

***CARACTERISATION DES MOTEURS DES PLATEFORMES
MULTISERVICES POUR UNE UTILISATION OPTIMALE DES
SERVICES ET DE L'HVP JATROPHA EN SUBSTITUTION AU
GASOIL PAR BICARBURATION***

PROGRAMME PARIER&SETUP (CENTRE BENIN, FINANCEMENT PRINCIPAL UE)

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU

**MASTER SPECIALISE EN GENIE ELECTRIQUE
ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES**

OPTION : *ENERGIES RENOUVELABLES*

Présenté et soutenu publiquement le [Date] par

Dimitri Ghislain CHINCOUN

Travaux dirigés par : Benjamin PALLIERE

Expert services énergétiques, GERES Afrique
de l'Ouest (GAO)

William FOTSEU NOUMOYE

Ingénieur, LBEB_2IE

Jury d'évaluation du stage :

Président : COLLARD Xavier

Membres et correcteurs : Daniel YAMEUGEU



Promotion [2010/2011]

CITATIONS

L'âme se nourrit de défis.

(Dimitri CHINCOUN)

REMERCIEMENTS/ DEDICACES

Au Président de la Fondation ZIE, Mr Paul GINIES, tous les enseignants, chercheurs et cadres administratifs pour le travail sérieux et important que vous faites à travers cette formation, pour le développement des compétences africaines

A tous mes collègues du GERES pour leur soutien et appui technique

A Benjamin PALLIERE et William NOUMOYE FOTSEU pour avoir accepté de diriger ces travaux

A Mme Sylvie OUEDRAOGO (Coordinatrice FOAD M2GEER 2010/2011) pour avoir supporté tous nos caprices, et tous mes camarades pour les expériences vécues et partagées tout au long de cette formation ; plus particulièrement à DADE Euphraïm pour tes nombreuses sollicitations qui m'ont permis de me concentrer sur la formation

A mon père CHINCOUN Paul, ma mère ATINDOGBE Assiba, et tous mes frères et sœurs qui croient toujours en moi

A toi MAMA BIO Samiratou, pour ta confiance et ton soutien

Enfin à Dieu, pour l'inspiration, la force et le courage qu'il nous accorde toujours. Ton nom est grand et nous ne cesserons jamais de te louer.

RESUME

Au nombre des moteurs des plateformes multiservices du programme SETUP il y en a de grande puissance (16ch). Compte tenu des puissances des différents équipements à entraîner, le régime de fonctionnement de ces moteurs varie beaucoup et peut parfois être faible. Ceci a un impact direct sur l'efficacité énergétique du moteur (consommation spécifique) et sur la température de la chambre de combustion qui est un paramètre très important dans l'utilisation de l'HVP par bicarburation dans ces moteurs. Nous avons déterminé ici les niveaux de charge pour lesquelles on obtient de bonnes conditions d'utilisation de l'HVP Jatropha et une meilleure consommation spécifique du moteur.

Mots Clés :

-
- 1 – Plateforme multiservices**
 - 2 – Moteur Diesel**
 - 3 – Délai d'auto-inflammation**
 - 4 – Huile Végétale Pure de Jatropha**
 - 5 – Consommation spécifique**

ABSTRACT

Among the engines of program SETUP multifunction-platform's, there are high power engines (16hp). Given the power needed by the different equipments run by the engine, the regime of operation of these engines varies widely and can sometimes be low. This has a direct impact on the efficiency of the engine (in terms of specific fuel consumption) and on the temperature of the combustion chamber, which is a very important parameter in the use of crude oil in these engines with a double fuel tank technology. Here we figured out the levels of support that allow good conditions for the use of crude oil in the engine, and a better specific fuel consumption.

Key words:

-
- 1 – Multifunction Platform**
 - 2 – Diesel engine**
 - 3 – Ignition delay**
 - 4 – Jatropha crude oil (JCO)**
 - 5 – Specific fuel consumption**

LISTE DES ABREVIATIONS

ZIE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Ch : Cheval vapeur

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CS : Consommation Spécifique

GERES : Groupe Energies Renouvelables Environnement et Solidarités

HVP : Huile Végétale Pure

ID : Injection Directe

II : Injection Indirecte

PFMS : PlateForme MultiServices

SETUP : Services Energétiques et Techniques à Usage Productif

V : Volt

W : Watts

SOMMAIRE

ABSTRACT	iii
I. Introduction	1
II. Utilisation des HVP dans les moteurs diesel	4
III. Objectifs du travail	11
IV. Matériels et Méthodes	11
V. Résultats	18
VI. Discussion et Analyses	23
VII. Conclusions	31
VIII. Recommandations - Perspectives	31
IX. Annexes	33
Annexe I : Cycle à quatre temps du moteur diesel	34
Annexe II : Système de bicarburation avec préchauffage de l'huile par la chaleur des gaz d'échappement	35
Annexe III : Caractéristiques physiques et carburants de l'HVP Jatropha comparées au gasoil	36
Annexe IV : Equipements des plateformes	37
Annexe V : Plan d'infrastructure d'une plateforme	38
Annexe VI : Formule de calcul de la corrélation entre deux variables	39
Annexe VII : Quelques tableaux de données et graphes	40
Annexe VII : Quelques photos et images	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : <i>Quelques points d'auto-inflammation</i>	8
Tableau 2 : <i>Feuille de relevé des mesures pour le test de caractérisation du moteur</i>	16
Tableau 3 : <i>Feuille de relevé de mesures test d'efficacité énergétique</i>	17
Tableau 4 : <i>Valeurs des CS en fonction de la charge</i>	22
Tableau 5 : <i>Puissance des équipements et charge correspondante sur moteur 16ch</i>	24
Tableau 6 : <i>Tableau des valeurs compilées essai 1 sur moteur NISSAN à ID</i>	40
Tableau 7 : <i>Tableau des valeurs compilées essai 2 sur moteur NISSAN à ID</i>	40
Tableau 8 : <i>Extrait tableau des valeurs compilées essai 3 sur moteur NISSAN à ID</i>	40
Tableau 9 : <i>Extrait tableau des valeurs compilées essai 4 sur moteur PML GOLD à II</i>	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : A gauche injection indirecte avec préchambre et à droite injection directe	5
Figure 2 : Processus d'inflammation d'une goutte d'huile (gasoil ou HVP)	6
Figure 3 : <i>Principaux paramètres de la combustion dans le moteur diesel</i>	9
Figure 4 : <i>Schéma de câblage du dispositif</i>	14
Figure 5 : Courbes d'évolution des températures de la chambre de combustion en fonction de la charge	20
Figure 6 : <i>Exemple de courbe de relevé de température du dataloger</i>	41

LISTE DES IMAGES

Image 1 : Thermocouple sur collecteur échappement	16
Image 2 : Thermocouple sur vis préchambre de combustion	16
Image 3 : <i>Test au CISE</i>	42
Image 4 : <i>Moteur NISSAN 16ch au CISE</i>	42
Image 5 : <i>Moteur PML GOLD 16ch</i>	42
Image 6 : <i>Test à Kodota</i>	42
Image 7 : <i>Banc de charge en fonctionnement</i>	42
Image 8 : <i>Pinces ampérométriques, voltmètre et chrono</i>	42

I. INTRODUCTION

L'accès aux services énergétiques est aujourd'hui considéré comme essentiel à la mise en place des conditions permettant une croissance durable et donc de ce fait à l'atteinte du premier OMD¹ qui vise la réduction de la pauvreté. Dans les zones rurales des pays subsahariens, les services énergétiques adéquats, abordables et fiables sont presque inexistants, et ces localités demeurent dans l'extrême pauvreté. Le développement de ces zones étant un levier pour le développement de ces pays, plusieurs solutions ont été envisagées pour l'amélioration de l'accès aux services énergétiques modernes dans ces localités. Au nombre de ces solutions, se trouve l'initiative du PNUD².

En effet le PNUD a conceptualisé depuis 2004 une démarche pour favoriser le développement dans les zones rurales en Afrique de l'Ouest (Mali, Burkina-Faso) dénommé Plateforme Multifonctionnelle. Il s'agit d'une installation comportant plusieurs équipements de transformation agro alimentaire ou artisanales autour d'un unique moteur thermique qui assure leur motorisation. La justification principale de cet outil est la centralisation des services offerts sur un même espace, et une meilleure rentabilité par l'utilisation d'un seul moteur pour différents services (investissement mutualisé, à priori meilleure consommation en carburant). Depuis, beaucoup de projet se sont développés autour de cet outil au Mali, au Burkina-Faso, au Ghana, au Cameroun et au Bénin. Cependant les plateformes développés par les différents projets ne se ressemblent toujours pas (configuration, infrastructures, types et nombre d'équipement, etc.).

L'ONG GERES-BENIN a initié depuis 2007 un programme de développement de l'accès aux services énergétiques en zone non électrifiée, via entre autre la mise en place de plateforme multiservices, dénommé projet SETUP (Services Energétiques et Techniques à Usage Productif). Ce projet est dans sa phase de mise en œuvre avec 22 plateformes en cours d'installation et d'exploitation.

Ce développement à grande échelle des plateformes suppose de dépasser un certains nombres de problématiques technologiques, sociales et économiques. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement à un aspect environnemental qu'il est impératif

¹ Objectifs du Millénaire pour le Développement

² Programme des Nations Unies pour le Développement

de prendre en compte : le dégagement de gaz à effet de serre (GES) issues de la combustion de gasoil fossiles. Cet enjeu important pour le GERES qui, à travers la mise en place de filières de proximité de production d'Huile Végétale Pure (HVP) Jatropha, veut intégrer l'utilisation de cet agro-carburant dans ces moteurs. Les moteurs utilisés pour les plateformes sont des moteurs diesel indiens de type LISTER de 12ch³ ou 16ch à injection directe ou indirecte. En effet la possibilité d'utilisation d'HVP dans les moteurs de ce type semble prometteuse. Plusieurs travaux ont été réalisés dans ce sens. Les plus intéressants compte tenu de leur ressemblance avec le cas des plateformes, sont les travaux de l'association Belge CODEART (« Essais comparatifs de deux moteurs diesels, l'un alimenté à l'huile de palme et l'autre, au gasoil »), du chercheur du CIRAD Gilles VAITILLIGOM (« Extraction, conditionnement et utilisation des Huiles Végétales Pures comme carburant ») et surtout ceux de l'ingénieur ZiE William FOTSEU NOUMOYE (« Possibilités d'utilisation de l'huile de Jatropha dans les moteurs diesels du cercle de KITA »). Ces travaux s'intéressent entre autre, aux techniques d'utilisation de l'HVP dans les moteurs de type LISTER, qui sont des copies réalisées en Inde du moteur stationnaire inventé par la société anglaise LISTER.

