

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering



ADAPTATION D'UN MOTEUR DIESEL A L'UTILISATION D'HUILE VEGETALE PURE (HVP) COMME CARBURANT : APPLICATION AU PROTOTYPE « FLEXY ENERGY ».

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER SPECIALISE GENIE ELECTRIQUE,
ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES (MSGEEER).
OPTION : GENIE ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES (GEER)**

Présenté et soutenu publiquement le 26 Septembre 2011 par **Dodji AGBEZO**

Travaux dirigés par:

Dr Yao AZOUMAH

Enseignant chercheur, UTER GEI, LESEE

Dr Joël BLIN

Enseignant chercheur, UTER GEI, LBEb

M. Daniel YAMEGUEU

Doctorant LESEE

Dr Sayon SIDIBE

Post-Doctorant, LBEb

Jury d'évaluation du stage:

Président : Dr Yao AZOUMAH

Membres et correcteurs : Dr Sayon SIDIBE

M. Daniel YAMEGUEU

CITATION

« L'utilisation d'huiles végétales comme carburant pour moteurs peut sembler insignifiante aujourd'hui, mais ces huiles deviendront bientôt aussi importantes que le pétrole et le goudron de charbon »

“The use of vegetable oils for engine fuels may seem insignificant today, but such oils may become in the course of time as important as petroleum and the coal tar products of the present time”.

Rudolf Diesel, Patent application, 1912

REMERCIEMENTS/DEDICACES

Je voudrais remercier vivement:

- *L'éternel Dieu tout puissant, pour toute sa grâce et son amour envers moi.*
- *Le Président du jury -----, Pour avoir accepté de présider ce jury malgré ses multiples occupations.*
- *Monsieur **Paul GINIES**, Directeur Général de l'institut international de l'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE) pour l'opportunité qu'il offre à tous les étudiants africains de pouvoir réaliser leur rêve.*
- *Mon directeur de mémoire docteur **Yao AZOUMAH**, responsable LESEE, à qui je témoigne toute ma reconnaissance de m'avoir fait confiance en me permettant de faire mon stage sur une phase du concept « Flexy Energy » qui lui tenait à cœur, de son appui scientifique, sa disponibilité et de ses sacrifices durant ce stage.*

- *Mon co-directeur de mémoire le docteur **Joël BLIN**, responsable LBEB ; pour sa disponibilité, son attention et ses conseils malgré ses occupations.*

- *Mes encadreurs docteur **Sayon SIDIBE** et Monsieur **Daniel YAMEGUEU** pour tout leur soutien et leur présence malgré leurs occupations ; leurs conseils et leur appui technique à tout moment où j'en avais besoin. Que Dieu vous bénisse !*
- *Professeur **Yézouma COULIBALY**, Chef de l'UTER GEI.*
- *Mme Dr **Mariam PABYAM**, Responsable Pédagogique du Master Spécialisé GEEER, pour sa disponibilité et ses conseils durant notre formation.*
- *Monsieur **Henry KOTTIN** pour son suivi et sa disponibilité*

- *Monsieur **Madieumbe GAYE***

- *Monsieur **Athanase KONSEIBO** et son épouse, ma famille d'accueil à qui je ne saurais attribuer toute ma gratitude et ma reconnaissance pour leur soutien et leur hospitalité.*

- *Officier **AGBEZO Georgette Abra**, ma grande sœur, pour sa confiance et tous ses conseils.*

- *Tout le personnel du LESEE et du LBEB pour leur assistance ;*
- *Et enfin à tous mes camarades de promotion pour leur soutien inconditionnel et l'ambiance conviviale au cours de notre formation .Bonne chance à tous !*

RESUME

La filière biocarburant serait une des solutions à la substitution progressive des produits pétroliers en zones rurales et périurbaines.

Le présent document traite la possibilité d'utiliser de l'huile végétale pure (huiles de Jatropha ou de coton par exemple) comme carburant dans un moteur Diesel d'une centrale hybride PV/Groupe électrogène sans stockage d'énergie; la méthode d'adaptation préconisée est la bicarburation et l'huile retenue pour ce projet est l'huile de Jatropha. L'étude a été faite durant quatre mois de stage au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Énergie (LESEE) de la fondation 2IE sur le prototype Flexy Energy (centrale hybride PV/groupe électrogène) ; ce prototype est installé sur le site de la fondation 2IE de Kamboinsé localité située à 15 Km de Ouagadougou.

Un kit semi-automatique de bicarburation dont le coût s'élève à 308 880 FCFA a été conçu et réalisé pour équiper le groupe électrogène de la centrale hybride. Une fois réalisé, des essais ont été effectués à l'huile de coton (vu l'indisponibilité de l'huile de Jatropha à cette période de l'année). Au cours de ces essais, les performances du système hybride avec l'huile de coton ont été évaluées.

Les résultats ont montré qu'il y a une surconsommation de l'huile de coton de plus que le gasoil (pour une charge de 80% de la puissance nominale du groupe électrogène, sa consommation spécifique avec l'huile de coton est 356,8 g/KWh contre 290,7g/KWh avec le gasoil). De même ces résultats ont permis de déterminer le point de fonctionnement optimal du système hybride en fonction de la puissance demandée et de l'ensoleillement.

En outre, l'analyse des résultats a permis d'évaluer une quantité de 140,94 Kg de CO₂ évité par jour (soit 51114,6 Kg de CO₂ évité par an) et le coût du KWh de 116 FCFA avec l'huile de Jatropha contre 165 FCFA avec le Gasoil (soit une baisse du coût du KWh produit de 29%).

Mots clés: Huile végétale pure, Kit de bicarburation, centrale hybride, expérimentation.

ABSTRACT

Biofuels may be one solution to the substitution of liquid petroleum products (diesel fuel) in rural and urban peri-urban zones. This study is focused on the possibility of using pure vegetable oil (Jatropha or cottonseed oils for example) as fuel in a diesel engine of a hybrid power station PV/Diesel without energy storage. The adaptation method used in this study is the bi-carburation and the chosen biofuel is the Jatropha oil. The study was made during four months of internship at the Solar Energy and Energy Saving Laboratory (SEESL) of the 2IE foundation on hybrid/Diesel power plant prototype. This prototype is set-up on the site of the International Institute of Engineering of Water and of the Environment in Kamboinsé (locality situated 15 Km from Ouagadougou).

A semi-auto bi-carburation kit at a costing of 308 880 FCFA was designed and set-up on the diesel engine of the hybrid power station. Once completed, tests were conducted with cottonseed oil (owing to the unavailability of the Jatropha oil at this time of year). During these tests, the performances of the hybrid system with cottonseed oil have been assessed.

The results showed that there is an over-consumption of cottonseed oil more than the gasoil (for a charge of 80% of the diesel generator rated power, its specific fuel consumption with cottonseed oil is 356.8g/ kWh against 290.7g /kWh with gasoil). Also, through these tests the optimal operating point of the hybrid system depending on power demand and sunshine profiles has been founded.

In addition, the study made shows that the utilization of the cottonseed oil lead to a saving of 140.94 Kg of CO₂ saved per day (51,114.6 Kg of CO₂ saved per year) comparative to the gasoil and a KWh cost 116 FCFA against 165 FCFA for the gasoil (a decrease in the cost of KWh produced by 29%)

Key words: Pure vegetable oil, bi-carburation kit, hybrid power station, experimentation.

LISTE DES ABREVIATIONS

2ie : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.

CIRAD: Centre International de Recherche Agronomique et de Développement

CO: Monoxyde de Carbone

CO₂: Dioxyde de Carbone

CSE: Consommation Spécifique

EV : Electrovanne.

GE : Groupe Electrogène

GES : Gaz à Effet de Serre

GEI : Génie Energétique et Industriel

HVP : Huile Végétale Pure

HVB: Huile Végétale Brute

HJP : Huile de Jatropha Pure

HCP : Huile de Coton Pure

LBEB : Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant

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

NO_x: Oxydes d'azote

ppm : Partie par million

Pac : Puissance à la sortie de l'onduleur

PV : Photovoltaïque

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

SONABEL : Société Nationale d'Electricité du Burkina.

UEMOA : Union Economique et Monétaire Ouest Africain.

UTER : Unité Thématique d'Enseignant et de Recherche

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1: les paramètres mesurés et leurs méthodes de mesure..... | 24 |
| Tableau 2: les résultats du pré-test | 25 |
| Tableau 3: Performances journalières de la centrale hybride sous profil de charges..... | 36 |
| Tableau 4: quantité de CO2 évitée. | 36 |
| Tableau 5: coûts d'investissement de la centrale hybride. | 38 |
| Tableau 6: coût du KWh produit | 38 |
| Tableau 7: coûts de fonctionnement actualisés. | 38 |
| Tableau 8: Production d'énergie de la centrale hybride sur 20 ans..... | 38 |
| Tableau 9: Caractéristiques physico-chimiques des HVPs [28]..... | 46 |
| Tableau 10: Indice d'iode des différentes huiles végétales[31]. | 47 |
| Tableau 11: Prénorme DIN 51605 pour la production d'huile carburant [9]..... | 48 |
| Tableau 12: Normes euros (panorama 2008-IFP) [32]..... | 48 |
| Tableau 13: Coût de réalisation du kit de bicarburation à commande semi-automatique..... | 52 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1: Fruits de Jatropha | 5 |
| Figure 2: injection directe (Extrait de.....) | 9 |
| Figure 3: injection indirecte..... | 9 |
| Figure 4: groupe Flexy-LESEE | 10 |
| Figure 5: dépôts et encrassement des pistons [16] | 11 |
| Figure 6: Nature des rejetés lors d'une combustion | 11 |
| Figure 7: zone de compromis des charges [17]. | 12 |
| Figure 8 : Schéma de fonctionnement d'un moteur diesel sans adaptation..... | 16 |
| Figure 9: Schéma de fonctionnement d'un moteur diesel avec adaptation [LESEE-LBEB].. | 16 |
| Figure 10: filtre de l'HVP..... | 17 |
| Figure 11: Pompe..... | 17 |
| Figure 12: Réservoir de l'HVP | 17 |
| Figure 13: les tubes en Té et les colliers..... | 17 |
| Figure 14: montage des composants..... | 17 |
| Figure 15: réservoir sur son support | 17 |
| Figure 16: Interrupteurs de Basculement..... | 17 |
| Figure 17: électrovannes montées sur le circuit | 18 |
| Figure 18: Electrovanne 3 voies..... | 18 |
| Figure 19: Schéma d'installation du kit..... | 18 |
| Figure 20: GE sans kit de bicarburant | 19 |
| Figure 21: montage du support du réservoir..... | 19 |
| Figure 22: installation des composants du circuit carburant et de basculement..... | 19 |
| Figure 23: GE avec bi-réservoir | 19 |
| Figure 24: (a) local du prototype, (b) modules PV, (c) onduleur sunny boy, (d) GE triphasé de 11,5KVA muni d'un kit de bicarburant..... | 21 |
| Figure 25: schéma général du prototype..... | 22 |
| Figure 26: (a) multimètre, (b) sonde du solarimètre installé sur la toiture | 22 |
| Figure 27: écran du pupitre du GE | 23 |
| Figure 28: (a) onduleur sunny boy, (b) sunny Webbox..... | 23 |
| Figure 29: profil de charges..... | 24 |
| Figure 30: organigramme de la procédure..... | 27 |
| Figure 31: Ensoleillement moyen journalier | 28 |
| Figure 32: Consommation spécifique du GE au Gasoil [23]..... | 28 |
| Figure 33: Corrélation linéaire de la puissance et de la consommation horaire du GE (huile de coton en bleu et Gasoil en rouge). | 29 |
| Figure 34: Consommation spécifique du GE (en fonctionnement avec de l'HCP à gauche et avec du Gasoil à droite) | 30 |
| Figure 35 : Courbes de charge constante 7,2 KW | 31 |
| Figure 36 : Courbes de charge constante 5,4 KW | 31 |
| Figure 37 : Courbes de charge constante 3,6 KW | 32 |
| Figure 38 : Courbes de charge constante 1,8 KW | 32 |
| Figure 39 : Courbes sous profil de charges variables | 33 |
| Figure 40 : Comparaison entre le système hybride et le GE seul | 33 |

| | |
|---|----|
| Figure 41:profil de charges d'un site isolé | 36 |
| Figure 42: Système hybride PV-Diesel parallèle sans stockage..... | 37 |
| Figure 43 : courbes d'émission de CO2 en fonction de la charge..... | 39 |
| Figure 44 : étapes de traitement des oléagineux [27] | 46 |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |
| 1. Contexte et Problématique..... | 1 |
| 2. Objectifs de l'étude..... | 2 |
| 3. Méthodologie et organisation du travail | 2 |
| 4. Présentation de la structure d'accueil : 2IE et LESEE | 3 |
| PREMIERE PARTIE : Synthèse bibliographique..... | 4 |
| I. Contexte | 4 |
| II. Les huiles végétales carburant accessibles au Burkina Faso | 5 |
| II.1. Production, économie et consommation | 5 |
| II.2. Bilan énergétique des HVP | 7 |
| II.3. Conclusion et choix de l'huile végétale pure retenue | 7 |
| III. Approche technologique du moteur diesel : Méthodes d'adaptation | 7 |
| III.1. Généralités sur les moteurs diesels | 8 |
| III.1.1. Moteurs à injection indirecte | 9 |
| III.1.2. Moteurs à injection directe | 9 |
| III.2. Caractéristiques du groupe électrogène du prototype Flexy-Energy | 10 |
| III.3. Problèmes liés à l'utilisation des HVP dans les moteurs diesel | 10 |
| III.3.1. La viscosité..... | 10 |
| V.3.2. Influence des paramètres chimiques de l'huile | 10 |

| | |
|--|----|
| III.4. Solutions aux problèmes d'utilisation des HVP dans les moteurs diesel : méthodes d'adaptation et choix..... | 11 |
| III.4.1. Préchauffage de l'huile..... | 12 |
| III.4.2. Mélange huile/gazole | 12 |
| III.4.3. La Bicarburation..... | 13 |
| IV. Conclusion et choix de la méthode d'adaptation..... | 14 |
| DEUXIEME PARTIE : Adaptation du moteur | 15 |
| I. Réalisation du kit de Bicarburation | 15 |
| I.1. Conception..... | 15 |
| I.2. Phases de réalisation | 17 |
| II. Réalisation..... | 18 |
| TROISIEME PARTIE : Tests sur le réglage de basculement du kit de bicarburation..... | 20 |
| I. Introduction | 20 |
| II. Etas des lieux | 20 |
| II.1. Situation géographique du site | 20 |
| II.2. Description du prototype | 20 |
| III. Equipements du prototype Flexy Energy | 21 |
| III.1 La centrale hybride PV/GE sans stockage | 21 |
| III.2. Acquisition des données | 22 |
| IV. Méthodes : Tests sur le prototype..... | 23 |
| IV.1. Les protocoles de mesures | 24 |
| IV.2. Séquence des essais | 26 |
| IV.3. Organigramme de la procédure | 26 |
| V. Résultats, Analyses et Discussions..... | 27 |
| V.1. Performances du champ PV | 27 |
| V.2. Performance du groupe électrogène seul | 28 |
| V.3. Système hybride PV/GE | 30 |
| V.3.1. Résultats | 30 |

| | |
|--|----|
| V.3.2. Analyses et Discussions | 34 |
| V.4. Conclusion et proposition de conditions de fonctionnement optimal avec l'HVP. | 34 |
| QUATRIEME PARTIE : Etude du couplage solaire/biocarburant et gasoil (étude environnementale et économique)..... | 35 |
| I. Introduction | 35 |
| II. Analyse environnementale de la centrale solaire/huile de coton pure. | 36 |
| III. Analyse économique..... | 36 |
| IV. Avantages environnementaux et socio-économiques de la substitution du gasoil par les biocarburants (huile végétale pure ou biodiesel). | 39 |
| IV.1. Avantages environnementaux..... | 39 |
| IV.2. Avantages socio-économiques..... | 40 |
| IV.3. Conclusion | 40 |
| Conclusion Générale et perspectives | 41 |
| Références bibliographiques..... | 43 |
| ANNEXES..... | 45 |
| Annexe 1 : Généralités sur les huiles végétale carburant | 46 |
| 1. Production des huiles végétales pures (cas de l'huile de Jatropha)..... | 46 |
| 2. Etude comparative et propriétés des HVP et le Gasoil..... | 46 |
| 2.1. Propriétés physico-chimiques des huiles végétales carburant | 46 |
| 2.2. Qualité des huiles carburant et normes | 48 |
| Annexe 2 : Description des éléments physiques du moteur Diesel. | 49 |
| Annexe 3 : Cycle du moteur Diesel à quatre temps. | 50 |
| Annexe 4 : Protocole de manipulation du Kit de bicarburation | 51 |
| Annexe 5 : Coût de réalisation du kit de bicarburation. | 52 |

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte et Problématique

De récentes estimations ont montré qu'actuellement, plus de la moitié de la population mondiale vit en zone rurale dont près de 90 % (environ 2.5 milliards) dans les Pays En Développement¹. L'Afrique présente le taux d'électrification le plus faible du monde en développement avec 35,5 % de la population électrifiée en 2002 lorsque l'Asie du Sud est à 42,8 %, l'Amérique Latine est à 89,2 %, l'Asie de l'Est est à 88,1 % et 91,8 % au Moyen Orient¹. Seulement 7 % de la production mondiale d'électricité pourrait couvrir les besoins fondamentaux de ces populations ce qui paraît peu par rapport aux enjeux. De plus, en Afrique subsaharienne dont le Burkina Faso, le taux d'électrification rurale est généralement autour de 14,3 % [1]. L'un des objectifs les plus importants de l'UEMOA est de promouvoir le développement des huiles végétales biocarburants, notamment pour la lutte contre le changement climatique (accords de Kyoto), la diminution de la dépendance énergétique et la lutte contre la pauvreté. La plupart des pays membres en particulier le Burkina Faso, satisfont leurs besoins en électricité grâce à des centrales thermiques essentiellement et dépend à 67% (100% pour le transport) des produits pétroliers [2].

Et pourtant l'Afrique regorge d'un énorme potentiel énergétique peu exploité ; le Maghreb, les pays sahéliens et l'Afrique australe (74% du continent africain) reçoivent un ensoleillement moyen annuel supérieur à 1900 KWh /m²/an et environ 25% de la biomasse totale mondiale est disponible en Afrique [3]. La combinaison des énergies renouvelables avec les énergies fossiles pour la production de l'énergie dans les zones isolées constitue une offre attractive du point de vue économique et environnemental, incluant des réductions considérables de consommation de carburant d'origine fossile, de la taille des installations PV et du prix de l'énergie produite [4].

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 et en particulier au Burkina Faso. Pour ce faire, l'utilisation des huiles végétales pures (HVP) dans les moteurs Diesels (GE) représente une partie de la réponse à ce défi. C'est dans cette vision que s'inscrit le concept « **Flexy Energy** » initié par l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2IE) à travers son Laboratoire d'Energie Solaire et d'Economie d'Energie (LESEE). La réalisation du concept « Flexy Energy » passe par quatre phases principales à savoir :

- **Phase 1** : substitution de 35% de la production de la centrale thermique par du solaire PV ;

¹ Banque Africaine de Développement et le Centre de Développement de l'OCDE, Perspectives économiques en Afrique, 2005-2006.

- **Phase 2** : substitution de 50% (des 65% de capacité de production de la centrale à base de fossile) par des biocarburants ;
- **Phase 3** : substitution de 100% les énergies fossiles par les biocarburants, maîtrise totale des procédés utilisant les biocarburants ;
- **Phase 4** : une énergie renouvelable et moins chère pour les ruraux, un accès plus facile aux populations démunies via la dissémination du concept en milieux ruraux.

Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre de la deuxième phase du concept ci-dessus cité et passe par une bicarburantation du moteur Diesel (Groupe électrogène).

