

Huile végétale – le carburant renouvelable pour un marché de niche

Jusqu'à présent, le marché des carburants alternatifs à base d'huile végétale a été dominé par la production et la commercialisation de l'ester méthylique de colza EMC – appelé biodiesel dans la pratique. Parallèlement, au cours des années passées, des raisons écologiques et agro-économiques ont fait que l'intérêt s'est petit à petit porté sur la possibilité d'employer également de l'huile végétale à l'état naturel – dit diesel naturel – dans l'agriculture et la sylviculture.

Bien que les deux carburants alternatifs soient à base d'huile de colza, qui domine le marché en Europe, il faut clairement les distinguer:

- Après trans-estérification, le biodiesel (ester méthylique de colza) est suffisamment «dilué» pour être utilisé dans un moteur diesel non modifié.
- L'emploi d'huile végétale non modifiée (diesel naturel) nécessite une adaptation unique de la conduite de carburant, donc l'ajout d'éléments supplémentaires. Les principaux composants du moteur restent cependant en état original. (Contrairement à ce qui se pratique dans le système Mahler, par exemple, où le déplacement de la chambre de combustion nécessite la construction d'une nouvelle tête de cylindre).

En quoi l'huile végétale se distingue-t-elle de l'huile diesel?

Les huiles végétales sont des triglycérides, soit des composés constitués de glycérine (alcool trivalent) et de trois acides gras liés. La glycérine est responsable de la viscosité. A 40 °C, l'huile végétale est presque dix fois plus épaisse que l'huile diesel.

Les carburants diesel, tout comme le kérosène et le mazout léger, sont des distillats moyens, avec un grand nombre d'hydrocarbures dans un domaine d'ébullition allant de 180 à 360 °C. Le raffinage élimine les constituants de calamine. Ces derniers restent dans le résidu de la distillation atmosphérique, le mazout dit lourd. Par rapport à sa composition et à sa qualité, l'huile diesel est donc un carburant très homogène et soumis à des normes strictes.

La composition élémentaire de l'huile de colza la plus répandue est de 77% de masse volumique de carbone, 10% de masse volumique d'hydrogène et environ 12,5% de masse volumique d'oxygène, ce dernier étant important pour la combustion.

Les huiles végétales naturelles ne subissent pas de processus de distillation. Elles contiennent donc toutes les fractions qui se désagrègent dans la chambre de combustion du moteur et qui peuvent laisser des dépôts de calamine.

L'huile de colza se caractérise en outre par sa mauvaise aptitude à l'auto-inflammation et son point de combustion élevé. Et même si ces deux propriétés constituent des avantages importants lors du transport et du stockage, elles représentent un handicap au niveau de la combustion. Par contre, la teneur négligeable en soufre est un atout.

Quelles en sont les conséquences?

Deux problèmes principaux font donc obstacle à une utilisation généralisée des huiles végétales naturelles dans un moteur diesel moderne à injection directe:

- La viscosité élevée, thermosensible, due à la glycérine. Elle rend difficile la circulation ainsi que le filtrage du carburant et surtout la nébulisation très fine lors de l'injection.
- La forte teneur en fractions, qui tendent à former des dépôts de calamine lors de la combustion. Ce sont elles qui sont à l'origine du redouté calaminage des soupapes, gicleurs, fonds de piston et gorges de segment. La teneur en phosphore de l'huile végétale est un facteur important du risque de calaminage. Il est donc limité à 15 mg/kg dans le standard de qualité (norme de Weihenstephan) élaboré par la Bayerische Landesanstalt für Landtechnik et l'Université technique de Munich.

Trois voies ont été explorées jusqu'à aujourd'hui:

1. Adapter le carburant au moteur

- Trans-estérification: en séparant la glycérine, qui augmente la viscosité, des acides gras et en la remplaçant par du méthanol, un alcool monovalent très liquide, on obtient de l'ester méthylique de colza EMC. Le processus nécessite de l'énergie, de l'hydroxyde de sodium (soude) ou de l'hydroxyde de potassium comme catalyseur, ainsi que du méthanol. Une tonne d'EMC génère environ 110 kg de glycérine polluée par le catalyseur, le méthanol et les résidus d'huile. Le traitement visant à obtenir une qualité industrielle destinée à la vente est rentable pour les grandes installations, tandis que l'élimination peut être problématique pour les plus petites.
- Raffinage: l'huile végétale est raffinée en même temps que l'huile minérale brute pour produire les composés typiques des carburants. En raison de l'additivation et de la stabilité au froid, la part de produits provenant de l'huile de colza dans le carburant diesel commercialisable est de 1,5% en hiver et de 5% en été.