Les travaux de CODEART ont consisté à réaliser cent cinquante heures de fonctionnement de deux moteurs identiques de type LISTER de marque FIELDMARSHALL FM-II, alimenté l'un avec du gasoil et l'autre avec de l'huile de palme préchauffée (60°C à 80°C). Ces travaux ayant pour objectif d'évaluer la durabilité du moteur fonctionnant à l'huile de palme, montrent que l'utilisation de l'huile de palme ne pose pas de problème majeur en notant une consommation en masse de carburant plus importante et une baisse de rendement du moteur qui se traduit par des températures de gaz d'échappement plus élevées. La surconsommation massique de 24% (303g/kWh pour l'huile de palme et 243g/kWh pour le gasoil) serait liée au fait que le PCI⁴ (pouvoir calorifique inférieur) de l'huile de palme et des autres HVP d'ailleurs soit inférieur à celui du gasoil (46 500kJ/kg pour le gasoil contre 36 700kJ/kg pour l'huile de palme soit 15% de différence).

L'ingénieur William FOTSEU a obtenu des résultats semblables avec l'huile de Jatropha dans le cadre des travaux réalisés sur un moteur indien de 8ch qui entraîne un moulin à céréales. La consommation en huile de Jatropha était de 355g/kWh contre 277g/kWh (28%) pour des PCI de 36 700kJ/kg pour l'huile de Jatropha et 44 749kJ/kg pour le gasoil (18%). Il faut préciser

³ Ancienne unité de puissance ; 1ch = 736 Watts

⁴ Quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une unité (masse ou volume) de combustible

que les tests ont été répétés six fois sur de courtes périodes (8 à 29 minutes). Après ces tests de mesures, le moulin est resté en fonctionnement pendant quinze jours et on note à l'ouverture de la culasse du moteur un encrassement plus important (que le fonctionnement au gasoil) à l'injecteur, aux soupapes et sur la tête du cylindre.

Le chercheur Gilles VATILIGOM a montré que le délai d'auto inflammation des HVP s'améliore et se rapproche de celui du gasoil pour des températures de chambre de combustion de 500°C au moins. Cette température est fonction de la charge du moteur et d'après les tests d'analyse de combustion d'HVP de graines de coton dans un moteur diesel du doctorant ZIE Sayon SIDIBE, la combustion est meilleure pour des charges d'au moins 60% (par rapport à la puissance nominale du moteur) pour un groupe électrogène à injection directe.

L'Ingénieur Benjamin PALLIERE quant à lui, a essayé de caractériser un moteur à injection indirecte de type LISTER (Rhino 10ch) au mali, en évaluant de façon expérimentale l'évolution de la température de la chambre de combustion en fonction de la charge. Les températures sont mesurées à la sortie de l'échappement et permettent d'évaluées celle de la chambre de combustion. Pour contrôler et mesurer facilement la charge, le moteur est relié par le biais d'un alternateur à des bancs de charge constitués l'un de lampes de 500W et l'autre de lampes de 60W. Les mesures en fonctionnement réel avec un moulin à céréales (mil, sorgho, maïs, riz) ont permis de voir que les températures de la chambre de combustion ne semble pas suffisantes pour une bonne combustion des HVP.

Les moteurs des plateformes du programme PARIER&SETUP sont des moteurs de grandes puissances (12ch et 16ch). Les moteurs de 12ch s'apparentent fortement dans leur fonctionnement à ceux des 8 et 10ch. Les pièces et éléments (piston et autres) sont d'ailleurs identiques. Ceux de 16ch (deux à injection directe et six à injection indirecte) diffèrent des moteurs ayant fait l'objet des études sus citées de par leur taille et leur puissance, même si la technologie reste la même à des détails près. Le contexte d'utilisation (régime et charges) n'est pas le même. Il s'agit donc de faire dans un premier temps une caractérisation de ces moteurs, ensuite développer la technique la plus appropriée pour l'utilisation d'HVP Jatropa, définir les conditions et mesures d'accompagnement technique sur la base des résultats des différents tests qu'on aura à effectuer. Aussi nous tenterons d'analyser l'impact du point de vue efficacité énergétique, de l'utilisation en sous régime de ces moteurs, vu que cela risque d'arriver fréquemment.

II. UTILISATION DES HVP DANS LES MOTEURS

DIESEL

INTERET DE L'UTILISATION D'HVP DANS LES MOTEURS DIESEL

L'intérêt de l'utilisation des HVP est de trois ordres à savoir :

- Besoin de trouver une alternative au gasoil qui est un dérivé du pétrole dont la raréfaction devient de plus en plus évidente. Les HVP ayant des propriétés énergétiques proches du gasoil constituent une solution intéressante
- La principale source de pollution aujourd'hui est due à l'utilisation de combustible fossiles dont le gasoil. Le cycle de carbone des HVP étant neutre (les émissions existent mais très faibles), leur utilisation permet de préserver l'environnement⁵
- L'une des HVP les plus en vue aujourd'hui est celle du Jatropha qui n'est pas comestible et son exploitation n'est donc pas en compétition⁶ avec l'agro-alimentaire.

LA COMBUSTION DANS LES MOTEURS DIESEL

1. Qu'est-ce qu'un moteur diesel

Un moteur diesel est un moteur à combustion interne⁷ à allumage (spontané) par phénomène d'auto inflammation sous l'effet de la pression (rapport volumétrique⁸ élevé : 14 à 20ⁱ). La compression de l'air admis dans la chambre de combustion élève rapidement sa température (27 à 160°C), ce qui provoque l'auto-inflammation du carburant à l'injection. L'auto-inflammation est d'autant plus bonne et rapide que la pression et la température de la chambre de combustion sont élevées.

Le moteur diesel fonctionne au gasoil (le plus souvent), au fuel lourd et pourrait fonctionner aux huiles végétales pures et suivant le cycle à quatre temps : admission, compression, combustion-détente et échappement (*Annexe I*). Les temps de fonctionnement sont

⁵ A condition que les ressources soit bien gérées et leur renouvellement bien organisée en harmonie avec leur exploitation.

⁶ Cependant sa culture pourrait l'être si elle n'est pas bien organisée. GERES BENIN met en œuvre des plantations espacées permettant l'association de cultures telles que le piment, le niébé, l'arachide et le soja

⁷ Un moteur à combustion interne est une machine thermique qui transforme l'énergie chimique d'un combustible en énergie mécanique ; la combustion peut être enclenchée par un apport d'énergie (moteur à essence) ou par phénomène d'auto inflammation du carburant sous l'effet de la pression (moteur diesel)

⁸ Il représente le nombre de fois le volume d'air admis (admission) sera comprimé (en fin de compression)

synchronisés de façon précise par le système d'arbre à came. Le carburant est injecté au troisième temps où il se produit son inflammation et la détente des produits de combustion qui permet de récupérer donc une partie de l'énergie produite en travail mécanique par le biais du piston. Une partie de la chaleur restante chauffe les parois internes du moteur. Le reste est dissipé à travers les gaz d'échappement. Les éléments essentiels des moteurs diesel sont : le cylindre, le piston, la culasse, la pompe d'injection, l'injecteur, l'embellage, le vilebrequin et les arbres à cames.

2. Les différents types de moteur diesel

On peut classer les moteurs diesel en deux grandes catégories : les moteurs diesel à injection directe et les moteurs diesel à injection indirecte.

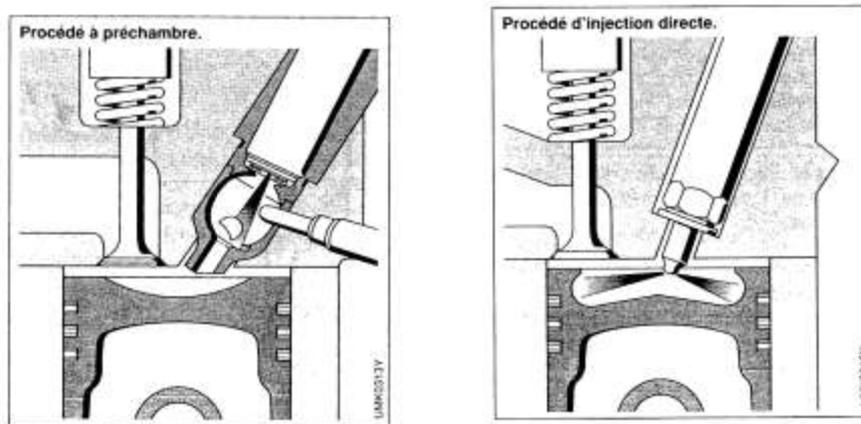


Figure 1 : A gauche injection indirecte avec préchambre et à droite injection directe

Dans les moteurs à injection directe, l'injecteur pulvérise le carburant directement dans la chambre de combustion formée par la tête de piston et la culasse. Sur les moteurs fixes de type LISTER, on les reconnaît à la position oblique du corps de l'injecteur.

Ceux à injection directe ont une préchambre de combustion dans laquelle le carburant est pulvérisé avant d'atteindre la chambre de combustion. Dans la préchambre, les gouttes d'huiles subissent un tourbillonnement qui les rend plus fines avant d'atteindre la chambre de combustion. Elles sont aussi réchauffées par une bougie de préchauffage (cas des voitures) ou par une vis métallique (cas des moteurs de type LISTER à injection indirecte). La combustion du carburant dans la chambre de combustion en est donc améliorée. Les moteurs à injection indirecte sont de ce fait plus faciles à adapter à l'utilisation d'HVP.

3. Comment s'effectue la combustion dans un moteur diesel

La combustion est une réaction chimique exothermique (oxydoréduction d'un composé organique) qui ne se produit que lorsque trois éléments sont réunis : le combustible, le comburant et l'énergie d'activation.



La combustion se déroule en trois phases : l'inflammation, la propagation de la flamme et l'extinction.

L'inflammation, étape la plus critique de la combustion, a lieu lorsque les conditions critiques (température, pression, rayon du volume de gaz) sont atteintes. Dans le moteur diesel, le carburant est pulvérisé dans la chambre de combustion (ou la préchambre) et l'inflammation des gouttes de carburant évolue selon le processus suivant :

- La température de la goutte augmente dans l'air comprimé, jusqu'à atteindre celle pour laquelle l'ébullition a lieu
- La température d'ébullition étant atteinte, la goutte diffuse des vapeurs de combustibles ; sa masse et sa taille diminuent
- Les vapeurs de carburant continuent de s'échauffer et s'enflamment spontanément dans l'air lorsque la température d' (auto) inflammation est atteinte
- Lorsque l'inflammation se produit, une flamme est créée autour de la goutte et diffusant ainsi un flux de chaleur vers la goutte dont la masse et la taille continuent de diminuer. La chaleur issue de la combustion des premières vapeurs contribuent donc au réchauffage, évaporation et inflammation de la goutte restante. Nous parlons alors d'auto-inflammation.

