

Synthèse des connaissances publiées depuis octobre 2006 sur les émissions des agrocarburants et conclusions pour les politiques publiques

Période : octobre 2006 à décembre 2009

Vincent NEDELLEC

Vincent Nedellec Conseils – Villennes-sur-Seine

Mots clés : Agrocarburants, Biodiesel, Diesters, Éthanol, Huile alimentaire recyclée, Méthanol, Pollution de l'air, Toxicité éthanol diesel et biodiesel

Depuis 2007, le *Bulletin de veille scientifique* de l'Afsset publie une note d'actualité trimestrielle sur les émissions atmosphériques et les impacts sanitaires des véhicules routiers utilisant des agrocarburants. En dépit d'un nombre important d'articles publiés chaque trimestre et de leur intérêt indéniable, les nouvelles connaissances portent maintenant sur des aspects à faible valeur décisionnelle ajoutée. Les ruptures dans ce domaine interviendront lorsque la prochaine génération de biocarburant entrera en phase de production industrielle. En attendant leur arrivée sur le marché prévue pour 2015, il est apparu intéressant de faire le point sur ce que l'on sait des émissions moteurs fonctionnant avec des agrocarburants (diester⁽¹⁾ ou éthanol) mélangés aux carburants pétroliers en plus ou moins grande proportion. En effet, ces carburants de première génération sont disponibles à la vente. Certes, la qualité de l'air et la santé publique ne sont pas les seuls critères à pouvoir fonder une politique publique concernant les agrocarburants. Le défi énergétique provoqué par le « Peak oil⁽²⁾ » impose la recherche de carburant routier de substitution. Les aspects économiques restent fondamentaux dans nos économies mondialisées. De même, la question du bilan carbone est devenue centrale en raison des perturbations climatiques liées à l'utilisation intense des réserves fossiles du carbone terrestre. Cependant, ces aspects (substitution, efficacité énergétique, climat) sortent du champ défini pour cette note d'actualité scientifique. Cette synthèse concerne donc les impacts sur l'air et sur la santé dus à l'utilisation des agrocarburants routiers.

Les émissions des moteurs diesel

Analyse

Pour les moteurs diesel on utilise des huiles d'origines végétales ou animales. À l'état brut, elles ont pour défaut commun d'être trop visqueuses et peu volatiles. Ces caractéristiques sont responsables d'une mauvaise combustion. La transestérification⁽³⁾ des huiles permet d'obtenir des diesters aux propriétés mécaniques semblables à celles des diesels. De nombreux procédés de transestérification ont été testés (cavitation⁽⁴⁾ à ultrason ou hydrodynamique, irradiation aux micro-ondes, réactions chimiques de surface, réactions chimiques à catalyse hétérogène...). Les huiles candidates à la substitution du diesel proviennent de nombreuses origines végétales et animales : colza, tournesol, maïs, lin, soja, sésame, palme, tabac, coton, caoutchouc, riz, *madhuca*⁽⁵⁾, *pongamia pinnata*⁽⁶⁾, *jojoba*⁽⁷⁾, *Jatropha curcas*⁽⁸⁾, de fritures usagés, du suif⁽⁹⁾ de bœuf et autres déchet gras d'animaux (Basha *et al.*, 2009).

Les diesters purs ou mélangés au diesel réduisent les émissions polluantes des moteurs. Selon une synthèse de l'EPA publiée en 2002, avec des moteurs classiques (sans dépollution des gaz d'échappement ni filtre à particules), les émissions de CO, de particules fines et d'hydrocarbures décroissent de manière

linéaire avec l'augmentation du taux de diester dans le mélange (avec 20 % de diester respectivement : - 10 % ; - 11 % ; - 20 %), pendant que les émissions de NOx augmentent légèrement (+ 2 %). Les taux de décroissance ou d'augmentation sont variables selon l'huile utilisée mais également selon le type de diesel dans le mélange. Parmi les rares « toxiques » mesurés, l'US-EPA notait une décroissance globale d'environ 5 % pour les émissions en acétaldéhyde, acroléine, benzène, 1,3-butadiène, éthylbenzène, formaldéhyde, n-hexane, naphthalène, styrène, toluène, xylène (EPA, 2002).

La capacité des diesters à réduire les émissions de particules et de CO, s'explique par l'absence de composés aromatiques et sulfurés ainsi que par la présence d'oxygène. Toutefois, **Armas *et al.* (2006)** ont montré que les émissions de particules augmentent durant la phase de démarrage à froid avec l'élévation de la proportion de diester dans le mélange. Lorsque le moteur est chaud, c'est l'inverse qui se produit. Ces derniers résultats sont confirmés par les résultats de **Raheman *et al.* (2007)** et de **Banapurmath *et al.* (2008)** indépendamment des d'huiles utilisées pour le diester, qu'elles soient d'origine végétale non comestible (*Madhuca*, *Honge*, *Jatropha*) ou comestible (sésame). Par ailleurs, **Yang *et al.* (2007)** ont mis en évidence une atténuation des effets bénéfiques du diester (mélange à 20 %) sur les émissions de polluants avec l'usure du moteur.

