

CARBURANTS

Article écrit par [Daniel BALLERINI](#), [Jean-Claude GUIBET](#), [Xavier MONTAGNE](#)

I. Prise de vue

II. Les essences

- . Propriétés physiques
 - Propriétés thermiques
- . Propriétés chimiques : définition des indices d'octane
- . Types d'essences disponibles
- . Formulation des essences
- . Additifs de finition

III. Le gazole

- Propriétés physiques
- . Propriétés chimiques : l'indice de cétane
- . Formulation du gazole
- . Traitements complémentaires du gazole

IV. Le carburéacteur

- . Mode de combustion
 - Caractéristiques exigées
- . Formulation du carburéacteur

V. Les carburants lourds

VI. Les carburants et la protection de l'environnement

- . Désulfuration des carburants
- . Relations entre les caractéristiques des carburants et les émissions de polluants
 - Les carburants et la formation d'ozone troposphérique
- . Recherche de nouveaux carburants peu polluants
 - Le gaz de pétrole liquéfié*
 - Le gaz naturel*
 - « L'aquazole »*
- . Les carburants et l'effet de serre

VII. Les biocarburants

VIII. Bibliographie

Prise de vue

Les carburants sont des produits dont la combustion en présence d'air permet le fonctionnement des moteurs thermiques à pistons (moteurs à essence ou Diesel) ou à flux continu (réacteurs d'avion, turbines à gaz). À la famille des carburants se rattachent également les ergols et les propergols utilisés pour la propulsion des fusées. Il s'agit de produits très

spécifiques (hydrogène liquide, diméthylhydrazine, peroxyde d'azote...) dont la combustion met en œuvre non plus de l'air mais de l'oxygène pur à l'état liquide.

Il ne faut pas confondre les termes « carburants » et « combustibles », ce dernier désignant les produits utilisés pour l'obtention d'énergie thermique dans les chaudières, les fours industriels et les centrales.

Dans presque tous les cas, les carburants sont des liquides, ce qui constitue un grand avantage sur le plan de la compacité, de la facilité de mise en œuvre et de la sécurité. Toutefois, l'utilisation de carburants gazeux, et principalement de gaz naturel dont les réserves sont importantes, pourrait se développer au cours des prochaines décennies.

Les carburants classiques proviennent essentiellement du pétrole. Celui-ci subit des opérations de raffinage très poussées pour obtenir plusieurs types de produits (essences, gazole, carburéacteur, carburants lourds) destinés à alimenter des véhicules très différents, depuis les voitures particulières jusqu'aux avions et navires.

En dehors du pétrole, d'autres filières permettent d'obtenir des carburants :

- La première concerne les biocarburants, qui proviennent de la biomasse, plus précisément de céréales (blé, maïs), de plantes sucrières (betteraves, canne à sucre), d'huiles végétales (colza, tournesol, soja, palme) et, en cours de développement, de biomasse lignocellulosique (bois, pailles,...). Cette voie est intéressante parce qu'elle fait appel à des énergies renouvelables. Son développement a été longtemps limité par sa faible compétitivité sur le plan économique. De nouveaux enjeux en termes de rejets de CO₂ font que cette filière est actuellement en plein essor.
- La deuxième, avec le procédé Fischer-Tropsch utilise comme matière première le charbon, via le mélange CO + H₂ (gaz de synthèse), ou même l'acétylène. Cette filière carbochimique, appelée CTL (Coal to Liquids), a été utilisée en Allemagne pendant la Seconde Guerre mondiale et en Afrique du Sud jusqu'au début des années 1990. De nouveaux procédés, peu émetteurs de CO₂, font que l'on observe un regain d'intérêt pour ce type de filière.
- La dernière consiste à faire appel au gaz naturel utilisé soit tel quel, soit après de profondes transformations chimiques. Ainsi, par synthèse de type Fischer-Tropsch modifiée, il est possible d'obtenir un carburant liquide pouvant être utilisé sur un véhicule Diesel sans nécessiter de profondes modifications. Cette voie appelée GTL (Gas to Liquids), dont le coût a été fortement réduit ces dernières années, est en cours de développement.

Les spécifications des carburants sont des réglementations relatives à leurs caractéristiques et à leur composition. Elles résultent d'un compromis entre les performances des véhicules (rendement, puissance, comportement en endurance, agrément de conduite), la fourniture de carburants, en quantités suffisantes et à un coût abordable, et le respect de l'environnement.

Les spécifications des carburants sont établies, non plus localement pays par pays, mais par grandes zones d'utilisation (Union européenne, États-Unis, Japon). Cependant, ce souci d'uniformisation n'exclut pas la nécessité de tenir compte des particularités climatiques et des fluctuations saisonnières de chaque pays. Ainsi, les essences et le gazole ne sont pas tout à fait identiques aux Pays-Bas et en Espagne, par exemple, et diffèrent légèrement, au sein d'un même pays, selon la saison.

Les essences

Les essences alimentent les moteurs d'automobile à allumage commandé par étincelle dits, de façon impropre, « à explosion ». À cette catégorie se rattachent le GPL et des produits à usages spéciaux alimentant notamment les motocycles, les avions munis de moteur à piston, les voitures de compétition.

Les essences sont utilisées en quantité massive dans le monde entier, avec des consommations annuelles de l'ordre de 385 millions de tonnes (Mt) aux États-Unis, 113 Mt en Europe dont 12 Mt en France.

Les États-Unis consomment deux fois plus d'essences en masse que de gazole. En revanche, en France, où les véhicules Diesel sont très largement diffusés, la situation est complètement inversée puisque la consommation de gazole est supérieure à 30 Mt et le rapport essences/gazole est maintenant inférieur à 0,40.

Les différents types d'essences présentent généralement des caractéristiques physiques proches les unes des autres, mais différent par leur composition chimique et leur teneur en additifs.

Propriétés physiques

La *masse volumique* des essences fait l'objet d'un encadrement précis puisque, pour l'Eurosuper, distribué partout en Europe, elle doit être comprise entre 0,720 et 0,775 kg/l à 15 °C.

Le respect de cet intervalle est nécessaire pour une utilisation satisfaisante du véhicule. En effet, les constructeurs automobiles en tiennent compte lors de la mise au point des systèmes d'alimentation du moteur et choisissent, en conséquence, les débits des différents organes mécaniques (injecteurs, pompe, etc.). Lors de l'utilisation réelle, une variation trop importante de masse volumique entre différents approvisionnements pourrait perturber les réglages, surtout dans les conditions de fonctionnement où la régulation est difficile (démarrage, mise en action c'est-à-dire fonctionnement du véhicule pendant les premiers kilomètres, accélération).

La *volatilité* des essences doit également être soigneusement contrôlée, afin d'obtenir à la fois un fonctionnement satisfaisant du véhicule et une réduction d'émission d'hydrocarbures par évaporation. Elle est définie, d'une part, par la pression de vapeur, et, d'autre part, par la courbe de distillation.

La pression de vapeur d'une essence (dite pression de vapeur Reid ou PVR) correspond à la pression créée par le passage à l'état gazeux des constituants les plus volatils dans une enceinte fermée – le réservoir – à une température donnée. Elle est généralement déterminée à 37,8 °C – c'est-à-dire à 100 °F (degrés Fahrenheit) – et s'exprime en valeurs relatives, à partir de la pression atmosphérique. Elle est comprise, selon les pays et les saisons, entre 450 et 1 000 hectopascals (hPa).

La courbe de distillation d'une essence représente quant à elle la fraction évaporée en volume, à pression atmosphérique, en fonction de la température. Le plus souvent, on définit quelques repères sur cette courbe : point initial (P.I.), point final (P.F.), fractions évaporées en pourcentage (volume) à 70 °C, 100 °C, 150 °C, désignées par les sigles

E 70, E 100, E 150 (E pour évaporées).

Une volatilité minimale (pression de vapeur et repères sur la courbe de distillation) est nécessaire, surtout en période d'hiver, pour permettre le démarrage du véhicule et obtenir un fonctionnement satisfaisant. Inversement, par temps chaud, il faut limiter la volatilité pour éviter des phénomènes d'évaporation intempestive (percolation, zones de carburants gazeux, émissions par évaporation) et minimiser les rejets d'hydrocarbures légers dans l'atmosphère.

