

ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES GAZOLES D'UN MOTEUR DIESEL D'AUTOMOBILE À INJECTION DIRECTE *

A. GERINI et X. MONTAGNE

Institut français du pétrole¹

L'étude présentée a été réalisée dans le cadre du GMCL (Groupement Moteur Carburant Lubrifiant), organisme qui réunit des constructeurs d'automobiles, des raffineurs et des addituteurs, avec l'objectif d'examiner la sensibilité d'un moteur Diesel à injection directe d'automobile aux paramètres du gazole. Les partenaires de cette étude sont Elf, IFP, Octel, PSA, Renault et Total.

Parmi les solutions technologiques permettant de disposer de convertisseurs d'énergie assurant de faibles niveaux d'émissions de polluants et de consommation, le moteur Diesel se place naturellement en bonne position.

Dans ce contexte, on enregistre aujourd'hui l'émergence du moteur Diesel à injection directe pour les véhicules légers en raison de ses performances, notamment en regard de la consommation. Toutefois, cette technologie nécessite une technique d'injection performante, associée à la gestion électronique, demande de l'EGR et un catalyseur d'oxydation afin de régler les problèmes d'émissions polluantes et sonores. Il est donc de première importance de cerner avec précision la sensibilité du moteur Diesel à injection directe aux paramètres carburants afin de tirer le meilleur profit de cette technologie.

À partir d'un ensemble de gazoles formulés pour faire varier la composition chimique, l'indice de cétane et la densité, un moteur Audi à injection directe de type 1Z a été testé au banc, dans des conditions standard de réglage (avance à l'injection et taux de gaz recyclés).

Cet ensemble de résultats a ainsi permis de démontrer que l'accroissement de l'indice de cétane, la réduction de la densité et de la teneur en polyaromatiques ont une influence positive sensible sur les émissions de CO, d'hydrocarbures imbrûlés, des VOF. En ce qui concerne les émissions de particules, l'indice de cétane semble avoir une influence négative sur la fraction sèche dans certaines conditions. De plus, il apparaît que les particules totales sont plutôt dépendantes de la viscosité et des fractions légères des carburants. Les émissions sonores sont étroitement liées à l'indice de cétane.

Par ailleurs, l'ensemble des résultats acquis semble indiquer que les paramètres pilotant le délai d'auto-inflammation sont importants sur ce type de convertisseur. Il serait cependant nécessaire de disposer de mesures directes des caractéristiques des jets d'injection (taille des gouttelettes, pénétration du spray) en fonction des différents carburants pour pouvoir quantifier l'effet des paramètres tels que la viscosité et la densité sur la partie physique du délai d'auto-inflammation.

(1) 1 et 4, avenue de Bois-Préau,
92852 Rueil-Malmaison Cedex - France

* Article paru dans la revue Ingénieurs de l'automobile, n° 706,
juin-juillet 1996.

SMALL DIRECT INJECTION DIESEL ENGINE SENSITIVITY TO THE DIESEL FUEL CHARACTERISTICS

Among the technical solutions that can lead to energy converters with low pollutant emissions and low fuel consumption, diesel engines rank, by nature, in a good position.

On this base, direct injection diesel engine has been developed and are now spreading in private passenger cars because of their performances, especially in terms of fuel consumption.

However, this equipment requires an efficient injection system, electronically driven, needs EGR and an oxidation catalyst to improve the pollutant emissions and the noise level. Thus, it is a major concern to be able to assess precisely the sensitivity to fuel characteristics of direct injection engines as to take the best advantage of this technology.

With a set of fuels formulated to cover a large range of chemical nature, viscosity, cetane number and density, an Audi direct injection engine (1Z model) was run at the test bench.

The impact of the fuel characteristics on pollutant emissions, regulated or unregulated (PAH, aldehydes), and on noise levels was assessed either under standard tuning conditions, either by changing the EGR rate and the injection timing.

The results obtained at the end of this program point out the main criteria that have an influence on emissions. They also allow a comparison between direct injection engines and their homologues with prechambers.

The works this communication is dealing with have been conducted as part of the program of the "Groupement Moteur Carburant Lubrifiant" (GMCL), in collaboration with ELF, Octel, PSA, Renault and Total.

ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD A LOS PARÁMETRO DE GASÓLEOS DE UN MOTOR DIESEL DE AUTOMÓVIL DE INYECCIÓN DIRECTA

El presente estudio se ha llevado a cabo en el marco del GMCL (Agrupación Motor Carburante Lubricante), organismo que reúne a los constructores de automóviles, las refinerías y las empresas de aditivación, con objeto de examinar la sensibilidad de un motor Diesel a los parámetros del gasóleo. Los participantes en este estudio son los siguientes : Elf, IPC, Octel, PSA, Renault y Total.

Entre las soluciones tecnológicas que permiten disponer de convertidores de energía capaces de producir reducidos niveles de contaminantes y de consumo, el motor Diesel se sitúa naturalmente, en buena posición.

En este contexto, se observa actualmente la emergencia del motor Diesel de inyección directa para los vehículos de turismo, con motivo de sus prestaciones, fundamentalmente en cuanto al consumo. No obstante, esta tecnología precisa aplicar una técnica de inyección de elevadas prestaciones, combinada con la gestión electrónica, demanda del reciclado de los gases de escape y un catalizador de oxidación, con objeto de solucionar los problemas de emisiones contaminantes y sonoras. Por consiguiente, es de primordial importancia delimitar con toda precisión la sensibilidad del motor Diesel de inyección directa con respecto a los parámetros de la carburación, para así sacar el mayor provecho de esta tecnología.

Tomando como punto de partida un conjunto de gasóleos formulados para hacer variar la composición química, el índice de cetano, las temperaturas características de destilación, la viscosidad y la densidad, se ha sometido a pruebas en banco de un motor Audi de inyección directa de tipo IZ, en condiciones estándar de ajuste (avance a la inyección y tasa de gases reciclados).

Este conjunto de resultados ha permitido así demostrar que el incremento del índice de cetano y la reducción de la densidad o de poliaromáticos ejerce una influencia positiva apreciable en cuanto a las emisiones de CO, de hidrocarburos no consumidos, y de los VOF. Por lo que respecta a las emisiones de partícula, el índice de cetano parece ejercer una influencia negativa sobre la fracción seca. Además, parece ser que las partículas total son mayormente dependientes de la viscosidad y de las fracciones ligeras de los carburantes. A su vez, las emisiones sonoras dependen en grado sumo del índice de cetano-

Por otra parte, el conjunto de resultados conseguidos parece indicar que los parámetros que controlan el tiempo de autoinflamación son importantes en este tipo de convertidor. No obstante sería preciso disponer de medidas directas de las características de los chorros de inyección (dimensiones de las gotitas, penetración del spray) en función de los diversos carburantes, para así poder cuantificar el efecto de los parámetros como, por ejemplo, la viscosidad y la densidad en la parte física del lapso de autoinflamación.

INTRODUCTION

Dans le contexte actuel de recherche de solutions technologiques capables de garantir de faibles niveaux d'émissions de polluants et des faibles consommations, le moteur Diesel occupe une place essentielle. Toutefois, pour atteindre les meilleurs niveaux, il faut avoir recours à la suralimentation, au recyclage des gaz d'échappement (EGR) et à la gestion électronique de l'injection ainsi qu'à la catalyse d'oxydation. Par ailleurs, la mise en œuvre de l'injection directe pour les moteurs destinés aux véhicules légers a exacerbé l'intérêt du moteur Diesel en raison des gains de consommation pouvant aller jusqu'à 15 % comparés à son homologue à préchambre.

L'évolution du moteur Diesel est donc sous le signe de l'injection directe : si de nombreux travaux de recherche se font autour de la technologie d'injection (systèmes *common rail*, injecteur-pompe, injecteurs double levée), il est toutefois nécessaire d'explorer la sensibilité de ce convertisseur aux paramètres carburants, ce dernier étant une composante à part entière du processus d'optimisation du groupe motopropulseur.

Dans ce contexte, le *GMCL : Groupement Moteur Carburant Lubrifiant*, organisme qui réunit des constructeurs d'automobiles, des raffineurs et des additifs, a mis en place une étude visant à examiner la sensibilité d'un moteur Diesel à injection directe d'automobile aux paramètres gazoles. Les partenaires de cette étude sont *Elf, IFP, Octel, PSA, Renault et Total*.

La présente publication regroupe les travaux d'un premier volet effectués dans ce cadre par l'*IFP* sur banc moteur. Ce programme a permis de cerner l'influence de la densité, de la viscosité, de la composition chimique du gazole (teneur en naphènes, en composés mono, di ou triaromatiques), de l'indice de cétane et des températures caractéristiques de distillation. Un second volet réalisé sur châssis dynamométrique a fait l'objet d'une seconde publication.

1 PARTIE EXPERIMENTALE

1.1 Moyens d'essais

1.1.1 Le moteur

Le convertisseur d'énergie utilisé pour la campagne d'essai est le moteur Audi type 1Z. Il s'agit d'un moteur à

injection directe suralimenté par turbocompresseur et équipé d'EGR ; son fonctionnement est géré par électronique. L'injection de carburant est bouclée sur le signal de la levée d'aiguille du cylindre n° 2. Cette particularité permet, dans le cadre spécifique de notre étude, de garantir une valeur constante de l'avance à l'injection indépendamment des caractéristiques physiques du carburant (densité et viscosité).

Les principales caractéristiques en sont les suivantes :

- type : Audi 1Z ;
- 4 cyl., 4 temps Diesel ;
- cylindrée : 1896 cm³ ;
- alésage x course : 79,5 mm x 95,5 mm ;
- rapport volumétrique : 19,5 ;
- puissance maxi : 66 kW à 4000 tr/min ;
- couple maxi : 182 Nm à 2300 tr/min ;
- pompe d'injection Bosch VE 4/10 E 2250 R 440 ;
- injecteurs Bosch DSLA 150 P 294 (de type à 5 trous et double ressort) ;
- porte injecteur Bosch 0 431 111 997 ;
- turbocompresseur Garrett T3 avec échangeur air/air ;
- vanne proportionnelle de recyclage des gaz d'échappement à commande électronique ;
- catalyseur d'oxydation (0,6 l de volume).

