

UTILISATION DES BIOCARBURANTS DANS LES MOTEURS A ALLUMAGE PAR COMPRESSION

Gilles Vaitilingom, gilles.vaitilingom@cirad.fr
CIRAD-Persyst
UR114 TA B 114/16
73, rue JF Breton
34398 Montpellier – France

INTRODUCTION

Le fonctionnement des moteurs à allumage par compression se base sur l'aptitude du carburant à se volatiliser en quelques millisecondes quand il est injecté dans un milieu comburant porté à des pressions de l'ordre de 20 à 50 bars et à des températures de 500 à 700°C.

Sous ces conditions, le carburant sous forme de fines gouttelettes, doit s'enflammer très rapidement en allant chercher l'O₂ nécessaire à sa combustion. Ceci est caractérisé par l'indice de cétane des hydrocarbures fossiles. Pour les carburants de la biomasse, on cherchera donc, à utiliser des produits dont les propriétés de volatilité se rapprochent de celles des fossiles. Sinon, on profitera de l'aptitude des molécules du biocarburant à se décomposer en libérant très rapidement des premiers composés aptes à brûler dans les mêmes bases de temps que ceux émis par les hydrocarbures pétroliers. Le déroulement de la combustion qui suivra l'inflammation, sera donc fortement influencé par la nature des composés restant après la libération des composés les plus volatiles. Ce qui signifie que la nature chimique et les propriétés physiques des molécules de biocarburants sont à prendre en compte lorsque l'on désire utiliser un moteur à allumage par compression sans lui faire de modifications techniques. Le délai d'inflammation et la qualité de la combustion seront donc étroitement liés aux caractéristiques physico-chimiques du biocarburant étudié.

I. TRAITS CARACTERISTIQUES DE LA COMBUSTION DANS LES MOTEURS A ALLUMAGE PAR COMPRESSION.

Il est nécessaire d'examiner les traits caractéristiques de la combustion dans les moteurs à allumage par compression afin de mieux comprendre les exigences de qualité des biocarburants envisagés pour leur alimentation.

Les traits dominants de cette combustion sont (Brun, 1973) :

- sa discontinuité
L'unité de temps de la durée de vie de cette combustion est le millième de seconde. L'amplitude de temps, mesurée en quelques millièmes de seconde, comprend :
 - a. la préparation du mélange (air + combustible)
 - b. l'inflammation de ce mélange
 - c. le développement du processus de combustion
 - d. la terminaison de ce processus
 - e. l'établissement d'un état général permettant la réalisation de la préparation

- Son intensité
L'énergie libérée sous forme de chaleur de combustion est de l'ordre de 1000 KW par m³ dans une

chaudière classique, de l'ordre de 10000 KW/m.³ dans une chaudière à vaporisation instantanée, de l'ordre de 100000 KW/m³ dans les moteurs thermiques alternatifs malgré leur combustion intermittente.

C'est parce que leur combustion est intermittente que l'on peut atteindre dans ces moteurs de telles libérations d'énergie calorifique sans que les structures dépassent un niveau de température inacceptable. Ces structures, en effet, ne sont soumises qu'à un flux thermique correspondant à un niveau de température constante, très inférieur aux températures instantanées développées dans les gaz en cours de combustion.

II. INFLUENCE DE LA NATURE DES COMBUSTIBLES SUR LE PROCESSUS DE LA COMBUSTION.

Les deux hydrocarbures liquides fossiles utilisés couramment sont :

- l'essence
- le gasoil

Ils sont profondément dissemblables au point de vue physique et au point de vue chimique.

II.1 Au point de vue physique :

L'essence, hydrocarbure C₄, C₈ est un liquide volatil à la température ambiante. On peut donc, sans transformation préalable, la mélanger à l'air et effectuer ce mélange sans précautions spéciales puisque la température d'auto-inflammation de l'essence est très supérieure à sa température de vaporisation.

Le gasoil, hydrocarbure en C₁₄, C₁₆ n'est pas volatil à la température ambiante. En air calme et dans des conditions d'échauffement telles que les températures de l'air et du combustible, maintenues voisines, s'élèvent lentement (bombe calorimétrique) l'auto-inflammation du gasoil se produit pour des niveaux de température qui, fonctions de la pression régnante, sont voisines des suivantes :

Table 1 : températures d'auto-inflammation du gasoil en fonction de la pression dans une bombe calorimétrique (Brun, 1973).

Pressions en bars	5	10	15	20	25
Températures en °C	305	260	235	220	210

Ces températures d'auto-inflammation du gasoil dans l'air sont inférieures à la température d'évaporation complète du combustible laquelle avoisine 385° C, avec seulement 50% ayant distillé à 250° C.

Il faut donc que le gasoil soit introduit à force dans l'air en cours de compression dans le cylindre et qu'il le soit en un instant du cycle tel que l'auto-inflammation spontanée du gasoil se produise pour une position convenable du piston, peu avant le P.M.H., en fin de course ascendante, compte tenu :

- d'une part, du gradient d'échauffement du combustible par unité de temps,
- d'autre part, du gradient d'accroissement de la pression de l'air par unité de temps,

II.2 Au point de vue chimique

La vitesse d'oxydation de l'essence est relativement faible et l'inflammation provoquée par l'étincelle de la bougie, se propage de proche en proche grâce à la conductibilité thermique du

mélange air+combustible, et sans création d'onde de choc.

La vitesse d'oxydation du gasoil est d'environ 2000 fois supérieure à celle de l'essence.

En conséquence l'inflammation se propage sous l'effet d'un phénomène mécanique, d'une onde de choc qui précède l'onde de combustion (le front de flamme).

Dans le cylindre d'un moteur diesel, la température et la pression de l'air vont en croissant car, du fait de la course ascendante du piston, le volume n'est pas constant.

Si la répartition du gasoil dans cet air chaud et sous pression se présentait comme un mélange saturé, macro géométriquement et micro géométriquement homogène, le rapport de compression volumique maximal que le mélange pourrait admettre sans provoquer de phénomènes destructeurs pour les structures serait très inférieur au rapport de compression minimal assurant l'auto-inflammation du mélange.

Or il est un fait que **le moteur diesel existe** : Cette existence est due à deux réalités fondamentales qui sont que :

- la répartition du combustible dans l'air n'est pas homogène,
- le gasoil est un mélange d'hydrocarbures de caractéristiques physiques et chimiques diverses.

III. INFLUENCE DE LA COMBUSTION SUR L'ARCHITECTURE DES MOTEURS A ALLUMAGE PAR COMPRESSION.

Les moteurs à allumage par compression ont pu se développer commercialement parce que l'on a réussi, dans le domaine technologique,

- d'une part à limiter le taux d'introduction du combustible par unité de temps, ou plus précisément par unité d'angle de rotation du vilebrequin c'est à dire par portion unitaire de cycle,
- d'autre part à limiter le temps que les premières gouttelettes de gasoil introduites mettent à s'enflammer, c'est à dire à limiter la durée du délai d'inflammation.

Plus élevé est ce délai, plus importante est la masse de gasoil présente dans le cylindre qui est prête à détoner lorsque l'auto-inflammation se produit, donc plus élevées sont les pressions maximales de combustion et plus raides les gradients de montée en pression.

L'aptitude à présenter un délai court est caractérisée par le nombre de cétane.

On perçoit en première analyse que, pour résister à des contraintes mécaniques élevées, nées de la combustion, l'ossature du moteur à allumage par compression doit être plus robuste que celle du moteur à essence. Le diesel est donc plus lourd, plus volumineux, plus cher que le moteur à essence de même puissance.

En seconde analyse, que la vitesse de rotation n'a pas une influence décisive sur le déroulement du processus de combustion d'un moteur à allumage commandé alors qu'elle a une influence capitale sur le déroulement du processus de combustion d'un moteur à allumage par compression.

III.1 Initiation et déroulement de la combustion – type de chambre de combustion.

L'auto-inflammation en moteur à allumage par compression, s'effectue en un certain nombre de foyers nodulaires, à partir desquels les fronts de flamme se propagent vers les zones de la cylindrée ou la pré-oxydation est moins avancée. Cette propagation relativement douce est la conséquence de

l'hétérogénéité du mélange air combustible et de l'hétérogénéité du combustible qui est lui-même un mélange de plusieurs hydrocarbures.

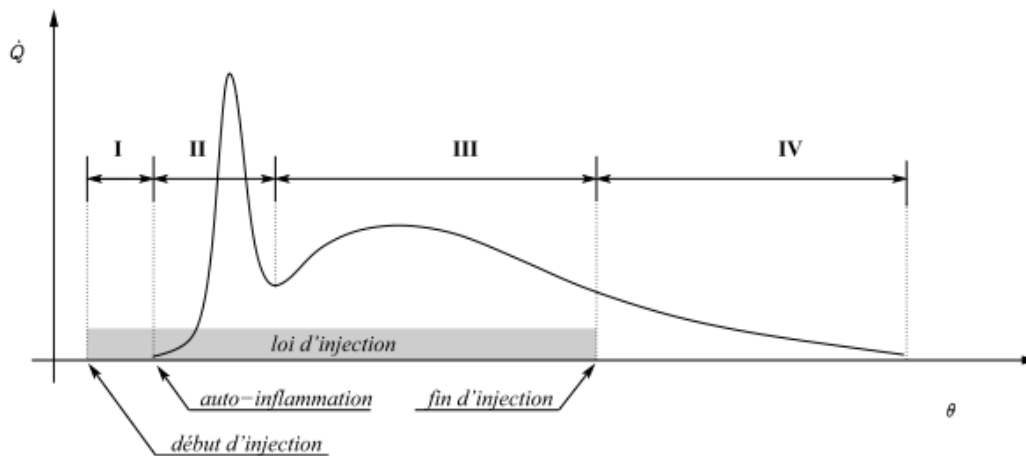


Figure 1 : Les différentes phases de la combustion. Evolution de la vitesse de dégagement de chaleur en fonction de l'angle vilebrequin (Heywood, 1988).