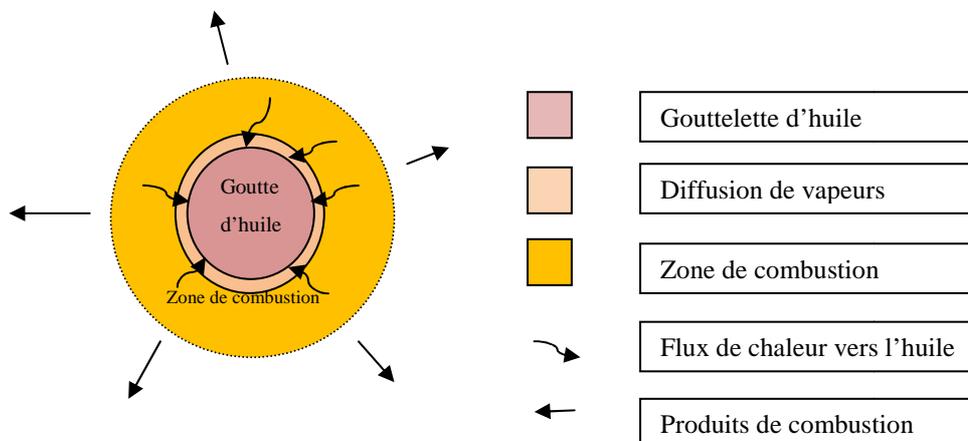


Figure 2 : Processus d'inflammation d'une goutte d'huile (gasoil ou HVP)

Ce processus se déroule dans un délai très court appelé délai d'auto inflammation qui peut varier en fonction des caractéristiques physico chimiques du combustible et de la pression et la température de la chambre de combustion. Il s'améliore (diminue) avec l'augmentation de la pression et de la température de la chambre de combustion.

4. Quels sont les principaux paramètres de la combustion dans un moteur diesel (*Annexe I*)

a) Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est la quantité d'énergie libérée par la combustion complète d'une unité de combustible. Une partie de cette énergie est utilisée par l'eau obtenue de la combustion pour se vaporiser. On parle donc de PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur) lorsqu'on considère l'eau encore à l'état liquide et de PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) lorsqu'on la considère vaporisée. Le PCI est beaucoup plus proche de la réalité parce que l'eau obtenue de la combustion est toujours à l'état vapeur. C'est donc pourquoi la plupart du temps c'est par le PCI qu'on désigne le pouvoir calorifique d'un combustible.

a) Indice de cétane

L'indice de cétane indique la capacité d'un carburant à s'enflammer sur une échelle de 0 à 100. Un carburant à haut indice de cétane est caractérisé par sa facilité à s'auto enflammer.

b) Point éclair

Un liquide d'un point de vue physique n'est pas inflammable. C'est le mélange des vapeurs émises par le liquide dans l'air qui peut former un mélange gazeux inflammable. Il existe donc pour chaque combustible une température minimale à partir de laquelle il émet suffisamment de vapeurs pour former avec l'air ambiant, un mélange gazeux qui s'enflamme sous l'effet d'une source d'énergie calorifique telle qu'une flamme, une étincelle etc. Cette température est appelée point éclair (flash point en anglais) ou point d'inflammabilité. A cette température les émissions de vapeurs ne sont pas suffisantes pour que la combustion s'entretienne d'elle-même.

c) Point d'inflammation

Le point d'inflammation est la température minimale à laquelle un liquide émet suffisamment de vapeurs pour former avec l'air ambiant un mélange inflammable dont la combustion une fois débutée puisse s'entretenir d'elle-même après retrait de la source d'allumage. Il est supérieur au point éclair de quelques degrés. Entre le point éclair et le point d'inflammation, les vapeurs s'enflamment mais ne peuvent continuer à brûler sans apport extérieur d'énergie.

d) Point d'auto inflammation

Le point d'auto-inflammation est la température à partir de laquelle un combustible s'enflamme spontanément en l'absence d'une source d'allumage.

Quelques points d'auto-inflammation

SUBSTANCE	TEMPERATURE
Phosphore blanc	34 °C
Éther	160 °C
Papier	233 °C
Gasoil	257 °C
Butane	287 °C
Acétylène	305 °C
Huile végétale	450 °C
Méthanol	455 °C
Magnésium	473 °C
Benzène	555 °C
Hydrogène	571 °C

Tableau 1 : Quelques points d'auto-inflammation (http://fr.wikipedia.org/wiki/Point_d%27auto-inflammation)

e) Délai d'auto inflammation

C'est la période plus ou moins courte entre l'échauffement du mélange carburant-comburant et son inflammation, et pendant laquelle se développent les réactions d'auto réchauffage qui conduisent à l'accélération de la réaction et à son auto inflammation.

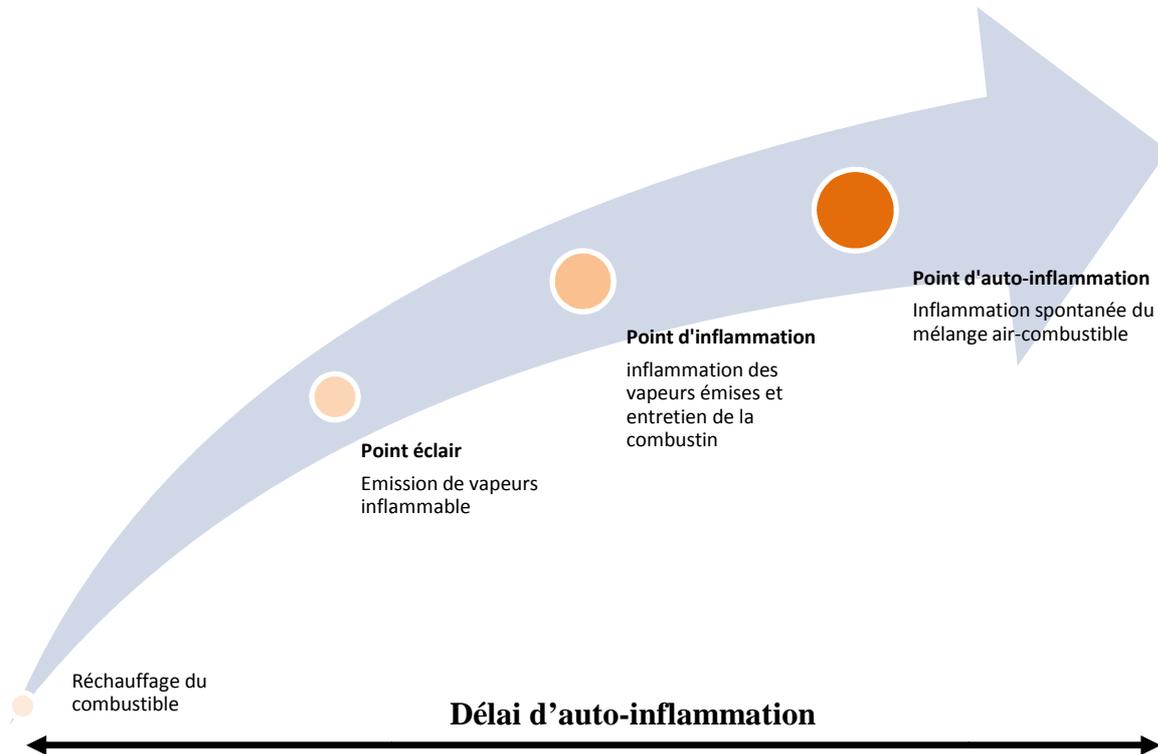


Figure 3 : Principaux paramètres de la combustion dans le moteur diesel

Ce délai est un paramètre très important dans la conception d'un moteur diesel car de lui dépendent la coordination du fonctionnement du moteur (admission, échappement, lubrification, transmission etc.). Ainsi donc la conception d'un moteur diesel est « calculée » suivant le carburant qu'il est appelé à utiliser. Seul les carburant ayant des propriétés physico-chimiques permettant d'obtenir le même délai peuvent alors faire fonctionner ce moteur dans de bonnes conditions ; d'où la problématique d'utilisation adéquate d'HVP dans les moteurs diesel existant et dont la conception était basée sur l'utilisation du gasoil.

Le délai d'auto-inflammation est directement lié au point (température) d'auto-inflammation et donc aux conditions (pression et température) de la chambre de combustion.

En comparant les points d'auto-inflammation des HVP à celui du gasoil, nous pouvons deviner facilement que les HVP auront un délai d'auto-inflammation plus long que le gasoil dans les mêmes conditions de pression et de température. En revanche, dans les mêmes conditions de pression, le délai d'auto-inflammation des HVP pourrait avoisiner celui du gasoil si la température de la chambre de combustion dépasse le point d'auto-inflammation qui est de 450°C. Les travaux de Gilles VAITILIGOM cités ci-dessus précisent 500°C pour

l'HVP Jatropa.

La pression de la chambre de combustion dans un moteur diesel est déterminée par le rapport volumétrique. Or sauf modification du moteur, celui-ci ne varie pas.

La température de la chambre de combustion, quant à elle varie en fonction de la charge. Son évolution en fonction de la charge peut varier d'un moteur à un autre et selon les conditions de fonctionnement.

5. Méthode d'utilisation d'HVP Jatropa dans les moteurs diesel non modifiés

Deux méthodes sont préconisées : le mélange avec le gasoil dans différentes proportions et la bicarburation. La bicarburation a fait l'objet de plusieurs travaux et semble prometteur. Dans le cas de la bicarburation, l'huile est introduite à 100% dans le moteur (voir schéma de principe en *Annexe II*). Deux contraintes majeures à vaincre :

- La température de la chambre de combustion qui doit être d'au moins 500°C. Cette valeur est atteinte à partir d'une charge donnée qu'il est utile de déterminer (10 à 70% selon le moteur)
- La viscosité de l'huile de Jatropa est dix fois plus élevée que celle du gasoil, alors que les pompes à injection et les injecteurs ont des capacités limitées. Dans ce cas, soit l'huile est préchauffée, soit les performances de la pompe et de l'injecteur autorisent une bonne pulvérisation de l'huile sans dommage.

Le préchauffage de l'huile peut être fait avec une source externe (résistances chauffantes électriques), ou par échange de chaleur avec le circuit d'échappement ou le circuit d'eau de refroidissement (tuyau de sortie). Dans le dernier cas, le moteur est démarré au gasoil jusqu'à ce que la température de l'huile à la sortie du circuit de préchauffage atteigne la valeur déterminée (60°C à 80°C) avant de by-passer le moteur sur l'HVP. A cause de la viscosité élevée de l'HVP, il est préconisé de repasser au gasoil une dizaine de minutes avant de décharger et d'arrêter le moteur pour faciliter son prochain démarrage.