1.1.2 Moyens de mesure et d'analyse

Analyse des gaz

Les gaz d'échappement sont prélevés en amont et en aval du catalyseur et sont acheminés au moyen de lignes chauffées à 180 °C vers :

- une baie d'analyse Pierburg pour l'identification des HC (FID), du CO (infrarouge non dispersif), du CO₂ haute teneur (infrarouge non dispersif), des NO_x (chimiluminescence) ;
- un analyseur Maihak pour le CO₂ basse teneur (infrarouge non dispersif) ;
- un analyseur Siemens pour l'oxygène (paramagnétique).

Les fumées sont évaluées en indices Bosch.

Prélèvement des particules

Les particules sont prélevées à l'aide du microtunnel de dilution développé par l'*IFP* : ce dispositif repose sur la dilution instantanée d'une fraction des gaz d'échappement, réalisée directement dans la sonde de prélèvement. Grâce à la présence de deux sondes de prélèvement, des mesures en amont et en aval du catalyseur peuvent être effectuées simultanément.

Les particules recueillies sur un filtre en fibre de verre "téflonnée" Pallflex T60A20 de 47 mm de diamètre, permettent d'évaluer :

- la masse des particules émises ;
- la fraction volatile (VOF-Volatil Organic Fraction) par extraction au four ;
- la fraction soluble qui servira de base pour le dosage des hydrocarbures aromatiques polycycliques présents (HAP), cette dernière analyse étant faite par chromatographie en phase liquide haute performance.

Piégeage et dosage des aldéhydes

À partir d'un échantillon de gaz dilué, les aldéhydes sont tout d'abord piégés sur une cartouche de silice greffée de DNPH. Celle-ci est ensuite extraite au moyen d'acétonitrile. La liqueur obtenue est alors injectée sur un chromatographe en phase liquide haute performance muni d'un détecteur UV calé à 365 nm.

Consommation de carburant

La consommation de carburant a été mesurée à l'aide d'une balance AVL (type 730) couplée à un conditionneur de carburant (température de consigne en entrée pompe d'injection de 20 °C).

Mesure de bruit

Deux types de mesure de bruit sont réalisés :

- le bruit de combustion : les mesures sont faites à l'aide d'un appareil AVL *Combustion Noise Meter 450*. Celui-ci opère un traitement en temps réel du signal de pression cylindre et fournit une indication en dB(A) ;
- le bruit global du moteur, évalué au moyen d'un sonomètre Brüel & Kjaer couplé à un système d'acquisition numérique sur PC multimedia.

Système d'acquisition

Le banc d'essai est équipé d'un système d'acquisition "lente" (fréquence 10 Hz) : régime, couple, températures et pressions moyennes et d'un système d'acquisition "rapide" (échantillonnage 1 °V) : pression cylindre et levée d'aiguille.

Contrôle moteur

Les modifications d'avance à l'injection et de taux d'EGR sont faites par l'intermédiaire de boîtiers électroniques développés par l'IFP. L'ensemble de l'installation est représenté sur le schéma 1.

1.1.3 La matrice des carburants

Pour ce travail, les paramètres principaux qui ont été retenus sont :

- la masse volumique ;
- la viscosité cinématique ;
- la composition chimique (répartition entre les différentes classes d'aromatiques, les naphthènes et les paraffines) ;
- l'indice de cétane ;
- les températures caractéristiques de la distillation (T5, T50, T95).

Composer de telles matrices est toujours délicat en raison de l'étroite corrélation qui peut exister entre les différents paramètres. Pour réaliser celle de ce programme, il fut de nouveau fait appel à des effluents provenant :

- de procédés d'hydrotraitement : 2 gazoles résultant d'un hydrotraitement de plus en plus sévère permettant de réduire continûment les teneurs en tri puis di aromatiques (G2, G3) ;
- de procédés d'hydrocraquage : 1 gazole est ainsi constitué uniquement de composés saturés — naphthènes et paraffines (G7) ;
- d'une coupe kérosène (G4) et d'une coupe de tête de distillation sous vide (G5). On a cherché au travers de ces coupes des produits respectivement peu (G4) et a priori très visqueux (G5) ; on verra dans le tableau suivant que cet objectif ne fut pas atteint pour le gazole G5.
- d'un brut conduisant à un gazole très naphthénique (G6).

La teneur en soufre des gazoles a été ajustée à 500 ppm, soit par incorporation de dibenzothiophène (G2, G3, G4, G7), soit par hydrodésulfuration (G5, G6). Par ailleurs, un gazole conforme aux spécifications 1996 a été retenu comme carburant de référence (G1).

Les principales caractéristiques des gazoles utilisés sont reportées dans le tableau 1.

Les intervalles de variation des gazoles ainsi réalisés sont :

- masse volumique : de 798,2 kg/m³ à 864,3 kg/m³ ;
- viscosité cinématique (40 °C) : de 1,12 mm²/s à 3,93 mm²/s ;
- pourcentage en composés aromatiques : de 8,4 % à 36,6 % ;
- niveau de composés di et triaromatiques : de 1,5 % à 13,8 % ;
- indice de cétane : de 44,5 à 63,1 ;
- T95 : de 222,5 °C à 358 °C.

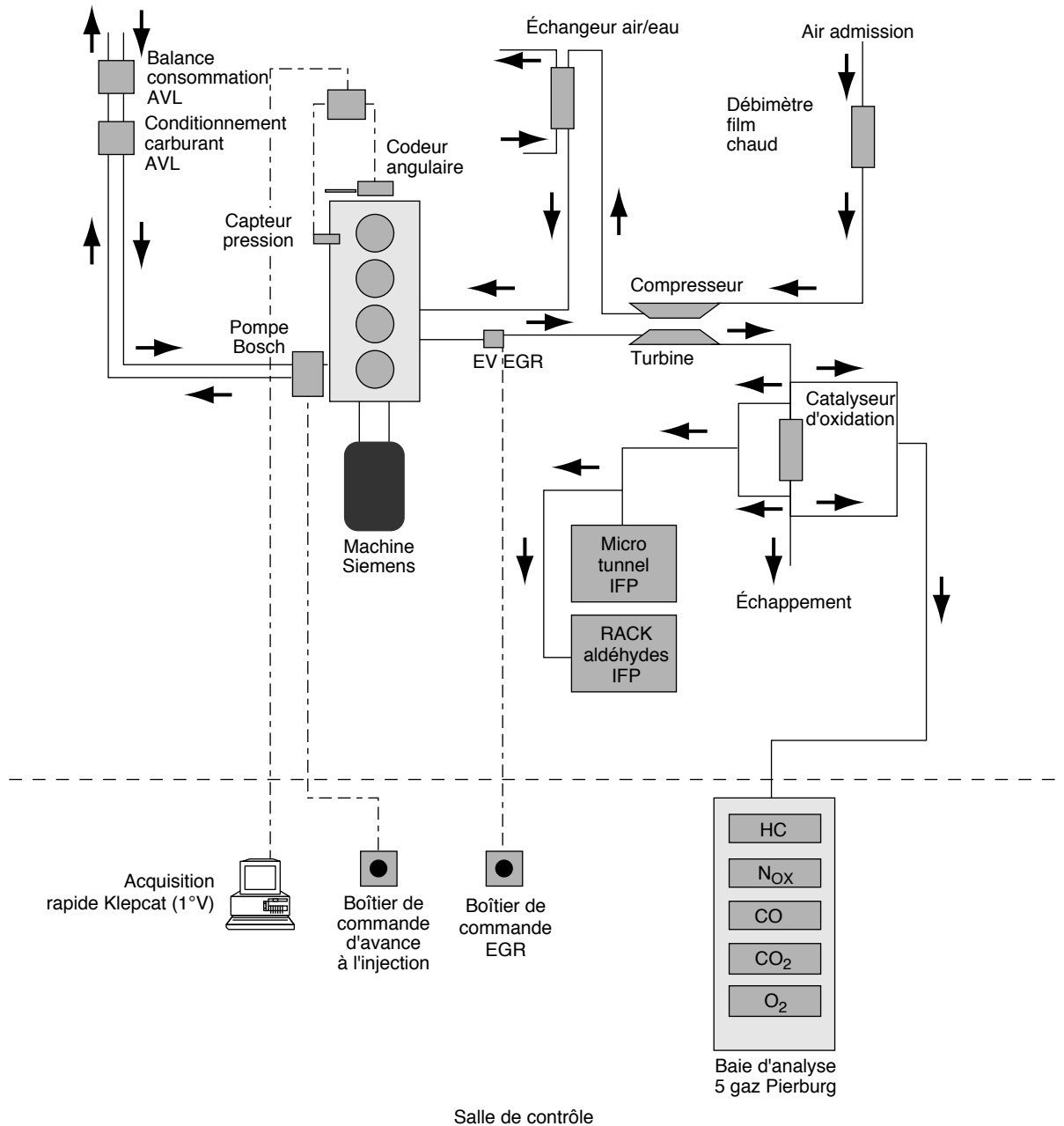


Schéma 1
Schéma de l'installation utilisée.
Test bench equipment.

Le tableau 2 présente la matrice de corrélation pour l'ensemble des carburants.