2. Mélanger l'huile végétale aux carburants minéraux

On connaît bien la proposition du Dr H. Jäckle, ex-Empa, et U. Wolfensberger, FAT, soit 50% huile de colza + 50% pétrole aviation Jet A-1 + 0,1% DK plus, ainsi que les formules en provenance d'Allemagne, à savoir Tessel I avec 80% huile de colza + 14% essence de référence +

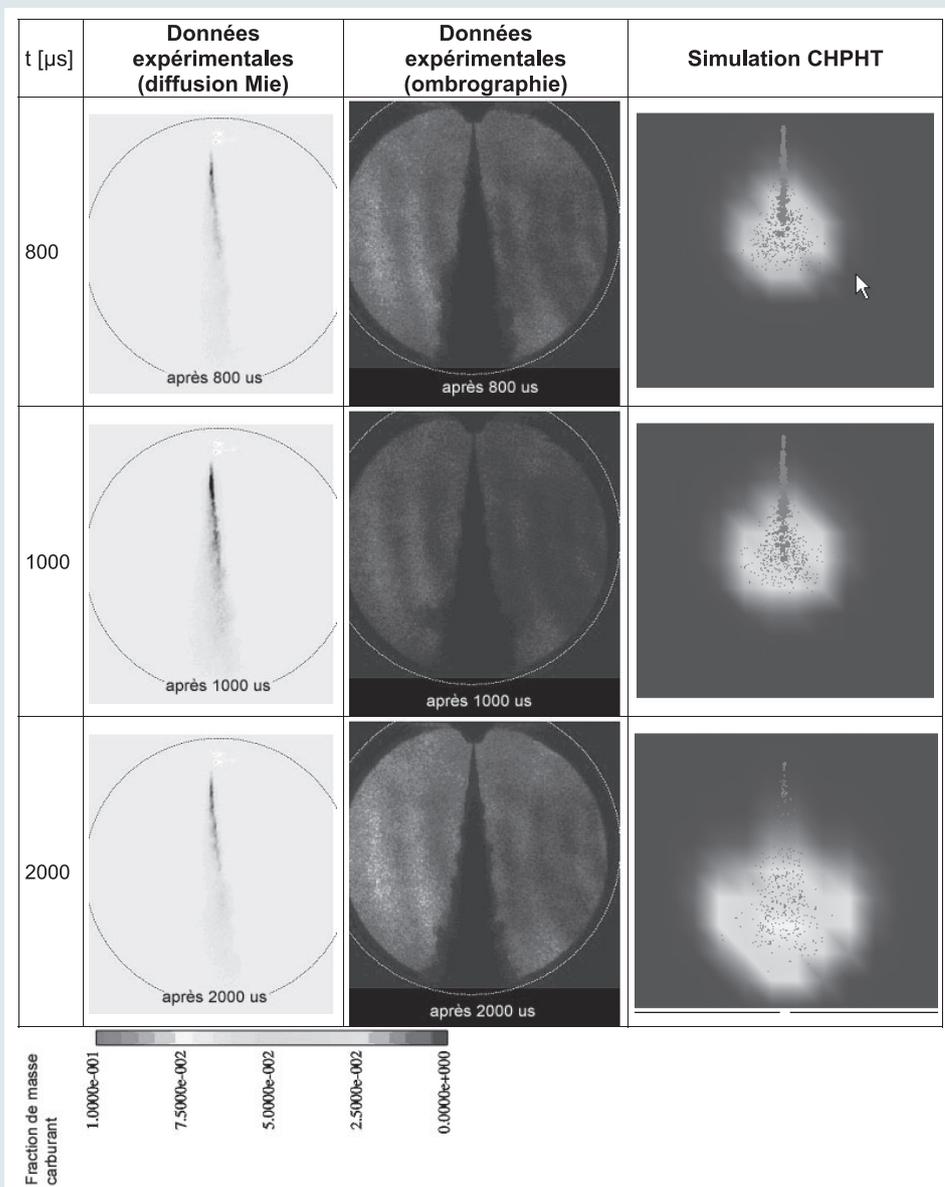


Figure 2: Evaporation de l'huile végétale injectée, saisie par optique laser et calculée par simulation (tiers de droite), après 800 à 2000 μs. (Cellule haute pression et haute température CHPHT, 150 μm gicleur, pression d'injection 1000 bar). La taille des gouttelettes va en diminuant depuis le jet vers l'extérieur
 Source: Yuri Wright, LVV EPF Zurich