En vue d'étendre ce concept à une échelle plus grande et de contribuer à l'accès durable de l'énergie dans nos pays africains, le présent mémoire qui porte sur « l'adaptation d'un moteur diesel à l'utilisation d'huile végétale pure comme carburant : application au prototype de Flexy Energy » s'inscrit dans le sens d'une évaluation qualitative et quantitative de la production électrique de la centrale. De même que l'évaluation des aspects positifs et/ou négatifs de la substitution des énergies fossiles (gasoil) par les biocarburants (HVPs).

2. Objectifs de l'étude

Cette étude, qui porte sur un prototype de système hybride PV/groupe électrogène installé sur le site du 2iE de Kamboinsé a pour objectifs spécifiques de :

- ✓ Adapter le groupe Diesel du prototype « Flexy Energy » à l'utilisation d'huile végétale pure (HVP) comme carburant.
- ✓ Expérimenter et Analyser les résultats et les impacts de la substitution du gasoil par l'huile végétale pure (HVP) dans le moteur.

3. Méthodologie et organisation du travail

Les travaux du présent mémoire de fin d'étude se sont déroulés selon la chronologie ci-après :

- **La recherche bibliographique**: Cette partie décrit les différentes méthodes d'adaptation et les possibilités d'utilisation des huiles végétales pures comme carburant dans les moteurs diesels. Tous les problèmes et solutions liés à l'utilisation de ces huiles dans les moteurs seront évoqués pour enfin retenir une solution appropriée sur de bases claires. Le choix de l'huile végétale à utiliser sera arrêté à ce niveau sur la base d'arguments clairs et objectifs.

- **Conception et réalisation**: Dans cette partie, il est d'abord question de faire un inventaire de tous les éléments indispensables à la réalisation d'un kit de bicarburantation. Ensuite l'aspect conceptuel est abordé pour permettre de faire un choix justifié et réalisable dans un contexte d'utilisation d'huile végétale comme carburant dans un moteur Diesel.

- **Manipulations:** Il s'agit de faire des essais sur le système réalisé en vue d'étudier et de vérifier les performances du GE seul et du système hybride (Test sur le réglage de basculement du kit de bicarburation).

- **Etude environnomicque du couplage solaire/HVPet gasoil:** Faire une étude comparative du moteur en fonctionnement au gasoil et à l'huile végétale pure retenue (taux de pénétration solaire, production électrique totale, coût de production du kWh d'électricité selon le type de carburant, les impacts socio-économique et environnementaux de chaque scénario).

4. Présentation de la structure d'accueil : 2iE et LESEE

Ce stage de fin d'étude qui est soumis à notre étude est une initiative du LESEE (Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie) situé sur le site 2iE de Kamboinsé à environ 15 km de Ouagadougou. Il fait partie des six laboratoires de recherche de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) et dépend de l'Unité Thématique de Recherche et d'Enseignement Génie Energétique et Industrielle (UTER GEI). Créé en novembre 2008, le LESEE est depuis lors dirigé par le docteur Yao AZOUMAH.

L'objectif scientifique du LESEE est de contribuer à l'innovation industrielle dans le domaine du solaire pour une production et une utilisation rationnelle d'énergies électrique / thermique en Afrique.

Les travaux effectués au laboratoire sont relatifs à quatre grands axes de recherche :

- Evaluation précise et continue de la ressource solaire et des besoins en énergie en Afrique
- Etude des centrales solaires à concentration
- Habitat, architecture bioclimatique et systèmes solaire PV/thermique (basse température)
- Conception optimale et optimisation thermodynamique des systèmes énergétiques

L'équipe actuelle de recherche au LESEE est composé de 03 enseignants chercheurs, 04 doctorants, 06 ingénieurs chercheurs et une douzaine de stagiaires.

PREMIERE PARTIE : Synthèse bibliographique

I. Contexte

L'objectif visé du concept Flexy Energy est de sécuriser et d'accroître l'accès aux services énergétiques modernes, efficaces, abordables et propres des populations des zones rurales et péri-urbaines. Ce concept qui consiste à produire de l'électricité décentralisée en utilisant une centrale hybride² solaire/ groupe électrogène (gasoil ou biocarburants) sans stockage (dans les batteries) de manière flexible et économique, dans le but de faire une substitution progressive du gasoil (avec lequel la centrale produit au départ) par des ressources renouvelables (les huiles végétales pures) [5]. Au fait, il existe plusieurs configurations de systèmes hybrides solaire PV/ GE : configuration en série, configuration commutée et configuration parallèle. Ces systèmes possèdent généralement un système de stockage (batteries) ce qui augmente d'avantage les coûts d'investissements de l'installation et cause des problèmes environnementaux en fin de vie (absence de structure de recyclage), ce que cherche à éviter le concept Flexy Energy.

Ce scénario est intéressant et innovant car le générateur photovoltaïque et le groupe électrogène présentent des caractéristiques complémentaires : le coût initial pour le PV est élevé, comparé à celui du groupe électrogène ; les coûts d'exploitation et de maintenance du PV sont faibles, relativement à ceux du groupe électrogène ; l'énergie produite par le GE est disponible à tout moment, pendant que celle du PV varie en fonction de l'ensoleillement. L'intérêt du concept Flexy Energy, qui est une première dans le domaine des systèmes hybrides dans la sous-région et en Afrique, à cause de son non stockage d'énergie et de la substitution progressive du gasoil par les huiles végétales, se situe à plusieurs niveaux à savoir :

- l'amélioration du taux d'électrification rurale (accès de l'énergie à moindre coût) ;
 - l'évitement des problèmes environnementaux ;
 - la réduction de la taille du champ PV, et des coûts d'exploitation et de maintenance du GE ;
 - la lutte contre la pauvreté. Ce qui constitue un apport incontestable au développement durable.
- Par ce concept, les biocarburants (HVPs) apportent de manière complémentaire une voie de réduction à court terme des émissions de gaz à effet de serre et représentent la première alternative aux produits pétroliers dans ce secteur. Les huiles végétales peuvent être utilisées comme carburant dans les moteurs Diesels (groupe électrogène) conçus préalablement pour fonctionner au gasoil, en remplacement ou en mélange avec le gasoil et nous devons donc les adapter (deuxième partie). Ce fonctionnement du groupe électrogène (quand il fonctionne seul) en HVP passe par une bicarburantation du moteur diesel sur laquelle beaucoup d'études ont été entreprises au cours des

² Les systèmes hybrides combinent l'utilisation d'au moins deux sources d'énergies différentes, par exemple un système PV couplé à un groupe électrogène.

travaux de thèse de Dr. Sayon SIDIBE au sein du Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (LBEB). Par contre dans un système hybride PV/GE, les performances et les conditions de fonctionnement doivent être étudiées, afin de maîtriser et d'appréhender l'influence du système PV sur le fonctionnement du kit de bicarburant.

II. Les huiles végétales carburant accessibles au Burkina Faso

Les substances à partir desquelles sont produites les huiles sont soit des graines ou des amandes soit des fruits. L'huile est extraite par des procédés plus ou moins complexes dans des usines de trituration ou des huileries artisanales.

En fait, 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 [9]. Parmi les graines de plantes cultivées pour leur huile, les plus connues sont : l'arachide, le colza, le ricin, le tournesol, le coton et le lin.

Quant aux fruits oléagineux et aux amandes, ils proviennent principalement du cocotier (noix de coco), du palmier à huile, de l'olivier et du pourghère (*Jatropha curcas* : voir figure1). En effet, seules les huiles de coton et de *Jatropha* sont produites au Burkina Faso ; les autres sont importées des pays voisins côtiers et européens ou asiatiques.



Figure 1: Fruits de *Jatropha*

II.1. Production, économie et consommation

- A l'échelle mondiale

Le marché mondial des huiles végétales représente 86 millions de tonnes, dont 50 % d'huile de soja et de palme. Le colza et le tournesol viennent ensuite, mais avec seulement 10 et 13 millions de tonnes, dont 1,4 en France, soit 1,6 % de la production mondiale d'huile végétale [6]. L'Afrique est le troisième grand producteur d'huile de palme sur le plan mondial après la Malaisie et l'Indonésie avec 13,180 millions de tonnes en 2003 et une prévision d'environ 125 millions de tonnes en 2015, selon une étude faite par la FAOSTAT (Food and Agriculture Organisation of the United States) [6]. Le prix de revient moyen des huiles végétales pure au niveau international est de 600 à 700 € pour 1000 litres, ce qui situe ces produits pour des usages énergétiques, dans une

fourchette comprise entre 60 et 70 €/MWh (sortie usine, hors transport), à comparer au prix du fuel actuellement entre 50 et 55 €/ MWh rendu [7]. L'intérêt économique de l'utilisation énergétique de ces huiles n'est établi qu'avec une valorisation des tourteaux (sous-produit du pressage des oléagineux) en alimentation animale, amendement organique, combustion...

- **Au Burkina Faso**

Les 30 000 tonnes/an d'huile de coton produit sont insuffisantes et sont destinées à l'alimentation. Dans ce contexte, affecter des ressources à une production d'oléagineux à des fins de biocarburant va à l'encontre de la sécurité alimentaire. La culture du Jatropha, non alimentaire, s'affranchit de cette problématique. Parmi les potentiels de plantes oléagineuses, seule la graine de Jatropha constitue aujourd'hui la ressource pour démarrer une production de biocarburants au Burkina Faso. Elle serait actuellement cultivée sur 70 000 ha depuis deux ans environ. La production de graines des premières années a été utilisée comme semence. Et nous devons attendre que ces superficies commencent à produire d'une façon effective à partir de 2011-2012 [7]. Suivant les échanges avec les producteurs (BELWET et Commune de Boni), l'huile de Jatropha a un rendement de 1800 litres/ha/an en moyenne.

De nos jours au Burkina Faso, le prix à la pompe du gasoil est compris entre **630 et 700 FCFA/l** sans compter le transport terminal qui serait de **30 à 40 FCFA/l** alors que le prix de l'huile de Jatropha varie entre **500 et 600 FCFA le Litre** [7], selon la disponibilité des graines (ce prix est de 400 FCFA au Bénin et à Kita au Mali). Nous pouvons affirmer que le prix de l'huile végétale, tourne autour de **70% du prix du diesel** au Burkina Faso [7].

La transformation de cette HVB en biodiesel³ à grande échelle n'étant pas envisageable avant 2015 [7], il ne reste donc que deux possibilités d'utilisation de cette huile :

- soit comme carburant de moteurs stationnaires (Diesel) ayant un régime constant équipé d'un système de bicarburant.

Ces moteurs (inventé à l'origine pour ce type de carburant)⁴ existent au niveau du Burkina Faso à la SONABEL, dans les centres d'électrification décentralisée ou les grosses motopompes.

Pour cette dernière catégorie un protocole de préchauffage et de finition au gasoil devra être appliqué (pour une utilisation à 100 % HVP) ;

- soit en mélange avec le gasoil dans une proportion de 30 à 40 % pour les mêmes utilisations sur des moteurs de plus petites puissances (motopompes, tracteurs,...) [8].

³ Le Biodiesel: C'est de l'huile végétale qui a été modifiée chimiquement par réaction de trans-estérification avec un alcool (ex : le méthanol)

⁴ 1891, Rudolph Diesel procède à des essais sur ses moteurs (les moteurs Diesel) avec de l'HVB. Il est convaincu que l'huile végétale a un fort potentiel, au même titre que le pétrole et le charbon.

Le mélange d'HVB dans le gasoil destiné au transport n'est pas envisagé, car le régime des moteurs dans lequel ce mélange sera utilisé est variable, avec des risques d'encrassement. C'est pour cette raison que la qualité « biodiesel » (ester d'HVB) est destinée aux énergies de transport [9]. Les débouchés pour cette production sont donc la SONABEL et les électrifications rurales décentralisées (ERDs).

II.2. Bilan énergétique des HVP

Le rendement énergétique est égal au rapport entre l'énergie récupérée par l'utilisation et énergie utilisée à la production [8]. Le rendement de l'huile végétale est égal à 6,3 pour 1 unité d'énergie fossile utilisée (essentiellement engrais et carburants pour la culture) [10], alors que Le gasoil a un rendement énergétique égal à 0,8 [11]. Ce qui montre un meilleur bilan carbone de l'HVP par rapport au gasoil. Une étude commanditée par l'ADEME et réalisée avec les données spécifiques pour les départements de l'Ain et de la Drôme (France) par Ecobilan-PricewaterhouseCoopers en 2001 avait conduit à des résultats plus intéressants : environ 7,8 unités pour le colza, et de 10,9 unités (Ain) à 13,3 unités (Drôme) pour le tournesol.

II.3. Conclusion et choix de l'huile végétale pure retenue

Au terme de cette analyse, nous retiendrons que parmi toute la gamme d'HVP rencontrée sur le marché l'huile de Jatropha sera retenue vue ses atouts incontestables non alimentaire et moins chère localement comparée aux autres HVPs (huiles de palme et de coton), bien qu'il est encore difficile de la trouver à certain moment de l'année sur le marché.

L'utilisation d'huile de Jatropha (produite sur place comme carburant), permettra de réaliser une économie substantielle (avec 550 FCFA le litre d'huile de Jatropha par rapport à 700 FCFA le litre de gasoil) [8]. Le fait de pouvoir réduire l'importation de gasoil (et donc la dépendance des pays producteurs de pétrole) et de favoriser la production locale d'huile de Jatropha sera tout bénéfique pour le Burkina Faso qui verra sa production d'huile de Jatropha augmenter. De nouvelles perspectives s'offriront à ce pays avec de nombreuses conséquences favorables dans les zones rurales, donnant ainsi un caractère équitable (socio-économique) au concept Flexy-Energy. Le but de ce paragraphe a été de faire le point sur les plans économique et énergétique, et bien sûr de faire le point sur la situation des ressources disponibles d'HVPs en Afrique et surtout au Burkina Faso.

III. Approche technologique du moteur diesel : Méthodes d'adaptation

Les constatations marquantes qui ressortent des caractéristiques physico-chimiques des huiles végétales (voir annexe1 pour les détails) sont les suivantes :

- la viscosité de l'huile de Jatropha est très élevée : plus de 10 fois celle du gazole, à température égale ;
- le PCI et l'indice de cétane de huile de Jatropha sont plus faibles que ceux du gazole ;
- le point éclair, le point de fusion et le point de trouble des huiles végétales sont élevés comparés à ceux du gazole.

Les observations précédentes indiquent que l'utilisation d'huiles végétales telles que celles comme carburants diesels est, non pas impossible, mais difficile. Ainsi, la maîtrise de la technologie des moteurs est essentielle pour étudier les possibilités d'utilisation de l'huile de Jatropha comme carburant. C'est l'objet de ce paragraphe qui fait le point sur les moteurs diesels en général et les problèmes majeurs dus à l'utilisation des HVP dans ceux-ci; nous ferons ressortir éventuellement les différentes méthodes d'adaptation (rencontrées dans la littérature) pour remédier à ces problèmes, avant de retenir une plus appropriée à base d'hypothèses claires.

III.1. Généralités sur les moteurs diesels

Les moteurs diesels sont des moteurs à combustion interne constitués d'un ou de plusieurs cylindres dans lesquels a lieu la combustion grâce au mouvement des pistons. Ils ont pour rôle de transformer de l'énergie chimique du combustible en énergie mécanique grâce à la combustion. Les moteurs diesel fonctionnent selon le principe du cycle à quatre temps qui comprend les phases suivantes : admission, compression, inflammation-détente et échappement (voir annexe 3) :

-premièrement, au temps d'admission le moteur aspire de l'air lorsque la soupape d'admission s'ouvre ;

-deuxièmement, l'air est comprimé et la pression peut avoisiner 40 bars, valeur à laquelle le mélange peut s'enflammer [12]. En fin de compression, une charge de gasoil est injectée à haute pression dans la chambre de combustion où la température atteint 600°C, ce qui provoque l'auto inflammation.

-troisièmement, l'inflammation entraîne la combustion (inflammation-détente).

-quatrièmement, c'est l'échappement des gaz de combustion et des imbrûlés dans les fumées.

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. Chaque cycle correspond à deux tours de vilebrequin. Le temps au cours d'un cycle est généralement exprimé en degrés angulaires de rotation du vilebrequin (°V).

Ainsi, au régime de 3000 tr/mn par exemple, 1°V représente 0,056 ms ; un cycle, soit 2 tours de moteur s'effectue en 40 ms. La description complète des éléments physiques du moteur diesel est donnée en annexe 2.

Selon le mode d'injection du combustible, les moteurs Diesels se classent en deux catégories : les moteurs à injection directe et les moteurs à injection indirecte.

III.1.1. Moteurs à injection indirecte

Les véhicules automobiles diesels avec ou sans turbo et les gros moteurs industriels équipés de bougies de préchauffage sur lesquels on a obligation de faire préchauffer le carburant avant la combustion. Ce sont des moteurs dits à injection indirecte car l'injecteur n'injecte pas directement dans le cylindre mais dans une préchambre (chambre auxiliaire où débute la combustion). Pour qu'ils fonctionnent correctement, le carburant et l'air doivent être correctement mélangés dans la préchambre avant de rejoindre la chambre de combustion principale (Figure 3). Ces types de moteurs acceptent bien l'HVP à 100% [13] sans autres modifications que le tarage des injecteurs et le réglage de la pompe d'injection. Ils sont aussi équipés de bougie de préchauffage et fonctionnent à température élevée 500°C à 600°C dès 10% de la puissance délivrée [13], la pression d'injection varie entre 120 et 180 bars. Ils ont comme avantage d'être increvables et de fonctionner à des températures très élevées mais comme inconvénients de ramer dans les côtes (sauf les turbos), de fumer dans les régimes transitoires à l'accélération [10].

III.1.2. Moteurs à injection directe

Ces moteurs équipent la plupart des tracteurs agricoles depuis 25 ans, les camions et les moteurs statiques industriels (groupes électrogènes). Ils sont équipés d'une pompe injection rotative HP manuelle (avec des éléments électroniques et parfois même un calculateur). La pompe à injection distribue le carburant successivement à chaque cylindre en ouvrant les injecteurs les uns après les autres par la pression du gazoil mais l'injecteur injecte directement dans le cylindre de la chambre de combustion (Figure 2). Ces moteurs ne sont pas (en général) équipés de bougies de préchauffage, il n'est pas nécessaire de préchauffer le moteur pour démarrer. Leur pression d'injection est comprise entre 180 et 250 bars. Ils sont de consommation plus faible, très fiables, moins de ruptures des joints de culasses. Mais comme inconvénient, leur température de chambre de combustion est faible (délais d'inflammation des HVPs plus longs et les problèmes d'encrassement) [10]. 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) [14].

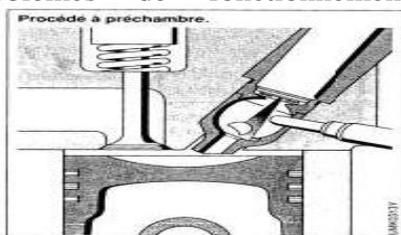


Figure 3: injection indirecte

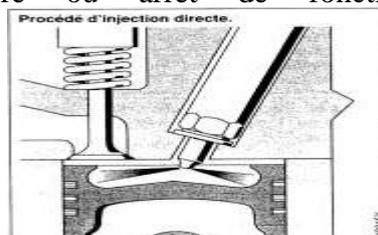


Figure 2: injection directe (Extrait de Cahiers Techniques Bosch)

III.2. Caractéristiques du groupe électrogène du prototype Flexy-Energy

- Type : SDMO T12K
- Puissance : 11,5 KVA / 9,2 KWe
- Cosφ : 0,8
- Tension : 400/230V
- Fréquence : 50 Hz
- Courant nominal : 14,5A
- Courant de standby : 16,6A
- Vitesse : 1500 tr/min
- Injection : Indirecte
- Conso. moyenne : 0,331 litre par kwh à 80% de charge.