La première phase « Fig.1 », correspond au délai d'inflammation du combustible injecté.

Durant une seconde phase, le combustible se trouve face à un excès d'oxygène, l'inflammation en masse du combustible injecté s'effectue donc à la vitesse de combustion maximale; le gradient de la montée en pression est raide; l'amplitude de la montée en pression dépend de la quantité de combustible qui est présente au début de la phase.

Durant une troisième phase, l'allure de la combustion est caractérisée par une vitesse de combustion contrôlée par le régime d'introduction du combustible; bien que la température aille en croissant, cette vitesse de combustion est inférieure à celle de la seconde phase car les gouttelettes de combustible pénètrent dans un mélange d'air et de produits de combustion. Cette phase, dite phase de diffusion, se situe après la Pression Maximale; elle se développe après que le fluide contenu dans la chambre ait atteint la température maximale.

La quatrième et dernière phase est la celle de la combustion tardive La combustion tardive met en jeu le combustible qui ne s'est pas encore mélangé avec l'air. Durant cette période, la vitesse de libération d'énergie est tributaire de la rencontre de l'air et du carburant. La combustion du carburant non encore utilisé dépend uniquement du brassage des gaz dans le cylindre, c'est pourquoi l'aérodynamique joue un rôle décisif au cours de ce dernier épisode de la réaction

Lorsqu'on observe l'évolution par une fenêtre transparente prenant jour dans une chambre de combustion, on constate que le début de la combustion se manifeste non par une flamme mais par une luminescence infiniment moins rayonnante qui est l'indice de la formation de peroxydes et d'aldéhydes, l'apparition d'une flamme réelle ne se produit qu'après un laps de temps variable avec le type de chambre de combustion et avec le type d'injecteur.

La qualité de la combustion est, au total, fonction, au premier chef, de la façon dont est réalisé le mélange (air + combustible). La tâche d'obtenir une combustion convenable appartient donc essentiellement à la nature de la chambre de combustion et au type d'injecteur.

Deux types de moteur à allumage par compression sont mis en œuvre :

- les moteurs à injection directe (Fig.2):

Dans cette solution **le combustible va chercher** l'air au sein d'une chambre de combustion ménagée dans la tête du piston afin de créer un tourbillon local de l'air. Le rôle majeur est assumé par l'injecteur qui est nécessairement un injecteur à plusieurs orifices (injecteur à trous multiples).

Malheureusement les charges thermiques de ces têtes de piston ouvragées augmentent au fur et à mesure que croissent l'alésage et la puissance par cm^2 de surface de tête de piston.



Figure 2 : chambre de moteur à injection directe (doc. DIESELPOWER)

- Les moteurs à injection indirecte (ou dans une chambre séparée).
Dans cette solution, **l'air va chercher le combustible** qui est injecté au sein d'une chambre annexe, qui se trouve dans la culasse.
L'injecteur peut être, avantageusement, à orifice unique (injecteur à **téton**).
On distingue :
 - a) la chambre « de turbulence », chambre ouverte dont le type est la chambre RICARDO COMET (Fig.3).
Durant la compression cette chambre est le siège d'un tourbillonnement intense ce qui est éminemment favorable au mélange intime du combustible et de l'air
 - b) la préchambre de combustion (Fig.4)
Cette préchambre de capacité réduite, est relativement fermée; la température élevée de ces parois permet que l'allumage commence très tôt au sein de gaz très chargés en combustible, donc pauvres en oxygène; la vitesse de combustion est, de ce fait, lente et la montée en pression est progressive.



Figure 3 : chambre « de turbulence » moteur à injection indirecte (doc. DIESELPOWER)

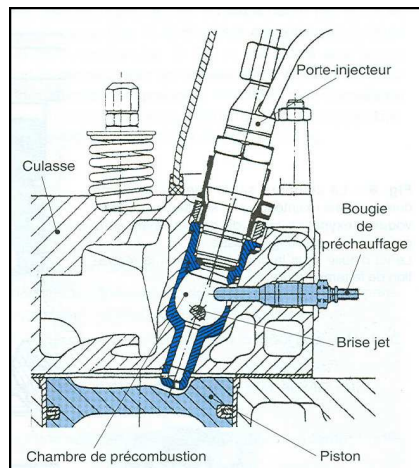


Figure 4 : préchambre de moteur à injection indirecte (Sovanna, 2004)

III.2 Influences sur la structure des moteurs - Conclusions.

Au total, il ne faut pas perdre de vue que, pour que la combustion soit correcte, il faut qu'une diffusion suffisante se produise entre les gaz et l'air de telle sorte que de l'air frais, pénétrant à l'intérieur des bulles gazeuses en ignition, atteignent les vapeurs combustibles non encore brûlés. Si la pulvérisation du combustible est trop poussée, il faut accroître la turbulence locale afin d'obtenir une vitesse relative entre gouttelettes et air qui soit suffisante.

Finalement :

- pour une turbulence donnée existe une pulvérisation optimale
- pour une pulvérisation donnée existe une turbulence optimale.

Les problèmes de structure et de combustion sont plus évolués en diesel qu'en moteur à essence

Il y a 70 ans, époque à laquelle les moteurs tournaient lentement, il était classique d'apparenter :

- le moteur à essence, au moteur à combustion à volume constant

- le moteur diesel au moteur à combustion à pression constante

Ces conceptions sont, de nos jours, révolues du fait que l'augmentation mutuelle des vitesses de rotation qui ont provoqué :

- un prolongement de la combustion essence au-delà du P.M.H.
- une avance à l'injection nettement avant le P.M.H: dans le cas du **diesel**.

Les combustions de ces deux types de moteur se développent donc, maintenant, partie à volume constant (c'est dire au voisinage immédiat du P.M.H.) et partie à pression constante (c'est à dire au-delà du P.M.H. lors de la course descendante du piston).



Figure 5 : moteur à allumage par compression actuel : injection directe et suralimentation.

IV. IMPORTANCE DU DELAI D'INFLAMMATION

Un délai d'inflammation s'étendant sur une portion importante du cycle moteur provoque donc :

- des pressions maximales de combustions élevées, donc des contraintes mécaniques nocives,
- un intense dégagement de chaleur en une position du piston qui correspond précisément au plus faible volume de la chambre de combustion donc à la plus faible surface d'évacuation calorifique; les flux de chaleur par unité de surface de parois sont donc très élevés, ce qui conduit à des températures de structures très importantes et à des conditions précaires de lubrification de hauts de cylindre.

IV.1 Influence de la vitesse de rotation avec des systèmes d'injections mécaniques.

Le taux d'injection est la masse de combustible introduite par degré de rotation angulaire du vilebrequin.

Ce taux est fixé par le fait que, pour que la combustion soit correcte, il faut en général, que l'introduction de la masse totale du combustible à injecter dans le cylindre s'effectue sur une plage de 30 à 40 degrés, répartie de part et d'autre du P.M.H. dans une situation qui diffère suivant le type de chambre de combustion et les modalités d'injection.

Ceci revient à dire que la quantité requise de combustible sera refoulée, au travers d'orifices de section constante, en 0,006 seconde pour un moteur tournant à 1 000 tours/minute et en 0,002

seconde pour un moteur tournant à 3 000 tours/minute.

Dans un moteur tournant à vitesse variable, du fait des caractéristiques de refoulement de la pompe, la durée d'injection peut être plus longue à grande vitesse qu'à faible vitesse si bien que, pour un moteur donné, le temps d'injection tend à être constant.

Les pressions créées à l'amont de l'orifice de l'injecteur, croissent avec la vitesse de rotation du moteur. En conséquence le degré de pulvérisation du combustible au sein du jet et la pénétration du jet au sein de la chambre de combustion varieront grandement. Les conditions présidant à la combustion des gouttelettes de combustible projetées à plus de 100 m/sec en pleine fournaise de 2000° C, varieront considérablement du fait des variations du diamètre moyen de ces gouttelettes. Les possibilités qu'aura chaque molécule d'hydrocarbure de trouver, dans des conditions satisfaisantes, la quantité d'oxygène qui lui est indispensable pour brûler correctement seront donc très diversifiées. Et l'on encourt le risque de situations telles que la destruction des molécules conduise à la formation de groupements de grosses molécules, c'est à dire de goudrons d'une part, à la formation de carbone libre c'est à dire de suie d'autre part.

Les systèmes d'injection modernes « COMMON RAIL » se distinguent des systèmes classiques grâce à la gestion électronique de l'injection qui permet, quel que soit le régime de rotation du moteur, de contrôler le taux d'introduction, le début et la fin de l'injection. Par conséquent, des processus d'injection très précis et très flexibles sont possibles. Par exemple, la combustion pendant le processus d'injection principale peut être considérablement améliorée par l'injection pilote d'une très petite quantité de carburant, suivie d'injections séquencées.

IV.2 Paramètres principaux influençant le délai.

Le délai, facteur fixant les conditions d'inflammation spontanée, dépend de nombreux paramètres et principalement :

- de la nature du combustible (volatilité, indice de cétane...)
- de son degré de pulvérisation lequel est lui-même fonction :
 - de la pression d'injection
 - du type d'injecteur
 - de la nature du combustible (viscosité, tension superficielle, ...)
 - du rapport géométrique de compression volumétrique
 - du coefficient de remplissage en air
 - des températures et pression de l'air admis
 - de l'instant où débute l'injection
 - de la température des parois du cylindre
 - de l'étanchéité des segments et soupapes.

Ce délai exprimé en unité de temps, varie-dans des proportions relativement faibles et sa valeur se situe aux environs de 1/1000 de seconde.