III. OBJECTIFS DU TRAVAIL

OBJECTIF

Etablir les conditions de substitution de l'HVP Jatropha au gasoil et les conditions d'utilisation optimale des services des plateformes

OBJECTIFS SPECIFIQUES

- 1) Caractérisation des moteurs des plateformes : courbe caractéristique température de la chambre de combustion en fonction de la charge.
- 2) Etude de l'efficacité énergétique des plateformes

IV. MATERIELS ET METHODES

MATERIELS

1. Deux plateformes

Une plateforme multiservices est un atelier de transformation agro alimentaire constitué d'un moteur et de plusieurs équipements (un à six dans le cadre du projet SETUP) de transformation et un alternateur. Le but est de diversifier les services énergétiques à offrir sur une installation et aussi de mutualiser l'utilisation du moteur par plusieurs services, ce qui pourrait avoir un impact positif en termes d'efficacité énergétique. Dans le cadre du programme SETUP, les équipements de transformation concernent cinq produits à savoir : l'arachide, le maïs, le manioc, les noix de palme, et le soja (voir liste d'équipements en *Annexe III*).

PFMS N°1 : Plateforme pilote (Centre d'Initiation aux Services Energétiques)

Moteur	Equipements	Services
16ch, Mq. NISSAN à injection directe avec injecteur à trois trous ; monocylindre ; 1000RPM	Moulin à céréales Grinding N°1 (300kg/h)	Mouture de maïs, arachide, soja, cossette de manioc et d'igname
	Râpeuse à manioc (1000kg/h)	Râpures de manioc épluché
	Presse fruit de palme (700kg/h)	Pressage de fruit de palme pour extraction de l'huile rouge
	Malaxeur pâte d'arachide (300kg/h)	Extraction d'huile d'arachide par malaxage de la pâte d'arachide
	Égraineuse de maïs (1000kg/h)	Egrainage des épis de maïs (avec ou sans spath) et battage des légumineuses
	Alternateur triphasé 10kW 380-400V	Fourniture de courant électrique

Les plans d'installation sont en *Annexe IV*. La transmission se fait directement entre le moteur et les équipements par des courroies trapézoïdales non crantées de type B. Seule l'égraineuse dispose d'un moteur électrique vu qu'il doit fonctionner à l'extérieur du bâtiment.

PFMS N°2 : Plateforme du groupement KPONDEHOU à Za-Kpota

Moteur	Equipements	Services
16ch, Mq. PML GOLD, type Lister à injection indirecte avec injecteur à trois trous ; monocylindre ; 850RPM	Moulin à céréales Grinding N°1 (300kg/h)	Mouture de maïs, arachide, soja, cossette de manioc et d'igname
	Presse fruit de palme (700kg/h)	Pressage de fruit de palme pour extraction de l'huile rouge
	Presse palmiste (250kg/h)	Presse à vis pour extraction d'huile palmiste
	Décortiqueuse d'arachide (700kg/h)	Décorticage des fruits d'arachide séchés
	Concasseur (500kg/h)	Concassage des noix de palme
	Alternateur triphasé 6,8kW 380-400V	Fourniture de courant électrique

2. Le banc de charge

Six bancs de charge sont réalisés. Ils sont constitués d'ampoules à incandescence de 100W/240V. Trois sont constitués de 12 ampoules soit une charge nominale de 1200W et les trois autres d'une charge nominale de 2000W. Chaque type est monté entre le neutre et une phase de l'alternateur. Nous avons donc sur chaque phase 100W à 3200W par pas de 100W et au total 9600W (9,6 kW soit 13ch) par pas de 300W pour respecter l'équilibre des phases. A l'entrée de chaque ligne se trouve un voltmètre branché en parallèle (entre la phase et le neutre) permettant de lire la tension sur chaque ligne. Le câblage des bancs est fait avec des fils cuivre de 2x2mm² et les fils de ligne et de phase sont de 2x2.5mm². Sur chaque ligne un disjoncteur assure la protection contre les courts-circuits et les surcharge.

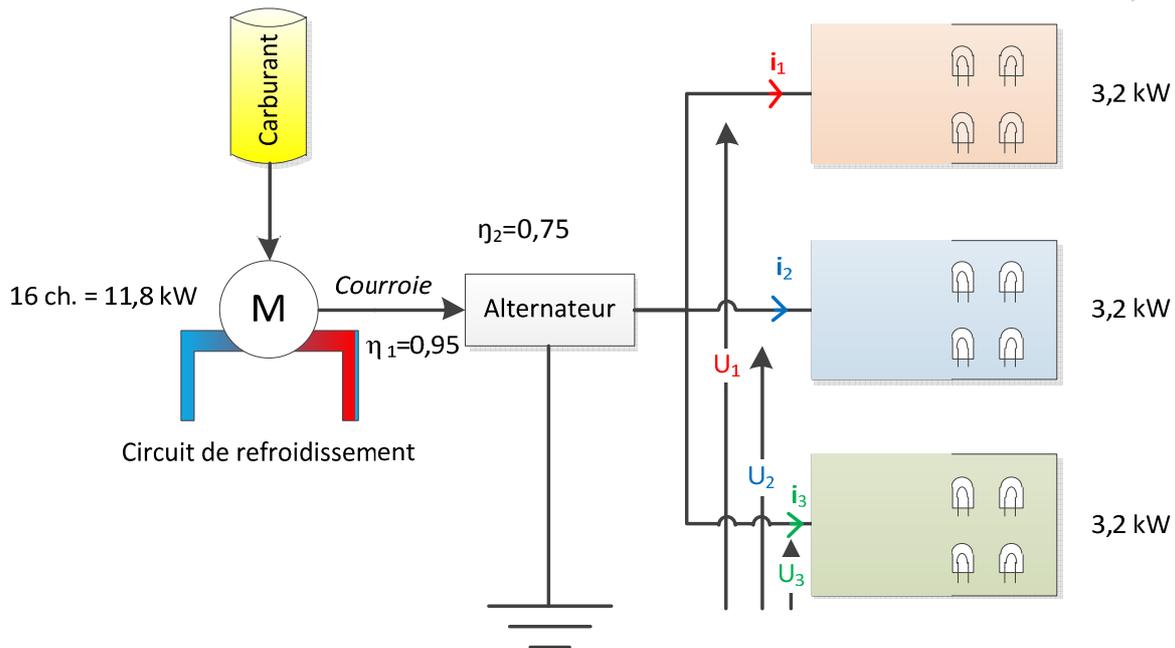


Figure 4 : Schéma de câblage du dispositif

3. Les instruments de mesures

Désignation	Marque/type	Mesure	Niveau de graduation
Multimètres		Tension monophasée en sortie de l'alternateur	1 V
Pinces ampérométriques	TENMARS	Intensité du courant sur chaque phase	1/100 A
Thermocouple	K	Température des gaz d'échappement et de la préchambre de combustion	1/100 de °C
Data logger	OMEGA	Enregistre les données des températures	1/100 de °C toutes les 10 secondes
Bouteille graduée		Volume d'huile utilisée	1/100 litre

4. Divers

- ✓ Logiciel EasylogUSB pour récupérer et traiter les données enregistrées par les data-logger. Il permet aussi de les exporter vers une feuille Excel.

- ✓ Microsoft office 2007 pour automatiser les calculs et tracer les courbes
- ✓ Ordinateur TOSHIBA Pentium 4 pour traiter les différentes informations

METHODOLOGIE

1. OS1 : Courbe caractéristique température de la chambre de combustion en fonction de la charge

a) Principe

Le protocole vise à relier la température de la chambre de combustion du moteur à une utilisation (charge) donnée et de déterminer les puissances pour lesquelles les conditions requises pour une bonne combustion du gasoil peuvent être satisfaites c'est-à-dire une température minimale de 500°C.

La première contrainte concerne la mesure de la température de la chambre de combustion. Nous mesurerons donc les températures des gaz d'échappement pour le moteur à injection directe et les températures des gaz d'échappement et de la préchambre de combustion pour les moteurs à injection indirecte. Celles-ci sont de 50°C à 150°C moindre que les températures de la chambre de combustion selon la position de la sonde sur le collecteur d'échappement. Pour le traitement des données nous augmenterons donc les températures mesurées de 50°C (la minimale) pour une estimation de la température de la chambre de combustion.

La seconde difficulté vient de la mesure de la puissance fournie par le moteur, qui est mécanique et qui suppose l'utilisation d'un instrument de mesure particulier. Pour pallier cette contrainte, le protocole cherche à mesurer une puissance électrique, en reliant le moteur à un alternateur qui va alimenter une charge contrôlée. La mesure de cette charge électrique est plus facile à réaliser que la mesure de la charge mécanique réelle en sortie du moteur.

Comme nous pouvons le voir sur le schéma de câblage plus haut, la charge mécanique et la charge électrique sont liées par le rendement de l'alternateur et le rendement de la transmission. Le rendement nominal de l'alternateur est de 85%. Vu qu'il n'est pas utilisé à sa charge nominale (moins de 60%) nous considérerons un rendement de 75%. Pour ce qui est du rendement de la transmission, nous prenons 95% pour le système poulie-courroie. Ainsi :



V. RESULTATS

Les essais ont été effectués trois fois sur le moteur NISSAN et une fois sur le moteur PML GOLD. Le premier et le troisième test sur le moteur NISSAN ont été effectués après un entretien général du moteur alors que le deuxième a été fait entre deux entretiens. Les tableaux de données sont en *Annexe VI*.

OS1 : COURBE CARACTERISTIQUE TEMPERATURE DE LA CHAMBRE DE COMBUSTION EN FONCTION DE LA CHARGE

Les mesures enregistrées sont plus ou moins stables pour chaque niveau¹⁰ de puissance. Les écarts types pour les températures varient de 1°C à 14°C avec une moyenne de 4,2°C. Les écarts types des puissances varient entre 2,6W et 94W avec une moyenne de 35W. Aussi la température suit très rapidement le changement du niveau de puissance (une minute et demie au plus pour atteindre le maximum et se stabiliser). Les durées de mesures semblent donc appropriées.