L'addition d'éthanol dans le diesel a également été testée. Comme les diesters, ce mélange fait baisser les émissions de particules, de CO et d'hydrocarbures. **Song et al. (2007)** notent une augmentation du taux de composés organiques dans la phase particulaire des gaz d'échappement moteurs. Au test de Ames, ces particules émises par le mélange éthanol diesel ne sont pas plus mutagènes que celles émises par le diesel pur. Les travaux de **Bünger et al. (2007)** indiquent une forte augmentation de la mutagénicité des gaz et particules d'échappement lors de la combustion d'huile de colza pur et non transestérifiée (10 à 50 fois plus mutagène au test micrososome sur 2 souches de *salmonella typhimurium*). La même huile transestérifiée par voie méthylique donne des résultats de mutagénicité comparables au diesel testé dans l'étude. **Liu et al. (2008)** montrent, avec les tests Microtox^{®(10)} et MTT⁽¹¹⁾, une moindre écotoxicité et une moindre cytotoxicité des particules de combustion des diesters. Selon les travaux de **Lapuerta et al. (2007)**, la présence d'oxygène dans l'éthanol mélangé au diesel améliore la combustion et réduit la formation de suie, donc des émissions particulières en masse tout diminuant le diamètre moyen des particules mesurées en nombre.

Face à la surémission de NOx engendrée par les diesters, diverses solutions ont été proposées. **Hess et al. (2007)** sont ainsi parvenus à réduire le surplus de NOx en améliorant la compressibilité du diester en utilisant un « polyol⁽¹²⁾ » d'huile de soja. Les résultats montrent une surémission de + 6 % de NOx avec un diester « classique », qui chute à + 1,7 % avec le diester amélioré (polyol d'huile de soja). L'optimisation de la combustion du diester par le biais d'injection d'éthanol (duo carburant) présentée par **Lu et al. (2008)** semble également apporter une réduction notable des émissions de NOx dans le cas des gros moteurs diesel. En revanche, les effets de cette solution sur les émissions d'autres polluants (aldéhydes) n'ont pas été étudiés. **Lin et al. (2008)** ont obtenu une réduction plus forte des émissions polluantes d'un moteur diesel lorsqu'il est alimenté avec un carburant paraffiné mélangé avec 20 % d'huile de palme (NOx: - 5 %; particules: - 38 %; CO - 49 %) comparé à celles d'un diesel mélangé avec la même proportion d'huile de palme (NOx: - 1 %; particules: - 13 %; CO: - 8 %). **Kegl (2008)** a montré l'influence du réglage moteur sur les surémissions de NOx en cas d'utilisation de diester. Un moteur diesel 6 cylindres alimenté par un diester de colza émet moins de NOx (- 25 %), de CO (- 25 %), d'hydrocarbures (- 30 %) et de poussières (- 50 %) lorsque le retard à l'injection est calé sur un angle vilebrequin de 19° par rapport au calage classique à 23° sans perte significative de puissance moteur. Ces résultats sont complétés par ceux de **Fang et al. (2008)** indiquant la possibilité de réduire les surémissions de NOx dues au diester en retardant l'injection après le « top dead center⁽¹³⁾ ». Dans leur expérimentation, en fonctionnement stabilisé et à charge moyenne, ce retard a pour effet de diminuer le pic de chaleur et la température moyenne du moteur. Cette baisse des températures contribue à réduire les émissions de NOx « thermiques⁽¹⁴⁾ ». Un biodiesel pur émet alors moins de NOx qu'un diesel conventionnel de type européen à ultra-faible teneur en soufre. Concernant les émissions d'aldéhydes, les résultats récents, **Corrêa et Arbilla (2008)** et **Peng et al. (2007)** sont contradictoires.

Ils ont observé respectivement une augmentation et une diminution des émissions d'aldéhydes lors de la combustion de diester en mélange avec du diesel. Ces contradictions dénotent l'ampleur des incertitudes actuelles. L'étude de **Pang et al. (2008)** donne une quantification détaillée de l'augmentation des émissions d'aldéhydes pour les mélanges éthanol-diesters-diesel: entre + 1 et 22 % selon la vitesse de rotation moteur.