Ces contraintes sont prises en compte dans la fixation des spécifications de la volatilité des essences en Europe (tabl. 1) . Par exemple, pour l'Eurosuper, six classes de volatilité sont définies en Europe. Chaque pays choisit celles qui sont les mieux adaptées à ses particularités climatiques et les utilise selon les saisons (été, automne-printemps, hiver).

Spécifications des essences de type Eurosuper

Classe	Température	Pression de vapeur	Point de distillation	Point de distillation	Point de distillation	Point de distillation	Point de distillation	Point de distillation
1	30°C	45	10	10	10	10	10	10
3	30°C	45	10	10	10	10	10	10
6	30°C	45	10	10	10	10	10	10

En Europe, huit classes d'essence de type Eurosuper sont définies (norme EN 228). La France a retenu les classes 1, 3 et 6. Elles sont distribuées de la façon suivante: classe 1 entre le 20 juin et le 9 septembre, classe 3 entre le 10 septembre et le 31 octobre, classe 6 entre le 1er ...

Une dernière caractéristique de la volatilité des essences est le point final de distillation qui ne doit pas être trop élevé (210 °C au maximum), afin de limiter la formation de dépôts à l'intérieur du moteur, résultant d'une combustion incomplète.

Propriétés thermiques

Dans ce domaine, la caractéristique la plus importante des essences est le pouvoir calorifique qui exprime la quantité d'énergie disponible par unité de masse ou de volume de carburant. On s'intéresse surtout au pouvoir calorifique volumique qui est de l'ordre de 32 000 kilojoules par litre, avec des variations (de 2 à 3 %) d'un approvisionnement à l'autre.

Par comparaison, le pouvoir calorifique volumique du gazole est plus élevé (d'environ 10 %). Si l'on ne tenait compte que de ce seul critère, le prix du litre d'essence devrait être plus bas que celui du gazole. La situation réelle est en fait inverse, essentiellement en raison d'une plus faible taxation du gazole.

L'utilisation de carburants à l'état liquide présente l'avantage d'une très grande compacité. Ainsi, dans un litre d'essence liquide, l'énergie stockée est près de quatre fois plus élevée que dans un litre de gaz naturel, même si celui-ci est comprimé à 20 mégapascals (à pression atmosphérique, le rapport des compacités atteindrait 800 !).

Propriétés chimiques : définition des indices d'octane

Avant d'aborder l'examen de la structure chimique des carburants, il est nécessaire de rappeler les différents

mécanismes possibles de combustion dans un moteur à essence.

Le processus normal consiste en une combustion rapide (quelques millisecondes), mais progressive, du mélange air-essence grâce à la propagation d'un front de flamme issu de l'étincelle jaillissant entre les électrodes de la bougie d'allumage.

Le phénomène parasite qu'il faut absolument éviter est le cliquetis. Il s'agit d'une auto-inflammation, instantanée et en masse, d'une partie du mélange non encore brûlé, porté à température et pression élevées par le mouvement du piston et par le dégagement d'énergie dû à la propagation du front de flamme. Il en résulte une augmentation locale de pression, suivie de vibrations de la masse gazeuse, entraînant un bruit caractéristique qui évoque un tintement métallique, d'où l'origine du terme cliquetis. Ce dernier entraîne des contraintes mécaniques et thermiques trop sévères, génératrices – parfois en quelques secondes – d'incidents destructifs graves : rupture du joint de culasse, grippage ou fusion partielle du piston, détérioration de la culasse et des soupapes. C'est pourquoi, depuis l'origine des moteurs, on a conçu et réalisé des essences qui suppriment tout risque de cliquetis.

Pour caractériser le comportement des essences ou de leurs constituants vis-à-vis de la résistance au cliquetis, la méthode universellement retenue depuis les années 1920 consiste à adopter la notion classique d'*indice d'octane*.

Le comportement de l'essence est comparé à celui de deux hydrocarbures purs choisis comme références. Il s'agit respectivement du 2,2,4 triméthylpentane (encore appelé iso-octane), très résistant à l'auto-inflammation et auquel on attribue arbitrairement l'indice d'octane 100, et du *n*-heptane, peu résistant et qui reçoit, de ce fait, l'indice d'octane 0.

Un carburant présente un indice d'octane X s'il se comporte, dans des conditions expérimentales déterminées, comme un mélange de X % en volume d'iso-octane et de $(100-X)$ % de *n*-heptane.

La mesure des indices d'octane s'effectue au moyen d'un moteur de laboratoire appelé CFR (Cooperative Fuel Research). Celui-ci présente une structure très robuste, afin de résister sans incident à un cliquetis prolongé. Le principe de la méthode consiste à augmenter progressivement le taux de compression du moteur CFR jusqu'à l'obtention d'une intensité « standard » de cliquetis repérée par un détecteur de pression implanté dans la chambre de combustion. Le taux de compression critique ainsi enregistré est comparé à deux valeurs relevées avec deux mélanges binaires iso-octane-*n*-heptane, de compositions voisines et connues.

Il existe deux procédures normalisées de détermination des indices d'octane : la méthode « Recherche » et la méthode « Moteur ». Les indices correspondants sont désignés par les sigles RON (Research Octane Number) et MON (Motor Octane Number).

Les distinctions entre ces deux procédures portent essentiellement sur les conditions de fonctionnement du moteur CFR, lors de la mesure ; ainsi, dans le premier cas (RON), le moteur tourne à 600 tr/min et le mélange air-carburant n'est pas réchauffé avant son admission dans le cylindre ; dans le second cas (MON), la vitesse de rotation atteint 900 tr/min et la température d'admission 150°C .

La plupart des essences classiques présentent un RON compris entre 95 et 99, tandis que le MON se situe, le plus souvent, entre 85 et 89 ; plus précisément, la différence RON-MON est généralement proche de 10 points.

Les deux indices d'octane permettent donc d'estimer la résistance à l'auto-inflammation d'une essence. Plus les

indices d'octane sont élevés, plus le constructeur automobile pourra augmenter le taux de compression et optimiser le déroulement de la combustion sans risque de cliquetis.

Ainsi, un accroissement d'un point des indices d'octane permet d'augmenter, en moyenne, de 1 % le rendement et la puissance spécifique d'un moteur, au stade de sa conception. Cependant, contrairement à une fausse affirmation pourtant très répandue, le fait d'utiliser, sur un véhicule donné, une essence d'indices d'octane supérieurs aux valeurs minimales préconisées par le constructeur ne provoque aucun gain de rendement, de puissance ou d'agrément de conduite.

Le plus souvent, on accorde une attention toute particulière au risque de cliquetis à haut régime (au-delà de 4 000 tr/min) dont les conséquences, sur le plan mécanique, sont redoutables. C'est le MON qui reflète le mieux la tendance au cliquetis à haut régime ; inversement, le RON est un meilleur indicateur du risque de cliquetis à bas régime (de 1 500 à 2 500 tr/min).

Les deux indices présentent chacun une utilité, ce qui explique qu'ils soient, l'un et l'autre, pris en compte dans l'élaboration des spécifications des essences.

Types d'essences disponibles

Trois types d'essences d'indices d'octane différents peuvent être principalement proposés en Europe (tabl. 2) :

Indices d'octane des essences en Europe

Type d'essence	Indices d'octane minimum	
	RON	MON
Supercarburant classique	87	80
Eurosuper	95	85
Super 98 (sans plomb)	98	87
GPL	89	89

Valeurs minimales des indices d'octane pour les différents types d'essences distribuées en Europe.

– Le supercarburant classique est caractérisé par des valeurs minimales de RON et de MON, respectivement, de 98 et 87. Avant le 1^{er} janvier 2000, il contenait de faibles quantités d'alkyles de plomb (0,15 g de métal par litre), ce qui permettait d'atteindre commodément et au moindre coût les valeurs requises d'indices d'octane. Désormais, l'addition de plomb dans les essences est interdite en vue de réduire la pollution atmosphérique et pour permettre un fonctionnement satisfaisant des pots catalytiques.

– L'Eurosuper est conforme à la norme EN 228 (Comité européen de normalisation) ; il doit présenter un RON minimal de 95 et un MON minimal de 85. Ce sera, dans les prochaines années, le type d'essence le plus répandu en Europe.