Figure 4: groupe Flexy-LESEE

III.3. Problèmes liés à l'utilisation des HVP dans les moteurs diesel

La plus part des travaux déjà réalisés dans le domaine ont conclu que les problèmes de substitution des huiles végétales au gasoil sont surtout dus à leur viscosité élevée et ensuite viennent le point éclair (volatilité), le PCI faibles et l'influence des paramètres chimiques des huiles (polymérisation, acidité...).

III.3.1. La viscosité

La viscosité des huiles végétales est 9 à 17 fois supérieure à celle du gasoil à température ambiante, ce qui montre que les HVPs sont extrêmement visqueuses [15]. Ce caractère visqueux pose des problèmes de pompage et d'écoulement à travers la tuyauterie et entraîne un colmatage du filtre par les gomme, mais également une détérioration des caractéristiques du jet injecté dans la chambre de combustion.

Dans la même vision, A.S. Ramadhas et al ont prouvé que la viscosité élevée peut entraîner la fuite de combustible dans la pompe d'injection (gouttelettes trop grosses) et que l'augmentation de la pression du système, affecte l'injection pendant la pulvérisation de jet [15].

V.3.2. Influence des paramètres chimiques de l'huile

L'acidité élevée conduit souvent à la contamination de l'huile de lubrification (polymérisation) entraînant l'échauffement excessif du moteur ; cause de rupture de celui-ci. Les photos de la figure 5 montrent le problème de dépôt et d'encrassement des pistons après 10 heures de fonctionnement avec l'huile de tournesol lorsque la température à l'intérieur de la chambre de combustion est supérieure ou égale à 500°C [13].

La présence d'eau dans le carburant, quel qu'il soit, pourra poser des problèmes tout au long du circuit de carburant (réservoir, filtre, etc.). Ce paramètre est donc à surveiller et dépendra de l'humidité de la graine et des conditions de stockage de l'huile [14].



Figure 5: dépôts et encrassement des pistons [16]

Au cours du paragraphe qui va suivre nous allons faire le point sur ces différentes méthodes d'adaptation des moteurs Diesels pour enfin retenir celle qui sera la plus pertinente au vu de nos conditions d'utilisation.

III.4. Solutions aux problèmes d'utilisation des HVP dans les moteurs diesel : méthodes d'adaptation et choix.

Nous pouvons dire de ce qui précède que des détériorations mécaniques sont possibles si nous laissons le moteur fonctionner à l'HVP à froid.

De plus, hormis les influences de la composition chimique des HVPs que sont les délais d'inflammation et les problèmes d'encrassement, nous notons également les rejets en CO, NOx et HC qui sont plus importants que ceux rejetés lors de la combustion du gasoil mais on remarque une nette amélioration lorsque la température est supérieure à 500°C [16]. Les travaux effectués au LBEB, dans le cadre de la thèse du Docteur S. SIBIBE, montrent que pour un moteur en pleine charge (ou au moins supérieur à 70% de la puissance nominale), la combustion des huiles végétales émet légèrement moins de CO et de NOx (Figure 6). Ces conditions de fonctionnement améliore plutôt les performances du moteur et garantit la durée de vie du GE comme si nous avions les conditions de fonctionnement normales [27] (avec du gasoil en temps normal). Selon le Dr. SIDIBE toujours, la viscosité élevée des HVPs n'est pas la principale source des dépôts goudronneux dans le moteur comme la littérature l'affirme.

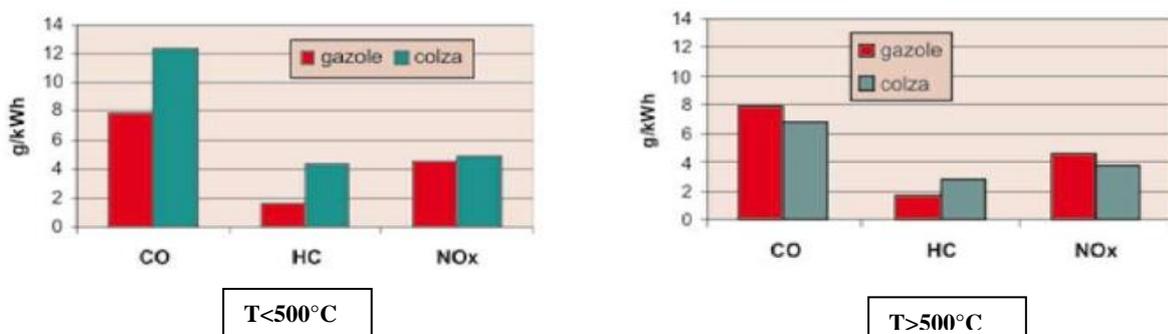


Figure 6: Nature des rejetés lors d'une combustion

En fin, pour optimiser les performances des moteurs fonctionnant aux HVPs et éviter de rejeter plus de gaz polluants, nous ne devons pas perdre de vue la zone de compromis (Figure 7) pour les charges, entre 60% et 70% de la charges maximale [17].

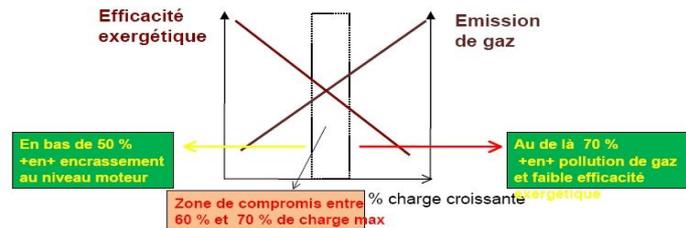


Figure 7: zone de compromis des charges [17].

Pour remédier aux problèmes liés aux caractéristiques physico-chimiques des HVPs, plusieurs méthodes d'adaptation sont disponibles en plus du préchauffage (viscosité élevée) et se regroupent en quatre modes qui sont :

- Utilisation directe de l'HVP en Bi carburant ;
- mélange huile/gazole (<30% de l'HVP, sans modification) ;
- La trans-estérification de l'HVP (plus adapté aux moteurs de véhicules, transport);
- Modification complète de la chambre de combustion (plus chère⁵ et plus adaptée au moteur à injection indirecte) [18].

III.4.1. Préchauffage de l'huile

La viscosité élevée des huiles végétales reste un problème majeur à résoudre pour qu'elles puissent être utilisées comme carburant. Il a été constaté des travaux de K. Pramanik [19] que la viscosité de l'huile de Jatropha diminue remarquablement avec l'augmentation de la température, et elle devient comparable au gasoil à des températures supérieures de 75 °C.

En effet, la viscosité de l'HVP est fortement dépendante de la température. Agarwa et al ont d'ailleurs montré dans une de leurs publications [20] que la viscosité de l'huile de jatropha diminuait remarquablement avec l'augmentation de la température pour s'en approcher de celle du gasoil au voisinage de 90°C. De leur côté, D. Agarwal et A.K. Agarwal [20] ont expérimenté que la viscosité élevée de l'huile de Jatropha peut être réduite par chauffage (autour de 80°C) en utilisant les gaz d'échappement du moteur ou le liquide de refroidissement du moteur via un échangeur à plaque et aussi en utilisant des résistances chauffantes.

III.4.2. Mélange huile/gazole

Le taux du mélange de l'huile végétale ne doit pas être élevé ; selon C.D. Rakopoulos et al [21], 10 à 30% de mélange d'huile dans le gasoil peut être utilisé sans aucune modification, mais au-

⁵ Environ 4000 Euro/2 624 000 FCFA, [conférence Internationale « Enjeux et perspectives des Biocarburants pour l'Afrique », Ouagadougou, Burkina Faso, 27-28 Novembre 2007].

delà de ce taux il se pose un problème de durabilité des composants qui pourra conduire à un dysfonctionnement du moteur.

III.4.3. La Bicarburantion

L'une des voies la plus simple d'utilisation des HVP sans modification interne du moteur est la bicarburantion (évite l'utilisation jusqu'à plus de 90% les carburants d'origine fossile) ; car la solution de mélange huile/gazole n'élimine pas la forte dépendance aux produits pétroliers et celle de la trans-estérification doit prendre en compte l'énergie consommée lors de la transformation de l'HVP sans oublier le coût du transport vers les zones isolées et aussi la petite quantité de biodiesel produite est surtout destinée aux moteurs de transport (à cause de ses caractéristiques très proches du gasoil).

Par ailleurs, l'HVP produite localement peut être utilisée directement sans d'autres coûts additionnels avec la bicarburantion.

Le principe de base d'un montage de bicarburantion gasoil/huile végétale consiste à installer un 2ème circuit carburant en parallèle de celui existant; cela permet de toucher le moins possible au circuit d'origine. On peut donc revenir à un fonctionnement normal au gasoil à tout moment. En fait, au démarrage (moteur froid) et à l'arrêt le moteur fonctionne avec du gasoil puis un passage à l'HVP lorsque le moteur s'échauffe. Ceci nécessite donc une utilisation à plus de 70% de la puissance maximale des moteurs diesels si nous voulons atteindre une température de 500°C dans la chambre de combustion.

Tant que la température de la chambre de combustion est inférieure à la température de fonctionnement normal du moteur (450°C à 500°C selon le type de d'injection), le moteur reste alimenter en gasoil et dès que la température dépasse ce seuil, un système de basculement automatique (ou manuel) pilote une électrovanne électrique (ou vanne manuelle) qui alimente le moteur grâce au circuit huile végétale pure.

Le pilotage du système de basculement peut s'effectuer en contrôlant deux paramètres : la température des gaz d'échappement ou la charge du moteur diesel.

Les essais de A. Murugesan et al [22] ont montré que la température des gaz d'échappement augmente avec l'augmentation de la charge du moteur diesel. Lorsque le moteur diesel fonctionne à 75% de sa puissance maximale une température des gaz d'échappement supérieure à 300°C, a été observée. K. Pramanik [19] a trouvé la valeur élevée de la température de gaz d'échappement de 554°C avec de l'huile de Jatropha en pleine charge du moteur diesel, tandis que la valeur correspondante avec le Gasoil est de 425 °C seulement.

Cette option semble être la plus appropriée car nous pouvons contrôler les deux paramètres (charges du moteur ou température de gaz d'échappement).

Mais, dans d'autres cas la présence d'une source d'alimentation « réseau 230Vac » et la température de l'HVP (à l'aide d'une sonde placée sur le circuit d'huile) sont les paramètres de basculement (kit de la société AEDEN en France).

On installe une électrovanne 3 voies en amont immédiat de la pompe d'injection pour sélectionner le gasoil, moteur froid, puis l'huile végétale biocarburant quand la chambre de combustion du moteur est en température normale de fonctionnement (moteur chaud). Bref, sur le deuxième circuit nous avons : Réservoir-Pompe-Filtre-Electrovanne-Pompe d'injection (moteur).

IV. Conclusion et choix de la méthode d'adaptation.

Au terme de notre étude sur les HVPs et la technologie des moteurs, il ressort que la carburation à l'huile végétale n'est efficace que lorsque le moteur diesel est suffisamment chaud (tournant à une charge autour de 70% de sa puissance nominale), seule condition pour éviter les pertes de puissance et à une rupture du moteur (dépôt, encrassement et plus d'émissions polluants). La température (450 à 500°C) dans la chambre de combustion et la pression de tarage de l'injecteur (180 à 250 bars) jouent un grand rôle du point de vue performances dans le moteur lors d'un fonctionnement en huile végétale. Ces paramètres doivent être maîtrisés si nous devons nous attendre à un bon rendement. Pour cela, nous avons pensé à un système de bicarburation adapté sur tous les types de moteurs Diesels du fait, de la maîtrise du système, de la rapidité d'accès des composants et le coût du matériel d'adaptation.

Pour l'adaptation du moteur du prototype Flexy Energy (paragraphe suivant), nous retiendrons le montage d'un kit de bicarburation avec la charge ou la température des gaz d'échappement comme paramètres de basculement et à l'utilisation de l'huile de coton pure. D'un autre côté, l'utilisation de l'huile de coton dans le GE va contribuer à l'amélioration des performances environnementales du concept Flexy Energy en plus des émissions de CO₂ économisées par le champ PV ; en ce sens que la contribution des biocarburants au réchauffement climatique dû à l'effet de serre est insignifiante.

DEUXIEME PARTIE : Adaptation du moteur

Dans un souci de conception d'un kit de bicarburation fiable et sécurisant avec des équipements plus efficaces, une enquête sur les marchés de Ouagadougou a été menée en vue de compléter les composants disponibles.

En fait, pour réaliser un kit de bicarburation, nous avons deux choix possibles selon le type de basculement :

- **soit un kit à basculement manuel** moins cher (prix de revient inférieure à 100 000FCFA) et disponible localement. Le basculement est assuré par des vannes manuelles et un opérateur (qui choisit le type de carburant gasoil ou HJP).

- **soit un kit à basculement automatique « kit standard »** (prix compris entre 700 000 et 1300 000FCFA) plus sécurisant et permettant une souplesse de fonctionnement du moteur. Son basculement est assuré par des électrovannes commandées par un boîtier électronique de gestion qui remplace l'opérateur.

Réaliser un kit de bicarburation semi-automatique avec les mêmes éléments que celui conçu en Europe (kit automatique standard) est aussi une approche pour réduire le coût d'acquisition et minimiser donc le coût du KWh. Pour cette option, un certain nombre d'éléments peuvent manquer notamment l'électrovanne et le boîtier électronique de gestion. Pour notre étude nous réaliserons un kit semi-automatique sans boîtier de gestion mais avec des électrovannes uniquement couplé à des interrupteurs. En fait, pour des projets destinés au monde rural où le niveau de vie est faible, un kit semi-automatique serait plus économique et moins onéreux.

I. Réalisation du kit de Bicarburation

La réalisation du kit de bicarburation est abordée dans cette partie. Il s'agit de faire ressortir les différentes étapes qui nous ont conduits à la réalisation de cette technologie avec les équipements ainsi identifiés dans les différents marchés de la ville de Ouagadougou et en France. Ensuite, il s'agit de procéder au montage du kit de bicarburation ainsi réalisé.

I.1. Conception

Dans la recherche d'un partenariat entre le LBEB-2IE et elle, la société SARL AEDEN a mis à notre disposition un kit de bicarburation correspondant à un coût de 1800 Euros (**1.180.000 FCFA**) et constitué des composants suivants :

-Un (01) échangeur de chaleur à plaques inox

-Deux (02) électrovannes trois voies

-Un (01) capteur de débit

-Une sonde de température

- Un (01) boîtier électronique de gestion automatique.

Mais, ce présent kit de la société AEDEN comme la plupart des kits disponibles sur les marchés européens est très onéreux pour une utilisation dans les campagnes (conditions de basculement très compliquées à remplir et un kit très fragile vu que les ruraux ne maîtrisent pas ses procédures électroniques imposées). Nous avons pensé donc utiliser les électrovannes uniquement pour assurer le basculement via deux interrupteurs. Les autres composants (pompe, filtre, durites, colliers et réservoir) sont achetés localement à Ouagadougou. Une fois les éléments du kit réunis, nous avons procédé à leur montage. L'adaptation du groupe électrogène qui fonctionnera désormais en bicarburant, consiste uniquement à l'ajout du kit de bicarburant précédemment décrit.

• Schéma d'installation du kit de bicarburant

Les Figures 8 et 9 schématisent de manière synoptique, respectivement le moteur du GE Flexy Energy sans adaptation et avec adaptation.

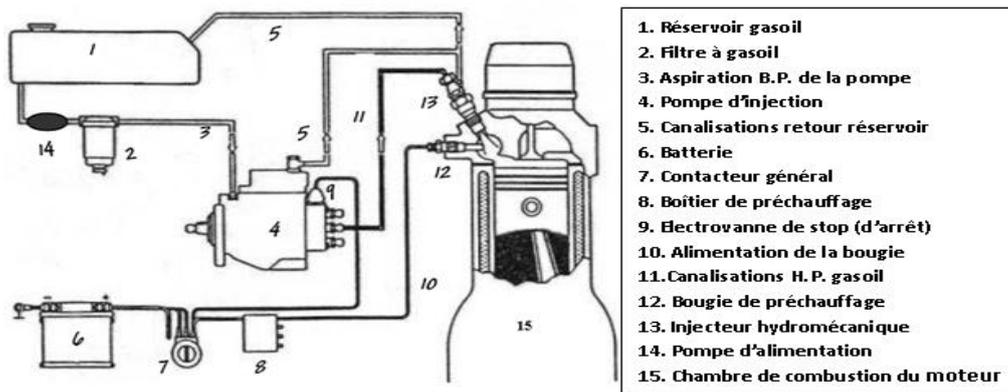


Figure 8 : Schéma de fonctionnement d'un moteur diesel sans adaptation

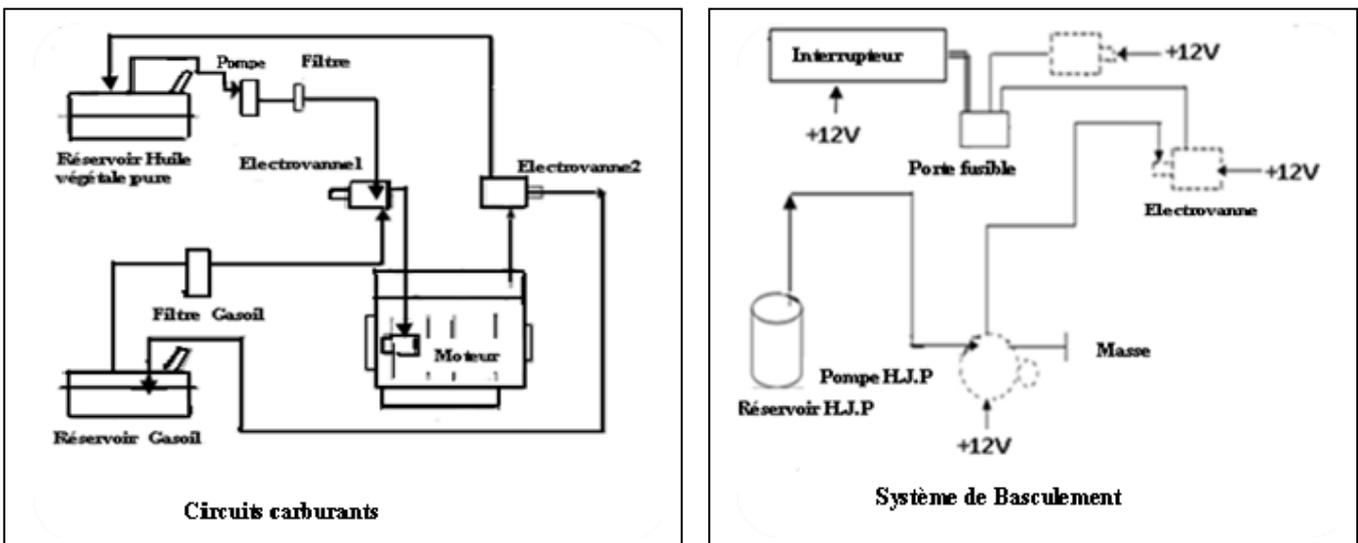


Figure 9: Schéma de fonctionnement d'un moteur diesel avec adaptation [LESEE-LBEB].

I.2. Phases de réalisation

-Circuit d'alimentation en huile végétale carburant et support de réservoir

Le circuit d'alimentation en huile végétale comprend les éléments suivants : un réservoir de 15 litres, des flexibles durits de 8mm de diamètre, une pompe de pré-gavage et d'un filtre.

Le support en bois posé sur le GE a été conçu pour supporter un réservoir de 15 litres. Cet élément supporte le poids du réservoir d'HVP et d'une bombonne (échangeur gaz/liquide) placé juste au dessus du pot d'échappement (utilisée pour la cogénération). Le réservoir est monté au support et attaché par des fils de fer.



Figure 12: Réservoir de l'HVP



Figure 11: Pompe



Figure 10: filtre de l'HVP



Figure13 : montage des composants



Figure14 : réservoir sur son support



Figure 15: les tubes en Té et les colliers

-Système de basculement

Le système de basculement est constitué de deux électrovannes, deux interrupteurs, six niples et trois mamelons, un tube en Té de 8mm de diamètre. L'ensemble de ces éléments est monté et fixé les uns aux autres par des colliers de serrage métalliques.