Lapuerta et al. (2008a) ont cherché à déterminer les effets de l'adjonction d'huiles alimentaires usagées (2 types d'huiles testés) sur les émissions particulières d'un moteur diesel (4 cylindres) européen. Pour les 5 modes de fonctionnement du moteur étudiés, représentatifs du cycle de test européen, l'opacité des fumées, les émissions de suie et le nombre de particules émises sont significativement réduites par l'incorporation des biodiesels (jusqu'à 80 % de réduction des émissions de suie). Il n'y a pas de différence d'émission entre les deux types d'huiles testés malgré des usages préalables légèrement différents (stress thermique plus ou moins important) et des différences de composition (notamment sur le taux d'acide myristique, palmitique, oléique et linoléique). L'influence de la voie de transestérification (éthylrique ou méthylique) a été testée par **Lapuerta et al. (2008b)** dans une autre étude. Les différences constatées entre les deux voies de transestérification sont ténues mais significatives. Les émissions gazeuses (NOx et hydrocarbures) semblent légèrement inférieures pour l'éthyl-ester alors que les quantités de suies sont plus faibles dans le cas du méthyl-ester.

D'autre part, **Di et al. (2009)** ont montré que l'augmentation du taux de diesters d'huiles alimentaires recyclées dans le mélange augmente la consommation du moteur (+ 9 % avec le biodiesel pur) ainsi que son efficacité énergétique⁽¹⁵⁾ (+ 37 % avec le biodiesel pur). Cela s'explique par un pouvoir calorifique des diesters inférieur au diesel et par la présence d'oxygène qui améliore la combustion, notamment dans la phase de diffusion.

Les émissions des moteurs essence

Analyse

Pour les moteurs essence, on utilise l'éthanol ou le méthanol⁽¹⁶⁾. À l'heure actuelle 80 % des agrocarburants produits dans le monde sont à base d'éthanol. Entre 2000 et 2007, la production mondiale est passée de 17 milliards à 52 milliards de litres, soit environ 1,5 % des carburants routiers consommés mondialement par an. En 2006, environ 17 pays et 36 états ou provinces ont imposé l'adjonction d'éthanol (généralement 10 à 15 %) dans les essences mises sur le marché. Dans les 10 prochaines années on s'attend à un doublement de l'utilisation des agrocarburants. L'éthanol est produit principalement par fermentation des sucres. Les végétaux utilisés varient d'une région à l'autre: canne à sucre et manioc en Amérique du sud, Asie et Afrique; maïs, blés, betterave sucrière en Amérique du nord et en Europe. Selon l'UNEP, l'éthanol provenant de la canne à sucre recèle le meilleur potentiel de réduction de gaz à effet de serre (UNEP, 2009). En 2007, la France est le 4^e producteur mondial d'éthanol et le 2^e producteur européen, où 70 % de l'éthanol provient de la

betterave et 30 % du blé (soit 3 % de la récolte annuelle de blé) (Institut de l'élevage, 2007).

Selon l'EPA en 2006, les moteurs essence alimentés par un mélange de 85 % d'éthanol et 15 % d'essence (E85) émettent moins d'oxydes d'azote (-30 %), moins de 1,3-butadiène (-10 %), moins de BTEX (-80 %) et pas de poussière. En contrepartie, on assiste à une forte augmentation de l'acétaldéhyde (+2000 %). À partir de ces données, Jacobson (2007) a évalué les conséquences sur la qualité de l'air d'un parc automobile californien fonctionnant entièrement à l'éthanol E85. Les aldéhydes étant précurseurs de l'ozone atmosphérique, leurs plus fortes émissions concourent, avec la réduction des NOx, à l'augmentation des concentrations d'ozone prévues pour 2020 en Californie. Les résultats de l'évaluation des impacts montrent que les gains sanitaires obtenus par la réduction des cancers (diminution du benzène et du 1,3-butadiène) sont inférieurs aux pertes dues à la mortalité attribuable à l'augmentation de l'ozone au mois d'août. Les auteurs concluent que l'E85 ne doit pas être promu pour ses avantages sanitaires. L'ensoleillement joue un rôle important dans la formation d'ozone, de plus les facteurs d'émission utilisés sont anciens et issus de seulement deux études. Ces résultats sont peu reproductibles pour d'autres zones géographiques.