– Le super 98 (SP 98 pour sans plomb), parfois appelé « super plus », présente des RON et MON supérieurs ou égaux, respectivement, à 98 et 87. Ces deux valeurs ne correspondent pas à des spécifications officielles, mais à des objectifs de qualité que se fixent les raffineurs en accord avec les constructeurs automobiles. Le SP 98 n'est aujourd'hui largement diffusé que dans quelques pays d'Europe comme la France, l'Allemagne et les Pays-Bas.

Il faut également citer, dans la même catégorie que les essences, puisqu'il alimente des véhicules du même type, le GPL-carburant dont l'indice d'octane MON doit être supérieur à 89. Pour ce carburant, l'indice RON ne fait pas l'objet de

spécifications, mais il atteint en pratique des valeurs élevées et supérieures à 98.

En France, les véhicules à essence munis de pots catalytiques sont tous adaptés à l'emploi de l'Eurosuper ; ils peuvent aussi utiliser le SP 98, ce qui leur confère une protection supplémentaire contre le cliquetis, sans que cela soit nécessaire ou procure un avantage déterminant en matière de performance.

Les véhicules anciens s'alimentent au supercarburant classique dont la préparation a été modifiée depuis le 1^{er} janvier 2000. Les véhicules qui doivent encore utiliser ce type de carburant peuvent rencontrer des risques de récession des sièges de soupapes qui étaient protégés par la présence de plomb dans les essences. Pour éviter ce problème, des additifs à base de potassium sont ajoutés dans les formulations. Ces nouveaux additifs, comme les anciens d'ailleurs, exercent un rôle de lubrifiant solide au niveau des sièges de soupapes d'échappement et empêchent donc leur usure prématurée.

Formulation des essences

Elle consiste à mélanger les effluents provenant de différentes unités de raffinage afin d'obtenir, au moindre coût, des produits finis conformes aux spécifications. Les contraintes les plus sévères concernent essentiellement la volatilité, les indices d'octane et la limitation des teneurs en certains composants (benzène, autres hydrocarbures aromatiques, oléfines) qui sont susceptibles d'accroître la pollution atmosphérique.

Les produits des raffineries classiques utilisés pour la formulation des essences sont (tabl. 3) :

Indices d'octane RON et MON des constituants des essences

Type de produit	RON	MON
Essence	95	82
Essence	98	85
Essence légère (distillation directe)	98	87
Effluent de polygène (propane)	94	85
Effluent de base (propane)	95	86
Effluent de base (C ₃)	115	105
Essence légère de craquage catalytique	95	85
Essence légère de craquage catalytique	93	83
Essence lourde de craquage catalytique	95	85
Alcane	95	84
Alcane	95	82
Alcane (isomérisation de produits légers)	94	83
Méthyltertiobutyléther (MTBE)	115	105
Éthyltertiobutyléther (ETBE)	115	105

Ordres de grandeur des indices d'octane RON et MON des différents produits de raffinage entrant dans la composition des essences. Afin de respecter les spécifications, l'obtention d'une essence implique, de la part du raffineur, une sélection très rigoureuse de ces différents composés.

- Des effluents de reformage catalytique ou reformats ; leur RON est ajustable entre 95 et 115 selon les conditions qui règnent lors de ce procédé de raffinage ; leur MON peut varier de 85 à 105 ; ce sont des produits riches en aromatiques, mais sans oléfines.
- Des essences de craquage catalytique, caractérisées par de fortes teneurs en oléfines et des MON souvent médiocres s'abaissant jusqu'à 80-82 ; leur quantité dans la composition des essences est soigneusement contrôlée afin de respecter les spécifications de MON.
- Des effluents (alkylats, isomérisats, dimères d'oléfines) obtenus par réaction de fractions C₃ et C₄ entre elles ; leurs indices d'octane sont généralement élevés, mais leur apport (en quantité) dans l'élaboration des essences est modeste.
- Des composés oxygénés, du type éther (métyltertiobutyléther ou MTBE, éthyltertiobutyléther ou ETBE) ; leurs

indices d'octane dépassent 110 pour le RON et 95 pour le MON ; la présence d'oxygène conférant aux essences des modifications de caractéristiques, leur teneur est limitée à 15 %.

– Des fractions légères (butane, isopentane, essence de distillation directe), principalement ajoutées pour ajuster les spécifications de volatilité.

Les effluents provenant de reformatage, de craquage catalytique et d'alkylation sont les principaux constituants des essences (tabl. 4) .

Composition moyenne des essences		
type de constituant	pourcentage (en 100 parties)	
	Europe	Etats-Unis
benzène	0,7	0,6
essence légère de distillation directe	39	4,0
isoprène	0,8	4,7
alkyle	3,8	13,0
autres (MIBK, E'WU)	1,8	1,8
essence de craquage catalytique	33,1	36,3
reformate	18,8	36,7
total	100	100

Composition moyenne des essences en Europe et aux États-Unis.

Lorsque l'addition d'alkyles de plomb était autorisée dans les essences, ceux-ci permettaient d'accroître les indices d'octane de 3 à 6 points, selon la dose de plomb (de 0,15 à 0,40 g de métal par litre). Depuis le 1^{er} janvier 2000, l'obtention d'indices d'octane élevés implique une sélection très rigoureuse des différents produits de raffinerie.

Additifs de finition

Les essences contiennent toujours des additifs en faible quantité – entre quelques dizaines et quelques centaines de parties par million (ppm).

Ce sont notamment :

- Des colorants (4 mg/l) permettant de distinguer les produits entre eux et d'éviter des mélanges frauduleux.
- Des anti-oxydants, assurant la bonne conservation des essences au stockage, même si celui-ci est toujours bref (quelques semaines au maximum).
- Des additifs anti-récession des sièges de soupapes.
- Des produits détergents ou surfactants empêchant la formation de dépôts dans le circuit d'admission (injecteurs, tubulure, soupapes) et les chambres de combustion du moteur. Les phénomènes d'encrassement doivent en effet être évités en raison de leurs inconvénients potentiels (perte d'agrément de conduite, augmentation de consommation de carburant et d'émission de polluants, accroissement de la tendance au cliquetis).

Le gazole

Toutes les propriétés demandées au gazole se justifient par les caractéristiques spécifiques du moteur Diesel.

Celui-ci aspire non pas un mélange air-carburant, comme dans le cas du moteur à essence, mais de l'air seul et le comprime fortement, provoquant ainsi son échauffement. À la fin de la phase de compression, le gazole, dosé par la pompe d'injection, est pulvérisé sous très haute pression (plus de 100 mégapascals) dans la chambre de combustion ; là, il est vaporisé et mélangé à l'air comprimé. La combustion naît par auto-inflammation dans une ou plusieurs zones de la chambre où sont réunies les conditions de température et de pression ainsi que les concentrations nécessaires au déclenchement du processus.

Contrairement aux moteurs à essence, le réglage de la puissance s'effectue non plus en modifiant, par un simple vannage, la quantité d'un mélange air-carburant de composition fixe, mais en ajustant le débit de carburant introduit dans un volume fixe d'air. Ces différentes particularités confèrent au moteur Diesel un bien meilleur rendement ; en revanche, sa puissance spécifique est limitée ; ce handicap est surmonté par une admission d'air sous pression (suralimentation) dans les moteurs dits « Diesel turbo ».

Propriétés physiques

Elles diffèrent quelque peu selon la zone d'utilisation en fonction des conditions climatiques. On distingue en effet les pays à climat tempéré comme la France, et ceux à climat « arctique » qui, en fait, englobent toutes les régions scandinaves.

La masse volumique du gazole doit être comprise entre 0,820 et 0,845 kg/l à 15 °C dans les pays tempérés, entre 0,800 et 0,845 kg/l dans les pays arctiques.

La fixation d'une valeur minimale de masse volumique se justifie par le souci d'obtenir une puissance suffisante pour le moteur, au moyen d'une pompe d'injection dont le réglage de débit s'effectue en volume ; plus la masse volumique du gazole est élevée, plus la quantité d'énergie délivrée à pleine puissance est importante. Par ailleurs, on impose une limite maximale à la masse volumique, afin de réduire les émissions de certains polluants et d'éviter la formation de fumées noires, à pleine puissance.