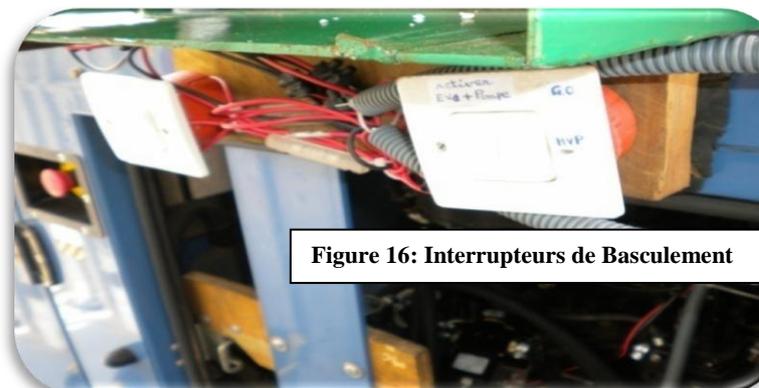


Figure 16: Interrupteurs de Basculement

Ce système permet à l'opérateur de faire fonctionner le moteur diesel soit par le gasoil soit par de l'HVP.

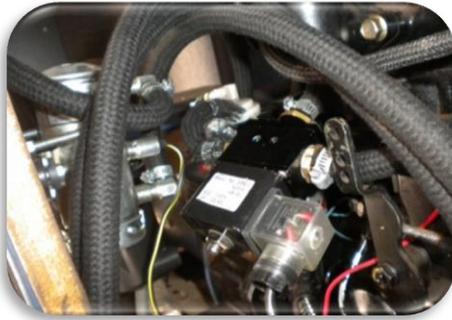


Figure 17: électrovannes montées sur le circuit



Figure 18: Electrovalves 3 voies

Trois principaux circuits sont réalisés et identifiés à savoir (schéma d'installation ci-dessous) :

- Circuit gasoil
- Circuit HVP (circuit d'alimentation après l'adaptation)
- Circuit commun aux deux carburants après l'électrovanne n°1.

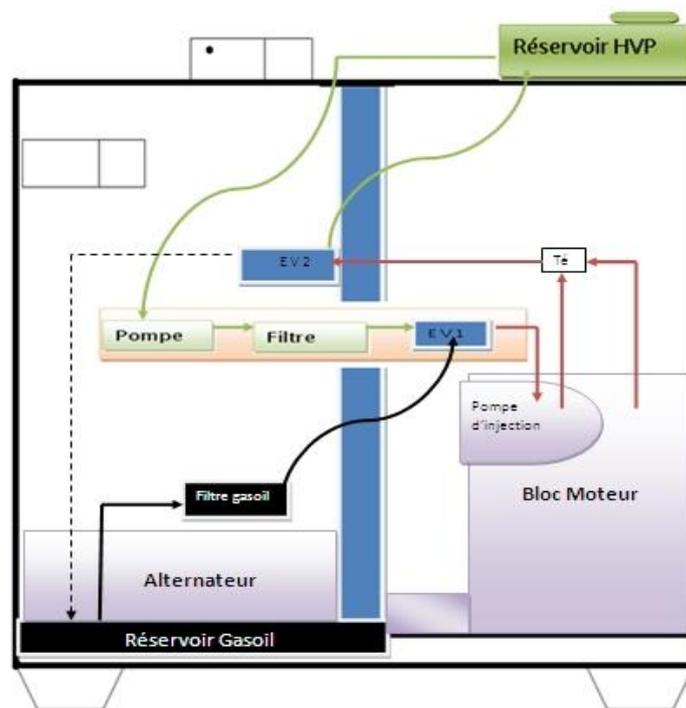


Figure 19: Schéma d'installation du kit

II. Réalisation

La réalisation effective consiste à monter un à un les éléments du kit de bicarburant selon les étapes explicitées sur les figures ci-dessous :



Figure 20 : GE sans kit de bicarburation



Figure 21: montage du support du réservoir

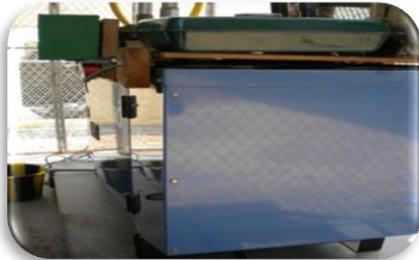


Figure 22: GE avec bi-réservoir



Figure 23: installation des composants du circuit carburant et de basculement.

Une fois le kit monté, sa mise en œuvre nécessite un protocole d'utilisation. Ce protocole permet de caractériser le kit de bicarburation afin de déterminer le moment opportun de basculement du système et d'expérimenter ce kit. C'est l'objectif de la troisième partie suivante qui est consacré à l'expérimentation du kit d'une part et du système hybride d'autre part.

Pour clore cette partie toutes les dépenses qui ont permis de réaliser le kit sont décrites dans le tableau 13 de l'annexe 5.

TROISIEME PARTIE : Tests sur le réglage de basculement du kit de bicarburation

I. Introduction

Rappelons avant toute chose que le but du concept Flexy Energy est d'accroître l'accès aux services énergétiques fiables, propres et durables pour les populations dans les zones rurales et péri urbaines d'Afrique Subsaharienne. Ce concept est initié par le laboratoire LESEE du 2IE et consiste à produire de l'électricité décentralisée en utilisant une centrale hybride PV/GE sans stockage dans le but de substituer progressivement le gasoil avec lequel le GE fonctionne au départ par l'HVP. Dans cette partie destinée à l'étude expérimentale de la centrale hybride, nous allons en premier lieu faire un point (états de lieux) sur le prototype d'expérimentation suite à une visite du lieu et ensuite nous présenterons les méthodes qui nous ont permis d'effectuer les différents essais puis les résultats lors des manipulations. Les objectifs à atteindre étant de :

- Evaluer les performances du GE seul en fonctionnement avec de l'HVP d'une part et le gasoil d'autre part ;
- Evaluer les performances de la centrale hybride (taux de pénétration solaire, consommation du groupe électrogène) ;
- Evaluer les impacts environnementaux et socio-économiques des deux scénarios (groupe électrogène seul et système hybride avec du Gasoil et/ou de l'HVP)

II. Etas des lieux

II.1. Situation géographique du site

Le site d'implantation du prototype Flexy Energy est Kamboinsé, situé à 15 Km de la ville de Ouagadougou. Les coordonnées géographiques de kamboinsé sont les suivantes :

-Latitude : 12°27' Nord ;

-Longitude : 1°33' Ouest ;

-Ensoleillement moyen journalier : 5,5 kwh/m²/jour.

II.2. Description du prototype

Le local du prototype(a) Flexy Energy a une toiture d'environ 20m² de surface entièrement couverte par les modules PV ; le toit est incliné de 14° vers le sud (b). A l'intérieur du local se trouve un onduleur (c), un enregistreur de données (Sunny Webbox), un afficheur électronique (Sunny Matrix) et un inverseur de sources. Au système PV est couplé un GE muni d'un kit de bicarburation (d). Deux bancs d'essais de 4KW chacun (soit au total 8KW) permettent de simuler les profils de charge.

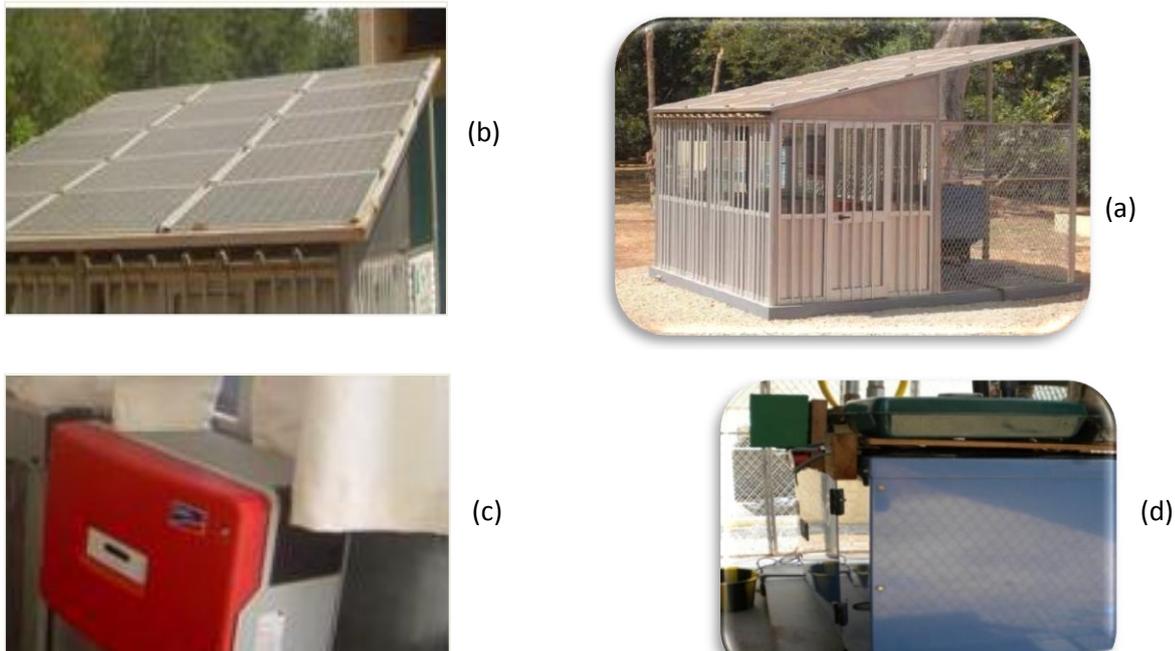


Figure 24: (a) local du prototype, (b) modules PV, (c) onduleur sunny boy, (d) GE triphasé de 11,5KVA muni d'un kit de bicarburant

III. Equipements du prototype Flexy Energy

III.1 La centrale hybride PV/GE sans stockage

La centrale hybride PV/GE sans stockage, prototype de notre étude est constitué d'un champ PV (2,85 KWc) couplé en parallèle soit avec un GE (9,2 KW) ou soit avec le réseau électrique local basse tension (230/380V) du 2IE, toutes les deux sources étant triphasées. Un inverseur de source placé en aval d'un onduleur monophasé assure ce choix et évite ainsi que le GE et le réseau électrique local soient simultanément en fonctionnement. En fait, lorsque le GE démarre (manuellement), sa présence est détectée par l'inverseur qui assure une permutation automatique en coupant le réseau, couplant ainsi le PV au GE. La sortie utilisation de l'inverseur de sources alimente les charges internes du local du prototype ou les bancs de charges résistives en cas d'expérimentation. L'onduleur solaire injecte la totalité de la production du champ PV sur une des trois phases du réseau (GE ou réseau SONABEL). Un afficheur électronique Sunny Matrix et un acquiiseur de données Sunny Webbox permettent l'accès permanent aux paramètres électriques de la centrale.

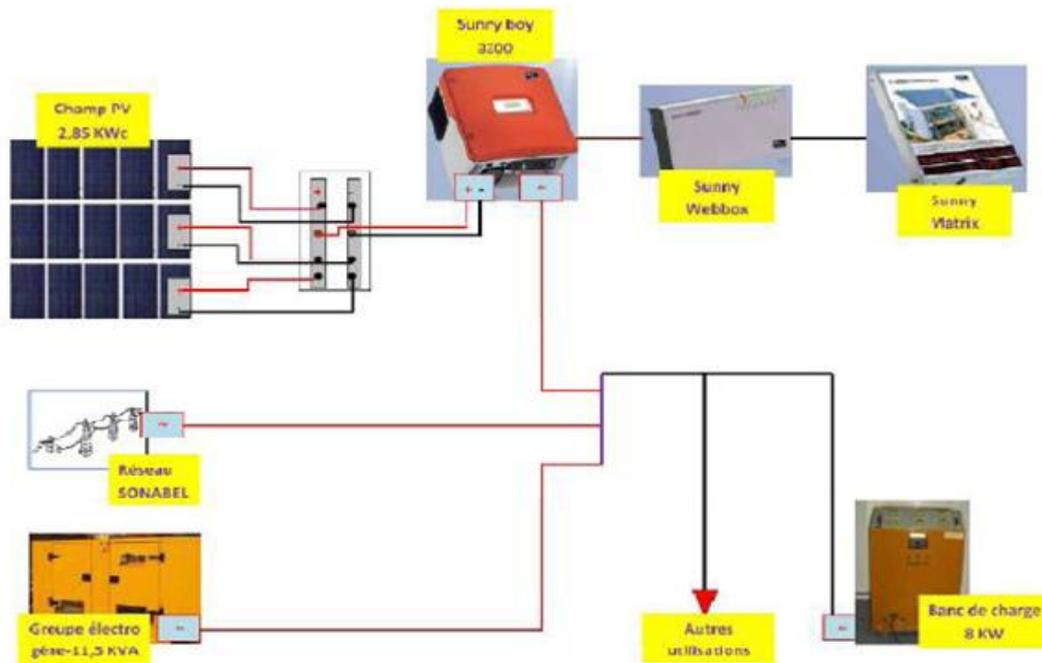


Figure 25: schéma général du prototype

Les caractéristiques des principaux composants à savoir le champ PV, le GE et l'onduleur sont présentées en annexe.

III.2. Acquisition des données

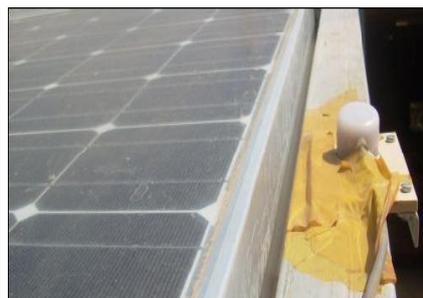
Pour acquérir les données nécessaires pour notre étude, nous avons utilisé les instruments de mesure suivants :

- **Solarimètre (référence EXTEL, M-830B)**

Il est placé directement sur le plan incliné du champ PV et mesure au fil du soleil la radiation solaire (en W/m^2) reçue par les modules PV. Les relevés se font par pas de trente minutes pendant les moments des essais.



(a)



(b)

Figure 26: (a) multimètre, (b) sonde du solarimètre installé sur la toiture

- **Thermomètre CA 861 K et/ou thermocouple**

L'évolution de la température ambiante et de celle des gaz d'échappement du GE est très importante pour le basculement du kit. Au cours de la période des essais ces températures seront mesurées manuellement.

- **Pupitre du GE**

Sur l'écran numérique du pupitre, nous recueillons les paramètres électriques suivants : le courant (A), la tension (V), la fréquence (Hz), la vitesse du GE (tr/min).



Figure 27: écran du pupitre du GE

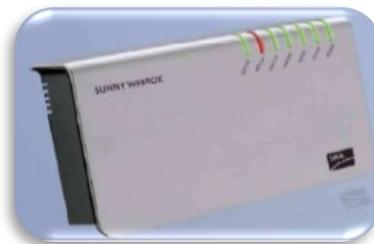
Pour des raisons de fiabilité sur la mesure des faibles courants, nous utiliserons une pince ampéremétrique (référence ARNOUX CHAUVIN, F09, 600 V, 400A) pour mesurer le courant.

- **Onduleur monophasé Sunny Boy SMA et Sunny Webbox**

L'onduleur Sunny Boy SMA affiche sur son écran les paramètres électriques délivrés par le champ PV, à savoir la puissance AC, la tension, les énergies en KWh et la quantité de CO₂ évitée. Nous avons relevé également le courant et la tension du champ PV via le sunny Webbox connecté à un ordinateur via un câble réseau.



(a)



(b)

Figure 28: (a) onduleur sunny boy, (b) sunny Webbox

IV. Méthodes : Tests sur le prototype

A travers une série d'essais, nous avons caractérisé le kit de bicarburant monté sur le GE (en repérant le moment favorable de basculement d'un carburant à l'autre avec comme paramètre de basculement la charge >70% de PN ou la température des gaz d'échappement) et étudié les performances du GE seul et de la centrale PV/GE suivant le profil de charges de la figure 29. L'objectif étant d'analyser et de quantifier les émissions en CO₂ évitées de la substitution du gasoil par l'HVP, le taux de pénétration solaire et la qualité de l'énergie produite. Pendant les périodes d'expérimentation, le système hybride est déconnecté des charges réelles. Cependant, la demande en énergie est assurée par une simulation en utilisant les bancs de charges résistives ; ce qui nous permet de fixer une zone de compromis des charges à utiliser afin d'éviter tout comportement préjudiciable aux performances du moteur qui fonctionnera désormais à 90% en HVP.

IV.1. Les protocoles de mesures

L'étude expérimentale sur le prototype nécessite l'acquisition de paramètres importants (tableau). Certains paramètres sont mesurés manuellement par l'opérateur des essais et les autres relevés sur le pupitre du GE et sur l'onduleur. Le profil de charges ci-dessous représente le type d'évolution de la demande en énergie qui pourrait correspondre à un profil rural. La moyenne des puissances de ce profil est d'environ 5 kW et la puissance maximale est de 9,2 kW.



Figure 29: profil de charges

Tableau 1: les paramètres mesurés et leurs méthodes de mesure

| Paramètres | Méthode de mesure |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Ensoleillement global sur le champ PV | Mesuré par le solarimètre |
| Température ambiante | Mesuré par le thermomètre |
| Température des gaz d'échappement | Mesuré par le thermocouple |
| Tension PV, V_{PV} | Enregistrée par le Sunny Boy |
| Intensité PV, I_{PV} | Enregistrée par le Sunny Boy |
| Puissance AC de l'onduleur, P_{ac} | Enregistrée par le Sunny Boy |
| Energie du jour, E_{jour} | Enregistrée par le Sunny Boy |
| Energie cumulée, E_{total} | Enregistrée par le Sunny Boy |
| Intensités des trois phases du GE | Relevé sur le pupitre du GE |
| Tensions du GE | Relevé sur le pupitre du GE |
| Fréquence du GE | Relevé sur le pupitre du GE |
| Consommation en HCP du GE | Mesuré par l'opérateur |
| Intensité demandée par la charge | Mesuré avec la pince ampéremétrique |

Pour effectuer nos essais, nous avons défini deux protocoles. L'un sur le test du GE seul en fonctionnement avec l'HCP et l'autre sur le système hybride solaire/HCP. En effet, l'huile de Jatropha pure (HJP) est celle qui a été retenue mais pour des raisons de non disponibilité nous avons utilisé l'huile de coton pure (HCP) lors de nos essais vu qu'elle a des caractéristiques presque similaires à celles de l'huile de Jatropha pure.

Protocole 1 : Test sur le réglage de basculement du kit de bicarburant

D'une part, ce protocole nous a permis d'évaluer les performances du GE fonctionnant à l'HCP, en termes de consommations horaire et spécifique. D'autre part, nous avons pu déterminer les conditions d'utilisation et de basculement du kit de Bicarburation.

Etant donné que le GE n'est pas équipé d'un compteur volumétrique pour la mesure précise de la consommation horaire de l'HVP, nous avons utilisé un réservoir transparent gradué et une balance

électronique (ACCULAB, 10 kg max, input voltage 11V-24V). La consommation spécifique C_s (en l/KWh) du groupe électrogène est calculée par :

$$C_s = \frac{m_c}{Pf \times \Delta t \times d} \quad (1)$$

m_c étant la masse de carburant (HCP) consommée pendant l'intervalle de temps Δt , Pf la puissance délivrée et d la densité.

La consommation horaire est déduite par le rapport :

$$C_h = \frac{V_c}{\Delta t} \quad (2)$$

Avec : Δt le temps de fonctionnement ; C_h (en l/h) la consommation horaire.

Le volume consommé étant :

$$V_c = \frac{m_c}{d} \quad (3)$$

Quant au basculement du kit (semi-automatique), la consigne est donnée par la fermeture d'un interrupteur qui active l'électrovanne EV1 et la pompe puis 30 secondes après nous fermons le second interrupteur qui active EV2 du circuit retour (pour que les deux carburants non injectés dans le moteur, retournent dans leurs réservoirs respectifs).