6% alcool C_3H_8O ou $C_6H_{14}O$ et Tessel II avec 60% huile de colza + 35% EMC + 5% alcool $C_8H_{18}O$.

chaleur, d'un chauffage de filtre ou alors d'un chauffage des injecteurs (le moteur original n'est pas modifié).

3. Adapter le moteur aux carburants alternatifs

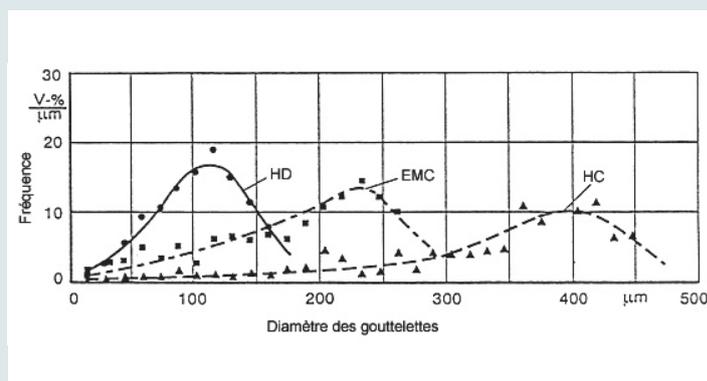
- Système à double réservoir de carburant: l'huile végétale n'est utilisée qu'après une phase d'échauffement au diesel. On utilise des huiles végétales fraîches ou traitées dans des réservoirs de carburant chauffés par l'eau de refroidissement du moteur. Biodrive SA, Lenzbourg, est le producteur leader en Suisse en matière de traitement et de transformation des moteurs dans le secteur des huiles végétales recyclées. L'entreprise adapte avant tout des camions.
- Système à un réservoir de carburant, selon la proposition de Willi Mahler, Obfelden, avec déplacement de la chambre de combustion du piston dans la tête de cylindre (nécessite une nouvelle fabrication des deux pièces).
- Système à un réservoir de carburant avec calibrage de la viscosité de l'huile végétale épaisse par réchauffement de la conduite de carburant située entre le réservoir et l'injection, au moyen d'un échangeur de

Pourquoi misons-nous sur l'huile végétale non modifiée et sur le système à un réservoir?

Dans la Haute école suisse d'agronomie de Zollikofen, nous avons opté pour les huiles végétales naturelles et le système à un réservoir pour les raisons suivantes:

- Avec env. 34,5 MJ/l, les huiles végétales offrent une densité énergétique similaire

Figure 1: Distribution de la taille des gouttelettes pour les carburants huile diesel (HD), ester méthylique de colza (EMC) et huile de colza (HC), à température égale pour tous les carburants et à une pression d'injection de 250 bar
 Source: Prof. H. Tschöke et al, Université Otto-von-Guericke, Magdebourg



à celle de l'huile diesel et ses quelque 35,7 MJ/l et un bon facteur de récolte de l'ordre de 3. Par ailleurs, leur production locale avec pression à froid et filtrage est simple.

- Ne présentant aucun danger durant les transports ou le stockage, ni risque de contamination de l'eau, elles réduisent en plus les émissions de CO₂ et constituent une alternative renouvelable à l'huile diesel.
- La pression exercée sur les prix dans le domaine agroalimentaire suite à la libéralisation du marché agricole génère de la part de l'agriculture indépendantisée un intérêt croissant pour les produits de niche, comme l'huile végétale, dans l'attente d'une stabilisation des valeurs se fondant sur l'augmentation des prix applicables à l'énergie équivalente.
- L'adaptation périphérique avec préchauffage du carburant, sans modification thermodynamique du moteur original, s'est imposée. En ce qui concerne le calaminage, cette solution est bien maîtrisée avec de l'huile fraîche dans un réservoir unique. Côté échappement, il reste cependant encore des progrès à faire.