Tout comme l'essence, le gazole doit respecter des critères de volatilité minimale et maximale. Ainsi, en France, la fraction évaporée à 250 °C (E 250) doit être inférieure à 65 % (volume) et les fractions évaporées à 350 °C (E 350) et 370 °C (E 370) supérieures respectivement à 85 % et 95 % (volume). Le gazole présente une volatilité très inférieure à celle des essences et, de ce fait, ne subit pratiquement pas de perte par évaporation, ce qui constitue un sérieux avantage sur le plan environnemental.

L'extrême précision mécanique de la pompe d'injection des moteurs Diesel implique également, pour le gazole, des caractéristiques bien spécifiques de viscosité. Celle-ci doit être comprise entre 2 et 4,5 mm²/s, à 40 °C, dans les pays à climat tempéré ; des valeurs plus basses (entre 1,2 et 4 mm²/s) sont admises dans les régions scandinaves.

Le gazole doit traverser un filtre à mailles très fines (quelques micromètres) avant de pénétrer dans la pompe d'injection dont le fonctionnement risquerait d'être perturbé par des impuretés et des particules solides en suspension dans le liquide.

Or certains hydrocarbures paraffiniques entrant dans la constitution du gazole peuvent cristalliser partiellement à basse température et colmater le filtre, ce qui provoque une immobilisation complète du véhicule.

Il faut donc surveiller et contrôler efficacement la fluidité et la limpidité à froid du gazole. Plusieurs caractéristiques sont prises en compte : le point de trouble, le point d'écoulement et la température limite de filtrabilité. Cette dernière, appelée TLF, est la plus utilisée.

La TLF correspond à la température minimale pour laquelle un volume déterminé de gazole traverse, en un temps limite, un appareil de filtration bien défini. Dans les régions les plus tempérées d'Europe, on distingue six types de gazole (classes A à F) en fonction de leur comportement à froid, avec des TLF s'échelonnant entre $+5^{\circ}\text{C}$ et -20°C (tabl. 5) . Ainsi, en France, la TLF du gazole doit être inférieure à -15°C pendant toute la saison hivernale et à -20°C pour la qualité grand froid ; dans les pays scandinaves, la TLF est évidemment plus basse encore : de -26°C à -44°C selon la latitude.

Spécifications du gazole en Europe

Caractéristique	Norme EN 590	Norme EN 591
Masse volumique à 15°C (kg/l)	0,825	0,880
Viscosité à 40°C (mm ² /s)	2	4,5
Point de trouble (°C)		
ET50 (p. 50 vol)	5	10
ET90 (p. 90 vol)	10	15
ET95 (p. 95 vol)	15	20
Température limite de filtrabilité (°C)		
classe A	+5	-
classe B	0	-
classe C	-5	-
classe D	-10	-
classe E	-15	-
classe F	-20	-
Point de gel (°C)	11	-

Dans les pays à climat tempéré d'Europe, on distingue six classes de gazole qui se différencient par leur comportement à froid c'est-à-dire leur température limite de filtrabilité (T.L.F.). La France a retenu les classes B, E et F. Elles sont distribuées de la façon suivante: classe B entre le 1er mai et le 31 octobre, ...

Pour améliorer le comportement à froid du gazole, le raffineur dispose de plusieurs moyens (abaissement du point final de distillation, réduction du point initial, choix de fractions plus naphthéniques et aromatiques) qui sont cependant contraignants et coûteux. Il utilise également des additifs dits fluidifiants, qui, incorporés à des doses de 200 à 600 ppm, permettent de baisser la TLF de plus de 10°C .

Propriétés chimiques : l'indice de cétane

Dans le moteur Diesel, il est nécessaire que le gazole présente une structure chimique favorable à l'auto-inflammation. Cette qualité s'exprime par l'indice de cétane.

Le comportement du gazole est comparé à celui de deux hydrocarbures choisis comme références : le *n*-cétane, très auto-inflammable auquel on attribue l'indice de cétane 100, et l' α méthyl-naphtalène, très résistant à l'auto-inflammation et qui reçoit l'indice 0.

Un gazole présente un indice de cétane *X* s'il se comporte comme un mélange de *X* % de *n*-cétane et de (100 — *X*) % d' α méthyl-naphtalène.

La mesure normalisée de l'indice de cétane s'effectue sur un moteur CFR proche de celui qui est utilisé pour la détermination des indices d'octane, mais présentant évidemment une chambre de combustion du type diesel. On ajuste,

pour le gazole testé, le taux de compression du moteur de sorte que l'auto-inflammation se déclenche pour une position bien précise du piston.

Le taux de compression ainsi enregistré est comparé à deux valeurs obtenues avec deux mélanges connus de *n*-cétane et d' α méthyl-naphtalène.

Les spécifications européennes imposent, pour les zones à climat tempéré, un indice de cétane minimal de 51. Dans les régions plus septentrionales, celui-ci est plus faible (descendant jusqu'à 47), une bonne aptitude à l'auto-inflammation allant rarement de pair avec un comportement au froid satisfaisant.

L'indice de cétane ne joue pas le même rôle essentiel que les indices d'octane dans l'optimisation moteur-carburant ; en particulier, il exerce une influence plus faible sur le rendement du moteur. Cependant, un indice de cétane élevé contribue à améliorer de nombreuses qualités d'utilisation : démarrage aisé, bruit moins intense, notamment au ralenti à froid, émissions moins élevées de fumées blanches et noires, rejets moindres de polluants gazeux (monoxyde de carbone, hydrocarbures).

Formulation du gazole

Il faut d'abord noter que, sous l'angle du raffinage, le gazole présente globalement des caractéristiques physiques et une composition chimique proches de celles du fuel domestique utilisé pour le chauffage et pour l'alimentation de certains moteurs Diesel rustiques (tracteurs, engins de travaux publics, etc.). Toutefois, le gazole se distingue du fuel domestique par la présence en son sein de plusieurs additifs spécifiques, par un meilleur indice de cétane et par une désulfuration plus profonde.

Tout comme l'essence, le gazole est obtenu par mélange de plusieurs produits de raffinerie :

- des composés issus directement de la distillation du pétrole brut ;
- des effluents issus de la conversion des fractions lourdes en fractions moyennes (craquage catalytique, viscoréduction, cokéfaction, hydrocraquage...) ;
- des composés de synthèse provenant du gaz naturel via le mélange $\text{CO} + \text{H}_2$.

De façon générale, la fabrication du gazole fait intervenir deux grands types de réactions chimiques : la désulfuration et l'hydrogénation. La première permet d'atteindre de très bas niveaux de teneur en soufre maintenant spécifiés par les réglementations antipollution (10 ppm maximum en 2009) ; la seconde conduit à obtenir un niveau suffisant de l'indice de cétane et à une réduction des teneurs en aromatiques (limites spécifiées à 8 % en masse dès janvier 2009, en remplacement des 11 p 100 autorisés actuellement). Parfois, l'objectif ne peut être réalisé que grâce à l'adjonction d'additifs « pro-cétane » ; on utilise alors des produits fournisseurs d'oxygène libre, du type nitrates d'alkyle, qui favorisent le déclenchement de l'auto-inflammation. Dans les gazoles classiques, les doses d'additifs pro-cétane sont habituellement comprises entre 300 et 1 000 ppm.

Traitements complémentaires du gazole

Ils concernent l'amélioration de certaines caractéristiques par recours à des additifs spécifiques. On combat ainsi :

- les risques d'encrassement des injecteurs, en employant des additifs détergents-surfactants de type semblable à ceux qui sont utilisés dans les essences, mais adaptés à la technologie diesel ;
- les phénomènes de dégradation lors du stockage (additifs anti-oxydants) ;
- la tendance au moussage au cours des opérations d'approvisionnement en station-service (emploi de silicones à très faible dose) ;
- la contamination bactériologique favorisée par le contact du gazole avec de l'eau stagnant au pied des bacs et des cuves de stockage (additifs bactériostatiques et biocides) ;
- l'odeur souvent jugée désagréable du gazole (masques d'odeur, parfums industriels).