Au fait, un pré-test effectué avant le montage du kit (avec du gasoil) a permis de relever les températures des gaz d'échappement (à l'aide d'un thermocouple placé juste après le pot d'échappement) puis par corrélation nous avons déduit les températures dans la chambre de combustion en fonction des charges. Les données relevées sont contenues dans le tableau suivant :

Tableau 2: les résultats du pré-test

| Charges (%) | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T° échap(°C) | 169 | 213 | 271 | 298 | 325 |
| Tcomb(°C) | 309,8 | 373,3 | 377,3 | 508,9 | 518,9 |

Ainsi, lorsque nous démarrons le moteur (avec du gasoil) et le chargeons entre 70 et 80% de la PN, nous le laissons tourner pendant 5 minutes ou lorsque nous chargeons à une charge inférieure à 70%, nous attendons que la température des gaz d'échappement atteigne 300°C avant de basculer. Notre objectif est de chauffer le moteur et d'atteindre la $T \geq 500^\circ\text{C}$ dans la chambre de combustion pour éviter tout désagrément de fonctionnement de ce dernier lorsque nous basculons sur l'HVP.

Protocole 2 : Test sur le système hybride

Ce protocole permet de relever les différents paramètres nécessaires pour évaluer les performances de la centrale hybride en fonctionnement avec de l'HCP et les comparer à celles en fonctionnement au gasoil. Les paliers de charges constantes utilisés au cours de ces essais sont 1,8 ; 3,6 ; 5,4 ; et 7,2kW. Par conséquent, les essais sous profil de charges (figure29) variables de

la centrale hybride sont effectués avec 7,2KW comme la charge maximale et 1,8 KW celle minimale. La procédure (figure30) pour le fonctionnement du GE est toujours respectée.

L'intensité AC délivrée par le système PV n'est pas directement mesurée. On peut l'avoir directement avec les données de l'enregistreur sunny webbox ou par déduction, sachant que le courant demandé par la charge ($I_{CH, ph}$) sur la phase d'injection (phase 1), est la somme des courants délivrés par le GE et le système PV :

$$I_{PV,AC} = I_{CH,Ph1} - I_{GE,Ph1} \quad (4)$$

La puissance PGE (en KW) délivrée par le groupe électrogène, est calculée à partir des paramètres de tension et de courant de chaque phase lus sur le pupitre de commande du groupe électrogène :

$$P_{GE} = V_1 I_1 + V_2 I_2 + V_3 I_3 \quad (5)$$

IV.2. Séquence des essais

➤ Essais des performances du groupe électrogène seul

Pendant cet essai, le groupe électrogène seul est en fonctionnement et ses performances sont évaluées en termes de consommation horaire et de consommation spécifique (l/kWh) ou (g/KWh).

➤ Essais du système hybride sous charges constantes

Ces essais à charge constante consistent à utiliser le système hybride sous une charge constante, pendant toute la durée de son fonctionnement journalier en suivant le protocole 2 précédent. Au cours de cet essai la consommation en litre et en gramme du moteur ainsi que les paramètres électriques de l'alternateur sont relevées chaque trente minute. Les paramètres électriques en question sont les suivants : courants, tensions et fréquence.

➤ Essais du système hybride sous profils de charges variables

Contrairement aux essais à charge constante, ces essais consistent à faire fonctionner le système hybride PV/GE sans stockage, pour répondre à des charges qui varient dans le temps.

Pour effectuer nos essais la procédure suivante a été respectée (voir annexe 4 pour les détails).

IV.3. Organigramme de la procédure.

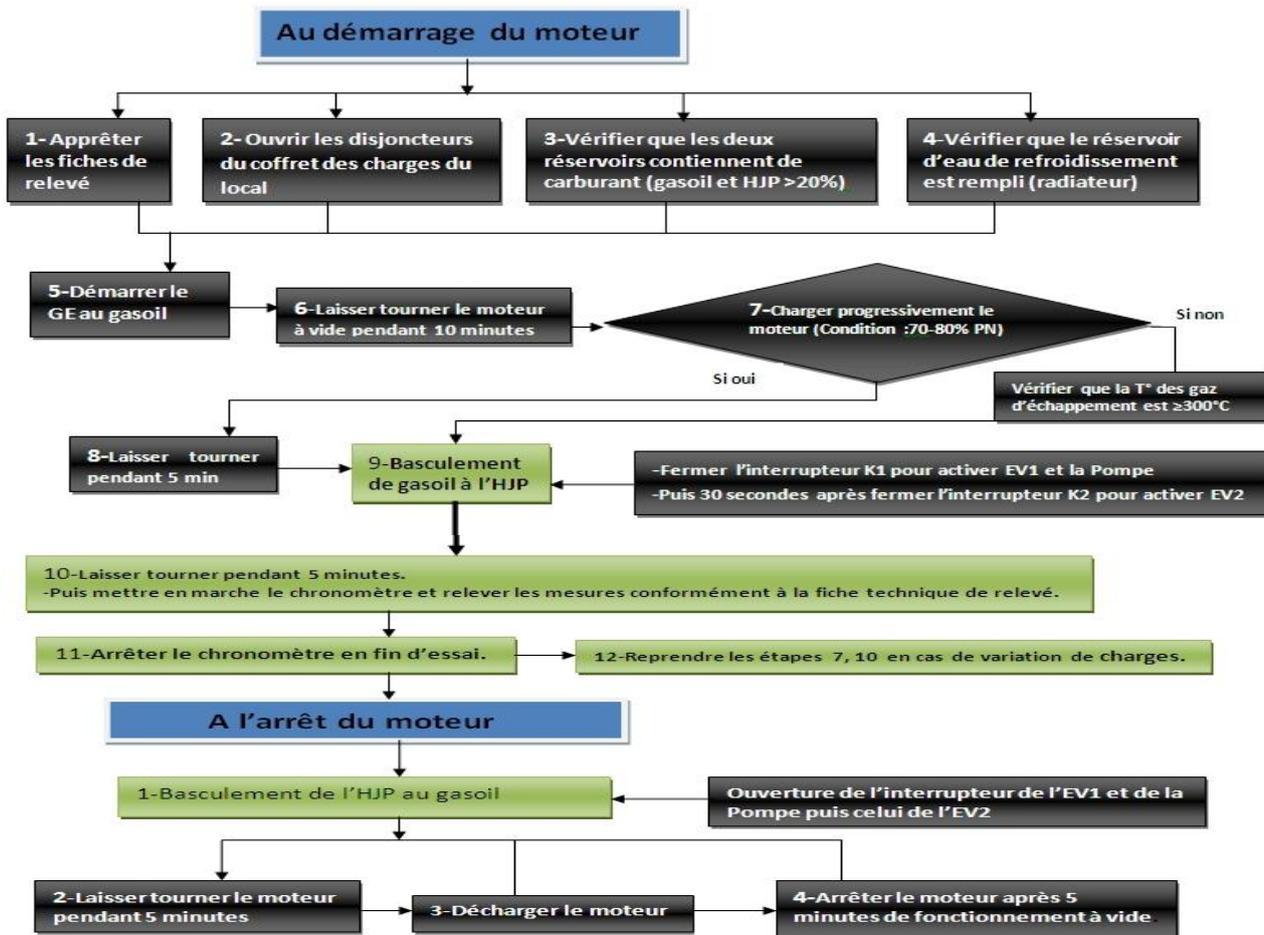


Figure 30: organigramme de la procédure

V. Résultats, Analyses et Discussions.

Dans ce qui précède nous avons présenté les méthodes qui nous ont permis d'effectuer les mesures au cours de nos expériences. Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats obtenus lors des essais effectués sur le prototype de début Juillet à fin Août 2011, puis nous ferons des discussions pour essayer d'expliquer chacun des résultats acquis.

V.1. Performances du champ PV

Les puissances solaires (en W/m^2), mesurées à l'aide d'un solarimètre ont été relevées entre 8h et 17h lors de nos essais sur la surface du champ PV de notre système hybride. Rappelons d'abord que nous avons réalisé ces essais dans une période défavorable de l'année pour la radiation solaire (cette période étant située dans une saison pluvieuse). Malgré ce fait, nous avons relevé pendant cette période (entre le 10 Juillet et le 16 Août), un ensoleillement maximal de $750 W/m^2$; ce qui correspond à une puissance maximale produite par le champ PV de 2,146 KW. Cette valeur n'est pas trop loin (environ 76%) de la puissance crête installée qui est de 2,85 KW. Nous pouvons remarquer que la centrale hybride PV/GE peut donc fonctionner durant toute l'année avec en

moyenne une puissance d'au moins 1,5 KW par jour. Nous avons constaté que la puissance délivrée par l'onduleur (Pac) dépend non seulement de l'ensoleillement mais aussi de la charge.

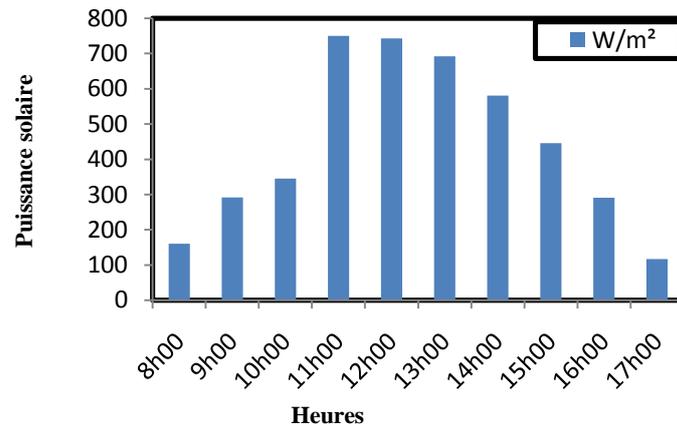


Figure 31: Ensoleillement moyen journalier

La puissance produite par le champ PV est toujours inférieure à la puissance crête. Ce qui est normale à cause des pertes au niveau de l'onduleur (dont le rendement est 95%) ; puis selon les fabricants des modules PV, un ensoleillement inférieur à 1000W/m² ou une température ambiante supérieure à 25°C contribue à diminuer la puissance délivrée des modules d'environ 10%. D'autres facteurs comme les saletés et la poussière, les ombrages partiels, le vieillissement etc.... peuvent considérablement jouer sur la productivité des modules.

V.2. Performance du groupe électrogène seul

Le fonctionnement du Groupe électrogène seul (selon le protocole n°1) avec l'huile de coton pure, nous a permis d'évaluer les performances de ce dernier. Nous considérons que les consommations horaire (en l/h) et spécifique (en l/KWh) du GE, sont les seuls paramètres importants pour déterminer ses performances. Au cours de ses travaux de thèse (en cours), Daniel YAMEGUEU a effectué des essais sur le GE du prototype (en 2010) [23] ; ce qui nous permet de comparer les deux scénarios huile de coton pure (HCP) et gasoil dans les mêmes conditions de fonctionnement du GE. La courbe de performance (consommation spécifique) du GE fonctionnant au Gasoil est la suivante :

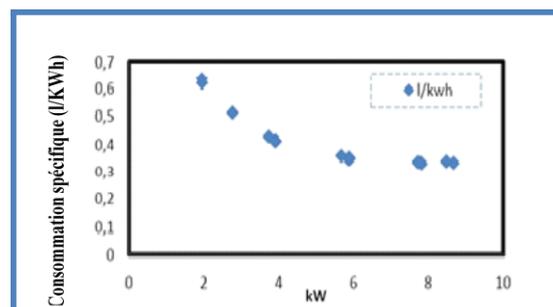


Figure 32: Consommation spécifique du GE au Gasoil [23]

❖ Consommation horaire

Les essais réalisés sur le GE seul en fonctionnement avec de l'huile de coton pure montrent que la consommation horaire varie entre 1,4 l/h pour une charge de 1,8 KW (20% de la puissance nominale du GE) et 2,9 l/h pour une charge de 7,4 KW (80% de la puissance nominale du GE) ; alors que dans les mêmes conditions, la consommation horaire du GE avec du Gasoil varie entre 1,1 et 2,5 l/h pour respectivement 1,8 KW et 7,4 KW.

Dans la littérature, la corrélation entre la puissance délivrée et la consommation horaire est souvent donnée par un modèle linéaire [23]. La corrélation suivante a été déterminée lors de nos

essais sur le GE en fonctionnement avec de l'HCP : $F(t) = 0,273P_{DGi}(t) + 0,098P_{Ri}$ (6)

Où P_{DGi} est la puissance délivrée par le GE en KW, P_{Ri} la puissance nominale du GE en KW et $F(t)$ sa consommation horaire (en l/h).

La figure suivante présente la corrélation linéaire entre la puissance délivrée et la consommation horaire du GE fonctionnant avec de l'HCP (en bleu) et du Gasoil (en rouge).

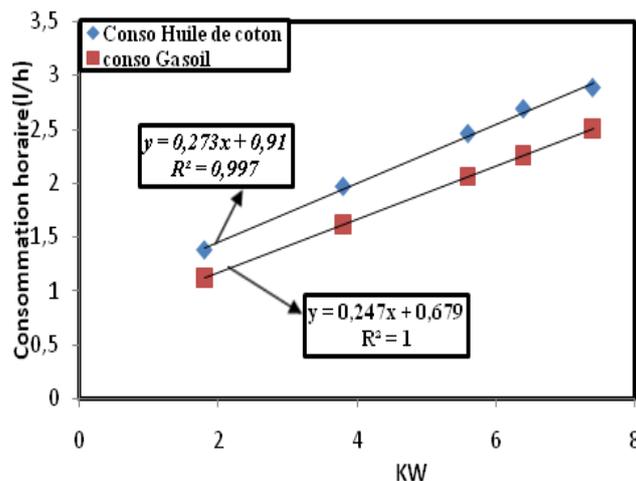


Figure 33: Corrélation linéaire de la puissance et de la consommation horaire du GE (huile de coton en bleu et Gasoil en rouge).

Les deux corrélations linéaires décrivent la même allure et croient avec la charge. La corrélation de l'huile de coton est au dessus de celle du Gasoil ; ainsi, nous notons une différence de consommation de 0,4 litre par heure. Ce qui est normal car le pouvoir calorifique de l'huile de coton (39,5 MJ/kg) est inférieur à celui du gasoil (44MJ/kg).

❖ Consommation spécifique.

Quant à la consommation spécifique du GE (en l/kWh), les essais effectués montrent que les valeurs de ce paramètre varient entre 0,39 et 0,7 l/kWh (respectivement pour les charges de 7,4 kW et 1,8KW). La consommation spécifique est faible (meilleure) quand la charge est élevée et élevée (traduisant un mauvais rendement) quand la charge est faible (moins de 70% de la puissance nominale du GE).

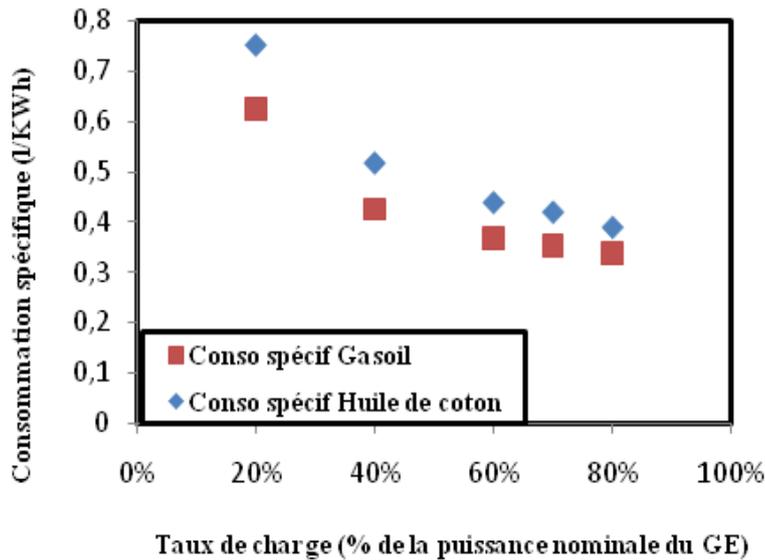


Figure 34: Consommation spécifique du GE (en fonctionnement avec de l'HCP à gauche et avec du Gasoil à droite)

Dans les mêmes conditions, la consommation spécifique du GE avec du Gasoil varie entre 0,62 et 0,34 l/kWh pour respectivement 1,8 kW et 7,4 kW.

Nous constatons une surconsommation de l'huile de coton (HVP) de 16% en moyenne de plus que le Gasoil ; ce qui peut être expliqué par le fait que le PCI de l'huile de coton (39,5 MJ/Kg) est inférieure à celui du Gasoil (44 MJ/Kg). Ce résultat est confirmé par les travaux déjà réalisés par B.DE THEUX, qui estime que cette surconsommation de l'huile est comprise entre 15 et 20% de plus que le Gasoil [24] et par Gilles VAITILLINGOM [13].

V.3. Système hybride PV/GE

V.3.1. Résultats

❖ Charge constante 7,2KW

Cette charge représente environ 80% de la puissance nominale du GE. Pour un ensoleillement moyen de 532 W/m², la puissance moyenne PV est de 1,5 kW, soit 21% de la puissance totale demandée par la charge. Le complément de la puissance demandée (soit 79% de la puissance totale) est assuré par le GE avec une puissance moyenne de 5,7 kW.

La consommation spécifique du GE varie avec l'ensoleillement entre 0,392 et 0,42 l/kWh (où les ensoleillements sont respectivement 329W/m² et 728 W/m²). Les figures ci-dessous montrent la répartition des charges entre PV et GE (a) et l'influence de l'ensoleillement sur la consommation spécifique (b).

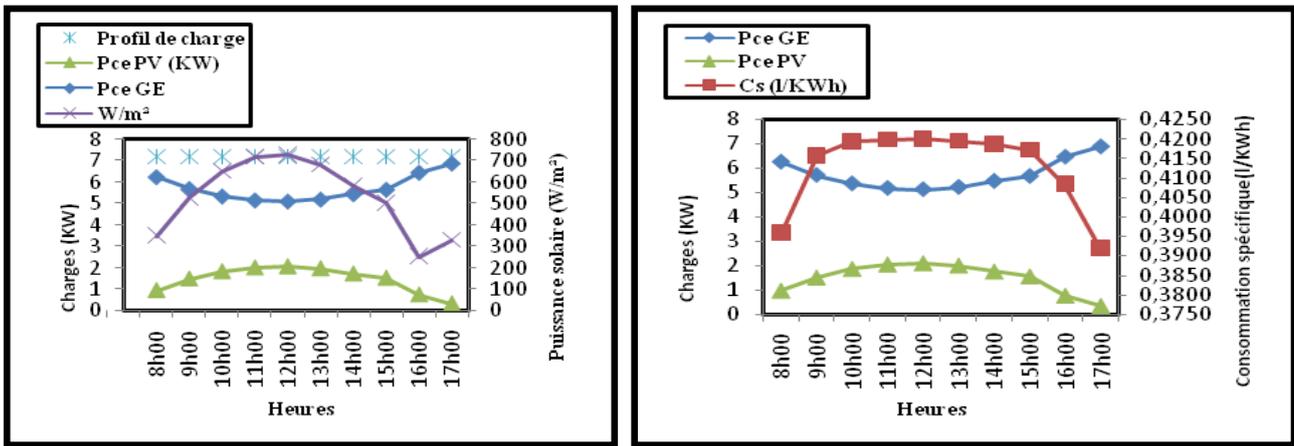


Figure 35 : Courbes de charge constante 7,2 KW ; (a) Répartition des charges entre PV et GE ; (b) Influence de la répartition des charges sur la consommation spécifique

❖ Charge constante 5,4 KW

Cette charge représente environ 60% de la puissance nominale du GE. Pour un ensoleillement moyen de 442 W/m², la puissance moyenne PV est de 1,400 kW, soit 26% de la puissance totale demandée par la charge. Le complément de la puissance demandée (soit 74% de la puissance totale) est assuré par le GE avec une puissance moyenne de 4 kW (soit 43% de charge).