Dans ce contexte, il n'est aucunement question de créer une concurrence entre les huiles végétales techniques et les huiles alimentaires. Le modèle de production de carburant renouvelable sur des surfaces cultivables écologiques et en jachère, permettant de réduire les émissions de CO₂, s'est développé avec succès en Europe. La domination du colza est diversement appréciée. Pour autant que les graines oléagineuses éprouvées, tant appréciées par l'agriculteur européen, suivent la bonne rotation des cultures, la critique se relativise et doit s'orienter sur les alternatives existantes en matière d'engrais et de protection phytosanitaire (insecticides, fongicides).

Car en fin de compte, nous travaillons à des solutions techniques qui sont également importantes pour les pays en développement et les nouveaux pays industrialisés. Cela ne vaut pas uniquement pour les véhicules, mais en particulier également pour les machines stationnaires de production d'énergie mécanique et électrique. Des huiles végétales n'interférant pas avec les besoins alimentaires existent ou sont cultivables partout dans le monde. Citons par exem-

ple la noix de pourghère au Sahel ou encore les énormes réserves de babaçu au Brésil, couvrant des superficies égales à plusieurs fois celle de la Suisse.

Que signifie l'adaptation du moteur?

La principale mesure d'adaptation périphérique du moteur concerne le réchauffement de l'huile végétale et la conception de la conduite de carburant pour une viscosité plus épaisse.

Le système complet de carburation et d'injection des moteurs diesel actuels repose sur une huile diesel strictement normée. En raison des propriétés physiques différentes, les conditions d'injection pour les huiles végétales ne sont plus adaptées de manière optimale à la géométrie de la chambre de combustion, initialement prévue pour le carburant diesel. La plus grande viscosité des huiles végétales à froid modifie notamment la quantité et la pression d'injection, augmentant fortement la charge mécanique de la pompe à injection. Le problème principal est dans ce cas une pénétration indésirable et profonde du jet de carburant dans la chambre de combustion durant la phase de départ à froid et d'échauffement du moteur, car le nombre de gouttelettes est insuffisant et leur diamètre trop élevé à ce moment-là. L'idéal serait une combustion saisissant le carburant en plein vol, empêchant ainsi tout dépôt sur les parois.

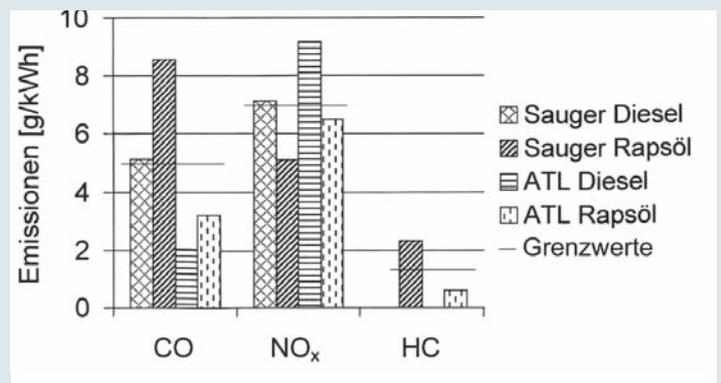
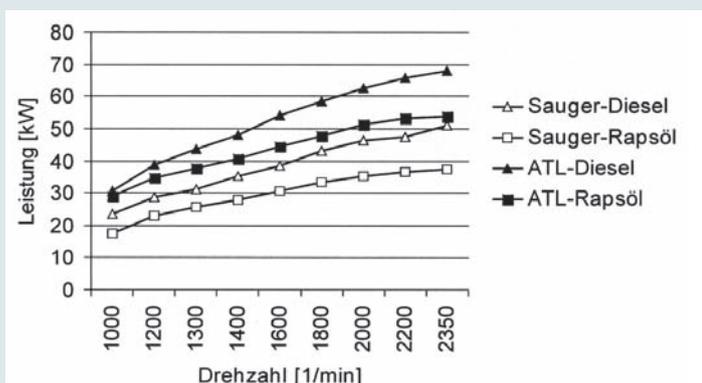
La figure 1 montre la formation très irrégulière des gouttelettes pour les trois carburants huile diesel, EMC et huile de colza, à température identique, dans un système d'injection non modifié.