Dans ce tableau, on a fait apparaître l'indice d'insaturation. Il s'agit d'un coefficient défini il y a quelques années [1], qui tente de rendre compte du niveau des émissions de polluants d'un moteur Diesel à partir de l'analyse chimique du gazole (réalisée par spectrométrie

de masse). Ce coefficient est évalué comme suit :

$$\text{indice de saturation} = \sum n_i C_i$$

où :

- n = 0 pour les composés paraffiniques
- n = 1 pour les composés naphténiques
- n = 4 pour les composés monoaromatiques
- n = 7 pour les composés diaromatiques

TABLEAU 1

Principales caractéristiques des gazoles d'essai
Main characteristics of the Diesel fuel set

Type	GO réf.	HDT 1	HDT 2	Kérosène	Tête DSV	Naphtén.	Hydrocraquage
Nom	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
Masse volumique 15 °C (kg/m ³)	835,9	832,3	822,6	798,2	840,4	864,3	812,8
Viscosité cinématique 20 °C (mm ² /s)	4,76	5,56	5,39	1,91	3,70	6,65	5,66
Viscosité cinématique 40 °C (mm ² /s)	2,99	2,80	2,72	1,12	2,44	3,93	3,48
Soufre initial (ppm)	560	2	0	0	10 220	1 884	120
Soufre final (ppm)	560	490	495	520	530	490	500
Paraffines (% masse)	43,9	45,0	41,9	43,9	31,6	23,5	47,7
Naphténiques (% masse)	32,9	37,0	49,6	40,4	31,8	44,8	43,9
(%) aromatiques totaux (% masse)	22,1	18,0	8,5	15,7	36,6	31,7	8,4
(%) monoaromatiques (% masse)	12,0	15,1	7,6	14,0	18,6	16,7	6,8
(%) diaromatiques (% masse)	9,1	2,7	0,9	1,7	9,9	13,0	1,5
(%) triaromatiques (% masse)	0,6	0,1	0,0	0,0	0,8	0,8	0,0
Point initial (°C)	179,5	200,0	172,0	154,5	182,0	222,0	187,0
T5 (°C)	218,0	235,0	218,0	171,5	204,0	245,0	230,5
T50 (°C)	281,0	291,0	290,0	191,5	256,0	279,0	285,0
T95 (°C)	375,5	331,0	329,0	222,5	337,0	335,0	358,0
Point final (°C)	349,5	348,0	347,0	231,5	354,0	344,0	362,0
Indice de cétane	52,1	59,9	61,7	44,5	45,7	44,9	63,1
Indice d'insaturation	150,6	117,3	86,3	108,3	183,5	210,6	81,6

TABLEAU 2

Matrice de corrélation des carburants d'essai ; caractères gras : coeff. r², caractères fins : coeff. a = dy/dx
Correlation matrix for the Diesel fuel set r² coeff.; in large print, a = dy/dx coeff. in small print

	Masse vol. 15 °C	Visco. cin. 40 °C	(%) aro. tot.	(%) mono aro.	(%) di aro.	(%) di + tri aro.	Indice insat.	Indice cétane	T5	T50	T95
Masse volumique 15 °C	1	0,48 16,56	0,53 1,42	0,28 2,50	0,74 3,66	0,72 3,29	0,71 0,362	0,08 -0,744	0,45 0,589	0,27 0,311	0,32 0,268
Viscosité cinématique 40 °C		1	0,02 0,011	0,02 -0,029	0,19 0,078	0,18 0,070	0,10 0,0057	0,09 0,033	0,89 0,0345	0,69 0,020	0,73 0,017
(% masse) aromatiques totaux			1	0,80 2,18	0,80 1,95	0,78 1,76	0,91 0,209	0,57 -0,98	0,00 0,0297	0,00 -0,027	0,01 0,0289
(% masse) monoaromatiques				1	0,45 0,599	0,43 0,533	0,65 0,073	0,60 -0,416	0,01 -0,0189	0,09 -0,0385	0,03 -0,0188
(% masse) diaromatiques					1	0,99 0,910	0,94 0,098	0,43 -0,392	0,09 0,062	0,01 0,0176	0,08 0,0331
(% masse) di + triaromatiques						1	0,92 0,106	0,42 -0,424	0,08 0,066	0,01 0,020	0,09 0,037
Indice d'insaturation							1	0,55 -4,44	0,05 0,462	0,00 0,0139	0,03 0,128
Indice de cétane								1	0,18 0,148	0,42 0,1527	0,24 0,0923
T5 (°C)									1	0,79 0,609	0,68 0,448
T50 (°C)										1	0,84 0,731
T95 (°C)											1

$n = 10$ pour les composés triaromatiques
 C_i : % masse de l'hydrocarbure considéré déterminé par spectrométrie de masse.

On précisera que l'élaboration de ce coefficient repose sur des résultats acquis sur des moteurs à injection indirecte.

1.2 Méthodologie expérimentale

Les essais "carburants" ont été précédés par une caractérisation du moteur au moyen du gazole de référence G1, ce qui a permis de vérifier les performances du moteur et d'évaluer les stratégies de fonctionnement (taux d'EGR, suralimentation, avance à l'injection). Les performances constatées sont en accord avec celles fournies par Audi notamment avec une valeur de 185 Nm pour le couple maximal et de 211 g/kWh pour la CSE minimale.

En ce qui concerne les essais "carburants", les points de fonctionnement moteur ont été les suivants :

- régime 2000 tr/min - PME : 1,3 bar (P1) ;
- régime 2500 tr/min - PME : 2,0 bar (P2) ;
- régime 2900 tr/min - PME : 3,0 bar (P3).

Dans les conditions standard de réglage :

- P1 : avance à l'injection = 1 °V avant PMH, taux d'EGR = 36 % ;
- P2 : avance à l'injection = 1 °V avant PMH, taux d'EGR = 21 % ;
- P3 : avance à l'injection = 1 °V avant PMH, taux d'EGR = 18 %.

Ces points ont été choisis pour être représentatifs du cycle Europe.

Le taux des gaz recyclés est le rapport entre le débit des gaz d'échappement renvoyés à l'admission et le débit total des gaz d'échappement avant prélèvement.

Le programme complet de l'étude s'appuie sur des essais à avance décalée, avec balayage de différents taux d'EGR, et avec analyse des gaz en amont et en aval du catalyseur. Seuls les résultats correspondant aux conditions standard de fonctionnement et en amont du catalyseur sont présentés ici. L'ensemble complet des résultats fera l'objet d'une nouvelle communication.

Les carburants ont été testés dans l'ordre suivant :

- gazole de référence (G1) ;
- gazole d'hydrotraitement léger (G2) ;
- gazole d'hydrotraitement poussé (G3) ;
- kérosène (G4) ;
- gazole d'hydrocraquage (G7) ;

- gazole de tête de distillation sous vide (G5) ;
- gazole de type naphténiq (G6).

Entre chaque carburant, un fonctionnement avec le gazole de référence est effectué de façon à vérifier l'évolution de l'ensemble moteur-banc d'essai et établir l'intervalle de précision de la mesure. Le tableau 3 réunit les résultats relatifs aux 6 bouclages effectués avec le produit de référence, pour le point P1 en condition de réglage standard.

TABLEAU 3

Résultats du test de bouclage avec le GO REF
Measurement repeatability (G1 Diesel fuel)

	CSE (g/kWh)	HC (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	CO (g/kWh)	Part. tot. (g/h)	Bruit (dBA)	Aldéh. tot. (mg/h)
Moyenne	375,6	1,92	2,72	5,62	2,38	84,6	806,7
Écart type	6	0,07	0,09	0,42	0,19	0,3	5 ⁸
Éc. type moy. (%)	1,5	3,4	3,1	7,4	7,9	0,3	7,2

2 RÉSULTATS

Cette partie est consacrée à la recherche des paramètres carburants ayant une incidence significative sur les émissions de polluants réglementés et non réglementés. Après une description des différentes émissions, on présentera ce que sont les grandes tendances pour chacune des caractéristiques physicochimiques ou chimiques du gazole.

Les résultats présentés concernent le point de fonctionnement P1 (2000 tr/min — 1,3 bar PME — angle d'injection 359 °V — 36 % d'EGR). Les points P2 et P3 (cf. leur définition au chapitre 1.2) étant caractérisés par un comportement analogue au premier point cité ne feront pas l'objet d'une description détaillée.

Tout d'abord, on fournit dans le tableau 4 suivant, l'ensemble des valeurs des coefficients de corrélation des différents polluants en fonction des grands paramètres que nous visons. En fonction de notre approche expérimentale, c'est-à-dire 7 valeurs soit 5 degrés de liberté, les coefficients r^2 ne sont réellement significatifs au risque de 5 % que s'ils sont supérieurs à 0,57. Dans les autres cas, un examen détaillé pourra permettre des interprétations particulières.

TABLEAU 4

Matrice de corrélation pour le point P1 en conditions standard

Correlation matrix – P1 (2000 rpm, 1,3 bar BMEP) under standard turning conditions

	HC		NO _x		CO		Part. tot.		IOF		VOF	
	r ²	dy/dx	r ²	dy/dx	r ²	dy/dx	r ²	dy/dx	r ²	dy/dx	r ²	dy/dx
Masse volumique	0,11	0,0031	0,13	-0,0027	0,00	0,0005	0,28	0,0095	0,00	0,0009	0,44	0,2650
Viscosité cinématique	0,00	-0,0110	0,01	-0,0228	0,29	-0,5111	0,81	0,3821	0,25	0,1928	0,08	2,749
Indice de cétane	0,48	-0,0166	0,00	-0,0003	0,52	-0,0723	0,37	0,0273	0,85	0,0374	0,61	-0,7879
(%) aromatiques totaux	0,12	0,0063	0,00	-0,0009	0,12	0,0267	0,01	-0,0039	0,25	-0,0156	0,51	0,5512
(%) monoaromatiques	0,03	0,0056	0,00	0,0007	0,16	0,0518	0,10	-0,0186	0,28	-0,0277	0,25	0,6539
(%) di + triaromatiques	0,23	0,0178	0,02	-0,0046	0,04	0,0338	0,02	0,0109	0,14	-0,0237	0,69	1,3096
(%) naphènes	0,06	0,0078	0,19	-0,0106	0,00	0,0118	0,04	0,0118	0,02	0,0071	0,00	0,0106
Indice d'insaturation	0,27	0,0021	0,02	-0,0005	0,11	0,0057	0,00	0,0003	0,23	-0,0033	0,73	0,1462
T5	0,02	-0,0013	0,02	-0,0008	0,36	-0,0206	0,92	0,0148	0,42	0,0089	0,02	0,0450
T50	0,14	-0,0021	0,08	-0,0012	0,43	-0,0152	0,92	0,0101	0,68	0,0078	0,03	-0,0401
T95	0,19	-0,0019	0,01	-0,0004	0,44	-0,0124	0,74	0,0073	0,48	0,0052	0,00	-0,0116

On rappellera aussi que les émissions considérées sont les émissions mesurées en amont du catalyseur, ceci dans le souci de ne pas prendre en compte les effets liés à la présence du convertisseur catalytique.