La consommation spécifique du GE varie avec l'ensoleillement entre 0,421 et 0,524 l/KWh (où les ensoleillements sont respectivement 117W/m² et 750 W/m²). Les figures ci-dessous montrent la répartition des charges entre PV et GE (a) et l'influence de l'ensoleillement sur la consommation spécifique (b).

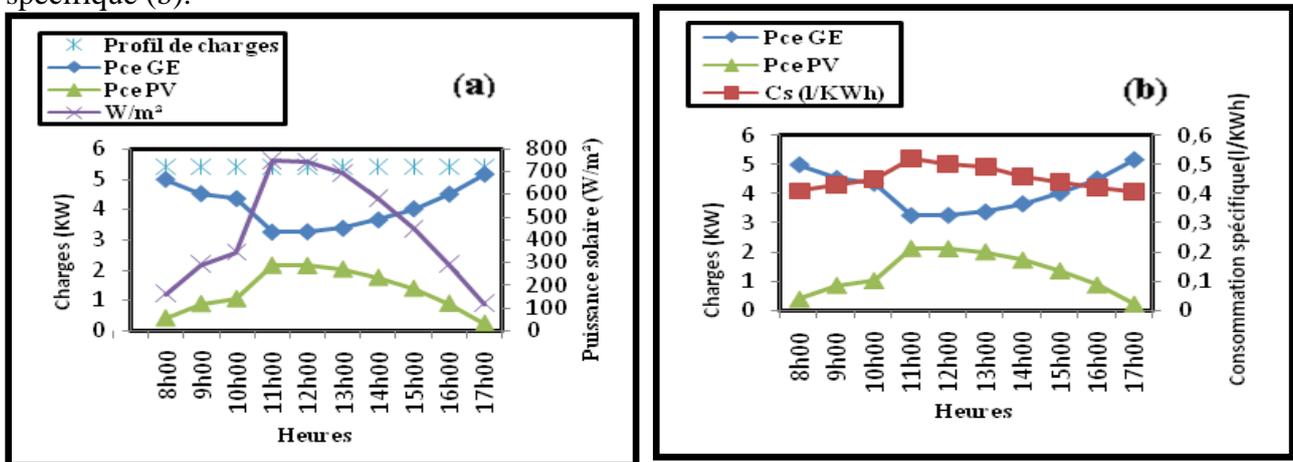


Figure 36 : Courbes de charge constante 5,4 KW ; (a) Répartition des charges entre PV et GE ; (b) Influence de la répartition des charges sur la consommation spécifique

❖ Charge constante 3,6 KW

Cette charge représente environ 40% de la puissance nominale du GE. Pour un ensoleillement moyen de 462 W/m², la puissance moyenne PV est de 1,5 W, soit 42% de la puissance totale demandée par la charge. Le complément de la puissance demandée (soit 58% de la puissance totale) est assuré par le GE avec une puissance moyenne de 2,1 kW. La consommation spécifique

du GE varie avec l'ensoleillement entre 0,51 et 0,9 l/kWh (pour lesquels ensoleillements sont respectivement 82W/m² et 784W/m²). Les figures ci-dessous montrent la répartition des charges entre PV et GE (a) et l'influence de l'ensoleillement sur la consommation spécifique (b).

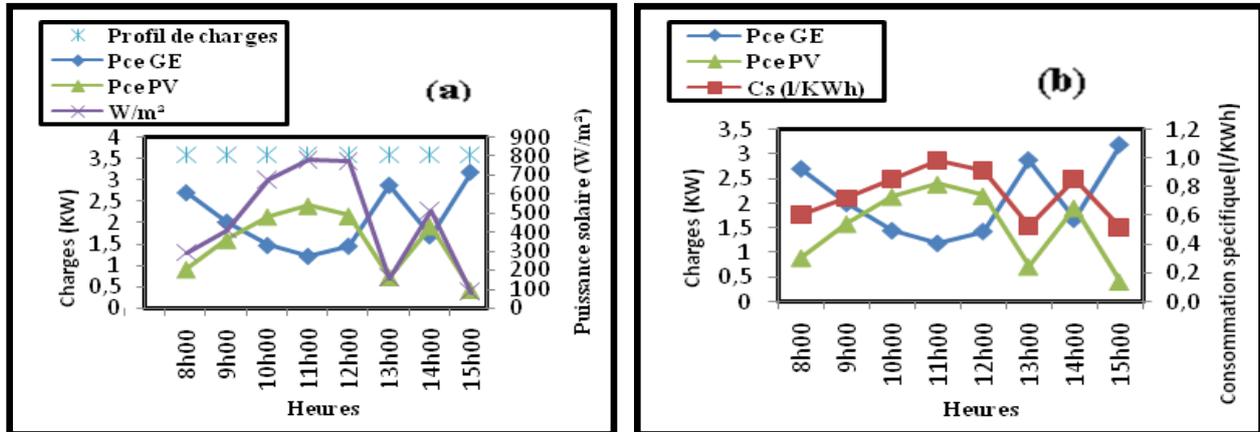


Figure 37 : Courbes de charge constante 3,6 KW ; (a) Répartition des charges entre PV et GE ; (b) Influence de la répartition des charges sur la consommation spécifique

❖ Charge constante 1,8 KW

Cette charge représente environ 20% de la puissance nominale du GE. Pour un ensoleillement moyen de 424 W/m², la puissance moyenne PV est de 0,93 kW, soit 52% de la puissance totale demandée par la charge. Le complément de la puissance demandée (soit 48% de la puissance totale) est assuré par le GE avec une puissance moyenne de 1,66 kW. La consommation spécifique du GE varie avec l'ensoleillement entre 0,69 et 0,75 l/kWh (pour lesquels les ensoleillements sont respectivement 142W/m² et 800W/m²). Les figures ci-dessous montrent la répartition des charges entre PV et GE (a) et l'influence de l'ensoleillement sur la consommation spécifique (b).

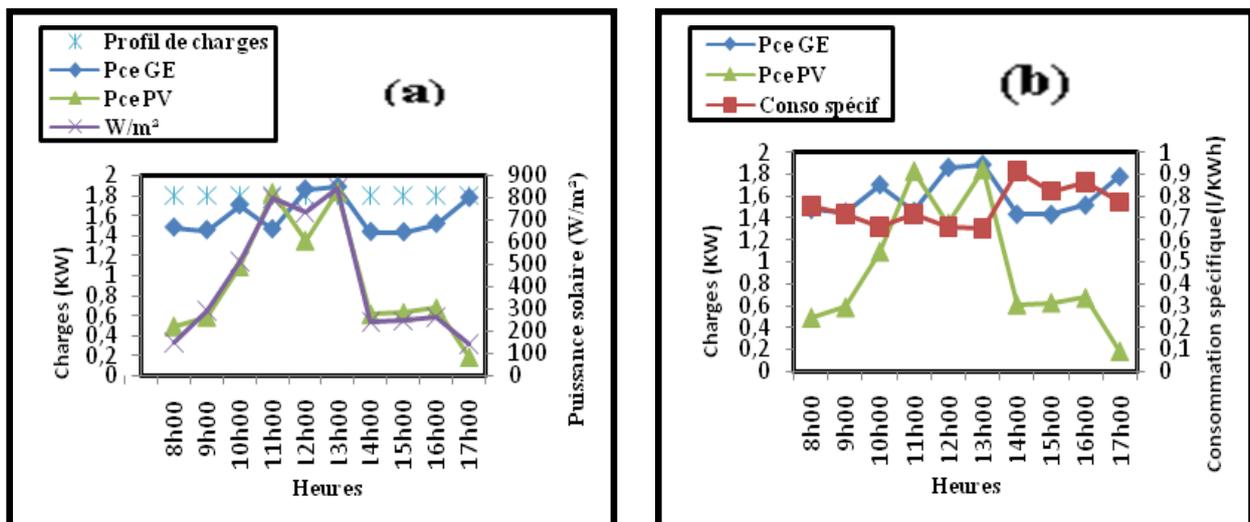


Figure 38 : Courbes de charge constante 1,8 KW ; (a) Répartition des charges entre PV et GE ; (b) Influence de la répartition des charges sur la consommation

❖ Charges variables

Les essais sous profils de charges variables montrent une répartition des puissances de charges entre le système PV et le groupe électrogène. Le fonctionnement montre que pendant les périodes de faibles charges (1,8kW), les performances du groupe sont faibles (0,81 l/kWh), cependant une meilleure consommation spécifique (0,39 l/kWh) est constatée pendant les périodes de fortes charges (7,2kW).

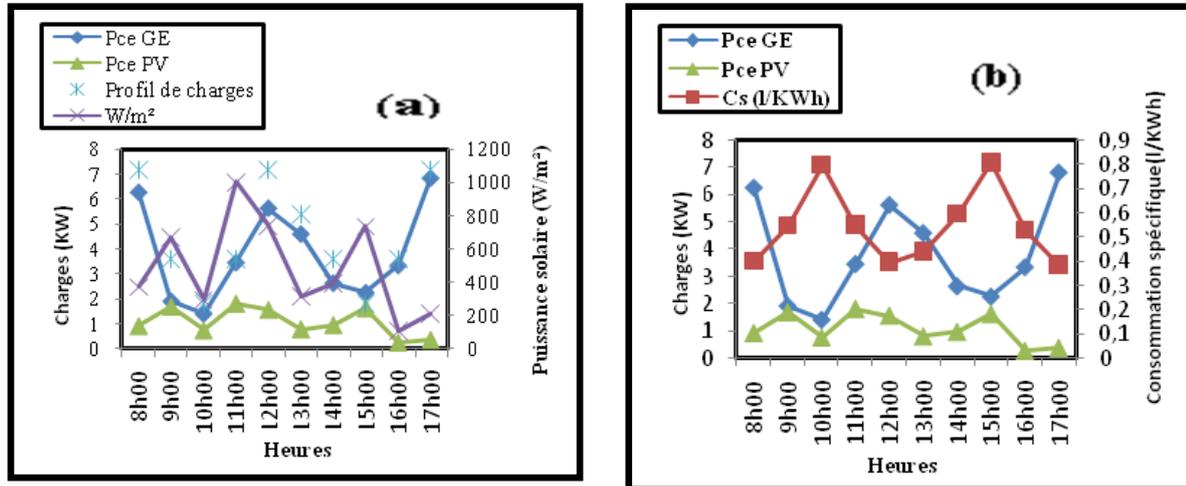


Figure 39 : Courbes sous profil de charges variables ; (a) Répartition des charges entre PV et GE ; (b) Influence de la répartition des charges sur la consommation spécifique

❖ Comparaison entre système hybride PV/GE et GE seul

Le système hybride PV/GE sans stockage présente une consommation horaire en huile de coton plus faible (mais une consommation spécifique élevée) que celle du groupe en fonctionnement seul. La différence est importante quand la charge est forte. A faible charge, l'avantage comparatif des systèmes hybrides sur le groupe électrogène seul est faible. La figure suivante montre la comparaison entre les consommations horaire et spécifique du système hybride et du GE seul.

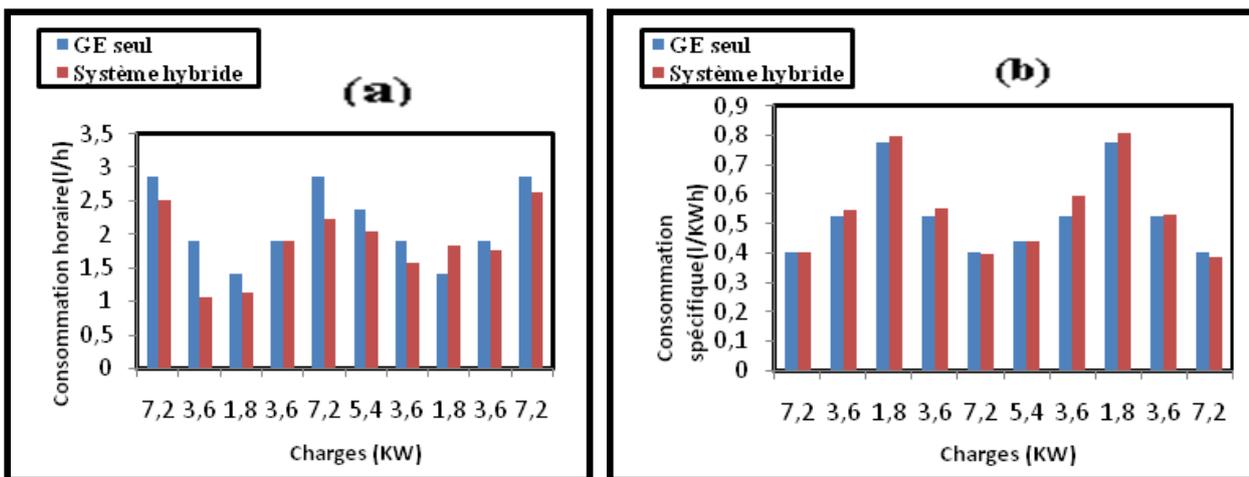


Figure 40 : Comparaison entre le système hybride et le GE seul ; (a) consommation horaire ; (b) consommation spécifique.

V.3.2. Analyses et Discussions

Dans le cas d'un fonctionnement hybride, la puissance délivrée par le système PV dépend de l'ensoleillement. L'énergie délivrée par le système PV est entièrement consommée par la charge et donc le solde de l'énergie demandée est délivré par le GE.

Dans ce cas nous remarquons que le système PV se comporte comme une charge négative. En effet, la contribution du PV bien que faible a tendance à diminuer la puissance demandée au GE, ce qui donne lieu à deux situations suivantes :

➤ Quand la charge est faible (1,8 et 3,6KW), le GE est confronté à une charge encore plus faible ; ce qui se traduit par une consommation spécifique élevée signe de mauvais rendement (risque d'encrassement et de dépôts goudronneux).

➤ Quand la charge est élevée (entre 5,4 et 7, 2 voir 9,2 KW), la contribution du GE est grande puisque le GE assure en moyenne 80% de la puissance demandée. Un fonctionnement du système hybride à 90 ou 100% de charge du groupe électrogène serait optimal, puisque le champ PV assure en moyenne 10 à 15% de la puissance demandée ; ce qui permettra au groupe électrogène de fonctionner entre 75 et 90% de sa puissance nominale.

Une comparaison entre l'énergie demandée et l'énergie produite, montre qu'un excès d'énergie électrique est produit par le groupe électrogène ; en moyenne le surplus d'énergie (ou taux de perte) est de 9% par rapport à la demande et pendant les moments de forts ensoleillements, cet excès peut atteindre 50% pour un fonctionnement du GE à faibles charges (3,6 KW et 1,8KW) ; ce qui montre les pertes d'énergie engendrées lorsque nous faisons fonctionner le système hybride à des charges faibles, sans oublier les problèmes d'encrassement sur les composants du moteur (piston, chambre de combustion) qui peuvent se produire.

De nos résultats sur les performances du GE et du système hybride, nous estimons que la puissance de fonctionnement optimal du système hybride de Flexy Energy est de 9 KW de charge, avec en moyenne 7,2KW pour le GE (ce qui correspond à une consommation spécifique de 0,39 l/KWh) et 1,5 KW pour le système PV.

V.4. Conclusion et proposition de conditions de fonctionnement optimal avec l'HVP.

Dans la suite de ce travail, nous allons supposer que la centrale fonctionne en continu (de jour comme de nuit). En vue d'améliorer les performances du GE tout en évitant les problèmes liés à l'utilisation des huiles végétales dans les moteurs (encrassement, dépôts, le colmatage...), il est nécessaire de définir des contraintes de fonctionnement optimal pour ce dernier :

➤ Dans la journée où le PV injecte un courant dans le réseau, la puissance demandée de fonctionnement optimal du système hybride est de 9KW ; ce qui permet au GE de fonctionner à

une charge variant entre 70 et 90% de sa puissance nominale (vu que le système PV assure 10 à 20% de la demande).

➤ Dans la nuit où le GE seul fonctionne nous proposons une charge de 80% de sa puissance nominale (soit 7,2 KW).

➤ Dans les conditions précédentes, hormis une bonne gestion des charges nous proposons une séance d'entretien du groupe électrogène après 1500 heures de fonctionnement périodiquement (démontage, nettoyage manuel avec du Gasoil des composants sur les circuits alimentation en carburant du moteur).

QUATRIEME PARTIE : Etude du couplage solaire/biocarburant et gasoil (étude environnementale et économique)

I. Introduction

Dans sa volonté d'apporter une contribution dans un monde confronté aux enjeux énergétiques (accès à l'énergie surtout dans les milieux ruraux) et environnementaux (réchauffement planétaire), le 2IE s'est engagé depuis 2009 à construire des centrales de production d'énergie à partir de sources renouvelables qui pourront non seulement être rentables économiquement (ce qui devrait réduire le coût de l'énergie produite) mais aussi contribuer à éviter des gaz à effet de serre. Dans ce qui va suivre, nous allons d'abord faire une étude environnementale, et ensuite une étude économique du prototype Flexy-Energy qui nous permettront de quantifier les émissions en CO₂ évitées et le coût du KWh produit de la centrale solaire/ huile de Jatropha (ou biodiesel) en considérant une durée de vie de l'installation de 20 ans. En fin, nous ferons le point sur les impacts environnementaux et socio-économiques de la substitution du Gasoil par les biocarburants. Toutefois, nous tenons à rappeler que les résultats de cette étude économique, sont estimés dans un cas idéal où nous ne tenons pas compte des indisponibilités qui pourraient survenir sur le GE et sur le système PV en raison des pannes ou entretiens.

II. Analyse environnementale de la centrale solaire/huile de coton pure.

Les performances environnementales de la centrale hybride solaire/huile de coton sans stockage en fonctionnement sous le profil de charges suivant (voir figure n°41), en moyennes journalières sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1: Performances journalières de la centrale hybride sous profil de charges

| Désignation | Unité | Du 11 au 16/08/2011 |
|--|------------------|---------------------|
| Energie demandée | KWh/j | 142,51 |
| Energie fournie par le GE | KWh/j | 136,8 |
| Energie fournie par le système PV | KWh/j | 19,8 |
| Ensoleillement Global moyen | W/m ² | 650 |
| Consommation journalière en Huile de coton | litre | 55 |
| Ratio PV/GE | % | 14,47 |
| Ratio PV/Energie demandée | % | 13,89 |
| Quantité de CO2 évitée | Kg/j | 140,94 |

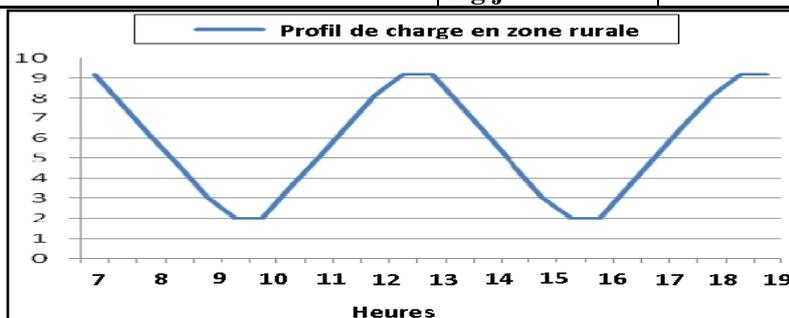


Figure 41: profil de charges d'un site isolé

A partir de ces données, nous pouvons évaluer la quantité totale de CO₂ évitée au cours d'une année, puis une projection sur 20ans de fonctionnement de la centrale hybride, dans les mêmes conditions que pendant nos essais ; sachant que 1kWh produit à partir d'une centrale thermique au gasoil engendre l'émission de 0,88014 KgCO₂eq [25].