Pour un moteur tournant à 1 000 tours/minute, 1/1000 de seconde représente 6 degrés de rotation angulaire du vilebrequin. Au moment de l'inflammation la masse de combustible présente dans le cylindre, compte tenu du fait que le taux d'injection est sensiblement constant durant les 40 degrés d'introduction, est donc environ 15 % de la masse injectée par cycle. Pour un moteur tournant à 3 000 tours/minute, 1/1000 de seconde représente 18 degrés de rotation et le pourcentage de combustible prêt à détoner avoisine 50%. Les pressions maximales vont donc être beaucoup plus élevées et les contraintes mécaniques appliquées aux structures du moteur risquent d'être

destrutrices.

En réalité, le délai exprimé en écart angulaire de rotation croît moins vite que la vitesse de rotation car l'accroissement de cette vitesse :

- accroît la turbulence de l'air, donc les échanges thermiques entre goutte froide et air chaud,
- accroît pour une même position de piston ascendant, la température et la pression de l'air puisque cette augmentation de vitesse diminue le temps d'échange thermique air/parois froides, ainsi que les fuites d'air sous pression par les segments et soupapes.

IV.3 Moyens de réduire le délai d'inflammation.

Plusieurs techniques permettent de réduire le délai d'auto-inflammation :

- La nature du combustible
- La réduction du diamètre moyen des gouttelettes
- L'accroissement de la température et de la pression de l'air.

La nature du combustible :

L'auto-inflammation d'un combustible donné survient au bout d'un temps qui résulte de la composition de deux phénomènes indépendants : l'évaporation (délai physique) et la vitesse de réaction (délai chimique). Le délai global n'est pas strictement égal, soulignons-le, à la somme des délais physique et chimique.

- Le délai physique
Le délai physique dépend évidemment de la volatilité du combustible.
Il dépend également de la viscosité du fait de l'influence qu'exerce celle-ci sur la dimension des gouttelettes (c'est à dire sur le gradient d'échauffement du combustible) et leur éclatement.
- Le délai chimique
C'est lui qui contrôle tout le processus d'auto-inflammation et motive que le délai global d'auto-inflammation puisse être plus élevé pour un combustible léger que celui d'un combustible lourd.
Le déroulement des réactions chimiques présidant à l'auto-inflammation d'hydrocarbures complexes est encore peu connu. On sait que les vitesses de réaction de chaque combustible croissent exponentiellement avec la température absolue (loi d'Arrhenius). Il existe un seuil de température à partir duquel la quantité de chaleur provoquée par l'oxydation n'a plus le temps de se dissiper et la température de la molécule se met à croître, le phénomène s'accélère alors de lui-même.

La réduction du diamètre moyen des gouttelettes

L'efficacité de cette réduction est évidente : elle porte sur le gradient d'échauffement de la gouttelette en fonction du temps et agit donc tant sur le délai physique que sur le délai chimique.

A titre d'exemple, la réduction de 100 à 40 microns du diamètre des gouttelettes (lesquelles sont, en réalité, plus fines que ces valeurs pour l'immense majorité d'entre-elles) abaisserait la valeur du délai dans le rapport de 5 à 1. Mais cette efficacité s'amenuise au fur et à mesure que l'on arrive dans les faibles diamètres. Par ailleurs, une diminution du diamètre des gouttes affaiblit la pénétration du jet; elle obère donc l'obtention d'une combustion correcte

L'accroissement de la température et de la pression de l'air admis

Le délai diminue et les contraintes mécaniques s'amenuisent lorsque l'air ambiant est chaud et que l'on reste au niveau de la mer.

Pour diminuer le délai en jouant sur l'augmentation de la température que possède l'air au début de l'introduction du combustible on peut recourir à trois techniques :

- augmenter le rapport de compression volumique
- diminuer l'avance à l'injection
- profiter de la suralimentation.

V. CONTRAINTES ET AVANTAGES DES MOTEURS A ALLUMAGE PAR COMPRESSION.

1.. Le moteur à allumage par compression présente moins d'anomalies fonctionnelles que le moteur à allumage commandé. Il se caractérise par une stabilité parfaite des cycles et il peut, en particulier, fonctionner sans troubles excessifs avec des combustibles dont l'indice de cétane est compris entre 35 et 60 alors que le moteur à essence est très susceptible à l'égard de la qualité du combustible.

Mais la combustion avec allumage par compression se caractérise par sa complexité fondamentale, due à la simultanéité de divers phénomènes : formation du mélange, propagation de la flamme à partir de foyers initiaux, poursuite de la formation du mélange au cours de la phase principale de combustion, combustion de diffusion d'un mélange non homogène.

Au point de vue technologique, une fois que la pression maximale de combustion et la température minimale d'inflammation ont été fixées, il s'agit de rechercher des compromis entre thermodynamique et physico-chimie afin de limiter :

- le gradient de montée en pression des gaz en début de combustion,
- la consommation spécifique de combustible
- la teneur en imbrulés des gaz d'échappement
- Ainsi que la teneur en oxydes d'azote

2. Les pressions maximales de combustion sont beaucoup plus élevées dans le diesel que dans le moteur à essence. En conséquence, pour une même cylindrée unitaire, la structure du diesel doit être plus robuste, donc plus lourde et plus volumineuse que celle du moteur à essence

3. Le mélange (air + combustible) étant hétérogène dans le cas du diesel, il s'ensuit que le souci de libérer toute l'énergie potentielle du combustible conduit à une quantité d'air nettement supérieure à la concentration stœchiométrique. De ce fait, un litre de mélange (air + gasoil) ne dégage qu'environ 3700 J alors que le mélange (air + essence) en dégage 4000. Mais la suralimentation, technique spécifique du diesel, accroît l'énergie que chaque litre de cylindrée peut fournir par cycle et corrige donc ce handicap.

4. Le rapport de compression volumique du diesel est plus élevé que celui du moteur à essence. En conséquence, conformément au principe de Carnot Clausius, le rendement thermodynamique du diesel, surtout s'il est suralimenté, est nettement plus élevé (0,60 contre 0,45). Il s'ensuit que le diesel consomme moins d'un combustible dont le pouvoir calorifique au kilogramme est voisin de celui de l'essence.

VI. LES BIOCARBURANTS – GENERALITES

Après avoir explicité l'influence de la nature des combustibles sur la combustion et avoir approfondi l'importance de la combustion sur la technologie des moteurs à allumage par compression, nous sommes en possession des éléments pouvant déterminer les exigences attendues de la part des biocarburants pour qu'ils puissent être utilisés dans ces moteurs. En effet, tous ne peuvent pas être de bons combustibles des moteurs à allumage par compression.

VI.1 Biocarburants : définitions

L'expression « biocarburant » (formée du grec *bios*, *vie*, *vivant* et de « carburant ») indique que ce carburant est obtenu à partir de matière organique (biomasse), par opposition aux carburants issus de ressources fossiles. L'appellation « biocarburant » a été promue par les industriels de la filière et certains scientifiques. Par exemple, Biocarburant est la dénomination retenue par le Parlement européen.

On distingue aujourd'hui 3 catégories de biocarburants, apparus plus ou moins chronologiquement :

- Les biocarburants de 1ère génération,
- Les biocarburants de 2nde génération,
- Les biocarburants de 3ième génération.

VI.2 Biocarburants de première génération : Ethanol, Huiles végétales et Biodiesel (Fig. 6) et Biométhane.

Ces sont des carburants liquides issus de la transformation des matières végétales produites par l'agriculture (betterave, canne à sucre, blé, maïs, colza, tournesol, pomme de terre...). Les biocarburants sont assimilés à une source d'énergie renouvelable. Leur combustion ne produit que du CO₂ et de la vapeur d'eau et pas ou peu d'oxydes azotés et soufrés (NO_x, SO_x).

Ces combustibles ont des caractéristiques physico-chimiques différentes des produits pétroliers qu'ils vont remplacer.

- La filière Ethanol :
 - **Le bioéthanol** est obtenu par fermentation de sucres (sucres simples, amidon hydrolysé) par des levures du genre *Saccharomyces*. L'éthanol peut remplacer partiellement ou totalement l'essence. Une petite proportion d'éthanol peut aussi être ajoutée dans du gazole, donnant alors du gazole oxygéné, mais cette pratique est peu fréquente.
 - **L'éthyl-tertio-butyl-éther (ETBE)** est un dérivé (un éther) de l'éthanol. Il est obtenu par réaction entre l'éthanol et l'isobutène et est utilisé comme additif à hauteur de 15 % à l'essence en remplacement du plomb. L'isobutène est obtenu lors du raffinage du pétrole.
- La filière huiles végétales :

De nombreuses espèces végétales sont oléifères comme le palmier à huile, le tournesol, le colza, le jatropha ou le ricin. Les rendements à l'hectare varient d'une espèce à l'autre. L'huile est extraite par pressage (écrasement) à froid, à chaud, voire (pour un coût plus élevé) avec un solvant organique.

Deux grandes voies d'utilisation sont ouvertes :

 - **L'huile végétale brute (HVB, ou HVP)** peut être utilisée directement, dans les moteurs diesels, pure ou en mélange, mais, notamment à cause de sa viscosité relativement élevée, l'utilisation d'une fraction d'huile importante nécessite l'usage d'un moteur adapté.
- La filière Biodiesel :

Le biodiesel, obtenu par la transformation des triglycérides qui constituent les huiles végétales ; la transestérification de ces huiles, avec du méthanol ou de l'éthanol, produit des Esters d'Huile Végétale, respectivement méthyliques (EMHV) et éthyliques (EEHV), dont les molécules plus petites peuvent alors être utilisées comme carburant (sans soufre, non toxique et hautement biodégradable) dans les moteurs à allumage par compression.