2.1 Les polluants réglementés

2.1.1 Le monoxyde de carbone

Tous gazoles confondus, aucun des coefficients de corrélation ne permet de rendre compte d'une évolution linéaire des émissions de CO avec l'une ou l'autre des caractéristiques. Seul un lien avec l'accroissement de l'indice de cétane semble apparaître. En effet, la droite de régression présentée en figure 1a ($r^2 = 0,52$), indique que le passage du niveau de l'indice de cétane de 45 à 60 amène une réduction de 15 % des émissions moteur.

En ce qui concerne l'influence de la teneur en aromatiques, le coefficient de corrélation ne permet pas d'établir un lien étroit, mais il est cependant intéressant de remarquer le comportement des gazoles G3 et G4 ; ce dernier, qui présente des caractéristiques de distillation très différentes par rapport aux produits ayant servi à la mise au point du moteur, s'écarte de l'évolution suivie par les 5 autres gazoles avec un niveau d'émissions beaucoup plus élevé (fig. 1c et 1d).

La température des 95 % distillés n'a que peu d'influence sur les niveaux d'émissions (fig. 1e). En effet, le coefficient de corrélation n'est que de 0,44. Ce que l'on

note surtout ici, c'est la répartition de la population sur un nuage de points concentrés dans une zone étroite : 337 °C – 358 °C et sur point isolé caractérisant le kérosène (T95 = 222,5 °C).

En ce qui concerne la masse volumique et la viscosité (fig. 1b et 1f), caractéristiques qui ont une influence directe sur l'injection du carburant (pression d'injection, pulvérisation du jet, etc.), les coefficients de corrélation de ces deux grandeurs ne permettent pas de dégager de liens directs avec les émissions de CO. Toutefois, la pente concernant la courbe entre émissions de CO et viscosité cinématique à 40 °C est négative, avec une diminution de 15 % du CO lorsque la viscosité passe de 1 mm²/s à 3 mm²/s.

2.1.2 Les hydrocarbures imbrûlés

Les émissions des HC sont principalement liées aux caractéristiques de cétane des carburants ; la droite de régression (coefficient de corrélation $r^2 = 0,48$) montre toutefois une sensibilité plutôt faible : l'accroissement de l'indice de cétane de 45 à 60 amène une réduction du niveau des HC de 15 % (fig. 2a).

En ce qui concerne l'influence de la teneur en di et triaromatiques, de la masse volumique, de la viscosité et des températures caractéristiques de distillation (fig. 2b, 2c, 2d) aucun effet n'est observé. On enregistre, une nouvelle fois, le comportement anormal du kérosène (G4) par rapport au reste des gazoles d'essai.

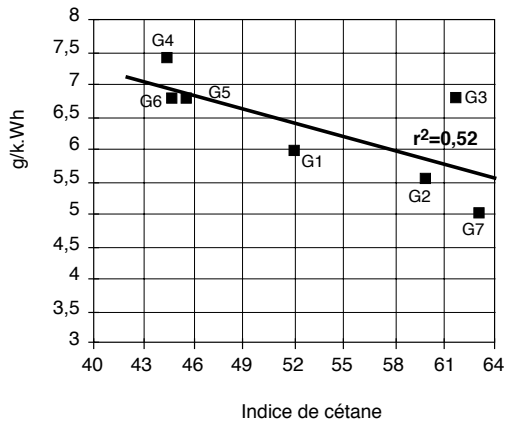


Figure 1a
Émissions de CO en fonction de l'indice de cétane.
Influence of cetane number on CO emission.

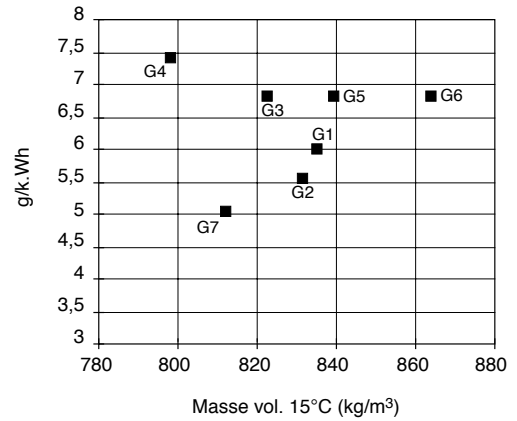


Figure 1b
Émissions de CO en fonction de la masse volumique.
Influence of density on CO emission.

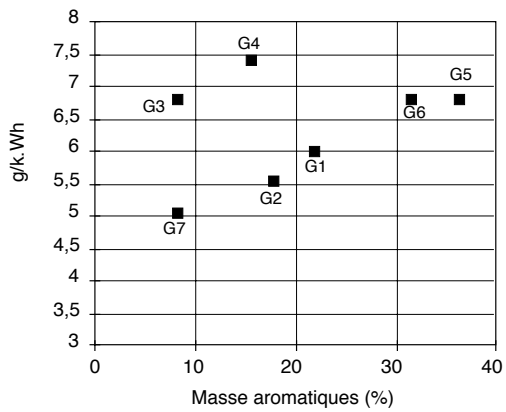


Figure 1c
Émissions de CO en fonction des aromatiques totaux.
Influence of total aromatics on CO emissions.

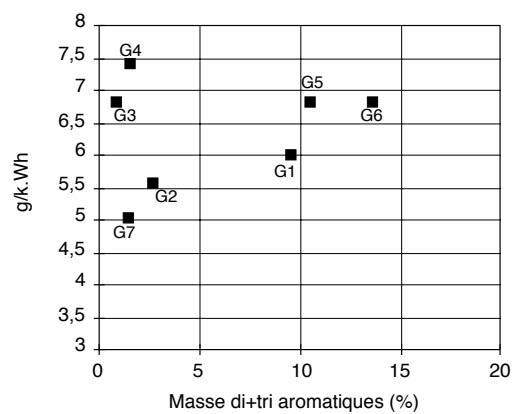


Figure 1d
Émissions de CO en fonction des di + triaromatics.
Influence of di + triaromatics on CO emissions.

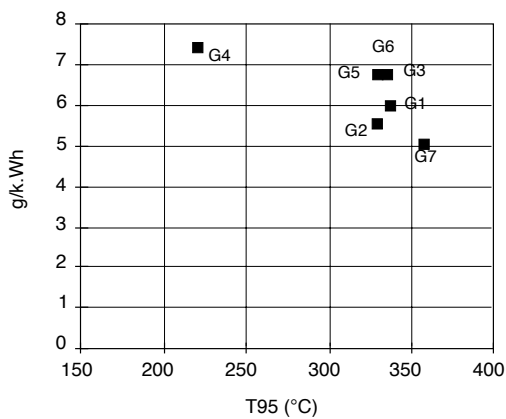


Figure 1e
Émissions de CO en fonction de la T95.
Influence of the T95 on CO emissions.

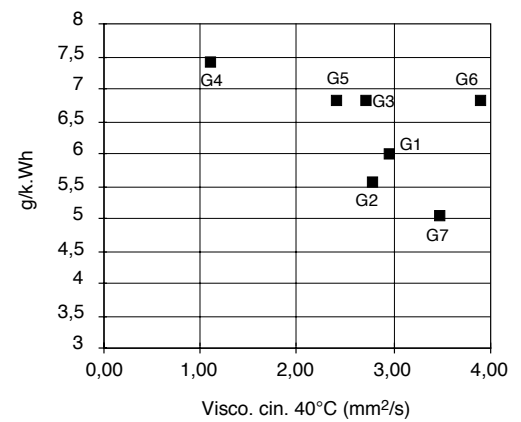


Figure 1f
Émissions de CO en fonction de la viscosité.
Influence of the viscosity on CO emissions.

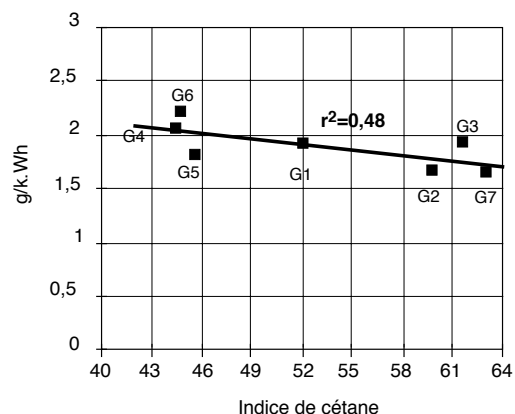


Figure 2a

Émissions de HC en fonction du cétane.
Influence of cetane on HC emissions.

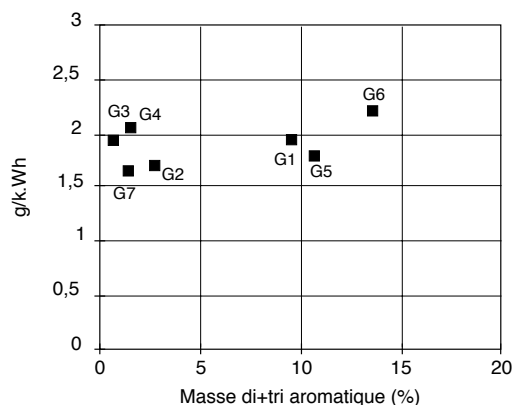


Figure 2b

Émissions de HC en fonction des di + triaromatiques.
Influence of di + triaromatics on HC emissions.

