sur batterie et/ou relié à une alimentation de secours afin d'éviter toute perte de données.

La qualité de l'électricité est devenu un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, etc. Afin de mieux juger de la qualité de l'électricité produite à partir d'huile végétale, il serait judicieux de réaliser des tests par type de carburant sur des périodes allant de deux semaines à un mois. Il faudra donc avoir un profil de charge réelle d'un site quelconque car les villages non électrifiés n'ont pas de données historiques de la consommation électrique. A partir de cela, il sera possible d'étudier tous les problèmes liés à l'alimentation électrique (variation de fréquence, creux de tensions, Flicker, Harmoniques, déséquilibres, etc).

Bibliographie

Ouvrages et articles

- [1] **Parfait Tatsidjodoung, Marie-Hélène Dabat et Joël Blin**, “Insights into biofuel development in Burkina Faso: Potential and strategies for sustainable energy policies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 12, 2012.
- [2] **Pierre JANIN et François de Charles OUEDRAOGO**, “Enjeux des agro carburants au Burkina Faso : le cas du *Jatropha curcas* L.” 2009.
- [3] **International Energy Agency**, “World Energy Outlook (WEO),” IEA, Rapport annuel, 2012.
- [4] **AUDOUIN Sarah**, “Le potentiel de production d’agrocaburants au Burkina-Faso : une approche territoriale,” Belfort (FRANCE), 2012, p. 16.
- [5] **Ministère de l’Agriculture, de l’Hydraulique et des Ressources Halieutiques**, “Opportunités de développement des biocarburants au Burkina-Faso.” Dec-2008.
- [6] **A. Hamidat, A. Hadj Arab et M. Belhamel**, “Etude et réalisation d’une mini-centrale photovoltaïque hybride pour l’électrification du refuge Assekrem,” vol. 10, no. 265–272, p. 8, 2007.
- [7] **Cirad**, “Guide technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales.” CIRAD, 2009.
- [8] **Dr. Sayon.S. Sidibé et Dr. Dr. Joël. Blin**, “Huiles végétales pures comme carburant dans le moteur diesel Etat de connaissance.” 2iE, 2009.
- [9] **Philippe GIRARD et Al**, *Guide technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales dans les pays de la CEDEAO*, L’Harmattan. 2iE.
- [10] **P. F. ADIKPETO**, “Mise en place de tests technico-économiques sur la plate-forme biocarburant : de la production à l’utilisation de l’huile de *Jatropha* dans un moteur,” 2ie-Centre Songhai, Mémoire de fin d’étude Master M11, 2010.
- [11] **Dimaista**, “Etude des moteurs thermiques.”
- [12] **Jean TRAPY**, “Moteur à allumage commandé.” Techniques de l’Ingénieur, traité Génie mécanique, 1997.

- [13] **G. VAITILINGOM**, "Performance globales théoriques des moteurs Diesels alimentés par des huiles de tournesol ou de colza." 2005.
- [14] **Jean.-Luc. PALLAS**, "Guide pratique d' Entretien et réparation des moteurs Diesel." Loisirs Nautiques.
- [15] **Dr. S.Sidibé, Dr. J. Blin**, "Etude comparée du délai d'inflammation des huiles végétales de Jatropha et de coton préchauffées et non préchauffées et du gasoil," Doctoriales 2iE, 2013.
- [16] **Patrick ROUSSET et Al**, *Guide technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales.* 2009.
- [17] **Daniel YAMEGUEU, Yao AZOUMAH, Xavier PY**, "Étude expérimentale et économique d'un système hybride solaire photovoltaïque/diesel sans stockage pour une production décentralisée d'électricité." 2iE, 2011.
- [18] **2iE**, "Conception du kit de bicarburant labélisé 2iE."
- [19] **Schneider-Electric**, "Les sept types de problèmes d'alimentation."
- [20] **European Copper Institute**, "Perturbations de Tension _ Introduction au déséquilibre." Mai-2002.