La conséquence de la dissolution trop lente du jet de carburant est un dépôt indésirable sur les parois. Le pionnier en matière d'huiles végétales, Ludwig Elsbett, nous livre les principes de base de leur combustion:

- Tenir le carburant injecté soigneusement à distance de toute paroi ou autre surface.
- Maintenir la relative étanchéité à la chaleur de la chambre de combustion.

Ce n'est pas par hasard que l'huile végétale était la plupart du temps bien tolérée par les moteurs à injection indirecte. Les chambres de combustion des pistons en aluminium des injecteurs directs actuels n'atteignent plus les températures élevées régulières comme le faisaient

Figure 3: Résultats des mesures de puissance et d'émission de gaz d'échappement effectuées sur un moteur 4 cylindres Same 1000.4 A(T) adapté au fonctionnement à l'huile végétale. La perte de puissance d'environ 20% lorsque l'huile de colza est utilisée comme carburant ne s'explique que partiellement par son pouvoir calorifique moindre. D'autres causes sont, par exemple, la baisse de la quantité d'injection dans les plages de régime supérieures afin de ne pas dépasser le degré de noircissement 3. Les valeurs d'émission des gaz d'échappement mettent en évidence la nécessité d'un turbocompresseur, au moyen duquel les valeurs limites actuelles peuvent être respectées sans problème lors du fonctionnement à l'huile de colza. Source: Les deux graphiques ont été établis par Ueli Wolfensberger, Station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles (agroscope FAT Tänikon).



les chambres de précombustion dans les têtes en fonte. L'huile végétale déposée sur les parois risque donc de ne pas s'évaporer et brûler entièrement, ce qui augmente d'une part les émissions de suie quand le moteur est froid et qui crée d'autre part des dépôts sur les orifices des gicleurs (formation de trompettes), avec perturbation croissante de l'injection, suivie d'une obstruction des gorges des segments de pistons (les spécialistes parlent alors de «cokéfaction», car l'épais résidu noirâtre résultant des dispositifs de combustion non conformes à l'huile végétale se différencie très nettement de l'encrassement plutôt sec observé lors de problèmes avec le fonctionnement à l'huile diesel). Dans le pire des cas, cela mène à l'immobilisation des segments et à l'arrêt du moteur. Un autre principe paraît donc d'autant plus logique: plus les unités de cylindres sont grandes, plus elles conviennent pour les huiles végétales.

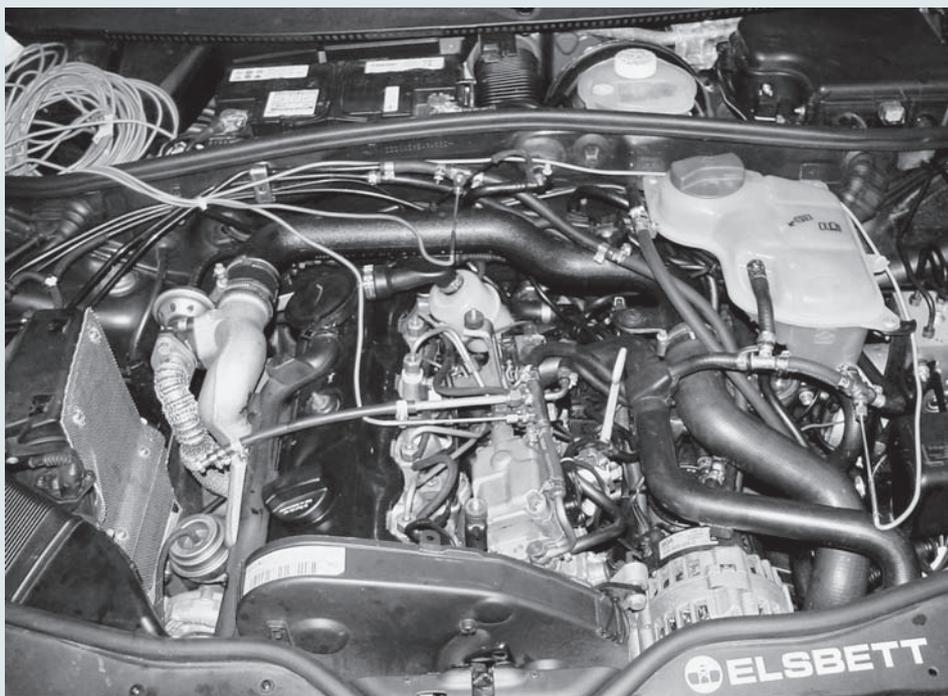
Les prises de vue au laser de la figure 2 montrent clairement la laborieuse nébulisation en fines gouttelettes du jet de carburant à froid, ainsi que sa profonde pénétration dans la chambre de combustion.