Dans une étude spécifiquement dédiée à la mesure des émissions en aldéhydes, avec un carburant essence mélangé à 10 % d'éthanol (E10), Pang *et al.* (2008) ont obtenu, en sortie de moteur, une diminution significative du formaldéhyde (-5 à -26 %), de l'acroléine (-2 à -22 %), de l'acétone (-10 à -100 %), du butyraldéhyde (-5 à -29 %) et des aldéhydes aromatiques benzaldéhyde et tolualdéhyde (-7 à -11 %) comparés aux émissions avec l'essence pure (E0). Cependant, les émissions d'acétaldéhyde augmentent de 5 à 36 %. Mesurés en sortie de pot d'échappement catalytique trois voies, le formaldéhyde, l'acroléine, l'hexaldéhyde et le diméthylbenzaldéhyde ne sont plus détectables. L'acétaldéhyde et le propionaldéhyde diminuent également mais restent quantifiables (respectivement de -30 à -56 % et -15 à -57 %) pendant que l'acétone augmente d'environ 10 % que ce soit avec l'E10 ou l'E0. La charge du moteur⁽¹⁷⁾ influence directement les émissions d'aldéhydes. Elles sont maximales à faible charge (3 Nm⁽¹⁸⁾) puis décroissent jusqu'à la charge moyenne (130 Nm) pour enfin augmenter légèrement à la charge maximale (161 Nm) quel que soit le carburant (E10 ou E0). La proportion d'air dans le mélange suit une courbe inverse (pauvre en air à faible charge, riche en air à charge moyen puis léger appauvrissement à pleine charge) c'est donc le principal déterminant de la formation d'aldéhydes pendant la combustion. Les travaux de Durbin *et al.* (2006) indiquent une augmentation des émissions d'hydrocarbures et une décroissance du CO avec l'augmentation du taux d'éthanol dans le mélange (taux max. 10 %). Les effets sur les émissions de NOx s'inversent en fonction de la volatilité du mélange. À 10 % d'éthanol la consommation de carburant augmente de 1,4 %. Dans une synthèse publiée en 2007, Agarwal (2007) note une décroissance du CO et des PM dues à la présence de 10 % d'éthanol dans l'essence. Il note également qu'en raison de son fort taux d'octane, l'éthanol permet d'éviter l'usage du benzène ou d'autres additifs dans l'essence. L'éthanol augmente les émissions de NOx mais cette augmentation est

dépendante du taux d'air à l'admission. L'augmentation des émissions d'acétaldéhyde suit une courbe en U selon la charge moteur, elle est maximale à charge moteur nulle et minimale à charge moyenne. Le benzène et le 1,3-butadiène sont fortement diminués avec le carburant E10 pendant que les HAP semblent légèrement augmentés surtout les composés les plus « lourds ». Celik (2008) a testé plusieurs taux de mélange éthanol essence (0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %) pour identifier le meilleur mélange pour les performances moteur (consommation, puissance) et pour les émissions. Le mélange à 50 % d'éthanol serait optimal, avec une augmentation du taux de compression sans cliquetis (de 6/1 à 10/1), une augmentation de 29 % de la puissance moteur et une décroissance de la consommation et des émissions de CO, d'hydrocarbures et de NOx respectivement de 3 %, 53 %, 12 % et 19 %. L'étude de Graham *et al.* (2008) indique que les avantages environnementaux et sanitaires sont plus importants avec l'E85 qu'avec l'E10.

Zhang *et al.* (2007) ont mesuré la mutagénicité et la cytotoxicité des effluents de moteur essence à l'aide des tests de Ames, MTT, micronoyaux, comètes. La combustion d'essence pure génère des effluents beaucoup plus cytotoxiques sur une lignée cellulaire de carcinome pulmonaire humain (A549) que les effluents du méthanol pur. En présence d'une activation métabolique, les effluents d'essence ont provoqué l'augmentation des adduits à l'ADN, des dommages à l'ADN et des réversions TA98. Les effluents moteurs du méthanol n'ont produit aucun de ces effets.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Pour les moteurs et carburants diesel de type européen, il est maintenant bien établi que l'addition de diesters engendre une légère surconsommation (+10 %) en contrepartie d'une baisse des émissions en hydrocarbures, CO, PM, formaldéhyde, 1,3-butadiène. Ces gains pour la qualité de l'air sont pondérés par la surémission d'acétaldéhyde et une légère surémission de NOx. Des solutions pour éviter la surémission de NOx concernent soit la formulation du diester, soit les réglages moteurs soit le post-traitement.

Pour les moteurs et carburants essence, l'éthanol est également avantageux du point de vue de la réduction des émissions de polluant à l'exception de l'acétaldéhyde. Les surémissions de ce toxique probablement cancérigène ne sont pas aussi importantes qu'initialement prévues. Elles seraient largement dépendantes des réglages moteurs (insuffisance d'air) et de la puissance appelée. Par ailleurs, la catalyse trois voies des gaz d'échappement diminue considérablement ces émissions.