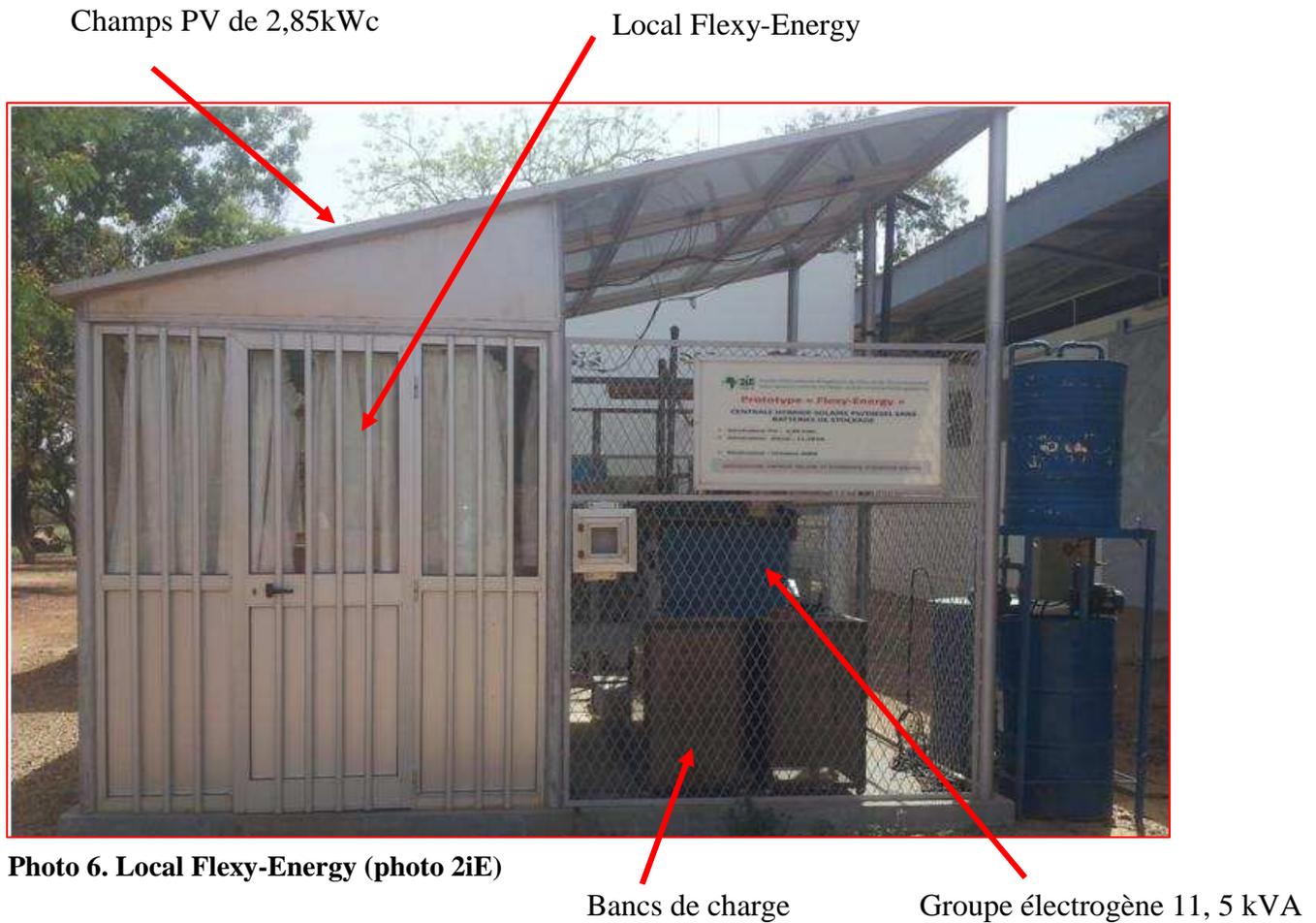
Sites internet

- [22] www.iea.org ; consulté le 01 Avril 2013
- [23] www.schneider-electric.com; consulté le 06 Mai 2013
- [24] www.volta-electricité.info; consulté le 16 Mai 2013
- [25] www.ademe.fr , consulté le 01 Juin 2013
- [26] www.total.fr, consulté le 04 Juin 2013