Par ailleurs, un fort dépôt sur les parois avec l'huile végétale encore froide peut également produire un enrichissement progressif de l'huile moteur. Bien des dégâts aux moteurs ont déjà été provoqués par la polymérisation de l'huile moteur suite à des transformations inadéquates.

La transformation du moteur – si elle doit aussi être réussie au niveau des émissions – est une entreprise exigeante et n'a rien à voir avec du bricolage. Une transformation sérieuse coûte vite plus de 1000 francs, rien qu'au niveau du matériel. Il est en général admis que les ateliers spécialisés maîtrisent bien les problèmes de calaminage pour les systèmes à un réservoir, mais que des recherches sont encore nécessaires en ce qui concerne les émetteurs de NO_x et la masse de particules. Au vu de la demande trop réduite, l'industrie des moteurs et des véhicules laisse le développement de l'aptitude des moteurs aux huiles végétales entièrement aux mains des ateliers spécialisés. Dans le secteur des CETE (centrales à énergie totale équipée) par contre, des projets communs prometteurs, avec soutien de tiers, sont en préparation.

Quelles expériences ont déjà été faites?

Dans la proposition de Willi Mahler, le précurseur suisse des moteurs à huile végétale, la chambre de combustion se situe, en tant qu'exclusivité mondiale, dans la tête du cylindre, sous la soupape d'admission reculée. L'injection directe est tangentielle, avec deux gicleurs opposés, décalés l'un par rapport à l'autre. En cas de besoin, on encastre de même façon deux bougies de réchauffage pour aider au démarrage. Un réchauffement du carburant avec l'eau de refroidissement du moteur n'est plus nécessaire. Les arguments principaux de l'inventeur sont la plus grande étanchéité à la chaleur des chambres de combustion situées dans la culas-



se en fonte, un meilleur degré de remplissage, des pistons plus courts, plus légers et plus avantageux, avec des fonds plats et un moteur à hauteur réduite. Le procédé suppose la fabrication de nouvelles têtes de cylindre et de nouveaux pistons. Suite à la mise en pratique réussie durant plusieurs années, le procédé de Mahler a été développé de 1999 à 2001 dans le cadre d'un projet scientifique collectif réunissant Same Deutz-Fahr Schweiz AG, Schwarzenbach, l'Institut Paul Scherrer PSI, Villigen, la Haute école spécialisée d'Argovie, la Station fédérale de recherches, Tänikon, et la Haute école suisse d'agronomie, Zollikofen. L'objectif principal fut le fonctionnement irréprochable avec de l'huile végétale, en respectant les futures normes d'émission de gaz d'échappement de la directive 2000/25/CE – étape 2, avec 5,0 g/kWh pour le CO; 7,0 g/kWh pour les NO_x ; 1,3 g/kWh pour les HC et 0,4 g/kWh pour la masse de particules.

Le non-dépassement de la valeur 3 du degré de noircissement Bosch à la puissance nominale a toujours été un critère pour l'adaptation de la quantité d'injection.

Le projet a été massivement soutenu par l'Office fédéral de l'énergie, dont le soutien non bureaucratique et objectif constitue de manière générale une grande source de motivation également pour le secteur de recherche en matière d'huiles végétales.

Les émissions de gaz d'échappement et les performances d'un «moteur de Mahler» moderne sont représentées dans la figure 3.

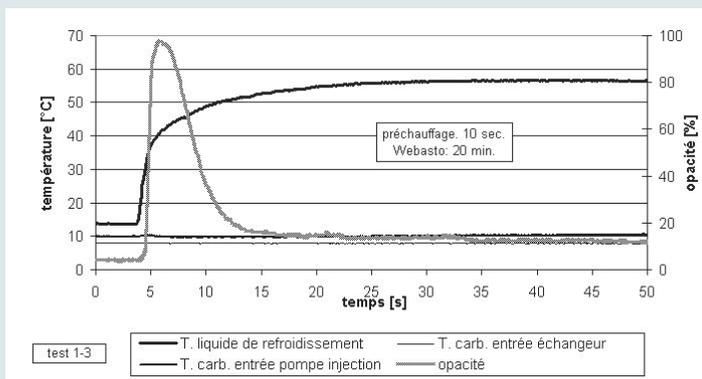
Un fonctionnement impeccable à l'huile végétale et de bonnes valeurs des gaz d'échappement, bien qu'accompagnés de considérables pertes de puissance, illustrent l'énorme travail préparatoire fourni par Willi Mahler, qui a réussi à mettre au point un procédé prêt à l'emploi. Une solution intéressante pour l'utilisation de