Par ailleurs, le pouvoir lubrifiant du gazole est amélioré par introduction d'additifs ou de biodiesel (cf. chap. 6, *Les Biocarburants*)

Le carburéacteur

Dans le langage courant, on utilise indifféremment les termes carburéacteur et kérosène ; en réalité, le kérosène désigne un produit de raffinage destiné à plusieurs usages différents (alimentation des avions à réaction, emploi comme combustible de chauffage ou pour l'éclairage et la cuisine). Tous les avions à réaction utilisent du carburéacteur. Seuls les petits avions de tourisme à hélice utilisent un carburant appelé « essence avion », assez peu différent des essences classiques destinées au transport routier.

Les deux types de carburéacteur les plus utilisés dans le monde sont désignés par les sigles Jet A et Jet A1, le second se différenciant du premier uniquement par la tenue au froid, un peu moins performante (-40°C au lieu de -47°C).

Mode de combustion

Contrairement aux moteurs à pistons, les réacteurs d'avion sont parcourus par un écoulement gazeux continu, le déplacement de l'appareil étant assuré par une poussée due à l'énergie cinétique des gaz d'échappement. Il n'existe donc pas ici de risques d'auto-inflammation. Les propriétés déterminantes du carburéacteur sont liées à la préparation du mélange air-carburant, au rayonnement de la flamme et à la formation éventuelle de dépôts. En outre, on sait que les avions à réaction volent souvent à plus de 11 000 mètres d'altitude ; dans ces conditions, la température extérieure peut descendre jusqu'à -50°C , voire -80°C . Le carburéacteur situé dans les réservoirs, eux-mêmes disposés dans les

ailles de l'avion, se refroidit progressivement. Il faut alors éviter un début de gélification qui pourrait provoquer l'arrêt des réacteurs.

Caractéristiques exigées

Pour que la combustion s'accomplisse de façon satisfaisante, le carburéacteur doit se vaporiser rapidement et se mélanger intimement à l'air. Cela justifie la fixation de spécifications relatives à la masse volumique (entre 0,775 et 0,840 kg/l à 15 °C), à l'intervalle de distillation (plus de 10 % distillés à 204 °C, point final inférieur à 300 °C), et à la viscosité (inférieure à 8 mm²/s à — 20 °C).

Afin de maintenir un rendement énergétique élevé et d'assurer la longévité des matériaux constituant la chambre de combustion – la turbine et la tuyère –, il est nécessaire d'obtenir une flamme claire, minimisant les échanges de chaleur par rayonnement et limitant la formation de dépôts de carbone. Ces qualités sont exprimées par le point de fumée. Celui-ci correspond, pour une lampe à mèche normalisée, à la hauteur maximale possible de la flamme, sans apparition de fumée noire. Selon les spécifications, le carburéacteur doit présenter un point de fumée au moins égal à 25 millimètres ; un abaissement jusqu'à 19 millimètres est toléré à condition que, simultanément, la teneur en naphthalène (précurseur bien connu de fumée) reste inférieure à 3 % (volume). Par ailleurs, la concentration totale en hydrocarbures aromatiques ne doit pas dépasser 22 % ; en pratique, elle est souvent proche de 15 %.

Le respect d'une bonne tenue au froid (limpidité totale jusqu'à — 47 °C) peut être rendu difficile par la présence de faibles quantités d'eau dissoutes dans le carburéacteur. En effet, lorsque la température décroît, l'eau libre devient moins soluble et se dépose sous forme de gouttelettes qui commencent à geler, dès que la température atteint 0 °C. Pour éviter cet inconvénient, on ajoute des produits antiglace qui passent en solution dans l'eau libre et abaissent le point de congélation. Ce traitement est souvent réservé à des applications militaires.

En régime de croisière, notamment lors de vols supersoniques, le carburéacteur, qui circule dans certaines zones chaudes de l'avion, peut atteindre des températures élevées, d'autant plus qu'il est utilisé comme fluide caloporteur pour le lubrifiant, le liquide hydraulique ou l'air conditionné. Il est donc nécessaire de contrôler sa stabilité thermique. Celle-ci est déterminée par des méthodes normalisées où un échantillon de carburéacteur circule sous une forte pression dans un tube en aluminium chauffé à 260 °C. La coloration du tube, exprimée par une cotation visuelle, et la perte de charge au travers d'un filtre constituent des modes d'expression de la stabilité thermique et font l'objet de spécifications.

Le pouvoir calorifique du carburéacteur est une caractéristique importante, car elle influe sur les conditions de vol (masse au décollage, encombrement du réservoir, rayon d'action). Rappelons à ce sujet qu'un Airbus long-courrier emporte au décollage plus de 200 000 litres de carburant, soit environ 160 tonnes ; le coût d'un seul avitaillement peut atteindre 50 000 euros. Il est donc souhaitable, pour l'utilisateur, de disposer d'un produit possédant un haut pouvoir calorifique. Les spécifications fixent pour le Jet A1 une valeur minimale de 42,8 MJ/kg qui est, en pratique, fréquemment dépassée.

Enfin, on s'intéresse à la conductivité électrique du carburéacteur. Si celle-ci est trop faible, il peut exister des risques d'explosion, lors des opérations de transfert et de remplissage, en raison de l'accumulation d'électricité statique. C'est

pourquoi les spécifications stipulent que la conductivité électrique du Jet A1 doit être comprise entre 50 et 450 picosiemens/mètre. Ce niveau est généralement obtenu au moyen d'additifs dits antistatiques qui, à des doses comprises entre 3 et 8 ppm, agissent en dissipant les charges électriques accumulées.

Formulation du carburéacteur

Les produits utilisés pour la fabrication du carburéacteur proviennent fréquemment de la distillation directe du pétrole brut. La fraction distillant entre 140-150 °C (point initial) et 240-250 °C (point final) convient le plus souvent, et ne nécessite qu'un simple traitement de finition (désulfuration, élimination de constituants corrosifs). Ainsi, on peut hydrotraiter cette fraction afin d'améliorer simultanément le point de fumée, la teneur en aromatiques et la teneur en soufre.

Le raffineur dispose donc de tous les moyens nécessaires pour produire des carburéacteurs conformes aux spécifications. Toutefois, ces produits utilisent des coupes qui peuvent être communes, soit avec les essences, soit avec le gazole, ce qui entraîne parfois des contraintes en matière de quantités. Ainsi, aux États-Unis, il faut assurer simultanément une forte demande en essence et en carburéacteur ; en Europe, au contraire, ce sont le gazole et le carburéacteur qui entrent en concurrence pour la coupe 150-250 °C.

Les carburants lourds

Encore appelés « carburants marine », les carburants lourds sont utilisés dans des moteurs Diesel servant à la propulsion des gros navires et développant des puissances comprises entre 2 000 et 50 000 kilowatts.

Ils se répartissent en deux grandes catégories : les « distillats » et les « résidus ». Les premiers, plus nobles, sont réservés à l'alimentation des bateaux d'un tonnage moyen, tandis que les seconds sont utilisés sur les bâtiments les plus importants. Leur classification est complexe, puisqu'il existe sur le marché quatre types de distillats et quinze types de résidus.

La masse volumique des carburants marine est comprise entre 0,890 et 0,920 kg/l pour les distillats, entre 0,975 et 1,010 kg/l pour les résidus. Les produits qui ont une masse volumique proche de 1 kg/l sont difficiles à exploiter car ils ne permettent pas d'éliminer par centrifugation les petites quantités d'eau présentes. L'exploitant s'accommode alors de la présence d'eau en réalisant une émulsion avec le carburant.

La viscosité ne doit pas dépasser 14 mm²/s à 40 °C pour les distillats et 55 mm²/s pour les résidus. Ces contraintes se justifient par la nécessité de réaliser une injection et une pulvérisation satisfaisantes du carburant dans la chambre de combustion des moteurs.

Puisque la désulfuration des produits pétroliers devient de plus en plus difficile lorsqu'on passe des fractions légères aux fractions lourdes, la teneur en soufre des carburants marine est donc fatalement beaucoup plus élevée que celle des essences et du gazole. Elle fait cependant l'objet de réglementations. Ainsi, le niveau maximal de soufre est compris entre

1 et 2 % dans la famille des distillats et entre 3,5 et 5 % dans la famille des résidus. Dans un avenir proche (2008-2010), en Europe, la teneur maximale en soufre sera limitée à 1,5 % dans tous les carburants marine, voire à 0,2 % dans les ports.