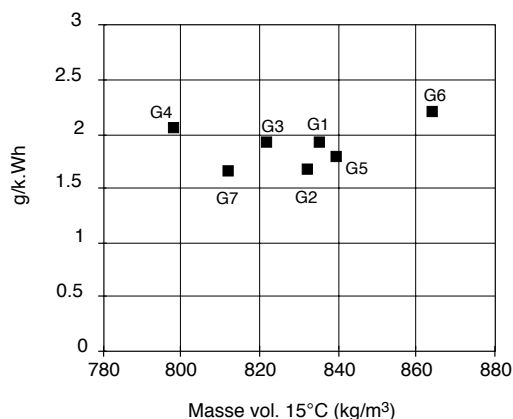


Figure 2c

Émissions de HC en fonction de la masse volumique
Influence of density on HC emissions.

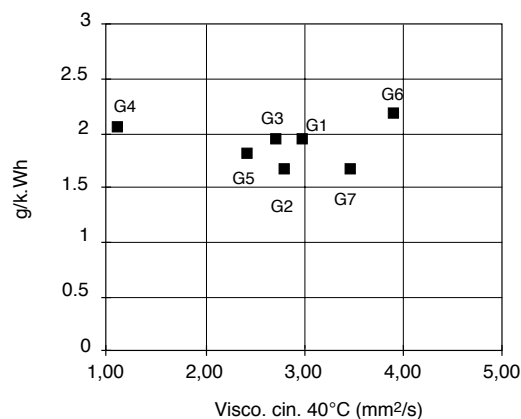


Figure 2d

Émissions de HC en fonction de la viscosité.
Influence of viscosity on HC emissions.

2.1.3 Les oxydes d'azote

Sur les émissions d'oxyde d'azote, densité, viscosité, indice de cétane et aromaticité sont sans effet (fig. 3a, 3b et 3c). Toutefois, l'observation des émissions en fonction des structures aromatiques, notamment condensées, présente un caractère particulier. Pour 6 des gazoles, l'accroissement des polyaromatiques est synonyme d'une réduction des oxydes d'azote. Seul le gazole fortement hydrotraité (G3) sort de cet épure (fig. 3d). Par ailleurs, ces tendances restent les mêmes, que le moteur fonctionne ou non avec de l'EGR. Le recours au recyclage des gaz d'échappement permet d'obtenir une réduction de l'ordre de 50 % des niveaux — à 2000 tr/min et 1,3 bar de PME — quel que soit le gazole, mais ne modifie pas les relations existant entre caractéristiques et émissions.

2.1.4 Les particules totales

Tous gazoles confondus, les paramètres influençant nettement les émissions des particules totales sont la viscosité et la température des 5 % distillés (fig. 4a et 4b). Pour le premier paramètre (coeff. $r^2 = 0,81$) on peut affirmer que la tendance est réelle ; l'accroissement de la viscosité de 1 à 3 mm²/s amène une augmentation des émissions des particules de 45 %. Compte tenu de la bonne corrélation existante entre T5 et viscosité (coeff. r^2 de 0,89), on retrouve ici un lien étroit avec la T5 ($r^2 = 0,92$).

Concernant l'indice de cétane, il faut remarquer qu'aucune influence n'est constatée lorsqu'on considère tous les carburants hors kérosène (G4) (fig. 4c).

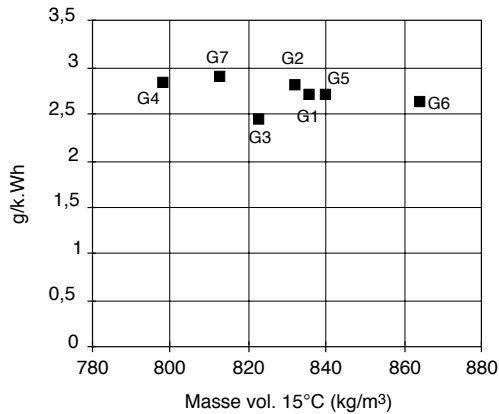


Figure 3a
Émissions de NO_x en fonction de la masse volumique.
Influence of density on NO_x emissions.

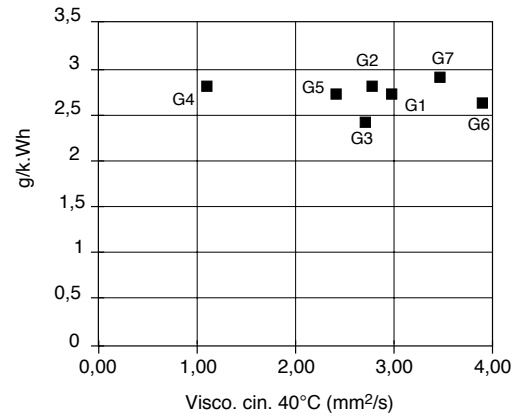


Figure 3b
Émissions de NO_x en fonction de la viscosité cinématique.
Influence of viscosity on NO_x emissions.

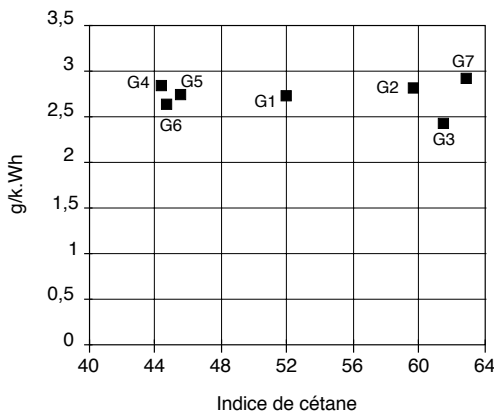


Figure 3c
Émissions de NO_x en fonction du cétane.
Influence of cetane on NO_x emissions.

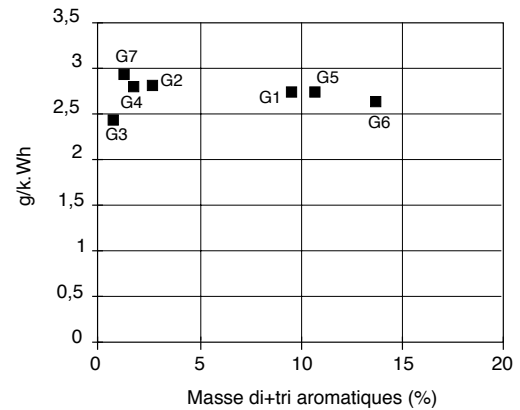


Figure 3d
Émissions de NO_x en fonction des di + triaromatiques.
Influence of di + triaromatics on NO_x emissions.

Pour le moteur considéré, les paramètres densité et aromaticité ne permettent pas de prédire les émissions de particules de façon fiable (fig. 4d, 4e et 4f).

2.1.5 Les fractions sèches des particules

Au vu de la matrice de corrélation reportée dans le tableau 4, le paramètre plus significatif influençant les émissions des parties sèches des particules (IOF - Insoluble Organic Fraction) est l'indice de cétane.

Concernant ce paramètre (coeff. $r^2 = 0,85$), l'accroissement de l'indice de cétane de 45 à 60 engendre une augmentation du niveau des IOF de 44 % (fig. 5a). Cette évolution reste significative même à l'égard de l'incertitude de mesure sur les particules totales (8 %,

cf. tableau 3) et de la détermination de la partie volatile (VOF - Volatile Organic Fraction), estimable à environ 12 %.

Dans le chapitre suivant, on proposera des voies d'explication de ce phénomène.

Il faut cependant remarquer que l'hydrotraitement du gazole G2 conduisant au produit G3, se traduisant par une diminution importante des composés monoaromatiques (de 15,1 % à 7,6 %) et des composés diaromatiques (de 2,7 % à 0,9 %), amène une réduction de la fraction sèche de 15 % (fig. 5b, 5c).

En ce qui concerne maintenant les températures caractéristiques de distillation, comme dans le cas des particules totales, l'élimination du point isolé représentant le kérosène rend nulle toute tendance que l'on pourrait dégager.

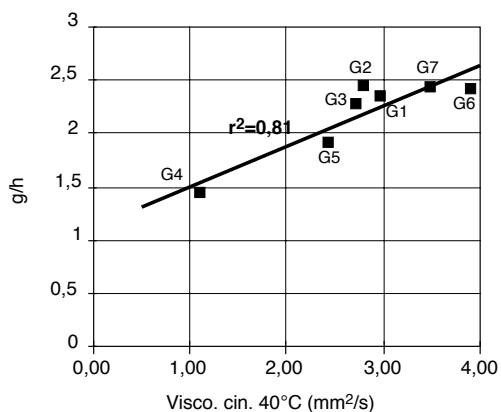


Figure 4a
Émissions de particules totales en fonction de la viscosité.
Influence of viscosity on PM emissions.

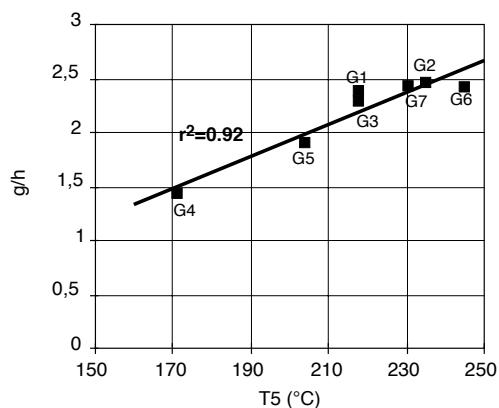


Figure 4b
Émissions de particules totales en fonction de la T5.
Influence of the T5 on PM emissions.

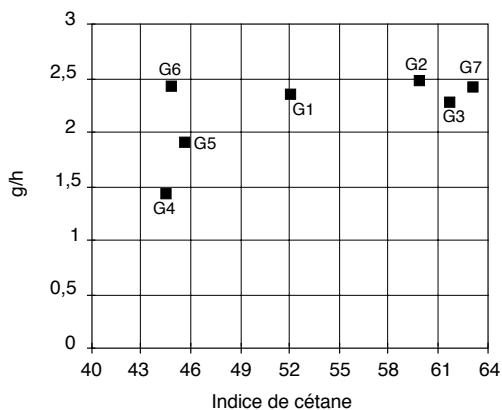


Figure 4c
Émissions de particules totales en fonction du cétane.
Influence of cetane on PM emissions.