Figure 4: Mesures de température et de pression de l'alimentation en carburant transformée et du fluide frigorigène de la Passat TDI de l'auteur. Les mesures sont à la base de l'interprétation de l'opacité des gaz d'échappement et des NO_x . Source: Travail de semestre de David Brun et Emmanuel Schwab, Organe d'expertise des émissions de gaz d'échappement à Nidau, Ecole d'Ingénieurs de Bienne



**Martin Meyer, Prof. für Landtechnik,
Haute école suisse d'agronomie,
3052 Zollikofen**

Figure 5: Graphique de principe des problèmes d'émission lors du fonctionnement à l'huile végétale. Le démarrage à froid génère un pic d'émissions et charge les mesures de façon à ce que les valeurs limites peuvent déjà être dépassées malgré la normalisation qui a lieu avec le moteur chaud, comme le montre ici l'exemple de l'opacité des gaz d'échappement. L'influence de la température du moteur et du système de refroidissement est très nette après 20 minutes de chauffage additionnel Webasto. 15 secondes à peine après le démarrage, le pic d'opacité de départ a disparu, bien que le réchauffement de l'huile végétale n'a lieu de manière continue, que l'eau de refroidissement ainsi que le carburant ne commencent à circuler et que l'opacité ne descende au niveau le plus optimal possible pour une telle transformation que lorsque le moteur est chaud et que la température du carburant avoisine les 70 °C.



l'huile végétale pour les moteurs de tracteurs, mais qui subit actuellement une forte pression par les avancées rapides de la technique d'injection diesel.

Sur le plan européen, l'Allemagne est le pays le plus actif en matière de technologie des huiles végétales et reçoit une aide massive de la part du Bund et des Länder. L'ancienne Bayerische Landesanstalt für Landtechnik de l'Université technique de Munich a commencé très tôt avec la mise en place d'un système de contrôle de la qualité de l'huile de colza. Aujourd'hui, aucun fournisseur d'huile végétale technique ne peut passer outre le standard de qualité Weihenstephan pour l'huile de colza utilisée comme carburant et des travaux sont en cours pour faire de cette norme «RK» (Rapsöl als Kraftstoff) une norme DIN.

Afin de soutenir l'introduction de l'huile de colza comme carburant dans l'agriculture et la sylviculture, le Ministère allemand de la Protection des Consommateurs, de l'Alimentation et de l'Agriculture (BMVEL) finance le programme dit «des 100 tracteurs». Dans le cadre de ce projet, le plus vaste de ce genre au monde, on met à l'épreuve, depuis avril 2001 et sur une période d'au moins 3 ans, l'emploi dans la pratique, la résistance à long terme et l'impact sur l'environnement des moteurs à huile de colza. Au total, le projet compte 110 tracteurs de 9 marques différentes. 89 machines sont de la classe de puissance de 70 à 120 kW. 88 tracteurs proviennent des deux ateliers de transformation les plus connus, spécialisés dans les systèmes à un réservoir à huiles fraîches naturelles, à savoir les Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie, VWP, Allersberg et Siegfried Hausmann, Wülfershausen. L'entreprise allemande leader sur le plan des techniques des huiles végétales, la Elsbett Technologie GmbH de Thalmässing, ne participe pas au programme des 100 tracteurs.

L'université de Rostock, mandatée pour le suivi scientifique du projet, a constaté durant la troisième année des essais un net recul des perturbations de fonctionnement dues à l'utilisation d'huile de colza. La plupart du temps, il est possible d'atteindre des performances comparables au fonctionnement diesel, mais de notables perfectionnements sont encore nécessaires du côté des émissions. Malgré une évolution clairement positive, Rostock estime que

le moment n'est pas encore venu pour une large introduction sur le marché.