Tableau 2: quantité de CO2 évitée.

| | Unité | une année | Sur 20 ans |
|------------------------|-----------------------|-----------|------------|
| Quantité de CO2 évitée | Kg CO ₂ eq | 51 114,6 | 1 022 292 |

III. Analyse économique

Le but de ce paragraphe est d'évaluer le coût du kWh produit par la centrale hybride PV/GE (en prenant l'exemple du prototype Flexy Energy) sur une durée de 20 ans en fonctionnement avec l'huile de Jatropha pure et le comparer à celui du fonctionnement de la centrale avec du Gasoil.

Le coût du kWh est calculé à partir du rapport entre le coût total de production (investissement et coûts de fonctionnement) et l'énergie produite durant une période donnée.

Pour effectuer cette analyse, nous avons adopté les hypothèses suivantes :

✚ Le Groupe électrogène

- Puissance électrique moyenne délivrée : 7,2 kW (soit environ 80% de sa puissance nominale)
- Temps de fonctionnement : 19 heures par jour (soit 10heures la journée et 9 heures la nuit).
- Consommation spécifique avec l'huile de Jatropha: 0,39 l/kWh soit 2,9 litres d'huile par heure (55litres par jour) ; ceci suppose que le moteur fonctionne tout le temps à 7,2 kW en moyenne.
- Entretien et temps d'arrêt: une fois par trimestre (en cas de fonctionnement continu).
- Taux d'actualisation : 10%

✚ Le système PV

La production du champ PV est estimée à 15kWh/jour en moyenne.

✚ Configuration du système hybride PV/GE sans stockage.

Dans la littérature, les différentes configurations des systèmes hybrides les plus courantes sont suivantes [26]:

- Système hybride PV - Diesel série
- Système hybride PV - Diesel commuté
- Système hybride PV - Diesel parallèle.

Mais, dans notre cas la configuration préconisée et réalisée est le système hybride PV-Diesel parallèle sans stockage et autonome ; ce qui correspond au cas d'un système hors réseau électrique public.

Configuration parallèle du système hybride sans stockage.

Dans la configuration parallèle, toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande mais également suppléer les pointes en combinant les sources. L'onduleur bidirectionnel peut fonctionner, soit comme un redresseur lorsqu'il y a un excès d'énergie produite par le diesel pour charger la batterie, soit comme un onduleur, pour transférer l'énergie fournie par le champ photovoltaïque ou par la batterie vers la charge. Grâce à l'onduleur bidirectionnel, le système parallèle peut alimenter une charge supérieure à la puissance nominale du générateur (voir figure suivante).

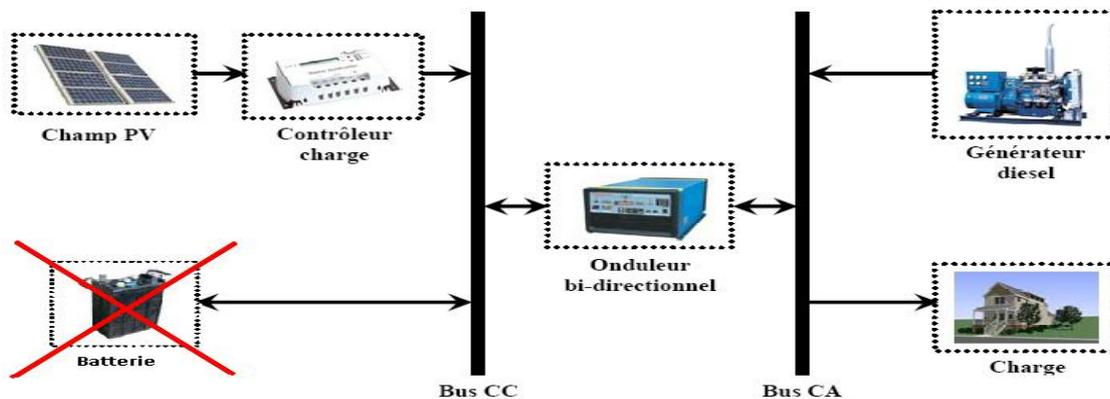


Figure 42: Système hybride PV-Diesel parallèle sans stockage.

Les coûts d'investissement et les coûts de fonctionnement actualisés des différents composants sont contenus dans les tableaux suivants :

Tableau 3: coûts d'investissement de la centrale hybride.

| Désignation | Quantité | Unité | Prix Unitaire | GE seul | GE+PV |
|-------------------------------------|----------|-------|---------------|------------|------------|
| Groupe électrogène SDMO de 11,5kVA | 1 | FCFA | 4870800 | 9741600 | 9741600 |
| PV de 2,85kWc + support de fixation | 1 | FCFA | 11321875 | 0 | 11321875 |
| Onduleur Sunny Boy 3300 | 1 | FCFA | 2153379 | 0 | 4306758 |
| Câble souple de 6mm ² | 100 | m | 1500 | 0 | 150000 |
| Kit de bicarburation | 1 | FCFA | 308880 | 308880 | 308880 |
| Investissement total | | FCFA | | 10 050 480 | 25 829 113 |

Tableau 4: coûts de fonctionnement actualisés.

| Coûts de fonctionnement | Coûts actualisés sur 20ans en FCFA |
|---|------------------------------------|
| Consommation huile de Jatropha pure (550F/l) | 94 000 388,52 |
| Consommation Gasoil (700F/l) | 149 652 448,8 |
| Coût d'entretien annuel du GE (10% du prix d'achat) | 8 556 540,471 |
| Coût d'entretien Système solaire (3% du coût annualisé) | 3 442 056,231 |
| Coûts de remplacement (GE+onduleur) | 7 024 179 |

En tenant compte des hypothèses précédentes, nous avons évalué la quantité d'énergie que notre centrale peut produire en 20 ans.

Tableau 5: Production d'énergie de la centrale hybride sur 20 ans.

| Sources | Production en KWh sur 20 ans |
|-------------------|------------------------------|
| Groupe | 1026380 |
| PV | 109500 |
| Total Ep (PV+ GE) | 1 135 880 |

En suite pour évaluer le coût du KWh la formule suivante a été utilisée: $C_{KWh} = \frac{C_T}{E_p}$ (7)

Avec, E_p : l'énergie produite par le système hybride sur une durée de vie de 20 ans ;

C_T : le coût total de production (Investissement+coûts de fonctionnement+coût de remplacement) sur une durée de vie de 20 ans

Le coût C_{KWh} du KWh produit sur 20 ans par chaque type de carburant (Gasoil et huile de Jatropha pure) est contenu dans le tableau suivant.

Tableau 6: coût du KWh produit

| | Avec le Gasoil (en FCFA) | Avec l'huile de Jatropha (en FCFA) |
|---|-----------------------------|---------------------------------------|
| Coût du KWh produit en FCFA/ KWh | 165 | 116 |
| Pourcentage de réduction | 29% | |

En tenant compte du coût moyen actuel de la tonne de CO₂ évité qui est environ de 12 € (soit 7 871,4 FCFA) ce projet s'il est enregistré au MDP pourrait bénéficier sur 20 ans d'une somme de **8 047 482,624 FCFA** (si nous utilisons la formule : $\text{Revenu} = E_p * R_T * 7871,4$; R_T étant le facteur d'émission de CO₂[25]); ce qui pourrait en tenant compte de ces revenus, réduire le coût du KWh (avec l'huile de Jatropha) à 108 FCFA/KWh.

IV. Avantages environnementaux et socio-économiques de la substitution du gasoil par les biocarburants (huile végétale pure ou biodiesel).

IV.1. Avantages environnementaux.

L'utilisation des huiles végétales pures (HVP) ou biocarburants comme carburant présente de nombreux avantages environnementaux. En effet, les huiles végétales ont un bon pouvoir lubrifiant, une teneur élevée en soufre et en oxygène ; elles sont biodégradables, renouvelables, et neutres en émission de gaz à effet de serre (GES). Les biocarburants permettent d'émettre moins de gaz à effet de serre (GES), à même quantité d'énergie produite (comparer au Gasoil lorsque le GE fonctionne à plus de 80% de sa puissance nominale). Au fait, le CO₂ émis pendant la combustion des biocarburants a préalablement été fixé par photosynthèse par les plantes, ce qui limite les émissions des GES. La figure suivante compare le CO₂ émis lors du fonctionnement d'un GE avec du Gasoil et avec de l'huile de Jatropha :

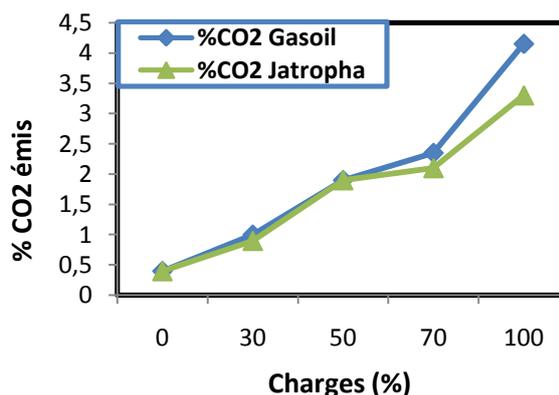


Figure 43 : courbes d'émission de CO₂ en fonction de la charge.

L'utilisation des biocarburants peut également favoriser une qualité de l'air (vu que la combustion des biocarburants donne des produits moins toxiques comparer au Gasoil), une reforestation des zones rurales sahéniennes (menacées par l'avancée du désert) par les cultures du Jatropha ou du karité et donc une régénération des sols dégradés dans ces zones.

IV.2. Avantages socio-économiques

Le développement économique de tout pays est généralement cautionné par sa consommation en énergie. L'huile obtenue par simple pression à froid peut être directement utilisée dans les moteurs Diesels. Par conséquent, la production et l'utilisation de l'huile de Jatropha (pure ou en biodiesel, vu ses qualités non comestibles) génèrent d'énormes atouts que nous pouvons répartir en deux domaines à savoir :

➤ **Energétique**

-L'Utilisation de l'huile de Jatropha pure (produite localement) dans les GE pour produire l'électricité; permet : de réduire le coût de l'énergie produite, un accès abordable aux services énergétiques, une augmentation du taux d'électrification rurale.

- Une réduction de l'importation des produits pétroliers et par conséquent une économie plus stable.

-Une autonomie énergétique des agriculteurs et une activité agro-industrielle nouvelle.

➤ **Sociétal**

-L'accès à l'énergie à moindre coût est une nécessité et pourra contribuer au développement économique et social de nos milieux ruraux. En effet, certaines priorités comme l'eau potable (pompage d'eau), les services de santé et d'éducation, la communication seront les impacts directs de cet accès ; ce qui favorise la décentralisation des structures administratives et culturelles vers les campagnes.

-L'utilisation de l'huile végétale pressée par les paysans eux-mêmes dans les motopompes, les moulins et dans leurs petits GE en privé (pour alimenter en électricité les ménages), leur permettra d'être autonomes et moins dépendants des produits pétroliers.

-Le développement du secteur agricole par l'utilisation des tracteurs fonctionnant à l'huile végétale, l'installation des équipements électriques (industriels ou manufacturiers) pour la transformation des produits agricoles sur place dans les milieux ruraux ; ce qui permet une création d'emplois et par là une atténuation de l'exode rural.

-La lutte contre la pauvreté par la culture du Jatropha ; les graines récoltées peuvent être vendues ou pressées pour la fabrication de l'huile pure, ce qui constitue une activité génératrice de revenus.

IV.3. Conclusion

Au vu de tout ce qui précède, nous pouvons retenir que les projets d'hybridation solaire/biocarburant sont porteurs d'espoir et plus efficaces du point de vue économique et environnemental. Cependant, personne n'estime que les biocarburants peuvent à eux seuls, remplacer complètement les produits pétroliers actuellement utilisés. La question est plutôt de

savoir s'ils peuvent représenter une part de la solution aux problèmes liés à l'utilisation de ces produits pétroliers (et même qui se raréfient).

Par ailleurs, si des précautions ne sont pas prises, la substitution du Gasoil par des biocarburants risque de générer des impacts environnementaux néfastes sur l'eau, le sol, la déforestation, les végétaux non indigènes, la biodiversité..., la concurrence avec la production alimentaire (consacrer des terres agricoles fertiles à la production des denrées alimentaires pour des cultures oléagineuses). Cependant, tous ces facteurs sont maîtrisables à l'aide d'un cadre réglementaire qui pour l'instant n'est pas opérationnel au Burkina Faso et il faudrait que des efforts (incitatifs) soient consentis dans ce secteur.

Conclusion Générale et perspectives

Notre travail a consisté à étudier la possibilité d'utiliser de l'huile végétale pure (HVP) dans le moteur Diesel du prototype Flexy Energy. Mis en place depuis Octobre 2009 par le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie), ce prototype est une centrale hybride PV/GE sans stockage, dans le souci d'aider à apporter des solutions (économique et environnementale) au problème d'électrification rurale en Afrique subsaharienne.

Pour atteindre nos objectifs dans ce stage de fin d'études notre démarche a été la suivante :

Après une étude approfondie sur les différentes méthodes d'adaptation des moteurs Diesels à l'utilisation de l'huile végétale (rencontrées dans la littérature) et le choix de la méthode la plus pertinente, un kit semi-automatique de bicarburation (dont le coût s'élève à 308 880 FCFA) a été conçu, réalisé et monté sur le GE de la centrale hybride (le but étant d'obtenir une centrale purement renouvelable avec le solaire et les biocarburants). Par la suite, un profil de charges correspondant à un profil rural et une procédure (protocole) de fonctionnement du kit ont été définis dans le cadre de l'expérimentation. Des essais ont été réalisés pendant les mois de Juillet et Août 2011 dans le but d'étudier et d'analyser expérimentalement ladite centrale fonctionnant désormais avec de l'huile végétale pure via le kit de bicarburation.

Les résultats obtenus lors de nos essais avec de l'huile de coton pure sont les suivants :

- La puissance délivrée par l'onduleur du système PV (Pac) dépend non seulement de l'ensoleillement mais aussi de la charge. Ce qui montre la complexité des systèmes hybrides sans stockage.
- La consommation spécifique du GE avec l'huile de coton est plus élevée que celle du GE avec du Gasoil (pour une charge de 80% de la puissance nominale du GE, sa consommation

spécifique avec l'huile de coton est 356,8 g/KWh comparée à celle du GE avec du Gasoil qui est 290,7 g/KWh) ; cette consommation est faible à charge élevée et grande à charge faible.

Le point optimal de fonctionnement de notre centrale hybride est atteint pour des charges proches de la puissance nominale du GE avec une pénétration en énergie du système PV de l'ordre de 20% de la charge totale demandée.

- L'impact environnemental est considérable avec une quantité d'environ 141 Kg de CO₂ évité par jour et de 51 114,6 KgeqCO₂/an.
- L'impact économique est remarquable avec un coût du KWh de 116 FCFA (contre 165 FCFA avec le Gasoil).

Vu la taille du prototype, ces résultats sont encourageant et le concept Flexy-Energy à grande échelle est une véritable opportunité en matière de développement durable en Afrique. Cependant, le fonctionnement d'une centrale hybride sans stockage est confronté aux problèmes dus à l'intermittence de l'énergie solaire (tels que les passages de nuages, la nuit...) et à la variabilité de la demande d'énergie. La solution préconisée par le Laboratoire LESEE, consiste à utiliser des groupes électrogènes de puissances différentes en cascade avec une gestion automatique de charges ; chaque GE étant utilisé de sorte qu'il fonctionne autour de son point optimal ; une seconde solution est la possibilité d'adjoindre au système hybride des batteries de stockage pour aider le système pendant les périodes de faibles charge, ce qui pourrait éviter les fonctionnements sous faibles charges pouvant porter atteinte à la durée de vie du groupe électrogène.

Références bibliographiques

❖ Ouvrages et articles

- [2]. **SONABEL**. *Rapport d'activités*. 2009.
- [3]. **Antoine Farcot** : Total Energie : développement des énergies renouvelables en Afrique ; sommet de l'énergie en Afrique, 5 et 6 novembre 2002, Paris.
- [4]. **Christopher W. Ajan, S. Shahnawaz Ahmed**. On the policy of photovoltaic and diesel generation mix for an. *Solar Energy*. Vol. 74, 453–467, 2003.
- [5]. **Y. Azoumah, D. Yamegueu, P. Ginies, Y. Coulibaly and P. Girard**, Sustainable electricity generation for rural and peri-urban populations of sub-Saharan Africa: The “flexy-energy” concept, *Energy Policy* 39, pp. 131–141, 2011.
- [6]. **Liliane BATTAIS et Serge DEFAYE (DEBAT) et Gilles VAITILINGOM (CIRAD)**, Perspectives de développement de l'utilisation des huiles végétales pures hors utilisations Biocarburant, Juin 2006
- [7]. **Jean-Paul LAUDE**, Table ronde : Situation de la filière Jatropha au Burkina Faso Perspectives pour le court terme (marché de l'huile_www.biofuel-africa.org_d).
- [9]. **Pierre BERTRAND**, Huile végétale un vrai biocarburant. s.n, 2007.
- [10]. « **Mécanique des fleurs** », un petit manuel technique pour adapter les moteurs Diesel aux huiles végétales, 45 pages.
- [11] **Michael Stöhr, B.A.U.M. Consult GmbH**, Réseau de zones rurales visant à accroître fortement la part des énergies renouvelables RENET 100 Projet N° NNE5-2001-357, Rapport final 2005.
- [12]. **Jean-Luc Pallas**, Guide pratique d'entretien et de réparation des Moteurs Diesel. Edition Lorsirs Nautiques.
- [13]. **Vaitilingom Gilles**, Utilisations énergétiques de l'huile de coton. Cahiers Agricultures. Vol. 15, pp. 144-149, 2006.
- [14]. **Vaitilingom Gilles**, conférence internationale "Enjeux et perspectives des Biocarburants pour l'Afrique" Ouagadougou, Burkina Faso, 27-29 novembre 2007.

- [15]. **Demirbas, Ayhan.** Relationships derived from physical properties of vegetable oil and biodiesel fuels. S.n., 2007.
- [16]. **Rousset Patrick.** Guide technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales. Brasília : s.n, 2008.
- [17]. **Y. Azoumah, J. Blin, T. Daho,** Exergy efficiency applied for the performance optimization of a direct injection compression ignition (CI) engine using biofuels, *Renewable energy*, 34 (2009) 1494–1500.
- [18]. **A.S. Ramadhas, S. Jayaraj, C. Muraleedharan.** Use of vegetable oils as I.C. engine fuels-A review. Vol. 29, pp. 727–742, 2004.
- [19]. **Pramanik,** Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. Vol. 28, pp. 239–248, 2003.
- [20]. **Agarwal, Avinash Kumar.** Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. Vol. 33, pp. 233–271, 2007.
- [21]. **C.D. Rakopoulos, K.A. Antonopoulos, D.T. Hountalas, E.G. Giakoumis.** Comparative performance and emissions study of a direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins. Vol. 47, pp. 3272–3287, 2006.
- [22]. **A. Murugesan, C. Umarani, R. Subramanian, N. Nedunchezian.** Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines-A review. Vol. 13, pp. 653-662, 2009.
- [23]. **D. Yamegueu, Y. Azoumah, X. Py, N. Zongo,** Experimental study of electricity generation by Solar PV/diesel hybrid systems without battery storage for off-grid areas, *Renewable Energy*, 36 (2011) 1780-1787.
- [24]. **B. DE THEUX,** Utilisation de l'huile de palme comme combustible dans les moteurs diesel, Travail de fin d'études. 2004.
- [26]. **B. Wickert, C.V. Nayar and W.B. Lawrance,** 'Photovoltaic-Diesel Hybrid Energy Systems for Off-Grid Rural Electrification', *International Journal of Renewable Energy Engineering*, Vol. 1, N°1, pp. 7 - 17, 1999.
- [27]. **S.SIDIBE, Post-Doctorant au 2IE,** les huiles végétales pures (support de cours), 2010-2011.
- [28]. **A. Murugesan, C. Umarani, R. Subramanian, N. Nedunchezian.** Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines-A review. Vol. 13, pp. 653–662, 2009.