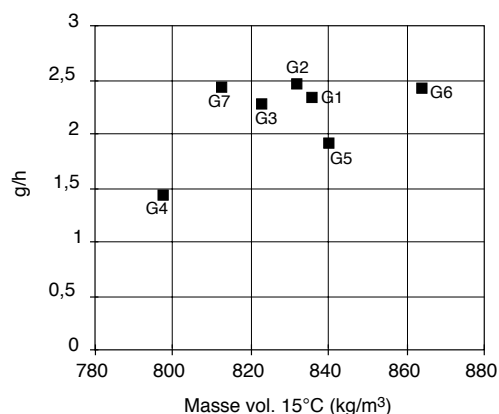


Figure 4d
Émissions de particules totales en fonction de la masse volumique.
Influence of density on PM emissions.

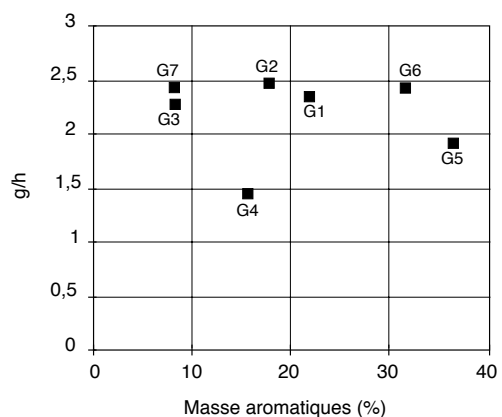


Figure 4e
Émissions de particules totales en fonction des aromatiques totaux.
Influence of total aromatics on PM emissions.

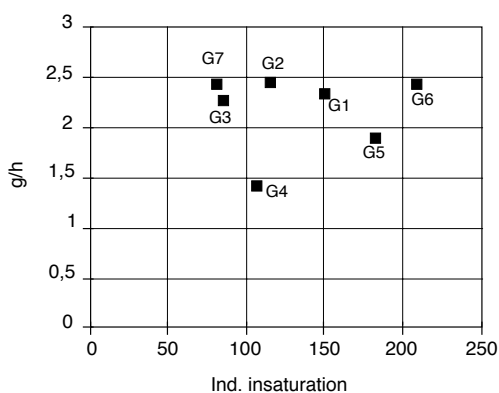


Figure 4f
Émissions de particules totales en fonction de l'indice d'insaturation.
Influence of the IS factor on PM emissions.

En effet, surtout dans le cas des T50 et T95, même avec des coefficients r^2 significatifs, on retrouve une répartition des points non homogènes sur la plage des températures, et que seul la présence isolée du kérosène est responsable de la pente des droites de régression (fig. 5d, 5e et 5f).

2.1.6 Les fractions volatiles des particules

Celles-ci varient dans le même sens que les émissions des HC : un accroissement de l'indice de cétane ou une réduction des aromatiques condensés (caractère insaturé du gazole) sera de nature à diminuer le pourcentage des fractions volatiles des particules (fig. 6a et 6b). En revanche, il n'y a pas de relation entre ces fractions et la viscosité ou la T5 (fig. 6c et 6d).

2.2 Les émissions d'aldéhydes

On raisonnera dans toute cette partie sur les aldéhydes totaux. Ceux-ci représentent la somme des structures de C1 à C8.

Les émissions des aldéhydes ne sont pas sensibles de façon significative aux paramètres carburant ; seul le gazole d'hydrocraquage (G7) s'écarte de l'ensemble des des gazoles avec des émissions plus faibles (fig. 7a à 7d).

2.3 Les émissions sonores

Les figures 8a à 8d représentent les niveaux de bruit, enregistrés à l'aide de l'appareil *Combustion Noise Meter* de chez AVL, en fonction des différents paramètres du gazole.

Le paramètre principal est l'indice de cétane ($r^2 = 0,66$) : l'accroissement de l'indice de 44 à 64 induit une réduction du niveau sonore de 2,2 dB(A).

À travers la corrélation entre caractéristiques des carburants, on retrouve aussi un lien avec le taux d'aromatiques. De plus, pour un même niveau d'aromatiques, les gazoles ayant de faibles points initiaux (cas du G3 et du G4) conduisent à des niveaux de bruit d'environ 2 dB(A) plus élevés.

3 DISCUSSION

Après l'examen de cet ensemble de résultats, on va chercher à extraire les paramètres influant sur les émissions des polluants considérés. Notre analyse a porté sur la densité, l'indice de cétane, les températures caractéristiques de distillation, la viscosité cinématique, les teneurs en aromatiques totaux et en polyaromatiques.

De manière générale le kérosène (G4) présente un comportement différent par rapport aux autres gazoles : en raison des ses caractéristiques physicochimiques, il fournit des niveaux des particules plus faibles, mais induit aussi des émissions gazeuses et sonores plus élevées. Pour ces raisons, il est traité à part dans les paragraphes de discussion qui suivent.

3.1 Effet de la densité

Pour les gazoles G1, G2 et G5 à G7, un accroissement de densité est corrélé à un accroissement des émissions de CO, d'hydrocarbures imbrûlés et des fractions volatiles des particules. Toutefois, les 2 gazoles présentant des points initiaux faibles (inférieurs à 170 °C) se comportent différemment : ils ont les niveaux d'émission les plus élevés.

Pour les NO_x , les aldéhydes et les particules, il n'y a pas de liaison entre densité et émissions. Alors que ce résultat est connu pour les NO_x , il est plus surprenant pour les particules. Ce phénomène est en plus contraire à ce qui a pu être vu sur moteur à injection indirecte [2] et [3].

3.2 Effet de l'indice de cétane

L'accroissement de l'indice de cétane induit une réduction des émissions de CO, HC, de la fraction volatile des particules et du bruit. Ce paramètre est sans effet sur les NO_x . Ces comportements sont identiques à ce que l'on peut rencontrer sur les moteurs à préchambre et conforme à ce qui a pu être publié [4].

Il existe cependant un point pour lequel le comportement est contraire à celui que l'on connaît sur moteur à injection indirecte : il s'agit de l'évolution des particules.

On a vu que, exception faite du kérosène, les émissions des particules totales ne sont pas influencées par la variation de l'indice de cétane. Celui-ci agit sur la répartition VOF/IOF. Par exemple, la partie sèche des particules augmente de 44 % lors du passage de l'indice de cétane de 45 à 60, tandis que la masse totale n'est pas modifiée (effet bénéfique du cétane sur les VOF).

Une explication du phénomène peut être avancée en supposant que l'accroissement de l'indice de cétane, qui se traduit par une réduction du délai d'auto-inflammation, peut conduire sur un moteur à injection directe à initier la combustion alors que des zones "à fortes quantités de carburant" subsistent. Ceci favorisera alors la formation des particules. Par ailleurs, réduire le délai ayant un effet analogue à une augmentation de

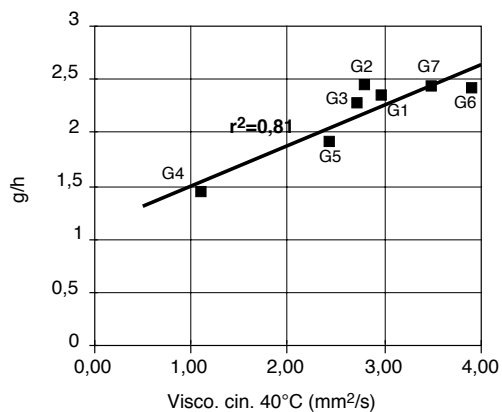


Figure 5a

Évolution du niveau des IOF en fonction du cétane.
Influence of cetane on IOF emissions.

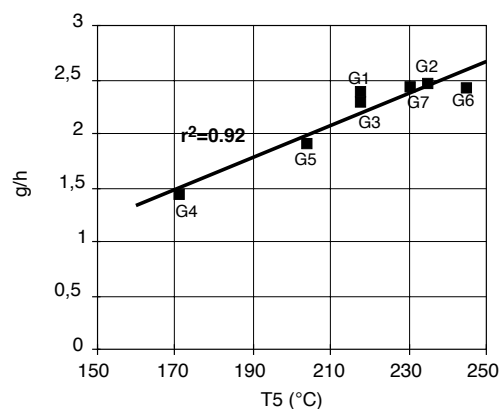


Figure 5b

Évolution du niveau des IOF en fonction des monoaromatiques.
Influence of monoaromatics on IOF emissions.

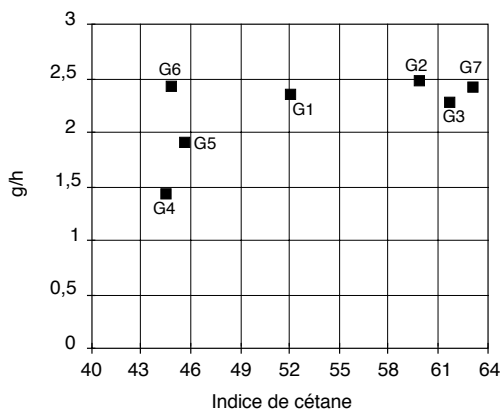


Figure 5c

Évolution du niveau des IOF en fonction des composés di + triaromatiques.
Influence of di + triaromatics on IOF emissions.

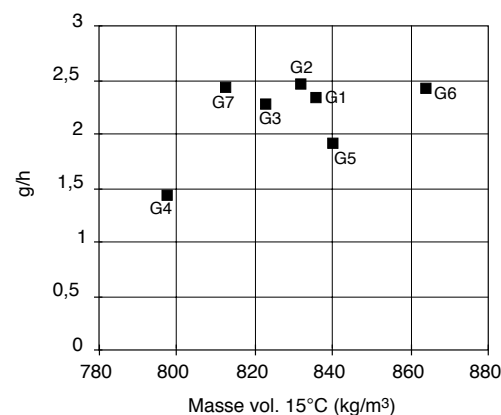


Figure 5d

Évolution du niveau des IOF en fonction de la T5.
Influence of the T5 on IOF emissions.