Depuis le 2 octobre 2001, les systèmes de transformation de VWP et Elsbett subissent des essais contrôlés, étalés dans le temps, sur une Passat TDI 06/2000 chez M. Meyer, HESA (Haute école suisse d'agronomie). Le véhicule de référence évoqué, équipé de ses deux transformations, a mis en évidence une utilisation exempte de calaminage de l'huile de colza non modifiée après quasi 50 000 kilomètres. Cette Passat, représentant le stade le plus moderne des procédés allemands, ainsi que tous les autres TDI des deux ateliers spécialisés, testés officiellement en Suisse, ont cependant dépassé les valeurs limites de la masse de particules et surtout des NO_x. Il est tout à fait compréhensible que les ateliers spécialisés, en tant que PME, sont relativement limités au niveau du développement, car les installations et les moyens que nécessitent ces tests onéreux leur font défaut.

Dans ce cadre, il semble indispensable de tenir compte également des expériences faites en Suisse et de contribuer, par clarifications concrètes et successives, au développement d'une transformation fiable et conforme aux normes d'émission des gaz d'échappement. Le plus important, c'est de déterminer les conséquences spécifiques aux huiles végétales sur les réglages des moteurs et des systèmes d'injection, en vue d'atteindre le meilleur compromis possible entre puissance, durée de vie du moteur et émissions. Ces clarifications ne sont réalisables qu'à travers une large alliance au niveau de la recherche – avec les spécialistes correspondants. Les mesures des émissions font notamment partie des contrôles les plus onéreux. Toute forme de soutien et de collaboration est vitale dans ce domaine et nous avons en cela la chance de pouvoir compter sur l'apport inestimable d'équipes telles que celle de l'École d'ingénieurs de Bienne, à Nidau.

La figure 4 montre le compartiment moteur de la Passat fonctionnant à l'huile végétale lors de mesures de température et de pression de l'alimentation en carburant transformée. Ces mesures ont été réalisées dans le cadre d'un travail de semestre effectué par l'Organe d'expertise des émissions de gaz d'échappement à Nidau, Ecole d'Ingénieurs de Bienne.

La figure 5, de même source, résume sous forme d'un graphique de principe la problématique des émissions. La nébulisation insuffisante après démarrage à froid produit un pic de l'opacité des gaz d'échappement. L'influence de la température du moteur et du système de refroidissement est très nette après 20 minutes de chauffage additionnel Webasto. 15 secondes à peine après le démarrage, le pic d'opacité de départ a disparu, bien que le réchauffement de l'huile végétale ne commence qu'à ce moment à faire son effet et que l'opacité ne descende au niveau le plus optimal possible pour une telle transformation que lorsque le moteur est chaud et que la température du carburant avoisine les 70 °C. (Le réchauffement de l'huile végétale n'a

lieu de manière continue que lorsque le moteur est en marche et que l'eau de refroidissement ainsi que le carburant commencent à circuler. Le chauffage additionnel Webasto fonctionne dans la voiture arrêtée, dont le moteur est éteint.)

Perspectives

- Les avancées de la technique de modification permettent aujourd'hui d'utiliser de l'huile végétale pour les moteurs diesel. Une chance pour l'agriculture, qui pourra ainsi jouer un rôle avant-coureur dans un marché de niche en pleine expansion.
- Une introduction massive sur le marché nécessite encore une approche technique plus poussée des concepts de modification, parallèlement à un meilleur contrôle de qualité au niveau de l'huile végétale utilisée comme carburant et à la recherche sur les effets des parts d'huile végétale dans l'huile moteur.
- A l'époque où l'agriculture employait encore des animaux de trait, environ 10%

des surfaces agraires étaient destinées à leur nourriture. Avec la même surface, on peut aujourd'hui couvrir les besoins en carburant d'une entreprise agricole. Un hectare de colza produit bien 1100 litres d'huile de colza naturelle utilisable comme carburant.

- Le législateur allemand a clarifié les choses en 2003 en libérant jusqu'en décembre 2008 les carburants bio tels que l'huile végétale de la taxe sur les carburants minéraux.

A nous de créer des conditions cadre similaires en Suisse, car cela vaut la peine de continuer à travailler dans ce domaine en alliant ténacité, endurance et intuition scientifique.

MARTIN MEYER
HAUTE ÉCOLE SUISSE D'AGRONOMIE,
3052 ZOLLIKOFEN

Der deutsche Artikel ist im
«Forum» 2/2004 erschienen.