X. ANNEXES

Annexe I. Prototype « FLEXY-ENERGY ».....	53
Annexe II. Recette d'instrumentation	54
Annexe III. Facture proforma kit de bicarburation 2iE	55
Annexe IV. Centrale d'acquisition de données (e-reader)	56
Annexe V. : T° fumées _ Essais au PV/Diesel.....	57
Annexe VI. Exemples et solutions aux problèmes électriques.....	58

Annexe I. Prototype « FLEXY-ENERGY »



Annexe II. Recette d'instrumentation

Tableau 22. Recette d'instrumentation

Nom	Mesurande	Plage mesurande	Type capteurs	Conditionneur	Etendue mesure	Unité	Signal sortie	Alimentation	Voie T°C	Voie tension	Voie courant	TOR	N° Voie	
T° échapp	Température	20-600°C	Tc	OUI	0-650°	°C	4- 20mA	NON			1		1	
T° ambiante	Température	20-50°C	Pt100	NON	0-100	°C		NON	1				2	
T° culasse	Température	20-300°C	Tc	OUI	0-600	°C	4- 20mA	NON			1		3	
Q entrée	Débit	0.5-15l/mn		NON		l/h		OUI				1	4	
Q sortie	Débit	0.5-15l/mn		NON		l/h		OUI				1	5	
Compteur d'énergie	Energie (active & réactive)	0-50A	Compteur d'énergie	NON	10Wh/impulsion	kWh						1		
I/phase	Intensité	0-120 A	Transfo de courant +TRIAD2	NON	0-150	A					3		6	
U/phase	Tension	0-400V		NON	0-400	V								7
Cos phi	Cos phi			NON	0-1									8

Annexe III. Facture proforma kit de bicarburation 2iE

FACTURE PROFORMA

OBJET : Conception de boîtier de commande pour projet de bicarburation

CLIENT : Fondation 2iE

Rubrique	Désignation	Nombre	Coût unitaire	Total
Technicien (Electronicien)	Honoraire conception dimensionnement montage	2hj	10 000	20 000
Equipement et matériel	Boîtier	1	15 000	15 000
	Plaque pré sensibilisée	1	1000	1000
	LED (verte, rouge, jaune)	3	100	300
	Bornier	8	100	800
Total			37 100 FCFA	
TVA 18%			6 678 FCFA	
TTC			43 778 FCFA	