➤ Autres filières : le Biométhane :

Le **biométhane** est le principal constituant du biogaz issu de la fermentation méthanique (ou méthanisation) de matières organiques animales ou végétales riches en sucres (amidon, cellulose, plus difficilement les résidus ligneux) par des micro-organismes méthanogènes qui vivent dans des milieux anaérobies. Les principales sources sont les boues des stations d'épuration, les lisiers d'élevages, les effluents des industries agroalimentaires et les déchets ménagers. Les gaz issus de la fermentation sont composés de 65 % de méthane, 34 % de CO₂ et 1 % d'autres gaz dont le sulfure d'hydrogène et le diazote. Le méthane est un gaz pouvant se substituer au gaz naturel (ce dernier est composé de plus de 95 % de méthane). Il peut être utilisé soit dans des moteurs à allumage commandé (technologie moteurs à essence) soit dans des moteurs dits dual-fuel.

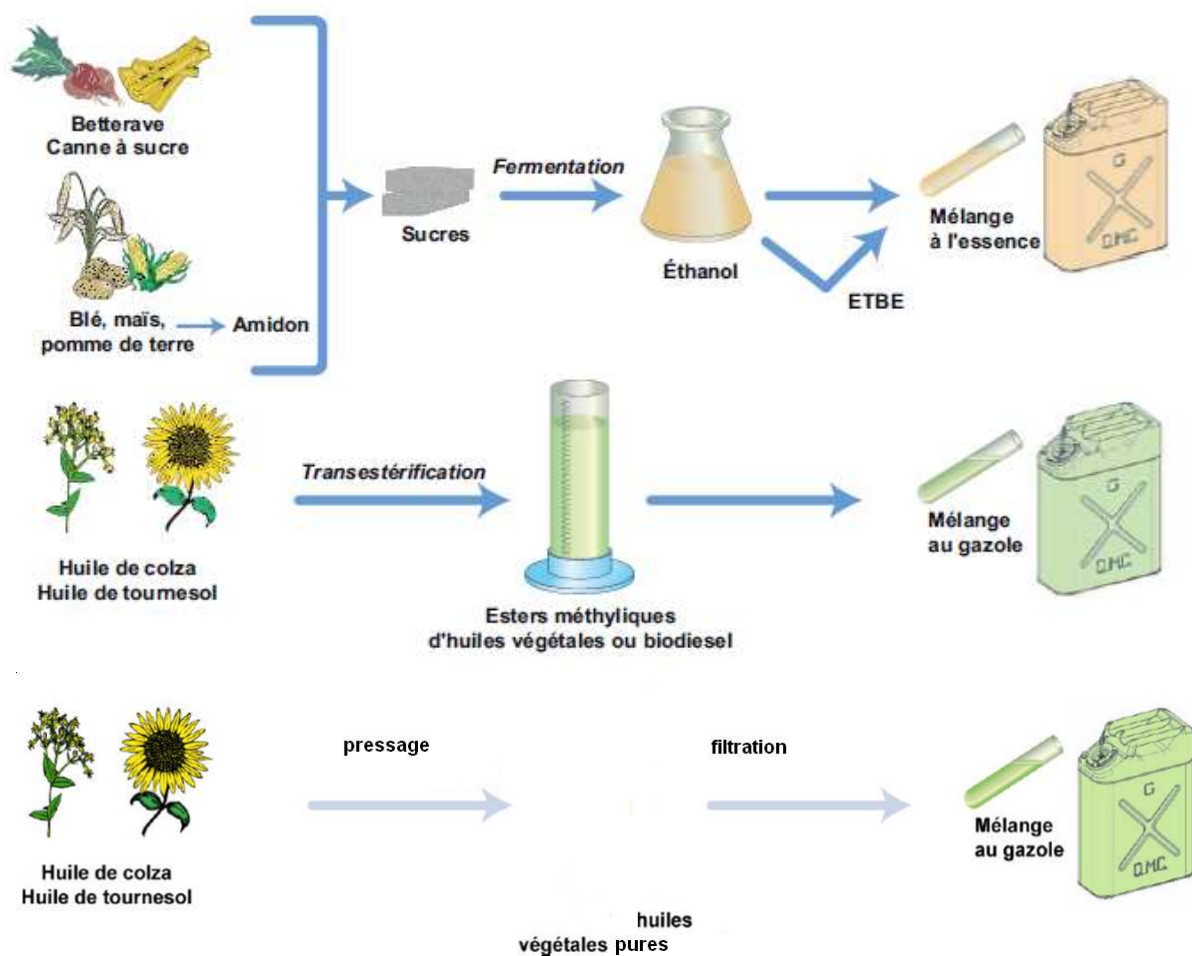


Figure 6 : Filière de production des biocarburants de première génération (source : IFPEN).

VI.3 Biocarburants de seconde génération : Ethanol cellulosique, hydrocarbures de synthèse.

De nouvelles filières purement énergétiques, aux meilleurs rendements et plus intéressantes sur le plan environnemental émergent progressivement (Fig. 7) :

➤ Éthanol lignocellulosique

La lignocellulose, principal constituant des parties non alimentaires des végétaux, consiste en un assemblage complexe de deux polymères de sucres, la cellulose et l'hémicellulose, et d'un polymère essentiellement composé de motifs aromatiques : la lignine. La principale difficulté pour transformer cette matière première est de rendre les sucres fermentescibles sans dégradation excessive.

➤ Diesel et kérosène synthétiques issus d'huile végétale :

Une autre approche permet d'utiliser les huiles végétales pour produire des hydrocarbures : il s'agit de procéder à leur hydrogénation pour enlever l'oxygène (*Hydrotreated vegetable oil* ou HVO). Les hydrocarbures issus de cette technologie ont d'excellentes qualités pour les gazoles : cétane élevé, absence de soufre et d'hydrocarbures aromatiques, propriétés à froid ajustables. Ces bases gazoles sont totalement compatibles avec le gazole actuel. Selon les sources d'huiles végétales, ce procédé convient également pour produire une base pour kérosène (biokérosène).

➤ Hydrocarbures synthétiques par voies thermochimiques

la voie indirecte *Biomass to Liquid* (BtL) est un enchaînement d'étapes unitaires : gazéification de la biomasse, purification du gaz de synthèse produit, synthèse Fischer-Tropsch (FT) et hydroisomérisation pour produire des hydrocarbures. Pour ces différentes étapes, les technologies existent mais elles présentent des degrés de maturité inégaux et ne sont utilisées en général que pour traiter des charges fossiles. Il faut donc, d'une part, les adapter à la biomasse et d'autre part, lever les verrous technologiques existants pour qu'elles atteignent l'échelle industrielle.

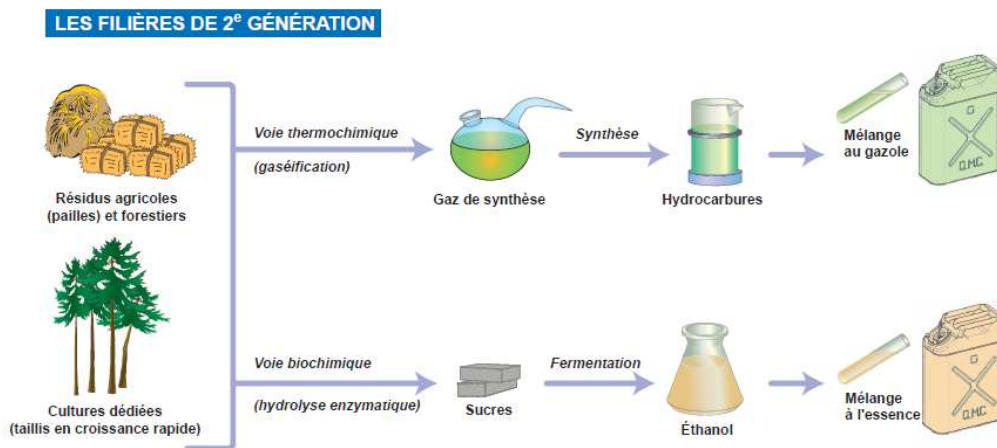


Figure 7 : Filière de production des biocarburants de seconde génération (source : IFPEN).

VI.4 Biocarburants de troisième génération : lipides de micro-algues.

Les biocarburants à partir d'algues, algocarburant, sont dits de « *troisième génération* ». Certaines micro-algues sont capables de synthétiser des lipides ou des hydrocarbures à partir du CO₂ avec une productivité potentiellement supérieure à celle des productions oléagineuses terrestres (10 à 20 fois plus qu'avec le colza ou le tournesol). On cherche depuis le début des années 2000 à sélectionner les organismes les plus prometteurs. C'est probablement à partir des cultures de micro-algues, que des biocarburants pourront être produits avec les meilleurs rendements, rendant ainsi envisageable une production de masse (par exemple pour l'aviation), sans déforestation massive ni concurrence avec les cultures alimentaires. Pour obtenir un rendement optimal en huile, la croissance des micro-algues doit s'effectuer avec une concentration en CO₂ d'environ 13 %. Ceci est possible à un coût très faible grâce à un couplage avec une source de CO₂, par exemple une centrale thermique au charbon, au gaz naturel, au biogaz, ou une unité de fermentation alcoolique, ou encore une cimenterie.