Dans l'ensemble, les biocarburants réduisent les principaux polluants de l'air émis par les moteurs routiers (PM, CO, COV). Les NOx et l'acétaldéhyde sont légèrement augmentés mais des solutions existent pour contrôler ces surémissions. Au plan sanitaire, on ne peut

pas encore être certain que le bilan final soit avantageux mais il est peu probablement désavantageux. En effet, actuellement ce sont les particules diesel qui engendreraient le plus d'impacts sanitaires alors qu'elles sont réduites par l'adjonction de diester. Dans le but de réduire les incertitudes au regard du bilan sanitaire, des travaux d'étude et de recherche en France seraient bien venus. Tant les avancées technologiques sur les moteurs et le traitement des gaz d'échappement que les progrès dans la production d'agrocarburants (seconde génération) incitent à considérer la situation de manière dynamique et à ne pas formuler de conclusions définitives concernant l'usage des agrocarburants sur la base des seules connaissances actuelles qui ne caractérisent pas les évolutions prévisibles aujourd'hui.

Lexique

- (1) Diester: le terme diester est employé dans cette note pour désigner les biocarburants destinés au moteur diesel. Le terme diester est une contraction de diesel et ester. Il s'agit ici d'esters méthyliques ou éthyliques d'huiles végétales.
- (2) Pic pétrolier « Peak Oil »: un pic pétrolier désigne le sommet de la courbe qui caractérise la production pétrolière d'un puits ou d'un champ pétrolier; par extension le « pic pétrolier mondial » (abrégé en « Peak Oil » en anglais) désigne le moment où la production mondiale de pétrole plafonnera puis commencera à décliner du fait de l'épuisement des réserves de pétrole exploitables.
- (3) Esterification: l'estérification est une réaction chimique permettant de synthétiser un ester. Il s'agit de la condensation d'un alcool sur un acide carboxylique, auquel cas la réaction est réversible (rétro-estérification) et renversable (saponification), mais elle peut s'effectuer à partir d'autres réactifs, en particulier à la place de l'acide carboxylique un de ses dérivés, chlorure d'acyle ou anhydride d'acide, changeant le type de réaction et son rendement. La transestérification transforme un ester et un alcool en un autre ester et un autre alcool. Un acide ou une base est souvent utilisé comme catalyseur. La transestérification est utilisée dans la fabrication du polyester et du biodiesel. C'est aussi le mécanisme qui permet l'épissage des introns lors de la maturation des ARNm.
- (4) Cavitation: la cavitation (lat. *Cavus* qui signifie « trou ») est un phénomène qui décrit la naissance et l'oscillation radiale de bulles de gaz et de vapeur dans un liquide soumis à une dépression. Si cette dépression est suffisamment élevée, la pression peut devenir inférieure à la pression de vapeur saturante et une bulle de vapeur est susceptible de naître. Les origines de la dépression sont de deux sortes: écoulement fluide; onde acoustique entraînant des variations de densité du liquide. La dépression peut avoir deux origines différentes:
 - Elle peut être liée à un écoulement de liquide à forte vitesse, par exemple dans un venturi, ou bien au voisinage d'une pale dans une pompe ou encore sur une hélice de bateau. En effet, une zone de forte vitesse dans un fluide correspond à une faible pression. On parle de cavitation hydrodynamique, découverte en 1917 par Lord Rayleigh. Cela se traduit par exemple par un sillage de bulles, ainsi que par l'apparition d'une couche de vapeur accrochée à une pale.
 - Elle peut être liée aux variations de densité d'un liquide soumis à une onde acoustique, en général des ultrasons de puissance. On parle alors de cavitation acoustique.
- (5) *Madhuca longifolia* L.: *Madhuca longifolia* L. est un arbre à croissance rapide d'environ 20 mètres de haut, à feuilles persistantes ou semi-persistantes, appartenant à la famille des *Sapotaceae*, originaire d'Inde et adapté aux milieux arides. Il est cultivé en climat chaud pour ses graines oléagineuses, ses fleurs et son bois. Rendement: 20 à 200 kg de graines par arbre, en fonction de sa maturité. Cette huile (solide à température ambiante, beurre) est utilisée pour les soins de la peau, pour fabriquer du savon ou des détergents, ou des bougies, ainsi que dans l'alimentation (assaisonnement des mets, ou remplacement des céréales). Elle peut aussi être utilisée en tant qu'huile végétale carburant. Les tourteaux obtenus après extraction de l'huile constituent de très bons fertilisants.
- (6) Hêtre Indien *Pongamia pinnata* (autres noms vernaculaires): Honge Tree, Pongam Tree, Panigrahi est un arbre à feuilles caduques, d'environ 15-25 mètres de haut, appartenant à la famille *Fabaceae*. Il est originaire d'Inde mais est cultivé partout dans le sud-est Asiatique. Néanmoins, toute la plante est toxique, le jus ainsi que l'huile sont des antiseptiques. L'huile obtenue des graines sert pour les lampes à huile, à la fabrication de savon, comme lubrifiant et dans la production de diesel bio.
- (7) Jojoba: le jojoba (*Simmondsia chinensis*) est une espèce d'arbuste de la famille des Simmondsiacés. Cette plante est originaire d'Arizona et du Mexique où elle est cultivée pour la cire (appelée communément « huile de jojoba ») contenue dans ses graines. On l'appelle encore « Or du désert » ou « Noix de brebis » car elle pousse dans les lieux arides, en plein soleil. Les graines sont de la taille d'une olive et on les récolte à l'automne. On en extrait l'huile de jojoba, une sorte de cire liquide comparable au sébum et qui ne rancit pas. Cette huile est utilisée dans l'industrie des cosmétiques pour diluer les huiles essentielles, en remplacement du blanc de baleine.
- (8) *Jatropha curcas*: *Jatropha curcas* est une espèce d'arbuste de la famille des *Euphorbiaceae* originaire du Brésil. En Afrique, il est appelé « pourghère » ou « tabanani » en sénégalais, ou « bagani » (poison) en bambara à cause de sa toxicité, ou « frofro baka » en Godié et « apromprom » en Baoulé, deux ethnies de Côte d'Ivoire. En Haïti, il est appelé « Gwo Medsiyen ». Sa graine, parfois appelée « noix des Barbade » (Barbados nut en anglais), contient 27 à 40 % d'une huile appelée « huile de jatropha ». Cette graine était utilisée dans