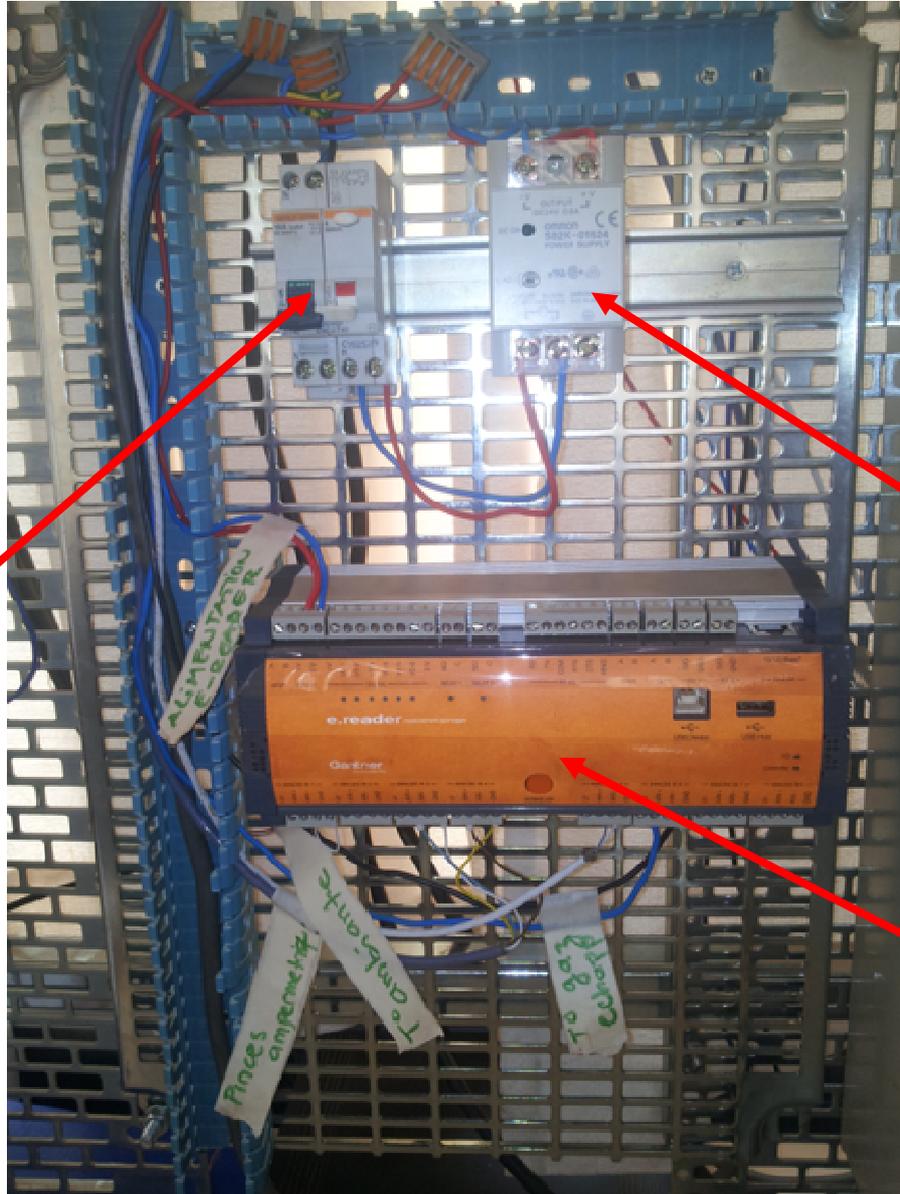
Le concepteur Le client

KABORE Leif

Figure 12. Facture proforma du kit de bicarburation 2iE

Annexe IV. Centrale d'acquisition de données (e-reader)



Disjoncteur 1A

Redresseur
230V (AC)/24 V (DC)

Centrale
d'acquisition de
données (e-reader)