Biodiesel production from microalgae

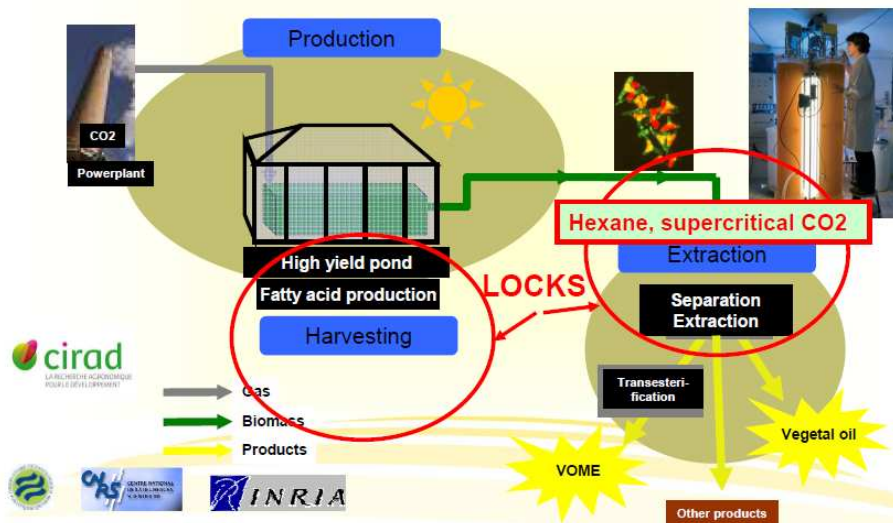


Figure 8 : Filière de production des biocarburants d'huile algale.

VI.5 Biocarburants en moteurs à allumage par compression : résumé.

Les biocarburants de 2nde génération empruntent des voies de conversion sophistiquées et complexes mais produisent des hydrocarbures synthétiques, dont l'usage est identique à celui des carburants pétroliers.

Les biocarburants de 1^{ère} génération sont issus de transformations simples et universelles, mais produisent des combustibles différents des produits pétroliers.

Ce sont donc ces derniers qui feront l'objet du chapitre suivant, qui détaillera les conditions de leur utilisation dans les moteurs à allumage par compression.

Le Biodiesel d'huile algale sera traité avec le Biodiesel d'huiles végétales terrestres, on notera que l'obtention des lipides, avant transestérification, reste encore complexe.

VII. ETUDE DES BIOCARBURANTS UTILISABLES DANS LES MOTEURS A ALLUMAGE PAR COMPRESSION.

On traitera donc des biocarburants dont les molécules (les caractéristiques physico-chimiques) sont différentes de celles du gasoil. Il s'agit (Fig. 9) :

- des huiles végétales pures (ou naturelles)
- du biodiesel
- du bioéthanol
- de mélanges et de formulations de gasoil et de biocarburants
- du biométhane
- des gaz de gazogène.

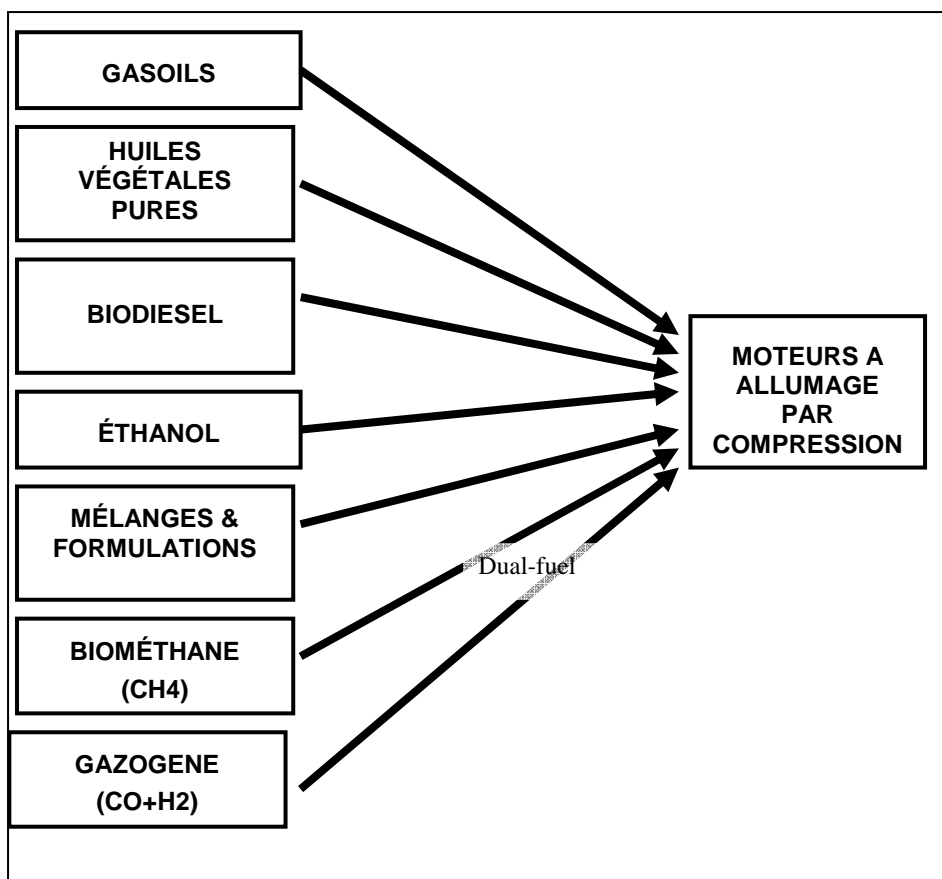


Figure 9 : Différents biocarburants utilisables dans les moteurs à allumage par compression.

VII.1 Utilisation des huiles végétales terrestres ou marines en moteurs à allumage par compression.

Les substances à partir desquelles sont produites les huiles sont, soit des graines ou des amandes, soit des fruits. Parmi les graines de plantes cultivées pour leur huile, les plus connues sont : l'arachide, le colza, le ricin, le soja et le tournesol. Il faut y joindre les graines de plantes cultivées pour fournir des fibres textiles - et subsidiairement de l'huile telle que le coton et le lin principalement. Quant aux

fruits oléagineux et aux amandes, ils proviennent principalement du cocotier (noix de coco contenant le coprah), du noyer, du palmier à huile (palme et palmiste) et de l'olivier (olives).

L'intérêt des huiles végétales en tant que carburant des moteurs à cycle Diesel n'est pas nouveau. Il semble même étonnant aujourd'hui de constater que dans les années 1920, ingénieurs et chercheurs se soient consacrés à leur étude. Depuis 2003, il y a un regain d'intérêt pour l'utilisation des huiles végétales pures comme carburant pour moteurs diesels ou pour brûleurs. En particulier, l'utilisation d'huiles végétales peut être intéressante pour les pays en développement, en favorisant l'accès à des services énergétiques au niveau local dans différents secteurs : l'agriculture, l'irrigation, la production d'électricité, l'approvisionnement en eau potable, les transformations post-récolte (décorticage, mouture), ceci, en plus de leurs usages multiples existants (alimentaire pour certaines huiles végétales, fabrication de polymères, encres ...).

➤ **Aptitude des Huiles Végétales Pures à la combustion :**

La composition chimique des 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 alcools du glycérol.

Les huiles végétales ont des caractéristiques similaires à celles du gasoil (table 2). En particulier, un indice de cétane qui indique une aptitude au fonctionnement en cycle Diesel. Plus il est élevé, plus le carburant est apte à l'auto inflammation. Mais, si les valeurs présentées dans les tableaux permettent une classification en termes de qualité des huiles végétales, elles ne sont pas directement comparables à celles du fioul. En effet, l'huile de tournesol qui présente un indice de cétane de 32 se comporte mieux dans un moteur diesel que des gasoils de mêmes indices.

Les performances en puissance seront voisines avec une réduction de 5 %, comme l'indique le contenu calorifique des mélanges air/carburant, stœchiométriques, de l'huile de colza prise en exemple (Vaitilingom, 1997).

En revanche, la viscosité cinématique de l'huile de colza est 12 fois plus élevée que celle du gasoil à 20°C. Les tailles des gouttelettes injectées seront significativement plus élevées que celles obtenues avec le gasoil. Or, on a vu précédemment, les différents facteurs influençant le délai d'inflammation et l'importance d'avoir un délai d'inflammation court afin d'assurer un mode combustion compatible avec les moteurs à allumage par compression. Il sera donc nécessaire de réduire la viscosité avant l'injection (Vaitilingom, 2006).

Table 2 : caractéristiques d'une huile végétale comparées au gasoil.

	Gasoil	Huile de colza
Masse volumique (kg/dm³) 20°	0.836	0.920
Pouvoir Calorifique Inférieur (kJ/kg)	43800	37850
Pouvoir comburivore (g air/g carburant)	14.84	13.50
Contenu calorifique du litre de mélange air/carburant (J)	3800	3625

Indice de Cétane	50	32
Viscosité cin. à 20°C	6	72

➤ Contraintes de nature physique liées à l'usage des Huiles Végétales Pures dans les moteurs : Afin de réduire la taille des gouttelettes du jet d'huile végétale, la diminution de la viscosité par réchauffage est la méthode la plus simple à appliquer. La figure 10 indique l'efficacité de cette méthode : on retrouve la viscosité du gasoil à 20°C pour un réchauffage de l'huile de colza à la température de 100°C. Le mélange avec le gasoil diminue la viscosité : à 50/50 la viscosité du gasoil est atteinte pour une température de 80°C.