Nous avons obtenu les différentes courbes suivantes :

¹⁰ Nombre d'ampoules allumées sans augmentation ni diminution durant toute la durée de mesure

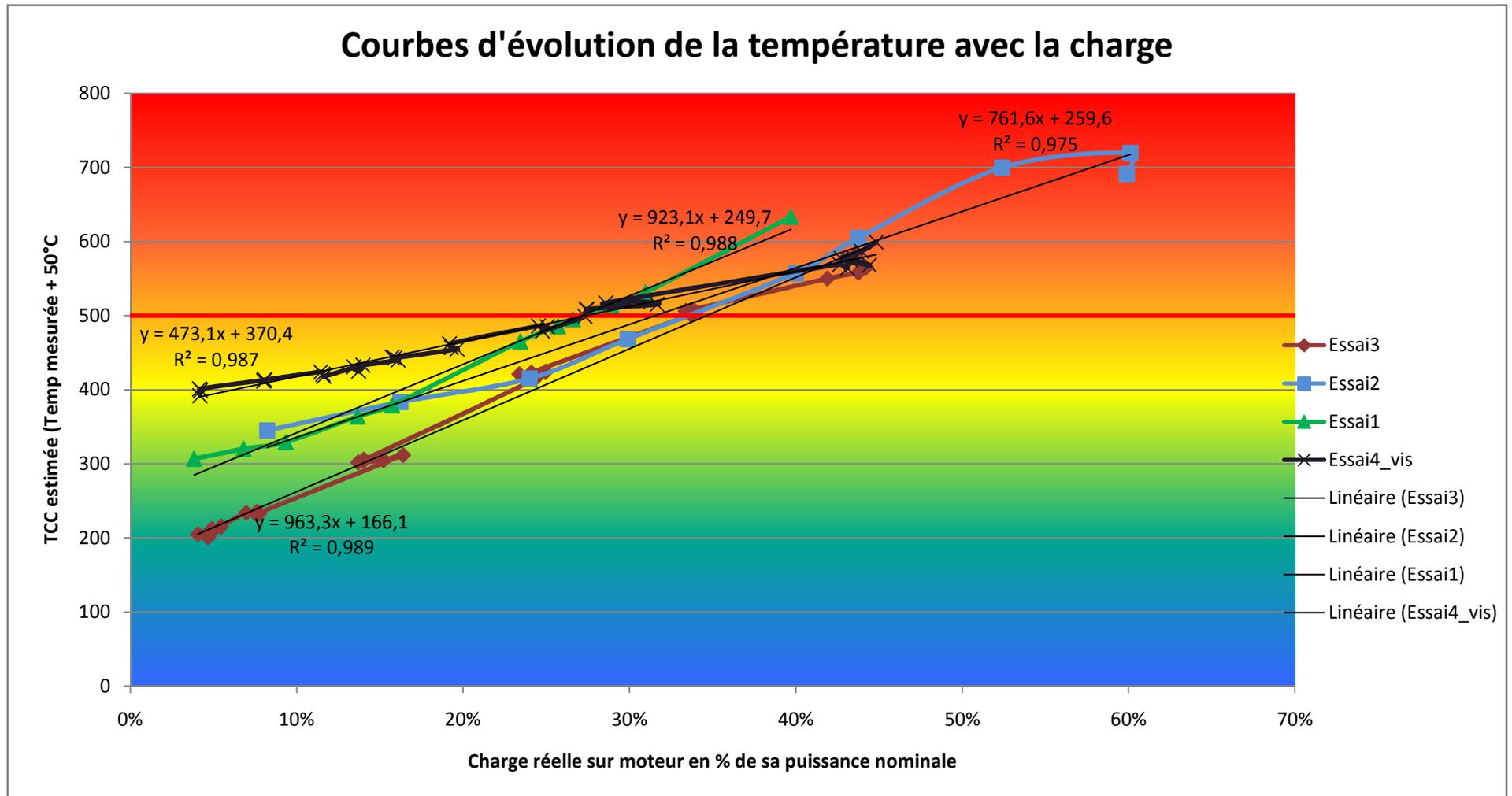


Figure 5 : Courbes d'évolution des températures de la chambre de combustion en fonction de la charge

1. Évaluation de la liaison entre les températures et les charges

Toutes les courbes ont une allure linéaire. L'hypothèse que la température est liée à la charge se justifie donc.

a) Calcul des coefficients de corrélation

Le coefficient de corrélation est un paramètre statistique permettant de mesurer le degré de liaison entre deux variables. C'est le quotient de la covariance par le produit des écarts types des deux grandeurs. Plus la valeur du coefficient de corrélation est proche de 1 en valeur absolue, plus la liaison est forte. Au-delà de 0,81 nous pouvons estimer que les variables sont dépendantes et qu'il existe une régression linéaire entre elles.

La méthode de calcul du coefficient de corrélation et de détermination de la droite de régression linéaire est décrite en *Annexe V*. Le programme Excel de Microsoft Office permet de déterminer les coefficients des corrélations de deux séries de données et de déterminer leurs droites de régression linéaires (courbe de tendance linéaire). Nous avons les valeurs suivantes pour les différents tests :

	Essai1_moteurID	Essai2_moteurID	Essai3_moteurID	Essai_moteurII	
				Echap	Préchambre
R	0,9940611	0,987720752	0,994610972	0,985675289	0,993707979
Equation droite de régression	$T = 923,1 * C + 249,7$	$T = 763,2 * C + 259,6$	$T = 963,3 * C + 166,1$	$T = 609,1 * C + 114,1$	$T = 473,1 * C + 320,4$
R ²	0,988157471	0,975592285	0,989250985	0,971555776	0,987455547

R : coefficient de corrélation

T : température (concernée sur chaque courbe)

C : charge en %

R² : coefficient de détermination qui traduit le niveau de fiabilité de la linéarisation

OS3 : ETUDE DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DE LA PLATEFORME

La compilation des valeurs moyennes donne le tableau et la courbe suivants :

Puissance en sortie d'alternateur (W)	Puissance méc. fournie par le moteur (W)	Charge (%)	CS (l/kWh électrique)	CS en g/kWh méc.
832,23	1165,12	10%	1,202	704
1286,27	1800,78	15%	0,902	528
1735,23	2429,33	21%	0,756	443
3007,34	4210,28	36%	0,692	405
3699,12	5178,76	44%	0,660	386
4250,30	5950,42	50%	0,682	400
5347,42	7486,39	63%	0,688	403

Tableau 4 : Valeurs des CS en fonction de la charge

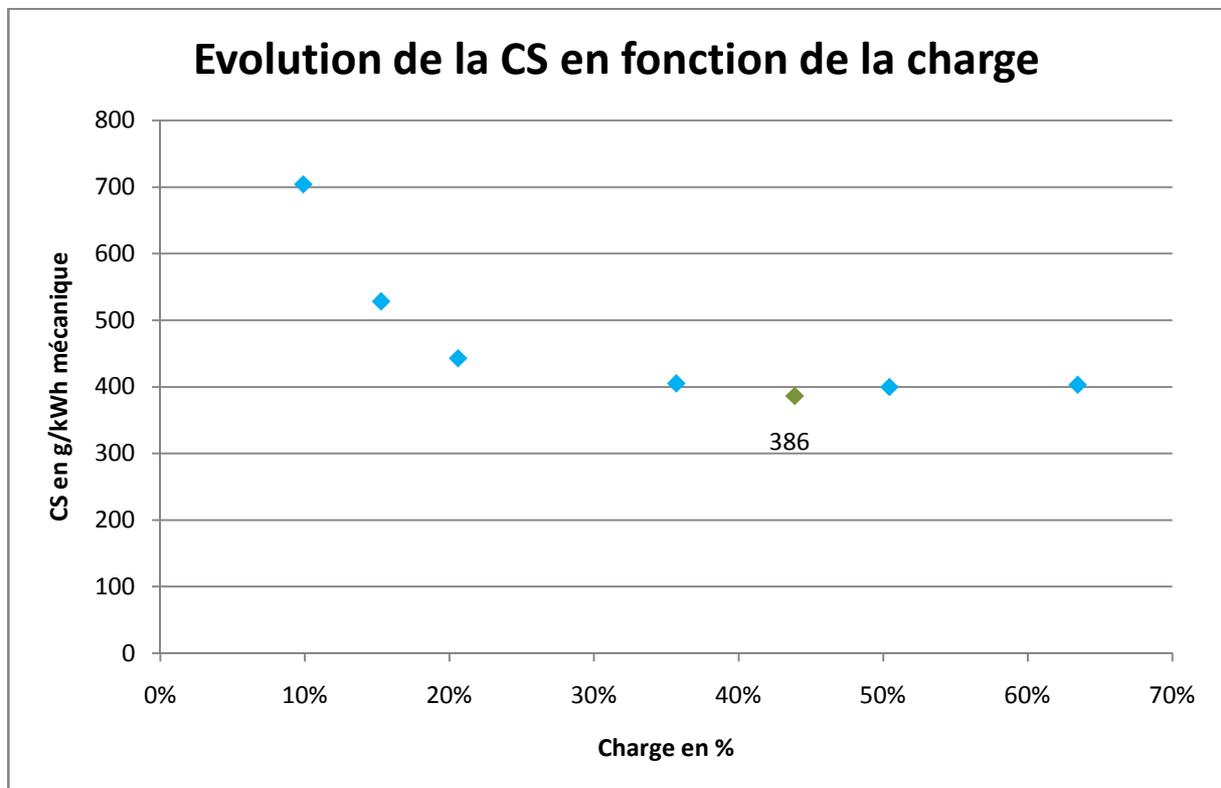


Figure : Courbe d'évolution de la CS en fonction de la charge

La consommation spécifique varie de 700 à 385g/kWh avec une moyenne de 467g/kWh. Elle s'améliore sensiblement à partir de 35% de charge. Aussi on observe une légère remontée pour des charges supérieures à 60%

VI. DISCUSSION ET ANALYSES

OS1 : COURBE CARACTERISTIQUE TEMPERATURE DE LA CHAMBRE DE COMBUSTION EN FONCTION DE LA CHARGE

Les coefficients de corrélation déterminés pour chaque test sont de l'ordre de 0,99. La température de la chambre de combustion est donc intimement liée à la charge du moteur. De plus les coefficients de détermination des droites de régression de ces différentes courbes sont très proches de 1 (R^2 : 0,989 – 0,988 – 0,987 – 0,975 – 0,971). *La température de la chambre de combustion évolue donc de façon linéaire avec la charge.* Elle varie entre **215°C et 691°C** pour des charges **de 4% à 60%**.

La modélisation de la combustion interne indique que la température des gaz (air et gaz brûlés) dans le cylindre, varie dans le temps et est une solution d'une équation différentielle. Mais globalement elle dépend de l'énergie interne du gaz.

En effet, comme décrit plus haut, l'énergie issue de la combustion se dissipe par trois voies :

- Sous forme de travail mécanique par le piston (W)
- Échange de chaleur (réchauffage) avec les parois du moteur (Q)
- Évacuation des gaz d'échappement

L'énergie du gaz à la sortie du cylindre est donc composée de son énergie interne

$$U = C_v T$$

et de l'énergie cinétique du gaz à la sortie de la soupape;

avec C_v chaleur massique à volume constant et T, la température.

