

Technologie fonctionnelle de l'automobile

7^e édition



TOME 1

Le moteur et ses auxiliaires

HUBERT MÈMETEAU
BRUNO COLLOMB

**Avec des tests
d'auto-évaluation
corrigés**

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Couverture : Pierre-André Gualino, graphiste

Photos de couverture (de gauche à droite) :

© dreamnikon – fotolia.com, © iammacintosh – istockphoto.com,

© joel_420 – fotolia.com, © calado – fotolia.com

Réalisation des illustrations : Philippe Mèmeteau

Ce pictogramme mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du **photocopillage**.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les

établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la

possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (**CFC**, 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 1981, 1993, 1996, 2002, 2006, 2009, 2014

5 rue Laromiguière, 75005 Paris
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-071249-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos	IX
Avant-propos de l'inspecteur	XI
L'étude technologique dans la démarche de maintenance	XII
Bref historique de l'automobile	XIII
 Partie 1	
Approche et découverte de l'automobile	1
Chapitre 1 : Connaissance de l'automobile	3
Chapitre 2 : Les sous-ensembles de l'automobile	9
2.1 Le système de motorisation.....	10
2.2 Le système d'alimentation en air et en carburant.....	11
2.3 Le système d'allumage	12
2.4 Le système de charge.....	13
2.5 Le système de démarrage.....	14
2.6 Le système de transmission.....	15
2.7 Le système de freinage	16
2.8 Le système de suspension.....	17
2.9 Le système de direction	18
Chapitre 3 : Le châssis-carrosserie	23
3.1 La carrosserie	24
3.2 La sécurité des automobiles	28
3.3 Les effets d'un choc	29

Partie 2

Le système de motorisation 33

Chapitre 4 : **Classification des moteurs** 35

4.1 Mise en situation 35

4.2 Le système de motorisation dans son ensemble 38

Chapitre 5 : **Constitution des moteurs** 43

5.1 Les éléments fixes 44

5.2 Les éléments mobiles 46

5.3 Les éléments de la distribution 57

Chapitre 6 : **Les caractéristiques des moteurs** 67

Chapitre 7 : **Le fonctionnement des moteurs** 75

7.1 Le cycle à quatre temps 75

7.2 Les différences de fonctionnement et de conception entre un moteur essence et un moteur Diesel 80

7.3 Particularités du moteur 3 cylindres 83

Chapitre 8 : **La distribution** 91

8.1 Le système de distribution 93

8.2 La distribution variable 94

Chapitre 9 : **La suralimentation des moteurs thermiques** 99

9.1 Mise en situation 99

9.2 Analyse structurelle 100

9.3 Analyse fonctionnelle 103

Partie 3

Les circuits complémentaires 111

Chapitre 10 : **Le circuit de graissage** 113

10.1 Mise en situation 113

10.2 Analyse structurelle 116

10.3 Analyse fonctionnelle 119

Chapitre 11 : Le circuit de refroidissement	127
11.1 Mise en situation.....	127
11.2 Analyse structurelle.....	128
11.3 Analyse fonctionnelle.....	134

Partie 4

La combustion et l'alimentation en carburant..... 139

Chapitre 12 : Les combustibles et la combustion	141
12.1 Les combustibles.....	141
12.2 Les biocarburants.....	144
12.3 La combustion.....	148

Chapitre 13 : Le mélange combustible	153
---	-----

Chapitre 14 : Les systèmes d'injection	157
14.1 L'injection indirecte essence.....	157
14.2 L'injection directe essence.....	169
14.3 L'injection Diesel.....	175
14.4 L'injection gaz.....	194

Chapitre 15 : Les systèmes antipollution	201
15.1 Mise en situation.....	201
15.2 Analyse structurelle.....	203
15.3 Analyse fonctionnelle.....	212

Partie 5

Le système d'allumage..... 217

Chapitre 16 : Principe de l'allumage	219
16.1 Mise en situation.....	219
16.2 Analyse structurelle.....	221
16.3 Analyse fonctionnelle.....	226