Enfin, les carburants lourds se caractérisent par la présence de traces de métaux tels que l'aluminium, le silicium et le vanadium. Ces métaux sont générateurs de phénomènes d'usure et de corrosion dans les chambres de combustion des moteurs. Leur teneur dans les carburants est donc contrôlée et limitée. Ainsi, les distillats ne doivent pas contenir plus de 100 mg de vanadium par kilogramme de carburant. Dans la famille des résidus, la teneur maximale autorisée en vanadium va de 150 mg/kg à 600 mg/kg, selon le type de produit, tandis que la teneur en silicium + aluminium est, dans tous les cas, limitée à 80 mg/kg.

Les carburants et la protection de l'environnement

Le concept de carburants propres, c'est-à-dire contribuant à une meilleure protection de l'environnement, s'est développé tout d'abord aux États-Unis au cours des années 1980. Il est maintenant répandu dans le monde entier, de telle sorte que, désormais, les contraintes relatives à la réduction de la pollution atmosphérique gouvernent, autant que les exigences des moteurs, l'évolution des caractéristiques des carburants.

Désulfuration des carburants

Elle a été mise en œuvre à l'origine pour réduire les émissions d'anhydride sulfureux (SO₂) qui est un polluant majeur.

Actuellement, on exige des teneurs en soufre très basses, aussi bien dans les essences que dans le gazole afin de favoriser le fonctionnement des catalyseurs disposés sur le circuit d'échappement. En effet, le soufre est un inhibiteur pour ces catalyseurs : il retarde leur amorçage, dans la période qui suit le démarrage, et exerce, de ce fait, une influence induite néfaste sur l'élimination des autres polluants.

Les nouvelles spécifications européennes limitent donc la teneur en soufre de l'essence et du gazole à 50 ppm depuis le 1^{er} janvier 2005 et à 10 ppm à partir du 1^{er} janvier 2009. Pour illustrer les progrès accomplis dans ce domaine, il faut rappeler qu'au cours des années 1970 un gazole pouvait contenir jusqu'à 8 000 ppm de soufre, et une essence 1 000 ppm.

Relations entre les caractéristiques des carburants et les émissions de polluants

Dans le cas des véhicules à essence, les pertes par évaporation constituent une cause non négligeable de pollution atmosphérique par les hydrocarbures. Un moyen d'action efficace pour pallier ce type d'inconvénient consiste à réduire la pression de vapeur de l'essence et à faire en sorte que les vapeurs émises soient aussi peu toxiques que possible. Cette

dernière considération explique que, depuis le 1^{er} janvier 2000, la teneur en benzène de toutes les essences distribuées en Europe est inférieure à 1 %. De même, la concentration en oléfines est limitée à 18 % en volume.

Les caractéristiques des essences susceptibles de modifier le niveau et la composition des rejets polluants à l'échappement sont les teneurs en aromatiques, en oléfines et en constituants oxygénés (MTBE, ETBE), ainsi que le point final de distillation. Les effets de ces différents paramètres (tabl. 6) jouent sur les taux de polluants classiques (monoxyde de carbone, hydrocarbures imbrûlés, oxydes d'azote) et sur des produits spécifiques particulièrement toxiques (benzène, 1-3 butadiène, formaldéhyde, acétaldéhyde).

Caractéristiques des essences et émission de polluants

type de polluant	aromatiques 30 → 35 g/100*	MTBE 0 → 15 g/100**	oléfines 20 → 18 g/100**	TFD [†] 160°C → 130°C
monoxyde de carbone	-13,8	-0,1	+1,9	-1
hydrocarbures	-1,5	-1,1	+1,8	-21,7
oxydes d'azote	+0	+0	-0,1	+0,3
benzène	-0,2	0	0	-0,1
1,3-butadiène	+0	-0	-0,0	-0,1
formaldéhyde	-1,4	-1,0	0	-0,1
acétaldéhyde	-0,1	0	0	-0,1

En faisant varier certaines caractéristiques des essences, il est possible de modifier la composition et la teneur des rejets polluants à l'échappement. Cependant, la variation d'un paramètre « carburant » n'induit pas nécessairement une évolution dans le même sens de tous les polluants.

On voit que le fait d'agir sur tel ou tel paramètre « carburant » ne conduit pas toujours à une réduction simultanée des émissions de tous les polluants. C'est donc par un choix judicieux de différentes techniques de formulation que l'on aboutit au meilleur compromis dans la définition d'essences peu polluantes.

Concrètement, l'abaissement des teneurs en aromatiques et en oléfines se révèle toujours bénéfique. C'est pourquoi les récentes spécifications européennes fixent une teneur maximale en aromatiques de 35 % depuis le 1^{er} janvier 2005 (tabl. 7). Quant à la teneur en oléfines, elle est limitée à 18 % depuis le 1^{er} janvier 2000.

Spécifications européennes des carburants pour réduire la pollution

caractéristique	date d'application	
	2000	2005
essence		
teneur maximale en benzène (g/100 vol)	1	1
teneur maximale en aromatiques (g/100 vol)	42	35
teneur maximale en méthyle tert-butyle (g/100 vol)	15	15
teneur maximale en soufre (g/100 vol)	0,05	0,05
gazole		
caractéristique		
masse volumique maximale à 15°C (kg/l)	0,845	0,840
température maximale mesurée à 0°C à 100 km/h (°C)	340	335
teneur maximale en polyaromatiques (g/100 vol)	8	8
teneur maximale en soufre (g/100 vol)	0,05	0,05

Spécifications européennes des essences et du gazole mises en place afin de réduire la pollution d'origine automobile.

En ce qui concerne le gazole, les caractéristiques les plus importantes en matière d'incidences sur la pollution atmosphérique sont la masse volumique, la teneur en polyaromatiques, l'indice de cétane et le point final de distillation (tabl. 8). Ces critères de qualité sont pris en compte dans les spécifications européennes 2000 et 2005. Ainsi, depuis le 1^{er} janvier 2000, la masse volumique ne peut dépasser 0,845 kg/l à 15 °C ; la teneur en polyaromatiques est limitée à 11 % en masse (8 % à partir de 2009), le point final de distillation à 360 °C, tandis que l'indice de cétane doit être supérieur à 51.

Caractéristiques du gazole et émission de polluants

type de polluants	évolution anticipée au XCVI	
	voiture particulière	grande surface
monooxyde de carbone	-10	+1
hydrocarbures	-24	+13
oxyde d'azote	+5	-8
particules	-24	-8

"En faisant varier les caractéristiques du gazole (masse volumique de 0,855 kg/l à 0,828 kg/l; teneur en aromatiques, de 8 à 1 p. 100 en volume; l'indice de cétane, de 50 à 58, et la température correspondant à 95 p. 100 évaporés, de 370 à 325 0C), on obtient globalement une réduction de la pollution ...

Toutes ces évolutions caractérisent une nouvelle génération de carburants (essences et gazole) souvent appelés « reformulés », en ce sens que leur comportement antipollution est pris en compte dès le stade de la préparation en raffinerie.

Les carburants et la formation d'ozone troposphérique

L'ozone est un polluant secondaire dans le sens où il se forme au cours de réactions chimiques complexes entre les hydrocarbures et les oxydes d'azote présents dans la basse couche de l'atmosphère (troposphère) et provenant, pour une part non négligeable, des rejets d'origine automobile.

Le taux de formation de l'ozone troposphérique dépend à la fois des conditions météorologiques (il est favorisé par un ensoleillement important, des températures élevées et la présence d'un anticyclone), du rapport des concentrations des éléments précurseurs et de la réactivité plus ou moins élevée des hydrocarbures présents.

Les modèles de prévision de la formation d'ozone sont encore au stade du développement et ne peuvent pas prendre totalement en compte l'influence de la nature et de la composition des carburants utilisés. Cependant, quelques tendances générales se dégagent :

- Pour les essences, la diminution de la teneur en oléfines, la réduction du point final de distillation, l'abaissement de la pression de vapeur constituent des voies d'action très efficaces, déjà mises en œuvre dans la production des essences reformulées américaines.
- Les effluents des véhicules diesel sont probablement moins réactifs en matière de formation d'ozone que les rejets des moteurs à essence, bien que ces derniers émettent moins d'oxydes d'azote.