U, tout comme Q et W, est directement liée à l'énergie de la combustion (E). Cette dernière est proportionnelle à la charge du moteur.

$$U = k \times E$$

$$E = \frac{1}{\eta} \times P_f$$

avec η comme rendement du moteur¹¹ et P_f la puissance fournie en bout d'arbre.

C_v étant une constante, on peut alors déduire par approximation que :

$$dT = K dP_f$$

¹¹ 27% environ

K est une constance.

Pour les deux moteurs (ID et II) le seuil des 500°C est franchi pour des charges d'au moins 30%. *Cette charge équivaut à des équipements ou des combinaisons d'équipements (atout de la plateforme) d'au moins 3,5kW*. Le tableau ci-dessous nous permet donc de voir les équipements ou les combinaisons d'équipements pour une bonne utilisation de l'HVP Jatropa sur ces plateformes.

EQUIPEMENTS	Motorisation individuelle ¹² ch	PUISSANCES (nécessaire ⁱⁱ) kW	Charge (% moteur 16ch)
Moulin Grinding 1A (300kg/h)	6ch	2,65	23%
Moulin Grinding 2A (500kg/h)	8ch	3,53	30%
Presse huile de palme (700kg/h)	7ch	3,09	26%
Presse soja ou noix palmiste (250kg/h)	16ch	7,07	60%
Décortiqueuse (500kg/h)	6ch	2,65	23%
Concasseur (1000kg/h)	5ch	2,21	19%
Râpeuse (1500kg/h)	6ch	2,65	23%
Malaxeur (120kg/h)	6ch	2,65	23%

Tableau 5 : Puissance des équipements et charge correspondante sur moteur 16ch

$$Charge (\%) = \frac{Motorisation (ch) \times 0,6}{16} \times 100$$

Comme le montre le tableau ci-dessus, seuls deux équipements peuvent fonctionner individuellement sur les moteurs 16ch pour une utilisation normale de l'HVP Jatropa par bicarburation. Il s'agit du moulin *Grinding N°2 de 500kg/h* et de la *Presse haute pression (soja ou noix palmiste)*. Aussi quelques soient les équipements, à partir de deux équipements

¹² Source PTAA (Programme de Technologie Agricole et Alimentaire)

les conditions de température de la chambre de combustion pourraient être atteinte.

Cependant, le fonctionnement simultané de plusieurs équipements n'est pas courant, ceci pour plusieurs raison :

- Problème d'organisation du travail
- Fréquences d'utilisation des équipements différentes

Pour une utilisation de l'HVP Jatropha dans ces conditions, il faudra penser à d'autres scénarios tels que les mélanges, ou à une modification du moteur.

En rapportant les résultats au moteur de 12ch on a :

EQUIPEMENTS	Motorisation individuelle ch	PUISSANCES (nécessaire) kW	Charge (% moteur 12ch)
Moulin Grinding 1A (300kg/h)	6ch	2,65	30%
Moulin Grinding 2A (500kg/h)	8ch	3,53	40%
Presse huile de palme (700kg/h)	7ch	3,09	35%
Presse soja ou noix palmiste (250kg/h)	16ch	7,07	80%
Décortiqueuse (500kg/h)	6ch	2,65	30%
Concasseur (1000kg/h)	5ch	2,21	25%
Râpeuse (1500kg/h)	6ch	2,65	30%
Malaxeur (120kg/h)	6ch	2,65	30%

Hormis le concasseur, le moteur 12ch ne devrait pas poser de problème particulier. Ceci confirme l'hypothèse de départ qui nous à amener à ne pas les prendre en compte dans les tests.

Les coefficients de détermination des droites de régression étant très proche de 1, on peut donc se servir de leur équation pour estimer la puissance d'un équipement en déterminant la température de la chambre de combustion et vice versa, par interpolation linéaire. *Cette évaluation peut s'avérer intéressante dans un contexte où il n'y pas de standardisation des équipements fabriqués localement et sans fiche technique renseignant sur les caractéristiques techniques de l'équipement dont la puissance.*

ELABORATION D'UNE METHODE DE CARACTERISATION DES EQUIPEMENTS DE LA PLATEFORME

Nous avons dans un premier temps évalué le niveau de précision de cette méthode pour chaque essai, ensuite la différence d'un test à un autre et enfin un exemple de détermination pour le moulin.

1. Évaluation du niveau de précision

Pour une droite de régression d'équation $T = a.P + T_0$ on a :

- $P_{interpolée} = \frac{T_{mesurée} - T_0}{a}$
- $\Delta W = P_{réelle} - P_{interpollée}$
- $Précision = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n \Delta W^2}$; c'est la moyenne des écarts par rapport à zéro¹³ de ΔW

Avec :

T : température de la chambre de combustion

P : puissance

ΔW : Différence entre la puissance réelle et la puissance déterminée par interpolation linéaire

n : Le nombre de mesures effectuées

Nous pouvons aussi déterminer la moyenne de l'erreur relative :

$$\bar{\xi} = \frac{1}{n} \sum_1^n \left| \frac{\Delta W}{P_{réelle}} \right|$$

¹³ Si la précision était parfaite $\Delta W = 0$



Pour l'essai 1 on a :

Essai1				
P réelle en W	Temp mes °C	P. interpolée	ΔW	ξ relative
322,08	256,8030303	523,881012	201,801012	62,66%
574,065	270,0333333	645,2599388	71,19493884	12,40%
788,055	279,3571429	730,7994758	-57,25552425	7,27%
1151,3	313,9615385	1048,270995	-103,0290049	8,95%
1325,585	329,0333333	1186,544343	-139,0406575	10,49%
1975,91	415,219697	1977,244926	1,334926327	0,07%
2166,655	435,6333333	2164,525994	-2,129006116	0,10%
2241,49	445,3142857	2253,342071	11,85207077	0,53%
2440,36	462,3387097	2409,529447	-30,83055342	1,26%
2610,26	481,0952381	2581,607689	-28,65231105	1,10%
3346,02	583,4166667	3520,336391	174,3163914	5,21%

Précision	100,5992552 Watts	10,00%
-----------	-------------------	--------

Les précisions pour les essais 3 et 4 sont respectivement 113W et 124W. Le niveau de précision est donc en moyenne de 115W; soit une amplitude de 230W d'erreur absolue possible sur une plage de 300W à 5 000W. L'erreur relative est en moyenne de 10%, 8% et 6% respectivement pour les essais 1, 3 et 4. Elle est plus importante pour les petites puissances. *Ainsi cette méthode peut être très intéressante pour caractériser des équipements dont la puissance dépasse les 1,5kW et inappropriée pour des puissances inférieures.*

2. Simulation entre deux essais

Nous déterminons les puissances correspondant à une série de température par deux équations de régression différentes (essai 1 et 3)



Temperature °C	Puissance interpolé_test1 (W)	Puissance interpolé_test3 (W)	ΔW
210	94,49541284	821,0526316	726,557219
240	369,7247706	1084,210526	714,485756
270	644,9541284	1347,368421	702,414293
300	920,1834862	1610,526316	690,34283
330	1195,412844	1873,684211	678,271366
360	1470,642202	2136,842105	666,199903
390	1745,87156	2400	654,12844
420	2021,100917	2663,157895	642,056977
450	2296,330275	2926,315789	629,985514
480	2571,559633	3189,473684	617,914051
510	2846,788991	3452,631579	605,842588
540	3122,018349	3715,789474	593,771125
570	3397,247706	3978,947368	581,699662
600	3672,477064	4242,105263	569,628199
630	3947,706422	4505,263158	557,556736
660	4222,93578	4768,421053	545,485273
690	4498,165138	5031,578947	533,41381

Moyenne **629,985514**

La différence entre les puissances déterminées par deux équations obtenues pour deux tests différents marque un grand point de vigilance : *L'équation de détermination ne peut être fixée car elle varie d'un test à un autre*. Ceci peut s'expliquer par le fait que les conditions de travail du moteur ne sont pas reproductibles car elles varient énormément. *Ainsi l'utilisation de cette méthode requiert que les mesures de caractérisation des équipements soient faites juste après la caractérisation du moteur* pour garantir les mêmes conditions de travail pour le moteur. *Cette méthode n'est donc pas très pratique pour un banc de caractérisation d'équipements car il prendra beaucoup de temps alors que même en une journée de fonctionnement les conditions de travail du moteur peuvent varier significativement*.

L'intérêt que présente la détermination des caractéristiques réelles des équipements pour le programme SETUP est entre autre la création de référence techniques (inexistantes jusque là) et la rationalisation du dimensionnement des services de type plateforme. Pour ce faire, un banc à moteur électrique avec un analyseur de puissance serait plus adapté que la méthode expérimentée ici.

3. Mesures sur le moulin (400 – 450 tr/min)

a) Mesure avec essai1

Temp. Echap meuré °C	Maximale °C	Equiv. puissance_alternateur W	Puissance sollicitée W
75	406,50	1 897,25	2 656,15
73,5			
373,5			
343,5			
355			
381,5			
379			
362,5			
390			
405			
406,5			

b) Mesures avec essai 4

Temp. Echap meuré °C	Maximale	Equiv. puissance_alternateur	Equiv. Puissance sollicitée
373,50	444,50	2 216,07	3 102,50
411,50			
430,50			
405,50			
427,50			
429,00			
418,00			
444,50			

Comme nous pouvons le constater, cette méthode peut nous donner une valeur très exacte¹⁴ de la puissance de l'équipement (essai1), tout comme une valeur plus ou moins biaisée.

¹⁴ Comparer avec tableau 5 « Puissance des équipements et » plus haut

OS3 : ETUDE DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DE LA PLATEFORME

Les résultats obtenus montrent que la consommation spécifique est moins importante pour les grandes charges. Cependant elle admet une puissance optimale à 3 600W électrique (soit 5 kW mécanique) qui est de 385g/kWh mécanique ; au-delà elle reprend une légère croissance.

Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'il existe des pertes d'énergies inhérentes au fonctionnement du moteur (réchauffage des parois internes, frottement) qui ne varient pas ou très peu en fonction de la charge. En effet il est évident qu'un moteur en fonctionnement à vide consomme du carburant. Aussi aux fortes charges du moteur, il peut apparaître dans le mélange frais des zones localement trop riches occasionnant une combustion incomplète qui se traduit par une baisse du rendement et donc une augmentation de la consommation spécifique. Il existe donc une zone optimale de charge pour une bonne CS. Dans le cas des moteurs étudiés ici, elle va de 35% à 60%.

Le fonctionnement de la plupart des équipements se trouve en dessous de cette plage. Cela impose donc une organisation du travail qui favorise au mieux la mutualisation du moteur pour une meilleure efficacité.