Photo 7. Centrale d'acquisition de données

Annexe V. : T° fumées _ Essais au PV/Diesel

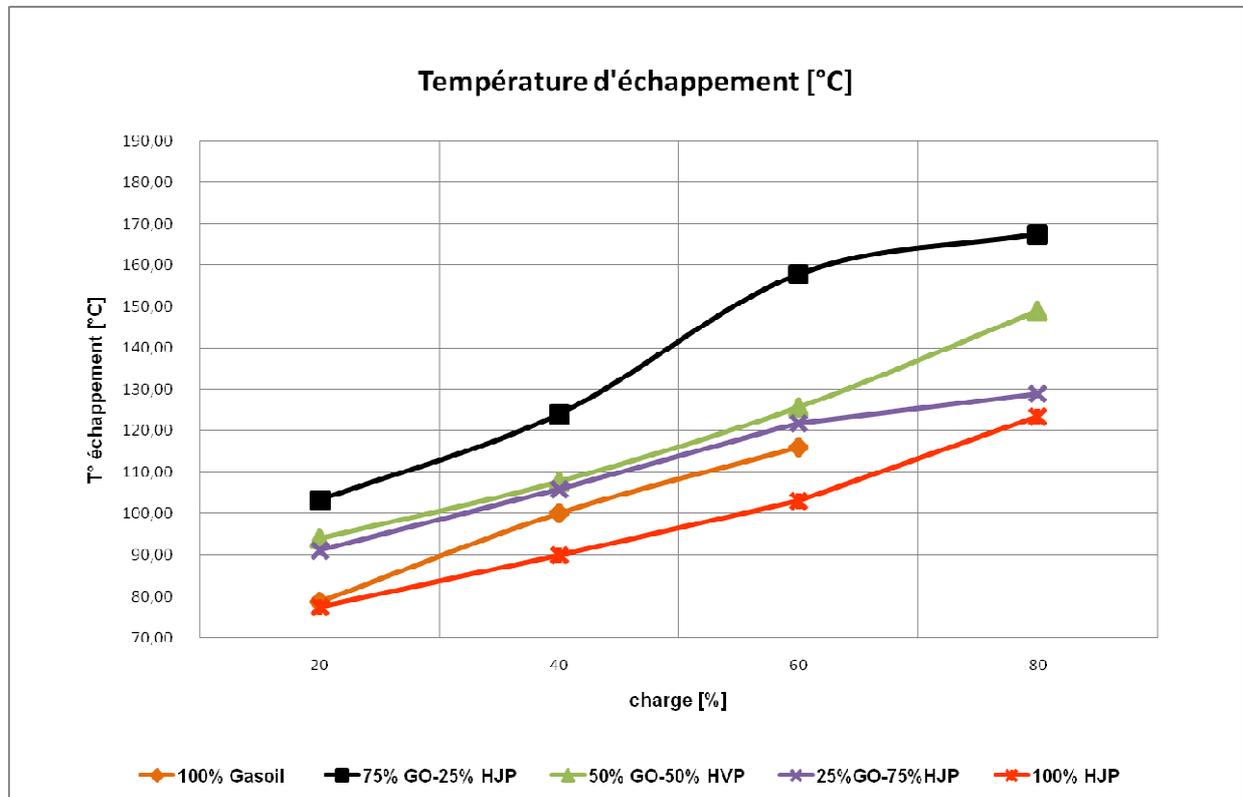


Figure 13. Evolution de la T° gaz échappement en fonction de la charge

Annexe VI. Exemples et solutions aux problèmes électriques

Tableau 23. Résumé et Solutions aux problèmes électriques

Types de perturbation	Origines	Conséquences	Exemples de solutions (équipement spécifiques et modifications)
Variations et fluctuations de tension	Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc...).	Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).	Compensateur électromécanique d'énergie réactive, compensateur automatique en temps réel compensateur électronique série, régulateur en charge.
Creux de tension	Court-circuit, commutation de charges de forte puissance (démarrage moteur...).	Perturbation ou arrêt du procédé : pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage de moteurs, extinction de lampes à décharge.	ASI, compensateur automatique en temps réel, régulateur électronique dynamique de tension, démarreur progressif, compensateur électronique série. Augmenter la puissance de court-circuit (Pcc). Modifier la sélectivité des protections.
Coupures	Court-circuit, surcharges, maintenance, déclenchement intempestif.		ASI, permutation mécanique de sources, permutation statique de sources, groupe à temps zéro, disjoncteur shunt, téléconduite.
Harmoniques	Charges non linéaires (variateurs de vitesse, fours à arc, machines à souder, lampes à décharge, tubes fluorescents...).	Surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité.	Self anti-harmonique, filtre passif ou actif, filtre hybride, inductance de ligne. Augmenter la Pcc. Confiner les charges polluantes. Déclasser les équipements.
Inter-harmoniques	Charges fluctuantes (fours à arc, machines à souder...), convertisseur de fréquence.	Perturbation des signaux de tarification, papillotement (flicker).	Réactance série.
Surtensions transitoires	Manœuvre d'appareillages et de condensateurs, foudre.	Verrouillage de variateurs de vitesse, déclenchements intempestifs, destruction d'appareillage, incendies, pertes d'exploitation.	Parafoudre, parasurtenseur, enclenchement synchronisé, résistance de préinsertion, self de choc, compensateur automatique statique.
Déséquilibres de tension	Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance...).	Couples moteurs inverses (vibrations) et surchauffement des machines asynchrones.	Equilibrer les charges. Compensateur électronique shunt, régulateur électronique dynamique de tension. Augmenter la Pcc.