- [29]. **F. Jiménez Espadafor, M. Torres García, J. Becerra Villanueva, J. Moreno Gutiérrez.** The viability of pure vegetable oil as an alternative fuel for large ships. 2009
- [31]. **Vaitilingom Gilles.** huiles végétales biocombustibles-influence de la nature des huiles et en particulier de leur composition en acide gras sur la qualité-carburant : s.n, 1992.
- [32]. **Hayet BENNADJI,** (thèse, Université de Nancy) combustion des esters éthyliques d'huiles végétales comme additifs au pétro diesel, 2010.

❖ **Sites internet**

- [1]. **Electricity access in 2009-Regional aggregates,**
<http://www.worldenergyoutlook.org/electricity.asp> consulté le 20 Avril 2011
- [8]. **Huile végétale carburant,**
<http://www.technoscience.net/?onglet=glossaire&definition=3412> consulté le 20 Avril 2011.
- [25]. **Facteur d'émission du réseau,** <http://www.cirad.bf/fr/bioenergie-mdp.php> , consulté le 15 Août 2011.
- [30]. **Solutions énergétiques alternatives pour le 21^e siècle,** www.alterenergies.org consulté le 28 Avril 2011.

ANNEXES

| | |
|--|------------|
| Annexe 1 : Généralités sur les huiles végétales carburant..... | 46. |
| Annexe 2 : Description des éléments physiques du moteur Diesel..... | 49. |
| Annexe 3 : Cycle du moteur Diesel à quatre temps..... | 50. |
| Annexe 4 : Protocole de manipulation du Kit de bicarburation..... | 51. |
| Annexe 5 : Coût de réalisation du Kit de bicarburation..... | 52. |

Annexe 1 : Généralités sur les huiles végétales carburant

1. Production des huiles végétales pures (cas de l'huile de Jatropha)

Les huiles sont obtenues à partir de plantes oléagineuses par simple pression à froid, sans solvant, décantée et filtrée, et sans modification chimique.

Les différentes étapes de traitement de la graine à l'huile végétale pure sont les suivantes :

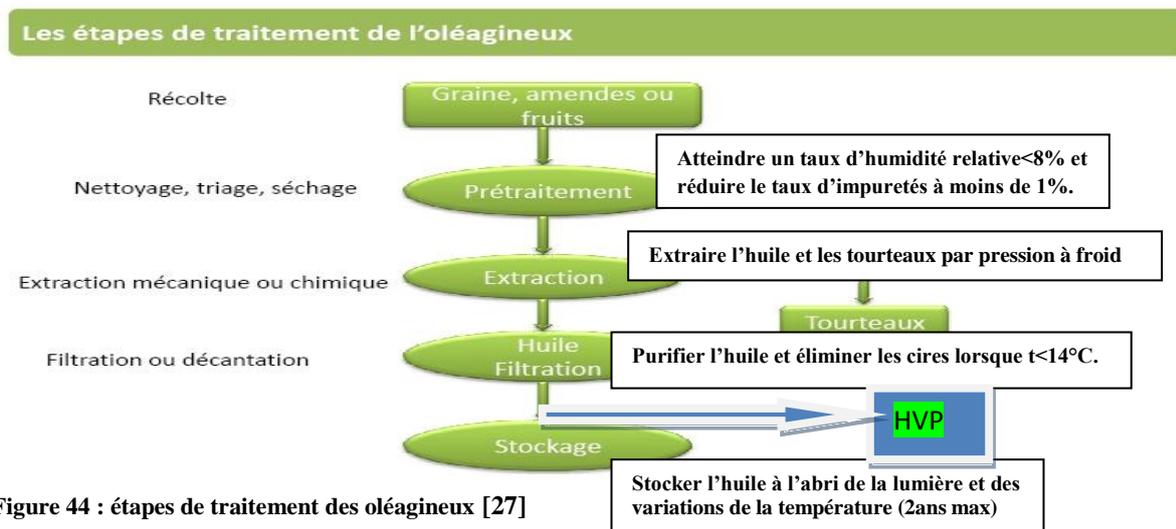


Figure 44 : étapes de traitement des oléagineux [27]

2. Etude comparative et propriétés des HVP et le Gasoil

2.1. Propriétés physico-chimiques des huiles végétales carburant

Les caractéristiques des huiles végétales sont influencées par plusieurs facteurs, dont la maîtrise de certains d'entre eux est importante pour le bon fonctionnement du moteur diesel.

Les caractéristiques de quelques huiles végétales utilisées comme carburant dans les moteurs diesels sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7: Caractéristiques physico-chimiques des HVPs [28]

| Huiles Végétales | Viscosité Cinématique à 38°C (mm ² /s) | Indice de Cétane | PCI (MJ/kg) | Point Trouble (°C) | Point de Fusion (°C) | Point Eclair (°C) | Densité (kg/l) |
|-----------------------|---|------------------|-------------|--------------------|----------------------|-------------------|----------------|
| Tournesol | 33.9 | 37.1 | 39.60 | 7.2 | -15 | 274 | 0.9161 |
| Palme | 39.6 | 42.0 | - | 31.0 | - | 267 | 0.9180 |
| Coton | 33.5 | 41.8 | 39.50 | 1.7 | -15 | 234 | 0.9148 |
| Sésame | 35.5 | 40.2 | 39.30 | -3,9 | -9,4 | 260 | 0.9133 |
| Arachide | 39.6 | 41.8 | 39.80 | 12.8 | -6,7 | 271 | 0.9026 |
| Colza | 37.0 | 37.6 | 39.70 | -3,9 | -31,7 | 246 | 0.9115 |
| Soja | 32.6 | 37.9 | 39.60 | -3,9 | -12,2 | 254 | 0.9138 |
| Jatropha ¹ | 35.98± 1.3 | - | 39.071 | 9±1 | 4±1 | 229 ±4 | 0.917 ±1 |
| Diesel | 3.06 | 50 | 43.8 | - | -16 | 76 | 0.8550 |

¹Propriétés de l'huile de Jatropha à 40°C

Le tableau ci-dessus indique que la viscosité cinématique de l'huile de Jatropha pure varie dans la fourchette de 35 à 37 mm²/s à 40°C. La viscosité élevée de ces huiles en général est due à leur masse moléculaire importante [20].

Le point éclair est la température à laquelle un fluide émet suffisamment de vapeurs pour qu'elles puissent s'enflammer au contact d'une flamme ou d'une étincelle. Les produits peuvent être classés en fonction de leur point-éclair :

- $< 0^{\circ}\text{C}$: extrêmement inflammables
- de 0°C à 21°C : facilement inflammables
- de 21°C à 55°C : inflammables

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) représente la quantité de chaleur par unité de masse cédée par le carburant. Les valeurs de PCI de ces HVPs sont de l'ordre de 39-40 MJ /kg et celui du gasoil est d'environ 44 MJ / kg. C'est la présence de l'oxygène dans la structure chimique de ces huiles qui fait baisser leur PCI d'environ 10% [20], comparé à celui du gasoil. Par ailleurs, les essais menés par M. S. SIDIBE ont montré que la consommation spécifique du moteur diesel (avec un GE de 6KW) avec comme combustible l'huile de Jatropha est de 15 à 20% supérieure à celle du gasoil ; Cela est dû à un pouvoir calorifique plus faible de cette huile.

L'indice de cétane mesure la facilité d'inflammation du combustible lorsqu'il est comprimé, il est dans la gamme de 37-42 pour ces huiles. Plus il est élevé, plus le carburant est facilement inflammable (démarrage à froid aisé). L'indice de cétane doit être haut pour augmenter l'efficacité thermodynamique du moteur et pour réduire au minimum les émissions, notamment ceux de HC (hydrocarbures non-brûlés) et NOx [29]. Pour A.S. Ramadhas et al [18], le point de fusion et le point trouble des huiles végétales révèlent une sensibilité plus grande qu'aux basses températures.

La composition chimique de ces huiles végétales correspond dans la plupart des cas à un mélange de 95% de triglycérides et 5% d'acides gras libres, de stérols, cires, et autres composants minoritaires. Les triglycérides sont des tri-esters formés par la réaction d'acides gras sur les trois fonctions du glycérol. La teneur et la position de ces acides gras déterminent la texture de l'huile, plus une huile sera riche en acides gras saturés, plus elle sera solide aux températures faibles [30].

Les huiles peuvent se diviser en 4 grands groupes selon leur indice d'iode explicités dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8: Indice d'iode des différentes huiles végétales[31].

| Groupe | Nature d'huile | Indice d'iode |
|--|--|---------------|
| Huiles saturées | Coprah, Palme, Karité | 5 à 50 |
| Huiles mono-insaturées (semi-siccatives) | Olive, Arachide, Colza, Sésame, Jatropha | 50 à 100 |
| Huiles di-insaturées (semi-siccatives) | Tournesol, Coton, Soja, Mais, Pépin | 100 à 150 |
| Huiles tri-insaturées (siccatives) | Lin, Bois de Chine | > 150 |

Dans un objectif de développement de la filière huile végétale pure à une échelle plus importante, il devient indispensable de mettre au point une norme de qualité de production des huiles carburant.

2.2. Qualité des huiles carburant et normes

Propriétés physicochimiques des huiles : les HVP ont des propriétés physico-chimiques différentes de celles du gazole, ce qui amène à prendre des précautions nécessaires en vue de leur utilisation comme carburant dans les moteurs diesels.

En Europe une prénorme d'origine Allemande pour l'utilisation des HVPs comme carburant notamment sur l'huile de colza existe [9]. Le Burkina Faso comme la plus part des pays africains n'en dispose pas encore. Cette prénorme (tableau 12) est établit dans une logique de carburant pour le transport. Néanmoins un certain nombre des paramètres (teneur en eau, en particule, en phosphore, Acidité) doivent être analysés avant son utilisation comme carburant dans les moteurs.

Tableau 9: Prénorme DIN 51605 pour la production d'huile carburant [9]

| Propriétés/Contenus | Unités | Valeurs limites | |
|--|--------------------|-----------------|-------|
| | | Min | Max |
| Propriétés caractéristiques de l'huile de colza | | | |
| Densité(15°C) | Kg/m ³ | 900,0 | 930,0 |
| Point éclair | °C | 200,0 | - |
| viscosité cinématique à 40°C | mm ² /s | - | 36,0 |
| Pouvoir calorifique | kJ/kg | 36.000 | - |
| Indice de cetane | - | 39 | - |
| carbone résiduel | % | - | 0,40 |
| Indice d' iode | g /100g | 95 | 125 |
| Contenu en soufre | mg/kg | - | 10 |
| Teneur en particules | mg/kg | - | 24 |
| Acidité | mg KOH/g | - | 2,0 |
| Stabilité à l'oxydation (110 °C) | h | 6,0 | - |
| Contenu en phosphore | mg/kg | - | 12 |
| Contenu en calcium et magnésium | mg/kg | - | 20 |
| Contenu en cendres | % | - | 0,01 |
| Contenu en eau | % | - | 0,075 |

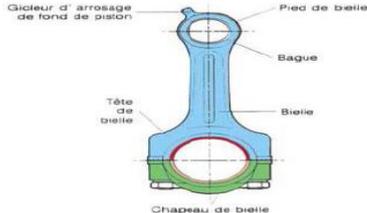
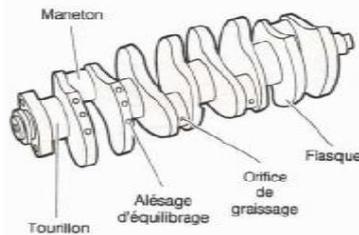
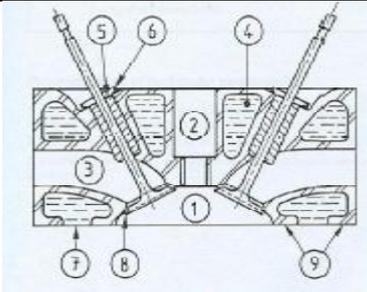
Les normes européennes (normes Euro) établies depuis 1990 limitent le taux de rejets de gaz d'échappement dans l'atmosphère.

Tableau 10: Normes euros (panorama 2008-IFP) [32]

| Normes | Année | HC ^a +NO _x mg.km ⁻¹ | NO _x mg.km ⁻¹ | CO mg.km ⁻¹ | PM ^a mg.km ⁻¹ |
|-----------------|-------|---|--|---------------------------|--|
| Euro I | 1992 | 970 | - | 2720 | 140 |
| Euro II | 1996 | 700 | - | 1000 | 80 |
| Euro III | 2000 | 560 | 500 | 640 | 50 |
| Euro IV | 2005 | 300 | 250 | 500 | 25 |
| Euro V | 2009 | 230 | 180 | 500 | 5 |
| Euro VI | 2014 | 170 | 80 | 500 | 4.5 |

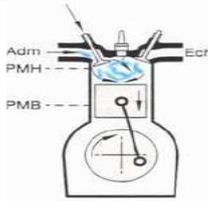
^ahydrocarbures (HC), particules (PM)

Annexe 2 : Description des éléments physiques du moteur Diesel.

| Elément | Fonction | Schéma |
|--------------------|---|---|
| Cylindre | <p>Ses différentes fonctions sont :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Résister à la pression des gaz de la combustion qui tendent à le dilater et pousser sur la culasse. 2. Guider le piston, d'où la nécessité de réduire le frottement et d'augmenter la résistance à l'usure. 3. Contenir le liquide de refroidissement tout en résistant à la corrosion. |  |
| Piston | <p>Le piston remplit 3 fonctions tout en étant mobile, il doit contribuer :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Etanchéité entre la chambre de combustion et le carter. Il doit supporter la pression des gaz créée par la combustion et la transmettre par l'intermédiaire de la bielle au vilebrequin, 2. Résister aux forces latérales qu'il exerce sur la paroi du cylindre, 3. Conduire la chaleur aussi rapidement que possible à la paroi du cylindre, |  |
| Soupapes | <p>Chaque cylindre d'un moteur à 4 temps possède deux soupapes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 soupape d'admission, • 1 soupape d'échappement <p>Elles assurent l'entrée et la sortie des gaz dans la chambre de combustion. Leur ouverture et fermeture sont commandées par l'arbre à cames.</p> |  |
| Bielle | <p>La bielle est la pièce mécanique dont une extrémité est liée au piston par l'axe de piston et l'autre extrémité au maneton du vilebrequin. Elle permet la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement circulaire continu du vilebrequin.</p> |  |
| Vilebrequin | <p>Le vilebrequin ou arbre moteur est la manivelle en forme de Z qui reçoit la poussée de la bielle et fournit un mouvement rotatif à partir du mouvement alternatif du piston.</p> <p>Fonctions :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Couple pour entraîner le véhicule. 2. Couple pour entraîner les auxiliaires du moteur (arbre à came, soupape,...) |  |
| Culasse | <p>La culasse assure la fermeture des cylindres dans leur partie supérieure, constituant ainsi la chambre de combustion. Elle permet :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'arrivée et l'évacuation des gaz; • la mise en position des éléments de la distribution et d'une partie de l'allumage; • l'évacuation rapide des calories, le point le plus chaud du moteur étant précisément la chambre de combustion. |  |

| | | |
|------------------|--|---|
| Injecteur | L'injecteur ou pulvérisateur est fixé et positionné dans un support dénommé porte injecteur. C'est un organe de haute précision qui assure la pulvérisation correcte et la répartition du combustible refoulé par la pompe d'injection, dans la chambre de combustion du moteur. |  |
|------------------|--|---|

Annexe 3 : Cycle du moteur Diesel à quatre temps.

| TEMPS | DEPLACEMENTS | | POSITIONS SOUPAPES | | OPERATIONS |
|-------------------------------|---|-------------------------------|--------------------|----------|--|
| | Schéma | Piston et vilebrequin | Adm. | Ech. | |
| ADMISSION |  | Le piston descend 180° | O | F | Le piston en descendant crée une baisse de pression qui favorise l'aspiration des gaz. |
| COMPRESSION |  | Le piston Monte 180° | F | F | Le piston comprime les gaz jusqu'à ce qu'ils n'occupent plus que la chambre de combustion (pression+chaleur) |
| COMBUSTION DETENTE |  | Le piston descend 180° | F | F | L'étincelle d'une bougie (ou l'injection de gasoil comprimé) enflamme le mélange. La chaleur dégagée dilate le gaz qui pousse violemment le piston vers le bas. TEMPS MOTEUR |
| ECHAPPEMENT |  | Le piston Monte 180° | F | O | En remontant, le piston chasse les gaz brûlés devant lui. A ce moment, le moteur se trouve à nouveau prêt à effectuer le premier temps. |

Source : Cours De Technologie Automobile Mm Fall, Guissé & Bâ Du L.T.I.D. De Dakar.

Annexe 4 : Protocole de manipulation du Kit de bicarburation

Le protocole suivant permet d'effectuer les essais avec le moteur du GE doté d'un kit de bicarburation en toute sécurité.

❖ Au démarrage :

1-Apprêter les fiches de relevé

2- Ouvrir les disjoncteurs du coffret des charges du local

3-Vérifier que les deux réservoirs contiennent de carburant (gasoil et HJP)

4-Vérifier que les futs d'eau de refroidissement sont remplis (réservoir du radiateur)

5-Démarrer le GE au gasoil

6-Laisser tourner le moteur à vide pendant 10 minutes

7-Charger progressivement le moteur (70-80% de la PN) (ou vérifier que la température des gaz d'échappement est supérieur à 300°C et basculer)

8-Laisser tourner pendant 5 minutes

9-Basculer de gasoil à l'HJP

-Fermeture de l'interrupteur K1 pour activer l'EV1 et la Pompe

-Activer EV2 en fermant K2 30 secondes après la fermeture de K1

-Laisser tourner pendant 5 minutes

10-Mettre en marche le chronomètre et relever les mesures conformément à la fiche technique de relevé.

11-Arrêter le chronomètre en fin d'essai.

12-Reprendre les étapes 7 et 10 en cas de variation de charges.

❖ A l'arrêt

1-Basculement de l'HJP au gasoil

Ouverture de l'interrupteur de l'EV1 et pompe puis celui de l'EV2 30 minutes après

2-Laisser tourner le moteur pendant 5 minutes

3-Décharger le moteur

4-Arrêter le moteur après 5 minutes de fonctionnement à vide.

Annexe 5 : Coût de réalisation du kit de bicarburation.**Tableau 11: Coût de réalisation du kit de bicarburation à commande semi-automatique**

| Réf | Désignation | Qté | Rôle | PU (FCFA) | PT (FCFA) |
|---|---|-----|--|--------------|---------------------|
| Circuit d'alimentation de l'HVP | | | | | |
| 1 | Réservoir de 15 l | 1 | Stockage de l'huile | 22 000 | 22 000 |
| 2 | Flexible (durites) | 5m | Servir de canalisation du réservoir à la pompe d'injection du moteur | 800 | 4000 |
| 3 | Filtre | 1 | Filtrer l'H.J.P avant de l'envoyer dans le moteur | 10 000 | 10 000 |
| 4 | Pompe | 1 | Alimenter le circuit d'HV et compenser les pertes de charges dans les flexibles | 198 700 | 198 700 |
| 5 | Collier de serrage | 12 | Assurer l'étanchéité des raccords | 200 | 2400 |
| 6 | Tube en Té + 3Pipes | 1 | Récupération du carburant retour | 5500 | 5 500 |
| 7 | Téflon | 1 | Assurer l'étanchéité au niveau des filetages | 250 | 250 |
| Basculement semi-automatique | | | | | |
| 8 | Boîtier électronique Représenté par un simple interrupteur | 2 | Piloter l'électrovanne en fonction du signal électrique de la batterie (12Vcc) | - | - |
| 9 | Electrovanne 3 voie | 2 | Sélectionner le circuit d'alimentation du moteur en fonction du signal qu'elle reçoit de l'interrupteur. | 30 000 | 60 000 |
| 10 | Fusibles 3,15A | 2 | Protéger les électrovannes | 515 | 1030 |
| Support du réservoir et prestations diverses : | | | | | 5 000 |
| Total des dépenses : | | | | | 308 880 FCFA |