Seule la puissance de la presse haute pression dépasse les 5kW. En revanche la combinaison d'au moins deux équipements (le concasseur exclu) permet d'avoir une consommation plus efficace du carburant. Cette consommation est plus importante que celle affichée sur la plaque signalétique du moteur (265g/kW). Nous avons constaté aussi lors de l'exploitation des plateformes, que plus le moteur reste allumé, sa consommation spécifique diminue pour une même charge. Vu les temps très courts sur lesquels nous avons fait les mesures, nous pouvons estimer que la consommation spécifique s'améliore d'avantage en fonctionnement continu, comparativement aux valeurs déterminées ;

Le moteur étant un moteur à moyenne vitesse (1000RPM), nous n'avons pas pu effectuer des mesures pour des puissances plus importantes car l'accélérateur est limité (condamné) à une position maximale donnée.

VII. CONCLUSIONS

L'utilisation des huiles végétales sur les plateformes de 16ch exigent une grande vigilance car très peu d'équipement ont une charge supérieure à la charge minimale nécessaire pour une meilleure combustion de l'HVP Jatropha. En dehors de la presse haute pression et du moulin N°2, il faut nécessairement que les moteur 16ch entraînent au moins deux équipements simultanément pour une substitution de l'HVP Jatropha au gasoil. *Les rythmes de travail des plateformes étant très variables (souvent un seul équipement en fonctionnement continu), pour une utilisation continue de l'HVP Jatropha dans ces moteurs, il faudra penser à d'autres scénarios comme le mélange avec du gasoil ou la modification du moteur.*

Les mêmes charges sont recommandées pour avoir une meilleure efficacité énergétique du moteur. En rapportant ces résultats aux plateformes de 12ch, on estime que la plupart des équipements même en fonctionnement individuel favorise l'efficacité énergétique et l'utilisation d'HVP Jatropha dans leur moteur.

VIII. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

Ce rapport est la première partie d'un grand protocole de test et expérimentation qui a pour but la création de référence et l'optimisation de l'accès aux services énergétiques en milieu rural. Les étapes suivantes sont entre autres les tests d'extraction et de traitement d'HVP Jatropha et les tests d'utilisation de cette huile produite localement dans les moteurs par différents méthodes dont le mélange (x% gasoil + y% HVP) et la bicarburation. Ces tests se feront sur des moteurs indiens fixes à injection directe ou indirecte de 8, 12 et 16ch avec une attention particulière sur les 16ch. Aussi les utilisateurs de plateformes devront être sensibilisés sur les conditions d'une meilleure exploitation du moteur et des équipements. Des plateformes électriques (groupe électrogène fonctionnant au gasoil et à l'HVP Jatropha) seront installées dans le cadre du projet ALTERRE. Nous pourrions alors faire des analyses comparatives avec les installations actuelles.

Bibliographie

Ouvrages et articles

CIRAD (2008), Guide technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales, *G946*

Philippe ARQUÈS (1999), Moteurs alternatifs à combustion interne, *TECHNOSUP : Génie Energétique*

Sayon SIDIBE (2010), Combustion des huiles végétales dans les moteurs et les chaudières, *Module de formation continue au ZiE*

William FOTSEU (2010), Possibilité d'utilisation de l'huile de Jatropha dans les moteurs diesels du cercle de KITA, *Mémoire PFE Master ZiE*

Sites internet

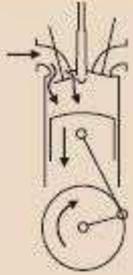
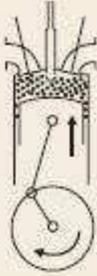
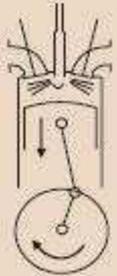
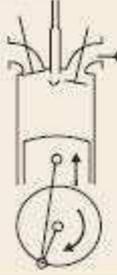
<http://www.reptox.csst.qc.ca> 23 Septembre 2011

<http://fr.wikipedia.org> 23 Septembre 2011

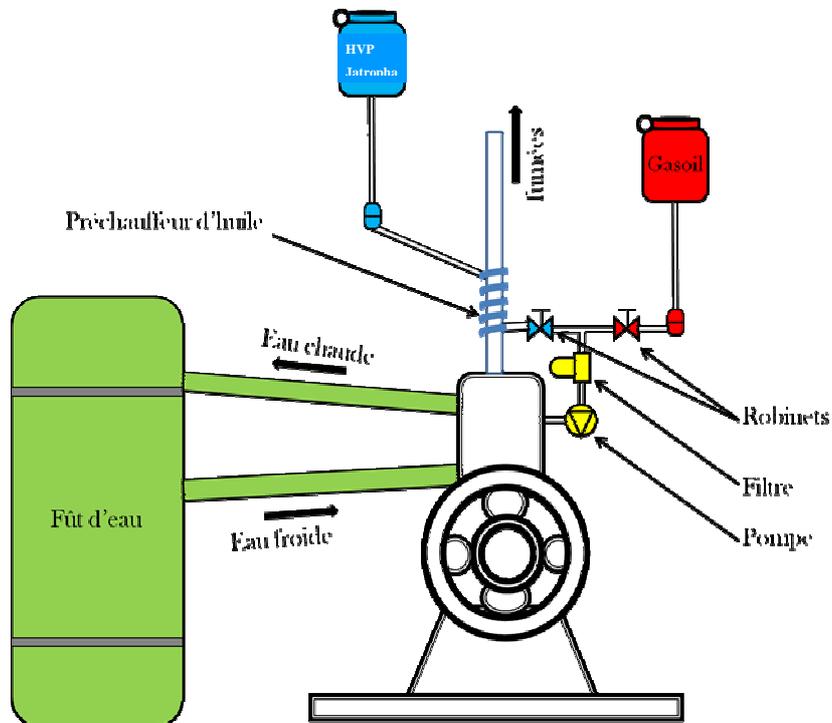
IX. ANNEXES

Annexe I : Cycle à quatre temps du moteur diesel.....	34
Annexe II : Système de bicarburation avec préchauffage de l'huile par la chaleur des gaz d'échappement.....	35
Annexe III : Caractéristiques physiques et carburants de l'HVP Jatropha comparées au gasoil	36
Annexe IV : Equipements des plateformes.....	37
Annexe V : Plan d'infrastructure d'une plateforme.....	38
Annexe VI : Formule de calcul de la corrélation entre deux variables	39
Annexe VII : Quelques tableaux de données et graphes.....	40
Annexe VII : Quelques photos et images.....	42

Annexe I : Cycle à quatre temps du moteur diesel

Couse du piston	Phases	Opérations	Schéma
Premier temps du P.M.H. ou P.M.B.	Admission	Remplissage des cylindres avec de l'air à pression atmosphérique ou précomprimé.	
Deuxième temps du P.M.B. ou P.M.H.	Compression	L'air est fortement comprimé et porté à une température supérieure à celle d'auto-inflammation du carburant (+ de 400 °C). Le rapport volumétrique est très élevé (15/1 à 22/1).	
Troisième temps du P.M.H. ou P.M.B.	Inflammation — détente	Le carburant est injecté sous pression (100 à 200 bars) en fin de compression. Il s'enflamme spontanément au contact de l'air échauffé. La combustion dure tant que dure l'injection.	
quatre temps du P.M.B. ou P.M.H.	Echappement	évacuation des gaz brûlés	

Annexe II : Système de bicarburation avec préchauffage de l'huile par la chaleur des gaz d'échappement



Auteur : William FOTSEU (*Mémoire Master Spécialisé_Genie Energétique 2IE 2009-2010*)



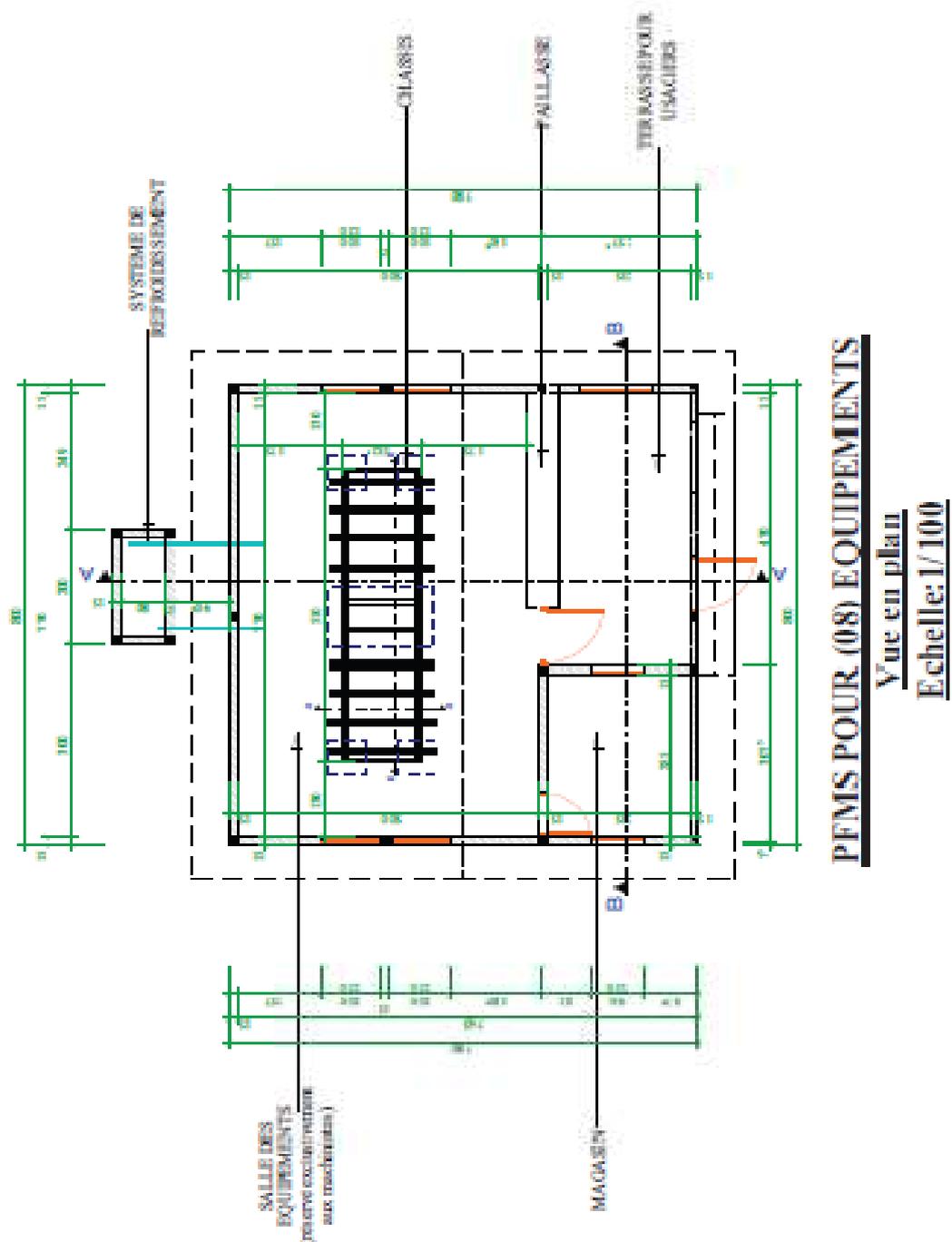
Annexe III : Caractéristiques physiques et carburants de l'HVP Jatropha comparées au gasoil