Recherche de nouveaux carburants peu polluants

Les nouveaux carburants peu polluants, dont certains sont encore au stade du projet et de l'expérimentation, ne peuvent pas prétendre à des marchés de la taille de ceux des essences et du gazole. Ils présentent cependant un grand intérêt pour des emplois localisés, notamment dans des zones urbaines particulièrement exposées à la pollution. Les biocarburants, qui offrent des perspectives intéressantes compte tenu des nouveaux enjeux environnementaux, seront traités plus loin (cf. chap. 6., *Les biocarburants*).

Le gaz de pétrole liquéfié

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) utilisé comme carburant, en substitution des essences, présente de nombreux avantages sur le plan environnemental ; il ne contient pas d'aromatiques et sa combustion ne génère que très peu de produits secondaires toxiques comme le benzène. Cependant, les disponibilités du GPL-carburant sont limitées, compte tenu de sa composition et des caractéristiques des pétroles bruts distillés, et son taux de diffusion ne pourra représenter qu'une faible fraction (de l'ordre de 5 %) de celui des essences.

Le gaz naturel

Le gaz naturel, constitué essentiellement de méthane (CH₄), est également un carburant de substitution très peu polluant. Il équipe d'ailleurs, depuis quelques années, un certain nombre d'autobus urbains et d'autres véhicules de service dans des pays comme l'Italie, la Russie, l'Argentine, la Nouvelle-Zélande, les États-Unis et le Canada. Cette filière tend également à se développer en France. Les rejets hydrocarbonés d'un moteur fonctionnant au gaz naturel ne contiennent pratiquement que du méthane, non toxique ; par ailleurs, le produit ne contient pas d'impureté (soufre) ou d'élément étranger (plomb) susceptibles d'entraîner une pollution supplémentaire.

Le gaz naturel devrait pénétrer, au cours du XXI^e siècle, le marché des carburants, car ses disponibilités sont potentiellement très élevées. Son développement implique cependant que soient levés les obstacles actuels liés notamment à sa faible compacité (malgré un stockage sous une pression de 20 mégapascals) et au coût élevé d'adaptation des véhicules.

Le gaz naturel peut également constituer une source pour la synthèse de nouveaux carburants liquides, présentant un excellent comportement antipollution. Parmi ceux-ci, il faut citer les gazoles de synthèse Fischer-Tropsch, qui ne contiennent ni soufre ni aromatiques, et le diméthyléther (CH₃-O-CH₃) susceptible de subir une combustion de type diesel, avec une très faible émission de particules, contrairement aux gazoles d'origine pétrolière.

« L'aquazole »

Un autre type de carburant mis en œuvre dans une perspective de réduction des émissions de polluants est connu sous le terme « aquazole ». Il s'agit d'une émulsion eau-gazole renfermant 13 % d'eau et rendue stable, même à basse température, par l'addition d'un émulsifiant très efficace. L'aquazole est utilisé par des autobus urbains équipés de moteurs Diesel de type ancien et donc souvent polluants. La présence d'eau exerce un effet favorable sur les rejets de particules solides et d'oxydes d'azote ; elle contribue aussi à réduire les émissions de fumées noires. En revanche, l'emploi d'aquazole se traduit par une légère perte de puissance maximale et de performances en accélération.

Les carburants et l'effet de serre

La combustion des produits issus de matières premières d'origine fossile (charbon, gaz naturel, pétrole) fournit du

dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres substances (méthane, oxydes d'azote) qui, directement ou indirectement, contribuent à accroître l'effet de serre dont on redoute à terme les conséquences planétaires, en particulier sur le plan climatique.

Compte tenu de sa concentration élevée dans les produits de combustion, la contribution du CO₂ à l'effet de serre est déterminante ; celle des autres gaz qui l'accompagnent est comptabilisée en utilisant divers facteurs de pondération. Les résultats de l'estimation sont exprimés en grammes de CO₂ « équivalents ».

Dans le secteur des transports, qui représente une part importante de la consommation d'énergie primaire fossile, on cherche à maîtriser les émissions de CO₂ exprimées le plus souvent en grammes de CO₂ équivalents par kilomètre parcouru. On est alors conduit à comparer le comportement de différentes filières (essence, diesel, carburants gazeux, biocarburants). Cette opération doit prendre en compte les émissions de CO₂ équivalents tout au long de la chaîne production-utilisation :

- en amont, c'est-à-dire au cours des opérations de raffinage, de transport et de distribution ;
- en aval, lors de la combustion sur moteur, à partir de la consommation de carburant et des émissions de différents polluants.

Les filières les plus intéressantes seront celles qui font intervenir des carburants peu riches en carbone, accessibles à faible coût énergétique, utilisés dans des moteurs de rendement élevé et peu polluants (tabl. 9) .

Contributions des différentes filières «carburant» à l'effet de serre

Filière	contribution relative (en grammes de CO ₂ /km parcouru)	
	circulation urbaine	circulation périurbaine
essence	100	107
diesel	79	80
gaz naturel	71	86

Exemples de contributions relatives des différentes filières «carburant» à l'effet de serre. La référence 100 correspond à l'utilisation de l'essence en circulation urbaine. Les estimations tiennent compte des émissions de CO₂ et des autres gaz à effet de serre lors de la production des carburants, puis lors de leur combustion sur moteur.

Contrairement à ce qui est souvent affirmé, la filière gazole est moins pénalisante en matière d'effet de serre que la filière essence, en raison essentiellement de l'excellent rendement énergétique du moteur Diesel. La teneur en carbone des deux types de carburants – essence et gazole – n'intervient pas dans la comparaison, puisqu'elle est pratiquement identique pour chacun d'entre eux (86 à 87 %).

Les filières des carburants gazeux – GPL et gaz naturel – se révèlent, elles aussi, très intéressantes, essentiellement grâce à la faible teneur en carbone des produits utilisés (de l'ordre de 87 % pour le GPL et 75 % pour le gaz naturel).

Quant aux biocarburants, on peut admettre que leur contribution à l'effet de serre n'intervient qu'au stade de leur production, dans la mesure où celle-ci fait partiellement appel à des énergies fossiles. En revanche, le dioxyde de carbone formé lors de leur combustion dans les moteurs est à nouveau utilisé, via la photosynthèse, pour la croissance des végétaux à partir desquels sont élaborés les biocarburants. Le cycle du carbone n'est pas rompu dans ce cas, à la différence des carburants fossiles dont la combustion rejette dans l'atmosphère du CO₂ stocké depuis des millions d'années dans les gisements de pétrole brut. Cette situation, éminemment favorable, a été peu exploitée jusqu'au début

des années 2000, mais la pénétration des biocarburants, jusqu'à présent encore très modeste dans la consommation totale des carburants, est en progression continue et significative.

Les biocarburants

Les biocarburants sont des composés fabriqués à partir de matières végétales (la biomasse) et utilisés dans les moteurs. Le développement important de leur production, auquel on assiste depuis 2003-2004 et qui va s'accroissant, doit permettre de répondre, au moins partiellement, à plusieurs enjeux :

- environnementaux, avec la double nécessité de réduire la pollution locale (monoxyde de carbone, hydrocarbures imbrûlés, particules) et les émissions de gaz à effet de serre (CO₂), responsables pour une grande part du réchauffement climatique ;
- énergétiques, en visant à diminuer la dépendance énergétique vis-à-vis des énergies fossiles, et plus particulièrement du pétrole ;
- agricoles, en trouvant de nouveaux débouchés aux excédents produits par l'agriculture moderne.

Les filières actuelles conduisent, d'une part, pour les moteurs à essence, à la production d'éthanol, utilisé seul ou en mélange, ou encore après transformation par réaction avec l'isobutène en éther-carburant (éthyltertiobutyléther ou ETBE), et, d'autre part, à la production de biodiesel, pouvant être mélangé au gazole.