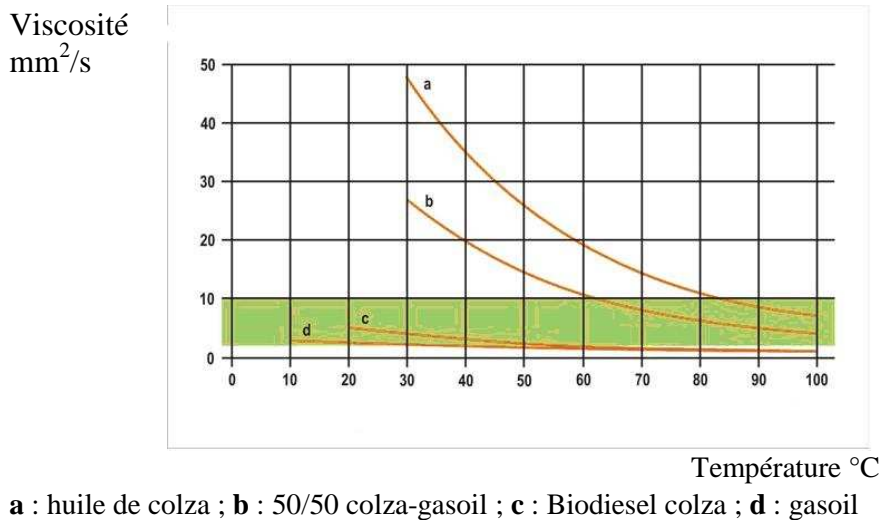


Figure 10 : évolution de la viscosité cinématique pour l'huile de colza (a), le mélange 50/50 colza-gasoil (b), le Biodiesel de colza (c) et le gasoil (d).

➤ Contraintes de nature chimique liées à l'usage des Huiles Végétales Pures dans les moteurs : On a vu qu'il existe deux familles de moteurs à allumage par compression : les moteurs à **injection directe** et les moteurs à **injection indirecte**. Le comportement des huiles végétales en combustion n'est pas identique dans ceux-ci.

*** les moteurs à injection directe :**

Alimentés avec des huiles végétales pures, ils connaissent rapidement des problèmes de fonctionnement (Daho, 2012). Ces problèmes sont la formation de dépôts carbonneux à l'intérieur du moteur (Fig. 11) et une forte *dispersion cyclique* pouvant conduire à des dégâts mécaniques parfois importants.



Figure 11 : Piston injection directe au gasoil.

Piston injection directe : 21 heures huile végétale

L'utilisation de mélanges significatifs d'huile végétale et de gasoil (contenant plus de 10 % d'huile) ne résout pas les problèmes. L'encrassement existera toujours, seul le temps de formation est fonction du taux d'huile végétale.

Il est donc nécessaire de modifier les moteurs à injection directe pour utiliser des huiles végétales comme carburant.

Mais ces modifications doivent respecter la conception et l'architecture interne du moteur tout en respectant les matériaux et les jeux fonctionnels mécaniques (Fig. 12). Il faut alors que les températures maximales atteintes restent raisonnables.

Ce type de modifications, permet toujours l'usage du gasoil (et donc de tout mélange d'huile et de gasoil) sans pertes de puissance et sans interventions mécaniques supplémentaires. A tout moment les utilisateurs peuvent remplir le réservoir indifféremment avec de l'huile ou du gasoil (notion de flexfuel).



Figure 12 : exemple de modification de piston pour l'utilisation d'huile végétale. A droite, piston modifié après 500 heures à l'huile de tournesol.

La solution double-circuit de carburant (dit : « Bicarburant »).

Il est possible d'utiliser des huiles végétales en mélange ou pure dans des moteurs à injection directe non modifiés dès lors que la charge (% de la puissance maximale) des moteurs est supérieure à 60-70 %. Ce qui signifie que si « le profil de travail » du moteur révèle un taux d'utilisation important dans ces plages de fortes charges, il peut ne pas être modifié tout en consommant des parts significatives d'huile végétale. Ceci en conservant ses rendements et en respect des limites d'émissions en vigueur. Mais cette dernière adaptation nécessite la mise en place d'un double circuit d'alimentation comportant deux réservoirs et deux lignes de carburant, une pour le gasoil et une pour l'huile végétale. Un système automatique de bascule garanti le bon fonctionnement du moteur quelle que soit sa charge (Fig. 13).

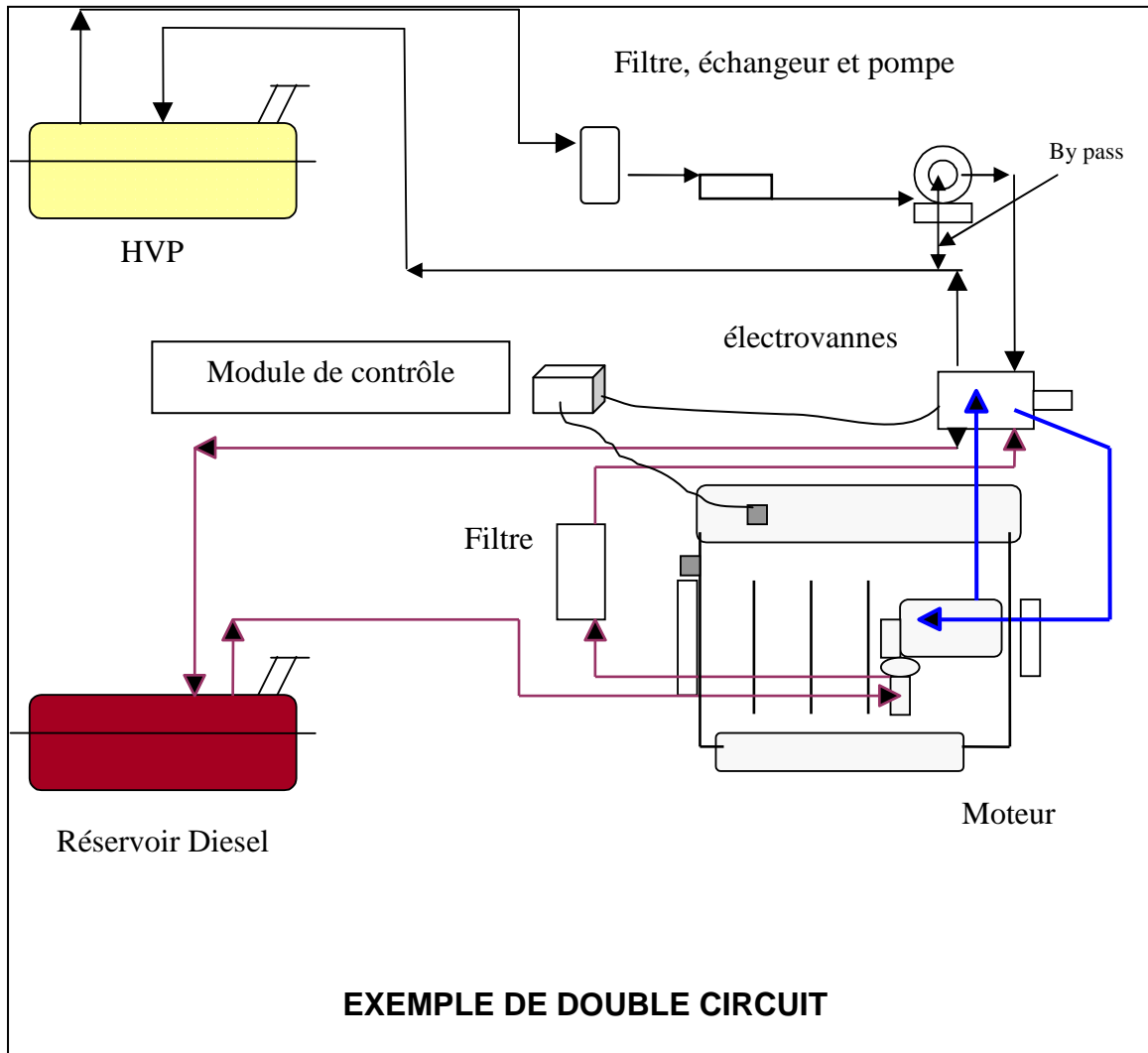


Figure 13 : Exemple de double-circuit de carburant. L'électrovanne est pilotée par une information sur la charge instantanée utilisée par le moteur.

La table suivante résume les avantages et contraintes liées à l'utilisation d'huiles végétales pures dans des moteurs Diesel à injection directe.

Table 3 : avantages et contraintes liées à l'utilisation d'huiles végétales pures dans des moteurs Diesel à injection directe.

AVANTAGES	CONTRAINTES
Toute teneur en HVP MOTEURS INJECTION DIRECTE	
Flexibilité (tout mélange fioul/HVP)	Modification des moteurs
	Réchauffage de l'huile végétale
Bicarburant	
Pas de modification des moteurs	Double circuit d'alimentation

	Part de fioul variable selon la charge
--	--

* **les moteurs à injection indirecte.** Ils désignent les moteurs à préchambre, à chambre de turbulence, à chambre à réserve d'air, etc. Ce sont des moteurs à chambre de combustion « divisée ». Ces derniers tolèrent bien les huiles végétales brutes (mais filtrées efficacement). Mais les tendances des 20 dernières années les ont rendus minoritaires face aux injections directes moins "gourmands" en carburant.

Table 4 : avantages et contraintes liées à l'utilisation d'huiles végétales pures dans des moteurs Diesel à injection indirecte.

AVANTAGES	CONTRAINTES
MOTEURS INJECTION INDIRECTE Mélanges à faible teneur (<20%)	
Aucune modification moteur	Mélanges préalables préférables
Aucun réglage	-
MOTEURS INJECTION INDIRECTE Mélanges à teneurs < 50%	
Aucune modification moteur	Mélanges préalables préférables
Aucun réglage	Réchauffeur sur ligne d'alimentation
MOTEURS INJECTION INDIRECTE Mélanges à forte teneur (50% < teneurs < 100%)	
Aucune modification moteur	Mélanges préalables préférables
Flexibilité (tout mélange fioul/HVP)	Réchauffeur sur ligne d'alimentation
	Pompe suppl. sur ligne d'alim.
	Réglage des injecteurs

➤ Résultats :

La table 5 donne les résultats obtenus sur un moteur à injection directe modifié. L'huile végétale présente une réduction du CO et des NOx à l'échappement en comparaison avec le gasoil.

Table 5 : émissions comparées à l'échappement d'un moteur à injection directe alimenté en gasoil et en huile de jatropha curcas (Sidibé, 2010).