la médecine traditionnelle, dans l'alimentation du bétail et dans la fabrication du savon de Marseille. Plus récemment, son usage pour produire des agrocarburants s'est développé, notamment en Inde, ce qui lui vaut le surnom d'« or vert du désert ». En décembre 2008, un Boeing 747 d'Air New Zealand a effectué avec succès un vol test en utilisant, pour l'un de ses moteurs, l'huile de Jatropha.

- (9) Suif: le suif est un produit résiduel obtenu par la fonte de la graisse de mouton et bœuf. Cette matière première est utilisée en savonnerie. Le suif peut être aussi utilisé pour l'assouplissement et l'imperméabilisation des cuirs. Enfin, source de lipides énergétiques il peut aussi entrer dans la composition d'aliments pour les animaux. Il est, en particulier, utilisé pour remplacer la fraction lipidique dans les laits de substitution pour les veaux d'élevage. Au Moyen-Âge, le suif a été utilisé pour l'éclairage, il remplaçait la bougie qui était trop chère pour les pauvres. Actuellement, le suif est utilisé dans l'industrie comme lubrifiant (graisse) et bientôt peut-être comme biodiesel. En Angleterre, le suif de bœuf (suet) est utilisé comme matière grasse dans le Christmas pudding. Le suif est également utilisé dans la préparation de nourriture hivernale pour oiseaux ou encore dans les caves à vins pour l'étanchéisation des futs ou pour des jointures diverses. Composition du suif: pour 100 g: 736 kcal, 84,8 g de matière sèche, 5,2 g de protéines brutes, 78,8 g de graisses (calcium 0 g et phosphore 0 g).
- (10) Test Microtox®: Le test Microtox® est basé sur l'inhibition de la luminescence d'une bactérie marine (*vibrio fischeri*). C'est un test d'écotoxicité aiguë principalement utilisé pour suivre la toxicité des effluents de station d'épuration des eaux, des sédiments de rivière, des lixiviats de centre d'enfouissement des déchets etc. Ce test est apprécié pour son utilisation facile et rapide. La luminescence bactérienne est produite au cours d'un enchaînement de processus métaboliques de la glycolyse et de la respiration cellulaire mettant en jeu l'enzyme luciférase et des coenzymes d'oxydoréduction. L'inhibition de ces processus est difficilement interprétable pour la santé humaine. Les résultats indiquent donc seulement une plus ou moins grande toxicité pour l'environnement.
- (11) MTT: test utilisant des cultures cellulaires et un réactif le sel de tétrazolium MTT (bromure de 3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyl tétrazolium). L'anneau de tétrazolium qu'il contient est réduit en formazan par la succinate déshydrogénase mitochondriale des cellules vivantes actives. La couleur du milieu passe alors du jaune au bleu violacé. L'intensité de cette coloration est proportionnelle au nombre de cellules vivantes présentes lors du test mais aussi à leur activité métabolique. Le test MTT indique donc une cytotoxicité à condition que les solutions testées ne modifient pas, par ailleurs, l'activité du métabolisme cellulaire... Indicateur de cytotoxicité, ce test reste d'une interprétation délicate en raison de facteurs de confusion difficilement contrôlables
- (12) Polyol (nom masculin): polyol (nom masculin). Composé chimique possédant plusieurs fonctions alcool.
- (13) Top dead center (TDC): point mort haut.
- (14) Nox thermiques: lors de la combustion d'hydrocarbures dans un moteur il y a plusieurs processus conduisant à la formation des oxydes d'azotes « nox ». L'azote est un élément chimique de la famille des pnictogènes, de symbole N et de numéro atomique 7. Dans le langage courant, l'azote désigne le gaz diatomique diazote N₂, constituant majoritaire de l'atmosphère terrestre, représentant presque les 4/5^e de l'air (78,06 %, en volume). Les nox apparaissent dès l'oxydation de l'hydrocarbure (nox prompt) à travers des mécanismes chimiques complexes. Typiquement 540 espèces interagissant suivant 5 000 réactions élémentaires pour un hydrocarbure comme le n-heptane. Cette production primaire est fortement imbriquée avec la transformation du combustible en vapeur d'eau, monoxyde de carbone et dioxyde de carbone. Ensuite, les nox sont aussi formés à haute température dans les gaz brûlés, par réaction entre l'azote présent dans l'air utilisé comme comburant et l'oxygène (nox thermiques). Les voies chimiques et les temps caractéristiques de ces deux mécanismes sont très différents. La connaissance des deux mécanismes reste encore incertaine et fait l'objet de travaux de recherche notamment financés dans le cadre du Framework Programme 6.
- (15) Efficacité énergétique: L'efficacité énergétique d'un système dépend de sa vocation. Les moteurs ont pour vocation de produire un mouvement (travail). L'énergie du mouvement est exprimée en joules. L'efficacité énergétique du moteur est le rapport entre l'énergie du travail produit et l'énergie contenue dans le carburant utilisée pour le produire (également exprimé en joule). Les lois de thermodynamique interdisent une efficacité de 100 % pour les moteurs. Une partie de l'énergie du carburant est perdue en chaleur sans être récupérée. Cette notion ne doit pas être confondue avec le « rendement » qui est le rapport entre l'efficacité réelle de la machine et l'efficacité théorique maximale qu'on peut attendre d'elle.
- (16) Méthanol: le méthanol, également connu sous le nom d'alcool méthylique, de carbinol, d'alcool de bois, de naphte de bois ou d'esprit-de-bois est un composé chimique de formule: CH₃OH (souvent abrégé en meoh). C'est le plus simple des alcools, et il se présente sous la forme d'un liquide léger, volatil, incolore, inflammable, toxique avec une odeur caractéristique un peu écœurante, plus douce et sucrée que celle de l'éthanol (alcool éthylique). À température ambiante, c'est un liquide polaire utilisé comme antigel pour liquide de refroidissement, comme solvant, comme carburant en aéromodélisme et comme dénaturant de l'alcool éthylique dont il est indissociable par distillation. Il est également utilisé pour la production de biodiesel par réaction de transestérification.
- (17) Charge moteur: la charge moteur correspond ici à la puissance appelée, c'est-à-dire à l'énergie que doit développer le moteur pour continuer à fonctionner dans une situation donnée. Quand le moteur n'entraîne aucun mouvement des auxiliaires (alternateurs, pompes à eau à huile et autres