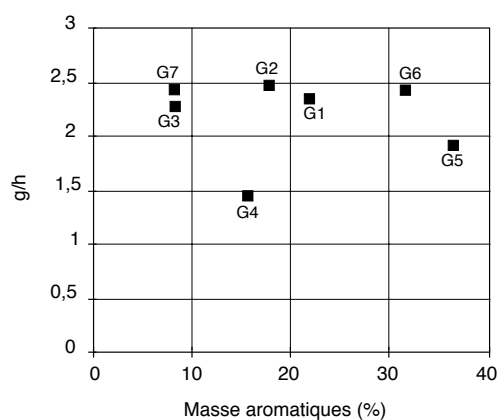


Figure 5e

Évolution du niveau des IOF en fonction de la T50.
Influence of the T50 on IOF emissions.

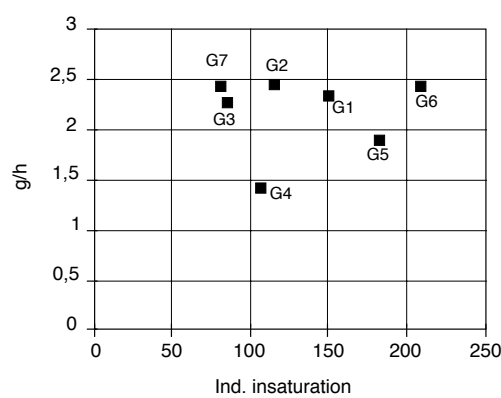


Figure 5f

Évolution du niveau des IOF en fonction de la T95.
Influence of the T95 on IOF emissions.

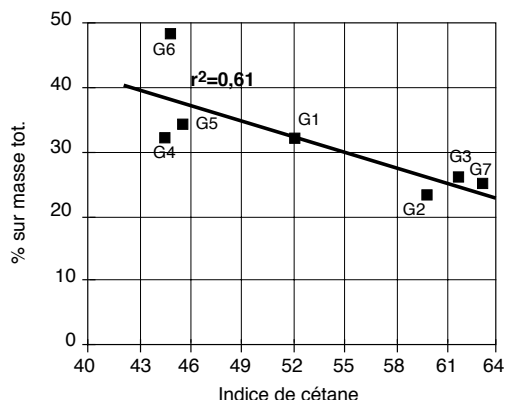


Figure 6a
Émissions de VOF en fonction du cétane.
Influence of cetane on VOF emissions.

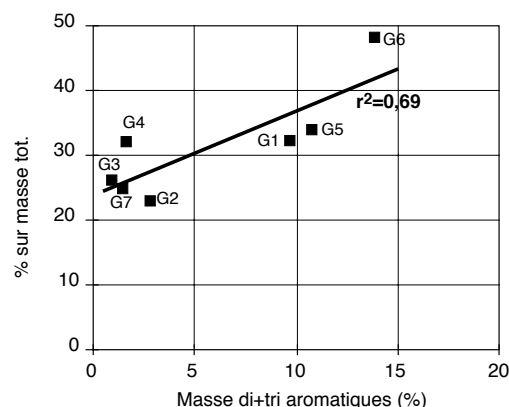


Figure 6b
Émissions de VOF en fonction des di + triaromatiques.
Influence of di + triaromatics on VOF emissions.

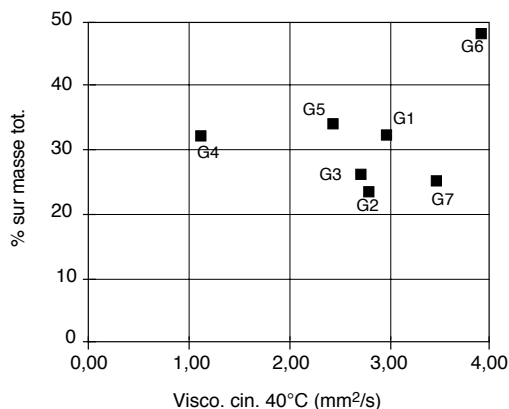


Figure 6c
Émissions de VOF en fonction de la viscosité.
Influence of viscosity on VOF emissions.

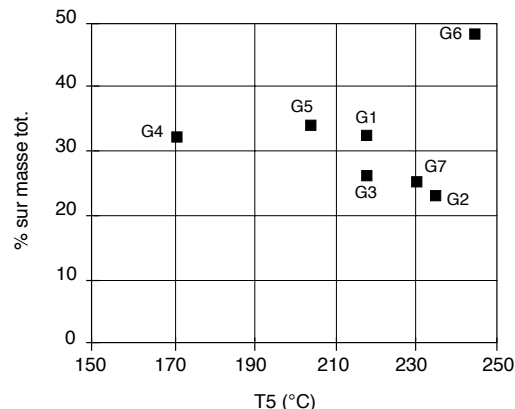


Figure 6d
Émissions de VOF en fonction de la T5.
Influence of the T5 on VOF emissions.

l'avance à l'injection, ceci peut conduire à la réduction du CO et des HC.

L'hypothèse avancée ne prend en compte que l'aspect de formation des particules dans la zone de prémélange, la partie concernant leur évolution et notamment leur postoxydation n'est pas directement accessible dans nos résultats.

Bien qu'à ce jour, méconnu, ce résultat est conforme à ceux obtenus dans le programme EPEFE, sur ces convertisseurs (5).

3.3 Effet de la viscosité

Il s'agit-là d'un paramètre purement physique influençant directement les caractéristiques d'injection, et en

particulier la taille des gouttelettes du jet du carburant. On observe au cours de cette étude que seuls le CO et les particules sont dépendants de la viscosité, mais dans des sens opposés. L'effet sur les HC est à peine visible mais suivrait celui rencontré pour le CO : l'accroissement de viscosité tendrait à réduire le CO alors qu'il augmente les particules. Alors que sur les moteurs à préchambre équipés de pompes mécaniques, la viscosité a un effet direct sur le calage de l'injection, il n'en est rien ici en raison de la régulation électronique.

Il reste donc à quantifier l'effet de la viscosité sur la partie physique du délai d'auto-inflammation, soit à travers la mesure des caractéristiques du jet telles que la taille des gouttelettes et la pénétration du spray, soit à travers le relevé des pressions d'injection.

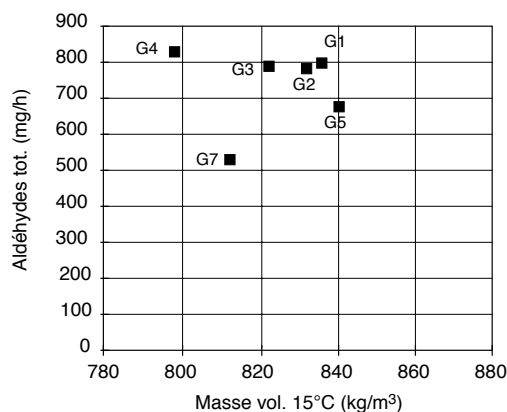


Figure 7a

Émissions d'aldéhydes en fonction de la masse volumique.
Influence of density on aldehyde emissions.

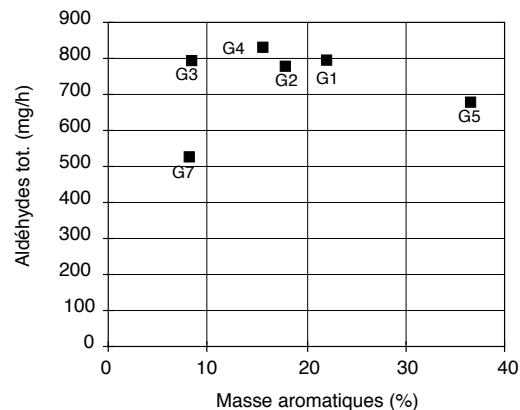


Figure 7b

Émissions d'aldéhydes en fonction des aromatiques totaux.
Influence of total aromatics on aldehyde emissions.

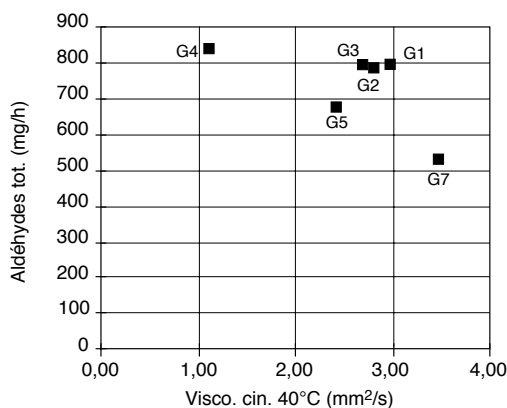


Figure 7c

Émissions d'aldéhydes en fonction de la viscosité.
Influence of viscosity on aldehyde emissions.

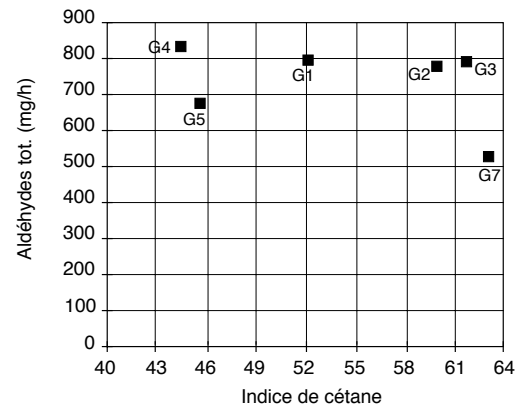


Figure 7d

Émissions d'aldéhydes en fonction du cétane.
Influence of cetane on aldehyde emissions.