L'éthanol est fabriqué par fermentation des sucres issus de plantes sucrières (extraction à l'eau chaude des sucres des betteraves, broyage et pressage de la canne à sucre) et de céréales telles que le blé, le maïs et l'orge. L'amidon des céréales, qui est un polysaccharide, est hydrolysé en sucres monomères par voie enzymatique grâce aux actions successives de deux types d'enzymes : les amylases et les amyloglucosidases, produites à l'échelle industrielle. L'éthanol est ensuite séparé du moût de fermentation par distillation, produisant de l'éthanol à une teneur voisine de l'azéotrope (92 % de volume dans l'eau), suivie ou non d'une distillation azéotropique en présence généralement de cyclohexane, ou plutôt d'une étape de déshydratation sur tamis moléculaires, pour aboutir à de l'éthanol anhydre.

Le biodiesel est fabriqué par transestérification des triglycérides, composants majeurs des huiles végétales (colza, tournesol, soja, huile de palme), en présence de méthanol, pour aboutir aux esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV), ou encore d'éthanol pour obtenir les esters éthyliques d'huiles végétales (EEHV). Cette réaction conduit aussi à la production de glycérol. La réaction de transestérification est effectuée en discontinu ou en continu en présence d'un catalyseur par des procédés de catalyse homogène ou hétérogène.

Le fait que les biocarburants contiennent de l'oxygène constitue un facteur favorable pour la réduction des émissions de certains polluants (monoxyde de carbone, hydrocarbures imbrûlés, particules). Par ailleurs, ces produits diminuent, dans la formulation des carburants, la teneur en constituants comme les aromatiques et les oléfines, générateurs de polluants. Cependant, il a été montré que l'utilisation des biocarburants génère plus d'oxydes d'azote (NO_x).

L'éthanol présente des propriétés intéressantes pour les moteurs à allumage commandé, notamment un indice d'octane élevé et une densité voisine de celle des essences. Cependant, quelques inconvénients subsistent comme

l'accroissement de la tension de vapeur du mélange qui se manifeste surtout à faible taux d'incorporation, et la démixtion en présence d'eau (l'éthanol passant de la phase essence à la phase aqueuse). Ces problèmes disparaissent en substituant l'ETBE à l'éthanol, tout en conservant un très bon indice d'octane en mélange.

Le biodiesel, en termes de densité spécifique, de viscosité et d'indice de cétane, se compare bien avec le gazole. Cela n'est pas le cas des huiles brutes végétales, non transestérifiées, qui créent, par ailleurs, des problèmes de dépôt sur les injecteurs et sur les pistons et de gommage des segments dans les moteurs.

Comparativement aux carburants classiques, l'emploi de biocarburants entraîne des diminutions de consommation (de 50 à 70 %) d'énergie fossile et d'émissions de gaz à effet de serre, lorsque calculées tout au long du cycle de vie de ces produits, et pour des productions d'énergie comparables. En Europe, l'adjonction de biocarburants dans les carburants classiques est limitée selon les modalités suivantes, qui devront toutefois être bientôt modifiées pour tenir compte de l'augmentation de la production et de la consommation en biocarburants :

- dans les essences, jusqu'à hauteur de 5 % (volume) lorsqu'ils sont sous forme d'éthanol et jusqu'à hauteur de 15 % lorsqu'ils sont sous forme d'ETBE (ce qui correspond en fait à environ 6,8 % d'éthanol) ; la teneur en oxygène ne devait pas dépasser 2,7 % en masse ;

- dans le gazole, jusqu'à hauteur de 5 %, sous forme d'esters méthyliques d'huiles végétales, encore désignés sous le nom de biodiesel.

En 2003, le Conseil et le Parlement européens ont validé la directive 2003/30/CE qui fixe des objectifs croissants de consommation de biocarburants. Celle-ci devra représenter au minimum 5,75 % en 2010 (pourcentage calculé sur le contenu énergétique des produits) des consommations globales d'essence et gazole utilisés dans les transports. En septembre 2005, le gouvernement français a annoncé que ce taux d'incorporation serait de 5,75 % en 2008, de 7 % en 2010 et de 10 % en 2015.

La production mondiale d'éthanol, le Brésil et les États-Unis étant les plus gros producteurs, a été voisine de 25 Mt en 2005, tandis que celle de biodiesel, essentiellement fabriqué et utilisé en Europe, était de l'ordre de 2,5 Mt. Les biocarburants représentaient alors environ 1,5 % de la consommation mondiale de carburants.

Dans l'optique d'augmenter cette production, et du fait que les filières classiques (fournissant des biocarburants dits de première génération) vont rapidement rencontrer des limites lors de l'approvisionnement en matières premières – limites des surfaces cultivées en plantes sucrières, céréales, oléagineux et fortes compétitions d'usages entre l'alimentaire, l'énergie et l'industrie –, il est nécessaire de diversifier l'emploi des ressources végétales. C'est pourquoi de nombreux programmes de recherche et développement sont en cours, qui visent à transformer la biomasse lignocellulosique (résidus agricoles et forestiers, cultures dédiées comme les taillis à courte rotation) en biocarburants dits de seconde génération et/ou en bioénergie (chaleur, électricité). Deux voies sont actuellement étudiées :

- la voie thermochimique, encore appelée voie sèche. La biomasse est convertie, par pyrolyse et/ou gazéification, en un mélange riche en CO et H₂, le gaz de synthèse. Ce dernier, après purification, est utilisé pour la production de carburants liquides comme le méthanol ou comme un mélange d'hydrocarbures issus du procédé Fischer-Tropsch, suivi d'un hydrotraitement catalytique. Ce mélange d'hydrocarbures, désigné sous le terme BTL (Biomass to Liquids) par analogie avec le GTL (Gas to Liquids), est d'excellente qualité, sans soufre ni composés aromatiques, avec un indice de

cétane élevé et peut donc être utilisé sans modifications des moteurs Diesel ;

la voie biochimique, encore appelée voie humide. La biomasse lignocellulosique, essentiellement composée de cellulose, hémicelluloses et lignine, est transformée en éthanol, pour ce qui concerne les deux premiers composants, le troisième servant à fournir l'énergie nécessaire à la mise en œuvre du procédé de transformation. L'amélioration du rendement de fabrication d'éthanol passe par l'optimisation de l'hydrolyse enzymatique des matériaux lignocellulosiques et de la valorisation en éthanol des pentoses issus des fractions hémicellulosiques.

Cependant, le coût d'accès à ces biocarburants, quelle que soit la filière utilisée, est encore élevé. Leur emploi n'est rendu possible que grâce à des incitations fiscales ; leur taxation est en effet beaucoup plus faible que celle des essences et du gazole.

Jean-Claude GUIBET,

Daniel BALLERINI,

Xavier MONTAGNE

Thèmes associés

- . BIOMASSE
- . CARBURANTS ET COMBUSTIBLES ISSUS DU PÉTROLE ET DU GAZ NATUREL
- . POLLUTION DE L'ATMOSPHÈRE
- . PRÉVENTION DE LA POLLUTION

Bibliographie

- . D. BALLERINI & N. ALAZARD-TOUX, *Les Biocarburants – États des lieux, perspectives et enjeux du développement*, Technip, Paris, 2006
- . P. DEGOBERT, *Automobile et pollution*, Technip, Paris, 1992
- . J.-C. GUIBET, « Carburants liquides », in *Traité génie énergétique*, Techniques de l'ingénieur, Paris, 1998
- . J.-C. GUIBET & E. FAURE, *Carburants et moteurs : technologies, énergie et environnement*, Technip, Paris, 1997
- . M. HUBLIN & J.-F. BONDOUX, « A clean and efficient motor fuel », in *OEM application of LPG in light duty vehicles*, European Conference and Exhibition on LPG, Maastricht, 1995
- . P. LEPRINCE, *Le Raffinage du pétrole, procédés de transformation*, Technip, Paris, 1998
- . M. MORET, X. LYS, R. GALEAZZI & J.-F. GRUSON, « Le Gazole : quelles qualités ? », in *Pétrole et techniques*, n° 422, Paris, 1999
- . J. ORSELLI, *Énergies nouvelles pour l'automobile*, Paradigme, Caen, 1992
- . K. OWEN & T. COLEY, *Automotive Fuels Reference Book*, 2^e éd., S.A.E. International, 1995
- . E. POITRAT, « Biocarburants », in *Traité génie énergétique*, Techniques de l'ingénieur, Paris, 1999
- . J.-P. WAUQUIER, *Pétrole brut-produits pétroliers, schémas de raffinage*, Technip, Paris, 1994.