2400 tr/mn	Cs consommation spécifique (g/kWh)	CO (ppm)	CO2 (%)	NOx (ppm)	O2 (%)
GASOIL 1/4 charge	398	303	2.5	487	17.4
JATROPHA 1/4 charge	438	273	1.2	218	18.5
GASOIL 4/4 charge	237	332	5.6	1088	13.4
JATROPHA 4/4 charge	273	225	4.4	448	15

VII.2 Utilisation du Biodiesel dans les moteurs à allumage par compression :

Les esters obtenus avec des huiles végétales et de l'alcool méthylique ou éthylique, sont de bons substituts des fiouls et gazoles. Ces esters ont des propriétés similaires au gazole. Ils peuvent donc être utilisés dans tous les moteurs diesel, sans modifications.

➤ Aptitude des Biodiesels à la combustion :

L'indice de cétane est identique, voire un peu supérieur à celui du gasoil. On peut prédire un délai d'inflammation court, prémices d'un bon déroulement de la combustion.

La viscosité cinématique est elle aussi très proche de celle du gasoil. La taille des gouttelettes injectées sera proche de celle obtenue avec le gasoil.

Le contenu calorifique des mélanges air/carburant, stœchiométriques, est voisin, les performances en puissance seront quasi-identiques.

Table 6 : caractéristiques d'un Biodiesel comparées au gasoil.

	Gasoil	Biodiesel*
Masse volumique (kg/dm³) 20°	0.836	0.880
Pouvoir Calorifique Inférieur (kJ/kg)	43800	41000
Pouvoir comburivore (g air/g carburant)	14.84	14.10
Contenu calorifique du litre de mélange air/carburant (J)	3800	3760
Indice de Cétane	50	52
Viscosité cin. à 20°C	6	7

* : Ester méthylique de colza

➤ Contraintes liées à l'usage des Biodiesels dans les moteurs :

Les trois tableaux suivants résument les contraintes d'utilisation des Biodiesels en fonction de leur taux de mélange dans le gasoil.

Table 7 : avantages et contraintes liées à l'utilisation de Biodiesel dans les moteurs.

AVANTAGES	CONTRAINTES
Mélanges à faible teneur (<10% de Biodiesel dans le gasoil)	
Pas de modification des moteurs	
Indice de cétane amélioré	
Réduction des émissions de polluants	
10 % < teneur de Biodiesel < 50 %	
Pas de modification des moteurs	

Indice de cétane amélioré	
Réduction des émissions de polluants	
50 % < teneur de Biodiesel < 100 %	
Pas de modification des moteurs	Vulnérabilité des matériaux à vérifier (réservoirs, tuyaux, joints,...)
Indice de cétane amélioré	
Réduction des émissions de polluants	

➤ Résultats :

La table 10 indique les résultats obtenus sur des bus urbains selon un cycle de roulage normalisé (cycle AQA ADEME). Le Biodiesel montre une réduction de polluants et de particules à l'échappement en comparaison avec le gasoil.

VII. 3 Utilisation de l'éthanol dans les moteurs à allumage par compression :

L'éthanol, par nature chimique n'est pas un substitut des fiouls et gazoles mais bien un substitut des essences comme l'indique la table 7.

Cependant, il y a un intérêt à l'utiliser dans les moteurs diesels car ils équipent la totalité des parcs agricoles et des véhicules de transports de marchandises et de passagers.

Au cours des années 80, plusieurs procédés ont été développés pour utiliser de l'éthanol de préférence non-anhydre (éthanol 95 %) dans les moteurs diesels.

➤ Aptitude du Bioéthanol à la combustion :

L'indice de cétane de 5 révèle que l'éthanol n'est pas apte à l'auto-inflammation dans les conditions technologiques des moteurs Diesel. L'allumage et le déroulement de la combustion devront donc être initiés et contrôlés, soit par un autre carburant (mode dual-fuel), soit par un additif spécifique, soit par un système à décharge électrique classique (mode allumage assisté).

Le contenu calorifique des mélanges air/carburant, stœchiométriques, indique une puissance attendue plus élevée à l'éthanol qu'au gasoil. La faible viscosité cinématique de l'éthanol peut être une contrainte, non pas de finesse de gouttelettes, mais de lubrification des organes d'injection pour les fortes teneurs des mélanges avec le gasoil.

Table 8 : caractéristiques carburant de l'essence, du gasoil et du Bioéthanol.

	Gasoil	Bioéthanol (95)
Masse volumique (kg/dm³) 20°C	0.836	0.79
Pouvoir Calorifique Inférieur (kJ/kg)	43800	26900
Pouvoir comburivore (g air/g carburant)	14.84	8.9
Contenu calorifique du litre de mélange air/carburant (J)	3800	3910
Indice de Cétane	50	5

Viscosité cin. à 20°C	6	1.5
-----------------------	---	-----

Il est cependant possible d'utiliser l'éthanol dans les moteurs diesels (dits à allumage par compression) :

- **les solutions « mixtes » :**

- procédé dit de fumigation : moteur muni d'un dispositif permettant d'aspirer de l'air très partiellement carburé en alcool,
- dual-fuel en double injection : in injecteur pour le gasoil, l'autre pour l'éthanol,
- mélanges gasoil-éthanol. Jusqu'à 5 % d'éthanol anhydre, il n'est pas nécessaire d'adapter les moteurs mais, dans les périodes froides, le recours à un tiers solvant peut être recommandé (Satgé de Caro, 2001).

Ces procédés restent étroitement dépendants du gasoil, puisqu'il assure l'allumage de la combustion dans les trois cas.

- **les solutions éthanol 100% :**

- moteur à allumage assisté : ici, l'allumage est commandé grâce à des équipements classiques (électronique, bougies,...), mais il y injection directe de l'éthanol dans la chambre de combustion. (C'est, par exemple, le procédé MOTEURGARO qui a su tirer tous les avantages de ce mode de carburation : puissance massique accrue et rendement supérieur au fonctionnement gazole.)



Figure 14 : A gauche, tracteur Massey Ferguson 275 modifié à allumage assisté. A droite, Massey Ferguson 698T à éthanol additivé.

- éthanol additivé avec des produits "procétane" : ce sont des "explosifs liquides" parfaitement miscibles avec les alcools (exemple : le Tri Ethyl Glycol Dinitrate). Ils ont pour effet d'augmenter l'indice de cétane du carburant. Le mélange éthanol-procétane se comporte comme les gasoils et peut alors être utilisé dans un moteur Diesel classique. Seuls les éléments d'alimentation (réservoirs, tuyaux et pompes d'injection) doivent être adaptés et modifiés.

Cette dernière voie est très intéressante car elle est applicable à tous les moteurs Diesel quelque soit leur type et leur taille. Le moteur conserve ses caractéristiques d'origine et peut, le cas échéant, être réalimenté en gazole

Plusieurs additifs peuvent être utilisés. Enfin, par simple formulation il est possible d'utiliser des mélanges gasoil-éthanol additivé.

La Suède à développer depuis 1990 l'utilisation d'éthanol en moteur diesels. Aujourd'hui le constructeur Scania propose un bus à éthanol dans sa gamme. Plus de 600 de ces bus sont actuellement en exploitation dans les villes suédoises. Ils utilisent de l'éthanol additivé de 5 % en poids d'un produit « procétane » fabriqué par Akzo Nobel (qui a racheté ICI en 2007). Les performances sont identiques à celles des bus fonctionnant au gazole et les émissions à l'échappement beaucoup plus faibles (respectant les limites EURO VI).

➤ Contraintes liées à l'usage du Bioéthanol dans les moteurs à allumage par compression : L'éthanol présente l'inconvénient d'attaquer certains matériaux ce qui induit des contraintes dans l'adaptation des réservoirs et des circuits d'alimentation des moteurs. (voir tableau suivant : vulnérabilité des matériaux).

Table 9 : vulnérabilité des matériaux à l'éthanol.

ATTAQUE DES MATERIAUX	
Vulnérables	Compatibles
Alliage zinc et magnésium. Carburateur Laiton Alliage plomb étain Revêtement réservoirs	Autres métaux ou alliages
Polyuréthane, PVC, polyamides polyméthacrylates, caoutchouc nitrile caoutchoucs acryliques	Polyéthylène Silicones Polyacétals Téflon Polyesters

La table 9 résume les contraintes d'utilisation des Biodiesels en fonction de leur taux de mélange dans le gasoil.

Table 10 : avantages et contraintes liées à l'utilisation de Biodiesel dans les moteurs.

AVANTAGES	CONTRAINTES
Mélanges à faible teneur (< 5%)	
Pas de modification des moteurs	Ethanol anhydre ou Tiers solvant et éthanol 95
Réduction de la consommation	Climat froid : tiers solvant nécessaire
Réduction des émissions de polluants	
5 % < teneurs < 70 %	
Fumigation : pas de modification des moteurs Ethanol 95 utilisable	Carburateur supplémentaire
Ethanol 95 utilisable	Double injection : modification du moteur
	Vulnérabilité des matériaux à vérifier (réservoirs, tuyaux, joints,...)
Réduction des émissions de polluants	Augmentation de la consommation en volume

Ethanol 100 %	
Ethanol 95 utilisable	Allumage assisté : modification des moteurs
Additif pro-cétane : pas de modifications des moteurs Ethanol 95 utilisable	Emploi d'un additif
	Vulnérabilité des matériaux à vérifier (réservoirs, tuyaux, joints,...)
Réduction des émissions de polluants	Augmentation de la consommation en volume

➤ Résultats :

La table 10 indique les résultats obtenus sur des bus urbains selon un cycle de roulage normalisé (cycle AQA ADEME). L'éthanol a été utilisé pur et additivé avec un procétane de marque AVOCET. L'impact sur les réductions de polluants et de particules à l'échappement est spectaculaire (moteur sans filtre à particules).