3.4 Effet des températures caractéristiques de distillation

Sur l'ensemble des travaux présentés ici, on n'a pas dégagé d'effet significatif de la température des 95 % distillés, ce qui est en accord avec les travaux connus à ce jour. Néanmoins, il est un paramètre qui semble important : il s'agit de la fraction la plus légère du gazole. Il semblerait que de faibles points initiaux de distillation soient défavorables, notamment sur le CO, mais auraient un effet bénéfique sur les particules ; tel est le cas entre les deux gazoles G2 et G3 qui présentent une différence d'environ 20 °C sur les T5.

On peut penser que les fractions légères sont constituées de molécules à faible indice de cétane, et que c'est donc le reflet de ce paramètre que l'on enregistre au travers de ce résultat.

3.5 Effet de l'aromaticité

L'accroissement des aromatiques totaux et notamment des polyaromatiques provoque un accroissement des émissions de CO, HC, et surtout de la partie volatile des particules. La masse totale de celles-ci est globalement peu sensible au paramètre aromaticité et par conséquent, c'est la partie sèche qui est diminuée.

En ce qui concerne les NO_x, la pente des droites de régression est quasi nulle ; il est toutefois intéressant de remarquer le bon comportement du G3 (dérivé du G2 par hydrotraitement).

3.6 Incidence du point de fonctionnement

Sur les 3 points de fonctionnement étudiés, les variations que l'on a enregistrées suivent toujours les mêmes

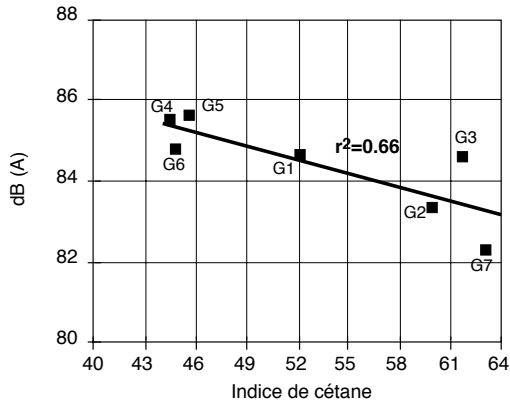


Figure 8a
Émissions de bruit en fonction de l'indice de cétane.
Influence of cetane on the noise level.

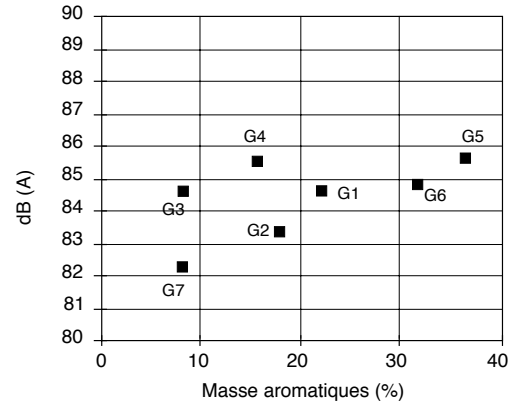


Figure 8b
Émissions de bruit en fonction des aromatiques totaux.
Influence of total aromatics on the noise level.

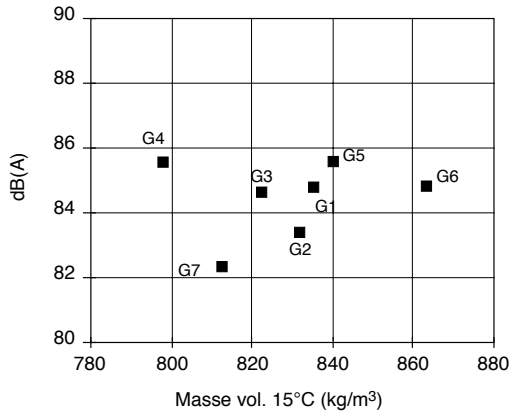


Figure 8c
Émissions de bruit en fonction de la masse volumique.
Influence of density on the noise level.

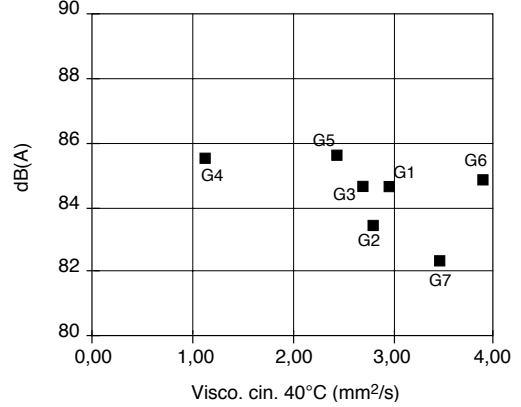


Figure 8d
Émissions de bruit en fonction de la viscosité cinématique.
Influence of viscosity on the noise level.

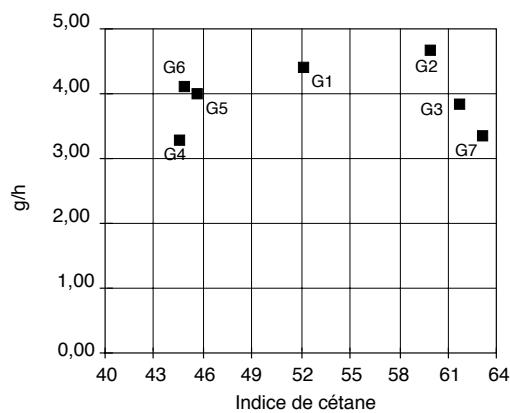


Figure 9a
Évolution du niveau des IOF en fonction de l'indice de cétane
P2 – 2500 tr/min – 2 bar PME.
Influence of cetane on IOF emissions – 2500 RPM – 2 bar BMEP.

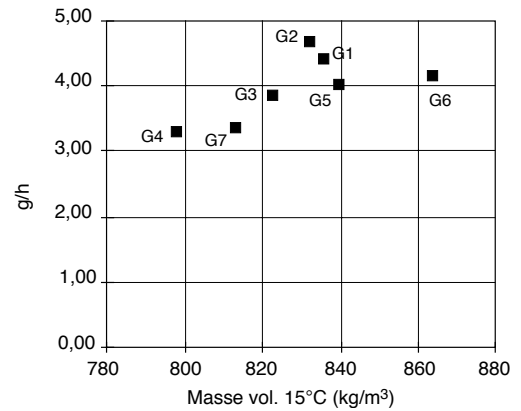


Figure 9b
Évolution du niveau des IOF en fonction de la masse volumique.
Influence of density on IOF emissions.

tendances, surtout vis-à-vis des polluants gazeux. En ce qui concerne les émissions des particules il faut remarquer que l'incidence de l'indice de cétane sur la formation des parties sèches diminue lorsque la charge augmente et qu'une influence plus forte est exercée par le paramètre masse volumique (fig. 9a et 9b). De plus, à plus fort régime et à plus forte charge, on retrouve un comportement identique à celui obtenu sur moteur à préchambre.

De plus, on ne s'est penché ici que sur les conditions standard de fonctionnement moteur. Il faudra approfondir ce dossier à partir de l'étude en conditions décalées (avance à l'injection, taux d'EGR), à froid et en transitoire.

CONCLUSION

L'étude a permis de caractériser la sensibilité d'un moteur Diesel d'automobile suralimenté à injection directe vis-à-vis des paramètres gazoles au travers de son fonctionnement stabilisé à chaud au banc moteur, et en conditions standard de réglage (avance à l'injection et taux d'EGR).

La matrice des gazoles utilisée pendant l'étude a permis de balayer une plage de variation assez importante de masse volumique, de viscosité, de composition chimique (caractérisée par la teneur en aromatiques et par l'indice d'insaturation), d'indice de cétane et des températures caractéristiques de distillation.

Pour le CO, les hydrocarbures imbrûlés, les fractions volatiles et les fractions sèches des particules, le paramètre le plus influent est l'indice de cétane ; en particulier, l'accroissement de l'indice amène une diminution du CO, des HC et des VOF, et, contrairement à ce que l'on connaît sur moteur à préchambre, se traduit par une augmentation de la partie sèche des particules. Cette influence négative sur les IOF est toutefois réduite sur les points de fonctionnement à plus forte charge.

Les émissions des particules totales sont en revanche sensibles aux paramètres T5 et viscosité, grandeurs qui ont une influence directe sur les caractéristiques d'injection.

En ce qui concerne les émissions des NO_x, celles-ci sont plutôt peu influencées par le facteur carburant. Le gazole obtenu par hydrotraitement poussé se démarque des 6 autres gazoles par un niveau d'émissions plus faible.

La température des 95 % distillés n'a pas d'influence sur le comportement de ce moteur, mais l'effet des fractions légères du gazole semble être important vis-à-vis des émissions des particules et du CO.

Globalement, le moteur Diesel à injection directe étudié ici avec ses réglages d'origine montre un comportement aux tendances proches de son homologue à préchambre vis-à-vis des polluants gazeux et du bruit, mais il réagit de manière différente lorsqu'on considère la formation des particules, et notamment de leur partie sèche.

Au travers des hypothèses avancées, on s'aperçoit en effet que le fonctionnement de ce moteur Diesel à injection directe est plus sensible aux paramètres qui pilotent l'initiation de la combustion. Et pour cela, l'ensemble des résultats présentés mériterait l'appui d'une mesure directe des caractéristiques dimensionnelles du jet de carburant. Ceci dans le but, en particulier, de pouvoir caractériser la contribution de la viscosité sur le délai physique d'auto-inflammation.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 Montagne X. *et al.* (1991), Relation between chemical composition and pollutant emissions from Diesel engines. *13th World Petroleum Congress.*
- 2 Betts W.E. *et al.* (1992), The influence of Diesel fuel properties on particulate emissions in european cars, *SAE 922190.*
- 3 Floy S.A. *et al.* (1993), The influence of Diesel properties on particulate emissions in a catalyst equipped european car, *SAE 932683.*
- 4 *Van Bekoeven Report* (1994), Effect of fuel qualities and related vehicle technologies on European vehicle emissions. Working Group European Commission Industry, Technical Group 1,
- 5 Epefe Report, *CEC*, janvier 1996.

Manuscrit définitif reçu en juillet 1997