fluides, ventilateurs, boîte de vitesse, etc.) ou du véhicule la puissance appelée est minimale, lorsque le moteur entraîne les auxiliaires et le véhicule, la puissance appelée augmente. Lorsque la puissance appelée dépasse la capacité du moteur celui-ci « cale ».

- (18) Newton-mètre (symbole : Nm) : le newton-mètre (symbole : Nm) est l'unité dérivée du système international pour un « moment de force ». Elle représente le moment d'une force d'un newton dont le bras de levier est d'un mètre soit en unité SI un mètre carré kilogramme par seconde au carré ($m^2.kg/s^2$). Bien qu'elle soit égale à un joule, cette unité est employée spécifiquement pour les moments de force afin de transcrire la façon dont la grandeur est définie. L'emploi distinct de ces deux unités permet de ne pas confondre les concepts d'énergie et de moment de force.

Publications analysées

Agarwal AK. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Prog. Energ. Combust. Sci.* 2007; 33(3):233-71.

Armas O, Hernández JJ, Cárdenas MD. Reduction of diesel smoke opacity from vegetable oil methyl esters during transient operation. *Fuel.* 2006; 85(17-18):2427-38.

Banapurmath NR, Tewari PG, Hosmath RS. Experimental investigations of a four-stroke single cylinder direct injection diesel engine operated on dual fuel mode with producer gas as inducted fuel and Honge oil and its methyl ester (HOME) as injected fuels. *Renewable energy.* 2008; 33(9):2007-18.

Bünger J, Krahl J, Munack A et al. Strong mutagenic effects of diesel engine emissions using vegetable oil as fuel. *Arch. Toxicol.* 2007; 81(8):599-603.

Celik MB. Experimental determination of suitable ethanol-gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine. *Appl. Therm. Eng.* 2008; 28(5-6):396-404.