Table 11 : émissions comparées à l'échappement de bus urbains alimentés en gasoil, Biodiesel et éthanol additivé.

	consommation l/100 km	cycles AQA source : UTAC 1991			
		CO g/km	HC g/km	NOx g/km	particules g/km
GASOIL	52.62	5.87	2.15	21.82	1.19
BIODIESEL	58.23	5.26	1.55	20.38	1.13
ETHANOL*	99.70	2.47	0.82	13.18	0.20

**Ethanol 99, additivé procétane Avocet*

VII. 4 Utilisation des mélanges et formulations dans les moteurs à allumage par compression :

Le fonctionnement de ces moteurs est basé sur l'autoallumage du carburant dû à la compression de l'air dans le cylindre. A partir du moment où la combustion est initiée, théoriquement, n'importe quel combustible peut être injecté dans la chambre de combustion et fournir ainsi son énergie. C'est le principe utilisé dans la double injection Gasoil/éthanol vu auparavant.

On peut profiter des caractéristiques d'un produit pour pouvoir utiliser un autre qui seul n'aurait pas fonctionné dans les moteurs à allumage par compression.

Ainsi, les « formulations » peuvent présenter de l'intérêt soit pour « brûler » un sous-produit soit pour augmenter le taux de substitution des gasoils pétroliers.

Par exemple, une formulation « **Gasoil + Biodiesel + Ethanol** » peut s'avérer être un bon carburant ne nécessitant pas de modifications des moteurs. Car l'éthanol ne se mélange pas au gasoil mais en présence d'ester les trois produits sont parfaitement miscibles. Il suffit de trouver les proportions correctes de chacun pour obtenir un carburant Diesel de qualité intéressante.

Dans le cas « Gasoil + Ester d'huile végétale + Ethanol », les proportions respectives sont : 40 + 40 + 20.

Table 12 : avantages et contraintes liées à l'utilisation de formulations de carburants dans les moteurs.

AVANTAGES	CONTRAINTES
FORMULATIONS	
Pas de modification des moteurs	Mélanges pouvant être instable dans le temps
Substitution importante de gazole	
Réduction des émissions de polluants	

VII. 5 Utilisation du Biométhane dans les moteurs à allumage par compression :

Les gaz issus de la fermentation sont composés en moyenne de 65 % de méthane, 34 % de CO₂ et de 1 % d'autres gaz dont le sulfure d'hydrogène et le diazote. Il est préférable de le purifier afin d'enlever le CO₂, l'eau, le soufre et les composés organo-halogénés qu'il contient.

- Le biométhane une fois épuré doit contenir au minimum 96% de méthane pour être **comprimé** (à 200 bars) afin de servir comme carburant, exactement comme le GNV : gaz naturel pour véhicule.
- Il peut être aussi utilisé en **dual-fuel**, c'est-à-dire mélangé à l'air qui arrive dans la chambre de combustion du moteur diesel. L'énergie apportée par le biométhane sera donc autant d'énergie en moins à apporter par le gasoil. Du point de vu niveau énergétique, 1 m³ de gaz purifié équivaut à 1 litre de gasoil. Avec un réservoir de 400 litres de biométhane à 200 bars, un véhicule possède un équivalent de 80 litres de gasoil. Le mode dual-fuel permet une substitution de 40 à 50 % de sa consommation de gasoil.

➤ Aptitude du Biométhane à la combustion :

Le contenu calorifique du mélange Air/biométhane (à 70% vol.), est de 81 % de celui du mélange air/gasoil.

Table 13 : caractéristiques du gasoil et du Biométhane.

	Gasoil	Biométhane
Masse volumique (kg/m ³) 20°C	836	0.66
Pouvoir Calorifique Inférieur (kJ/kg)	43800	23200 kJ/m ³ *
Pouvoir comburivore (g air/g carburant)	14.84	6.1 m ³ air/m ³ gaz
Contenu calorifique du litre de mélange air/carburant (J)	3800	3100
Indice de Cétane	50	-

Viscosité cin. à 20°C	6	-
-----------------------	---	---

* biogaz à 70% de CH₄



Figure 15 : tracteur Steyr CVT 6195, équipe pour fonctionner avec du Biométhane.

VII. 6 Utilisation du gaz de gazogène dans les moteurs à allumage par compression :

La technique du gazogène est basé sur la combustion incomplète d'un combustible solide carbonifère généralement du bois, du charbon de bois ou du coke causé par un faible apport en oxygène. Sous l'action de la chaleur des gaz sont générés comme l'oxyde de carbone (CO), l'hydrogène (H₂) et le méthane (CH₄).

➤ Aptitude du gaz de gazogène à la combustion :

La composition du gaz de gazogène est variable selon le combustible utilisé et la qualité de combustion. Cependant on arrive toujours à une composition voisine de celle-ci : 20-30 % de CO ; 10-20 % de H₂ ; 2-5 % de CH₄ ; 45-60 % de N₂ ; 5-15 % de CO₂ et 6-8 % d'H₂O.

Le gaz produit par un gazogène est dit « pauvre » car son pouvoir calorifique est faible mais la quantité d'air nécessaire à sa combustion l'est aussi. Le contenu énergétique du mélange combustible gaz pauvre/air introduit dans le moteur est supérieur à ce que l'on pourrait imaginer : 2,5 MJ/m³ contre 3,1 MJ/m³ avec du biométhane (à 70% vol.) (soit 0,69 kWh/m³ contre 0,86 kWh/m³).

Le gaz produit peut s'utiliser en mode **dual-fuel** dans un moteur à allumage par compression.

➤ Contraintes liées à l'usage du Bioéthanol dans les moteurs à allumage par compression :

Pour alimenter un moteur à combustion interne le gaz doit être soigneusement refroidi et épuré. Il faut spécialement filtrer les cendres et les résidus imbrûlés (goudrons et acides) menaçant la mécanique du moteur. Après épuration, le gaz est mélangé avec l'air qui est introduit dans l'admission. En pratique, on obtient des taux de substitutions du gasoil avoisinant les 65 % mais il est possible d'arriver à des taux proche des 80 % voire 90 % avec des adaptations très bien réalisées.

Compte tenu des pouvoirs calorifiques des combustibles utilisés il faudra environ 2,9 kg de bois ou 1,5 kg de charbon pour obtenir l'équivalent énergétique d'un litre de gasoil.

Table 14 : caractéristiques du gasoil et du gaz de gazogène.

	Gasoil	Gazogène*
Masse volumique (kg/m³) 20°C	836	1.027
Pouvoir Calorifique Inférieur (kJ/kg)	43800	5200 kJ/Nm ³
Pouvoir comburivore (g air/g carburant)	14.84	1.15 m ³ air/m ³ gaz
Contenu calorifique du litre de mélange air/carburant (J)	3800	2500
Indice de Cétane	50	-
Viscosité cin. à 20°C	6	-

* gazéification de bois, à l'air.

VIII. CONCLUSIONS

Les moteurs à allumage par compression présentent des traits caractéristiques qu'il est nécessaire de prendre en compte car la combustion qui s'y produit influence l'architecture et les moyens d'introduction du carburant. Le délai d'inflammation et la qualité de la combustion sont étroitement liés aux caractéristiques physico-chimiques du biocarburant que l'on souhaite utilisé. Il existe plusieurs moyens de réduire le délai d'inflammation, la qualité de la combustion qui suivra dépendra de la nature du biocarburant, des conditions thermiques de la chambre de combustion et du mode d'injection, ou d'introduction, du carburant.

Les biocarburants actuels et en mesure d'être utilisés dans les moteurs à allumage par compression montrent de bons résultats comparés au fonctionnement au gasoil. Les Huiles Végétales Pures, les Biodiesels, l'éthanol additivé sont de bons produits de substitution dans ces moteurs ayant subi pas ou peu de modifications. Les mélanges de différents carburants fossiles et biocarburants, les « formulations » sont des solutions intéressantes précisément quand on ne peut, ou ne veut pas modifier les moteurs Diesel, on peut remplacer jusqu'à 60 % du gasoil en conservant les mêmes performances globales.

Les usages de gaz tels le biométhane (essentiellement du CH₄) ou le gaz de gazogène (CO et H₂), sont à considérer avec intérêt en mode dual-fuel, car ils procurent de très bons résultats.

REFERENCES :

- R. Brun, 1973. Primauté de la combustion sur la technologie des moteurs à piston. Cours CESIA, 96 p.
- J.B. Heywood, Internal Combustion engine fundamentals. Hill Book Co, ed. McGraw. 1988, New York.
- Sovanna, P., Chap. III Particularité du moteur diesel, in Moteurs Thermiques, ITC/GIM, Editor. 18/10/2004. p. 6
- IFPEN, 2012. Les carburants alternatifs pour les transports - Les travaux de recherche d'IFP Energies nouvelles.
- S. S. Sidibé, J. Blin, G. Vaitilingom, Y. Azoumah, 2010. Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines. State of the art: literature review.. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 2748–2759.
- G. Vaitilingom, A. Liennard, 1997. Various vegetable oils as fuel for Diesel engines and burners: Jatropha curcas particularities. Biofuels and industrial products from J. curcas. Ed. Technische Universitat Graz, Austria. 1997. p 98-109.
- G. Vaitilingom, 2006. Utilisations énergétiques de l'huile de coton. Cahiers de l'Agriculture, vol. 15 n°1, janvier-février 2006, p. 144-149.
- T. Daho, G. Vaitilingom, et al., 2012. Model for predicting evaporation characteristics of vegetable oils droplets based on their fatty acid composition. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012, 55 (11-12), 2864–2871
- P. Satgé de Caro, Z. Mouloungui, G. Vaitilingom, J. Ch. Berge, 2001. Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for a use in diesel engines. In FUEL 80 (2001) 565-.574.