Partie 6

Les véhicules électriques et hybrides 233

Chapitre 17 : **Le véhicule électrique** 235

17.1 Mise en situation..... 235

17.2 Analyse structurelle 237

17.3 La charge du véhicule 239

17.4 Analyse fonctionnelle 242

17.5 Le véhicule à pile à combustible 247

Chapitre 18 : **Le véhicule hybride**..... 251

18.1 Mise en situation..... 251

18.2 Analyse structurelle 257

18.3 Analyse fonctionnelle 262

VIII

Partie 7

Les principaux documents liés à l'entreprise automobile 269

Chapitre 19 : **L'ordre de réparation** 271

Chapitre 20 : **Le devis** 275

Chapitre 21 : **La facture**..... 277

21.1 Le contenu 277

21.2 Les obligations du garagiste..... 278

21.3 Les réductions 279

21.4 Les majorations 279

Corrigés des tests d'auto-évaluation..... 281

Unités et schématisation 283

1. Grandeurs et unités du Système international (SI)..... 283

2. Principe de l'analyse descendante dite « systémique » 285

Index 287

Avant-propos

La technologie automobile évoluant très vite, il est très difficile actuellement d'acquérir des connaissances sur tous les systèmes existants. C'est pourquoi il était important de faire une mise à jour et donc une 7^e édition de cet ouvrage, créé par Hubert Mèmeteau, qui comporte deux tomes :

- » tome 1 : Le moteur et ses auxiliaires ;
- » tome 2 : La transmission, le freinage, la tenue de route et l'équipement électrique.

Ils restent une référence pour les élèves et les enseignants de la maintenance automobile.

Cet ouvrage, conçu spécialement pour le milieu scolaire est composé de plusieurs séquences qui permettent à l'apprenant d'étudier le fonctionnement de base d'un système jusqu'à son évolution récente.

À la fin de chaque séquence se trouve un résumé fait d'une synthèse concise et une rubrique « testez vos connaissances » permet à l'élève de s'auto-évaluer. Pour effectuer des recherches personnelles, un encadré intitulé « Entraînez-vous » vient compléter tout cela.

S'il utilise la méthode inductive, l'enseignant pourra amener l'élève à utiliser cet ouvrage comme document ressource lorsqu'il devra passer à la partie pratique.

Les photos des systèmes étudiés ne sont données qu'à titre d'exemple car chaque constructeur a sa technique qui lui est propre. Il appartient à l'élève de rechercher le système sur la revue technique de son choix.

Ces manuels qui couvrent la formation en maintenance des véhicules du CAP au BAC PRO (3 ans) sont construits de la même manière pour chaque chapitre et apportent ainsi un confort de lecture et d'étude pour tous les utilisateurs.

Trois grands titres composent chaque chapitre :

- » **Une mise en situation** qui localise le système étudié, donne sa fonction principale et sa nécessité,
- » **Une analyse structurelle** qui liste les éléments constitutifs du système et leur fonction,
- » **Une analyse fonctionnelle** qui développe le fonctionnement des systèmes et les lois physiques qui le régissent.

En conclusion, les deux tomes de cet ouvrage favorisent l'ouverture d'esprit de l'élève tant sur la découverte que sur les connaissances plus pointues en matière de technologie automobile. Ainsi chaque élève pourra se l'approprier selon ses propres besoins.

L'enseignant, quant à lui, y trouvera un support pédagogique et technique directement utilisable en atelier et un outil de travail sur lequel s'appuyer.

Bruno Collomb
Enseignant

Avant-propos de l'inspecteur

L'évolution galopante des techniques et des technologies appliquées à l'automobile rend indispensable la mise à jour permanente des ouvrages à l'usage des élèves et des professeurs.

Cet ouvrage intègre les systèmes de haute technicité, mis au point en compétition et appliqués à la grande série.

Il couvre néanmoins toutes les compétences à développer et tous les savoirs à acquérir par un élève destiné à devenir un technicien de la maintenance automobile.