	Pouvoir calorifique kJ/kg	Indice de cétane	Point éclair °C	Point d'auto- inflammation °C	Viscosité (à 20°C) mm ² /s	Point d'écoulement °C	Point de trouble °C
Gasoil	48800	50	93	257	3 à 7,5	-18	<-5
HVP Jatropha	38800	35	236	450	77	-3	2

Annexe IV : Equipements des plateformes

DESIGNATION
Alternateur - 10KW Mec Fixe
Alternateur - 8KW Mec Fixe
égrappeuse de palme 500kg/h 3CV Elec Fixe
cuisseur 500kg/h - - Fixe
presse huile de palme 1000kg/h 6 à 7CV Mec Fixe
clarificateur huile de palme 1000 l - - Fixe
concasseur noix de palme 500kg/h 3CV Mec Fixe
égreneuse maïs 1000kg/h 5 à 6 CV Elec Fixe
égreneuse maïs mobile 1000kg/h - Mec Mob
moulin à céréales 500kg/h 5CV Mec Fixe
moulin + moteur 500kg/h 8CV Mec Fixe
presse huile de soja 250l/h 12CV Mec Fixe
clarificateur huile de soja 350 à 500 l - - Fixe
filtre huile de soja 20l/h - - Fixe
presse mouture de soja 50kg/h - - Mob
rappeuse fixe 1000kg/h 5 à 6 CV Mec Fixe
rappeuse mobile 500kg/h 4 CV Mec Mob
presse râpure manioc fixe 200kg/h - - Fixe
presse râpure manioc mob 200kg/h - - Mob
thermo soudeuse - Elec Mob
Décortiqueuse arachide 700kg/h 6 CV - Fixe
Malaxeur huile arachide 300kg/h 6 CV - Fixe
Presse huile palmiste 250kg/h 10 à 12CV - Fixe
Presse râpure 400kg/h 5CV Mec Fixe
concasseur noix de palme 500kg/h 3 à 4,5 CV Mec Mob
Pétrin 200kg/h 5CV Mec Fixe
Malaxeur huile d'arachide motorisé 300kg/h 6CV Mec Mob
Cuve mobile (brouette) 300l - - Mob

Annexe V : Plan d'infrastructure d'une plateforme



Annexe VI : Formule de calcul de la corrélation entre deux variables

$$r_p = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Par exemple, nous allons calculer le coefficient de corrélation entre deux séries de même longueur (cas typique : une régression). On suppose qu'on a les tableaux de valeurs suivants :

$X(x_1, \dots, x_n)$ et $Y(y_1, \dots, y_n)$ pour chacune des deux séries. Alors, pour connaître le coefficient de corrélation liant ces deux séries, on applique la formule suivante :

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

Si r_p vaut 0, les deux courbes ne sont pas corrélées. Les deux courbes sont d'autant mieux corrélées que r est loin de 0 (proche de -1 ou 1).

Avec :

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})$$

est la covariance entre x et y

où

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

est l'écart-type de X

et

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

est l'écart-type de Y

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

est la moyenne de X et

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

est la moyenne de Y

Annexe VII : Quelques tableaux de données et graphes

Essai1_ID			
Puissance en W	Charge	Temp mes °C	TCC estimée
322,08	4%	256,8030303	306,8030303
574,065	7%	270,0333333	320,0333333
788,055	9%	279,3571429	329,3571429
1151,3	14%	313,9615385	363,9615385
1325,585	16%	329,0333333	379,0333333
1975,91	23%	415,219697	465,219697
2166,655	26%	435,6333333	485,6333333
2241,49	27%	445,3142857	495,3142857
2440,36	29%	462,3387097	512,3387097
2610,26	31%	481,0952381	531,0952381
3346,02	40%	583,4166667	633,4166667

Tableau 6 : Tableau des valeurs compilées essai 1 sur moteur NISSAN à ID

Essai2_ID			
Puissance en W	Charge (%)	Temp mes °C	TCC estimée
691,53	8%	294,96	344,96
1365,58	16%	333,50	383,50
2018,25	24%	365,29	415,29
2514,59	30%	418,13	468,13
3363,97	40%	507,29	557,29
3681,21	44%	555,04	605,04
4406,74	52%	649,58	699,58
5055,82	60%	669,42	719,42
5037,97	60%	641,04	691,04

Tableau 7 : Tableau des valeurs compilées essai 2 sur moteur NISSAN à ID

Essai3_ID			
Puissance en W	Charge	Temp mes °C	TCC estimée
2103,75	25%	374	424
2032,24	24%	373	423
2840,16	34%	451	501
2861,6	34%	455	505
2813,76	33%	456	506
2842,1	34%	458	508
3530,9	42%	500	550
3688,29	44%	508	558
3727,42	44%	515	565
3678,07	44%	533	583

Tableau 8 : Extrait tableau des valeurs compilées essai 3 sur moteur NISSAN à ID

Essai sur moteur à injection indirecte

Puissance	Charge	T°C ECHAP	T°C VIS	TCC estimée
1655,72	20%	218	405	455
1626,56	19%	219	407	457
1616,16	19%	219	412	462
2067,36	25%	242	436	486
2111,81	25%	247	435	485
2088,45	25%	248	429	479
2302,56	27%	261	449	499
2311,2	27%	264	458	508
2311,2	27%	264	459	509
2668,6	32%	310	465	515
2571,4	31%	310	469	519
2408,14	29%	303	467	517
3592,8	43%	360	519	569
3633,2	43%	380	514	564
3648,08	43%	385	525	575
3744,4	44%	392	518	568
3601,26	43%	394	527	577
3704,31	44%	405	537	587
3778,88	45%	405	549	599

Tableau 9 : Extrait tableau des valeurs compilées essai 4 sur moteur PML GOLD à II

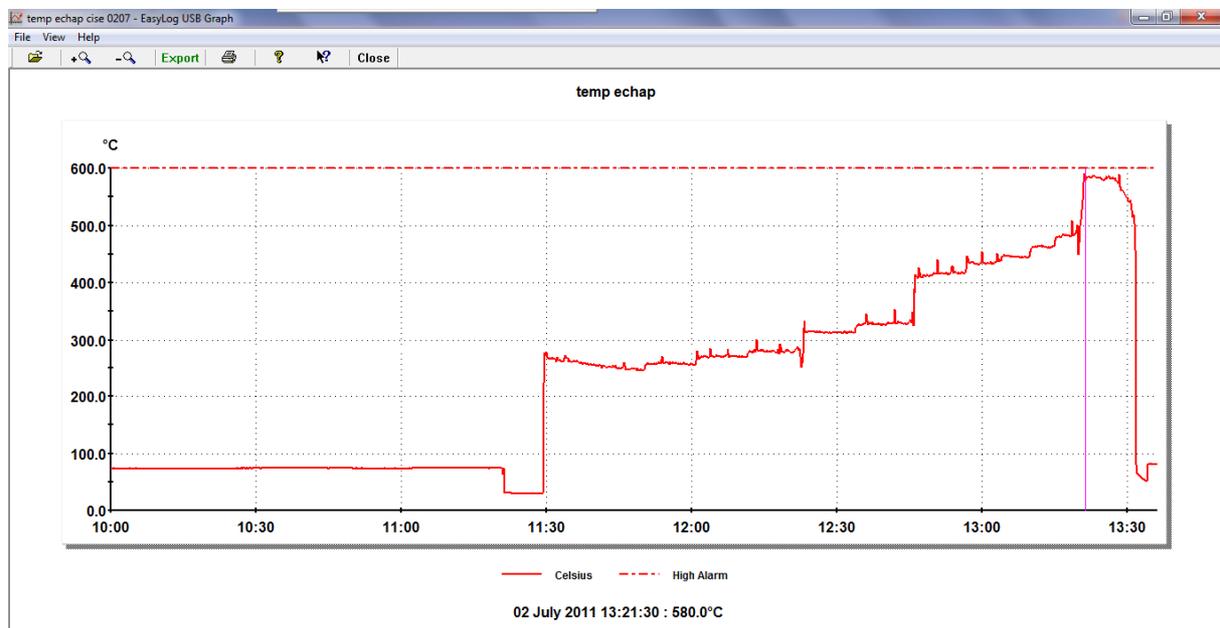


Figure 6 : Exemple de courbe de relevé de température du dataloger

Annexe VII : Quelques photos et images



Image 4 : Moteur NISSAN 16ch au CISE



Image 3 : Test au CISE



Image 5 : Moteur PML GOLD 16ch



Image 6 : Test à Kodota



Image 7 : Banc de charge en fonctionnement



Image 8 : Pincas ampérométriques, voltmètre et chrono

ⁱ En mécanique, le taux de compression d'un moteur à pistons, aussi appelé rapport volumétrique, est un rapport théorique de comparaison entre le volume de la chambre de combustion lorsque le piston est au point mort haut et le volume du cylindre lorsque le piston est au point mort bas).

Les moteurs modernes à allumage commandé ont un taux de compression souvent voisin de 10 et pouvant monter jusqu'à 13, et les Diesel ont un taux de compression allant en moyenne de 16 à 20 pour ceux à injection directe et 19 à 23 pour ceux à injection indirecte. Cette valeur est déterminée lors de la conception du moteur et reste invariable sur les moteurs conventionnels.

Le rendement d'un moteur augmentant avec son taux de compression, on cherche à augmenter celui-ci. Toutefois, sur les moteurs à allumage commandé, un taux de compression élevé favorise l'apparition du cliquetis, la compression plus élevée du mélange carburé pouvant provoquer un auto-allumage incontrôlé, nuisible au bon fonctionnement du moteur. C'est pourquoi dans le cas d'un moteur à allumage commandé ayant un taux de compression élevé, il faut utiliser un carburant ayant un indice d'octane suffisant.

Un moteur Diesel, en revanche, fonctionne par auto-allumage du carburant et pour ce faire a besoin de fortes valeurs de compression, afin que l'air introduit dans le cylindre soit porté à une température élevée.

ⁱⁱ Les ingénieurs du PTAA de même que les équipementiers choisissent la puissance des moteurs pour équiper les machines (de façon individuelle) par expérience. Nous n'avons pas pu obtenir donc de données sur la puissance utile des équipements de transformation. Nous avons considéré donc une sollicitation de 60% de ces moteurs car ils sont souvent surdimensionnés par rapport aux besoins des équipements.