Corrêa SM, Arbilla G. Carbonyl emissions in diesel and biodiesel exhaust. *Atmos. Environ.* 2008; 42(4):769-75.

Di Y, Cheung C, Huang Z. Experimental investigation on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with ultra-low sulfur diesel fuel blended with biodiesel from waste cooking oil. *Sci. Total Environ.* 2009; 407(2):835-46.

Durbin TD, Miller JW, Younglove T et al. Effects of Ethanol and Volatility Parameters on Exhaust Emissions. Coordinating Research Council, Inc. University of California, Riverside. Report CRC Project No. E-67. 2006

Fang T, Lin YC, Foong TM et al. Reducing NOx emissions from a biodiesel-fueled engine by use of low-temperature combustion. *Environ. Sci. Technol.* 2008; 42(23):8865-70.

Graham LA, Belisle SL, Baas CL. Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85. *Atmos. Environ.* 2008; 42(19):4498-516.

Hess MA, Haas MJ, Foglia TA. Attempts to reduce NOx exhaust emissions by using reformulated biodiesel. *Fuel Process. Technol.* 2007; 88(7):693-9.

Institut de l'élevage. Les agrocarburants et l'élevage - Atouts ou menaces pour les ruminants? Dossier économique de l'élevage n°373. Paris. Décembre 2007.

Jacobson MZ. Effects of ethanol (E85) versus gasoline vehicles on cancer and mortality in the United States. *Environ. Sci. Technol.* 2007; 41:50-57.

Kegl B. Effect of biodiesel on emissions of a bus diesel engine. *Bioresour. Technol.* 2008; 99(4):863-73.

Lapuerta M, Armas O, Herreros JM. Emissions from a diesel-bioethanol blend in an automotive diesel engine. *Fuel.* 2007; 87(1):25-31.

Lapuerta M, Rodríguez-Fernández J, Agudelo J. Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel. *Bioresour. Technol.* 2008a; 99(4):731-40.

Lapuerta M, Herreros JM, Lyons LL et al. Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions. *Fuel.* 2008b; 87(15-16):3161-9.

Lin YC, Lee CF, Fang T. Characterization of particle size distribution from diesel engines fueled with palm-biodiesel blends and paraffinic fuel blends. *Atmos. Environ.* 2008; 42(6):1133-43.

Liu YY, Lin TC, Wang YJ, Ho WL. Biological toxicities of emissions from an unmodified engine fueled with diesel and biodiesel blend. *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 2008; 43(14):1735-43.

Lu X, Ma J, Ji L et al. Simultaneous reduction of NOx emission and smoke opacity of biodiesel-fueled engines by port injection of ethanol. *Fuel.* 2008; 87(7):1289-96.

Pang X, Mu Y, Yuan J et al. Carbonyls emission from ethanol-blended gasoline and Biodiesel-ethanol-diesel used in engines. *Atmos. Environ.* 2008; 42(6):1349-58.

Peng CY, Yang HH, Lan CH et al. Effects of the biodiesel blend fuel on aldehyde emissions from diesel engine exhaust. *Atmos. Environ.* 2007; 42(5):906-15.

Raheman H, Ghadge SV. Performance of compression ignition engine with mahua (*Madhuca indica*) biodiesel. *Fuel.* 2007; 86(16):2568-73.

Song CL, Zhou YC, Huang RJ et al. Influence of ethanol-diesel blended fuels on diesel exhaust emissions and mutagenic and genotoxic activities of particulate extracts. *J. Hazard. Mat.* 2007; 149(2):355-63.

Yang HH, Chien SM, Lo MY et al. Effects of biodiesel on emissions of regulated air pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons under engine durability testing. *Atmos. Environ.* 2007; 41(34):7232-40.

Zhang Z, Che W, Liang Y et al. Comparison of cytotoxicity and genotoxicity induced by the extracts of methanol and gasoline engine exhaust. *Toxicol. In Vitro.* 2007; 21(6):1058-65.

Revue de la littérature

Basha SA, Gopal KR, Jebaraj S. A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13(6-7):1628-34.

UNEP (United Nations Environment Programme). Towards sustainable production and use of resources: Assessing biofuels. Report ISBN 978-92-807-3052-4. 2009.

EPA (United States Environmental Protection Agency). A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions. Washington DC. Draft Technical Report EPA420-P-02-001. 2002.

EPA (United States Environmental Protection Agency). Clearinghouse for Inventories and Emission Factors. In Washington, DC: United States. Environ. Protection Agency. 2006. www.epa.gov/ttn/chief

Mots clés utilisés pour la recherche bibliographique

Biodiesel, Biomass fuel, Emissions, Ethanol fuel, Vehicle emissions.