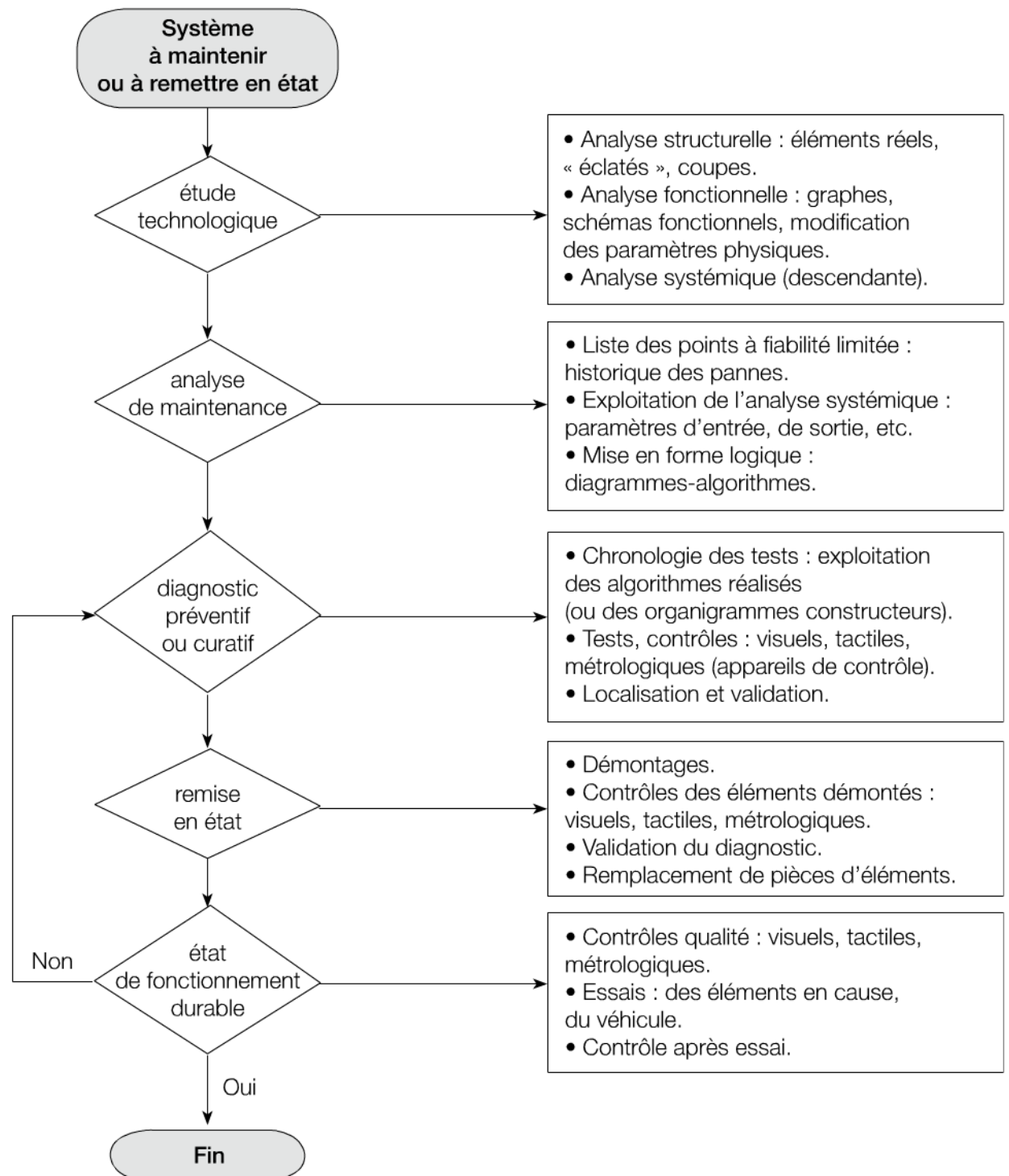
Basé sur une approche concrète de métier, il permet à l'enseignant de mettre en œuvre la démarche pédagogique la mieux adaptée aux apprenants, tout en prenant en compte les impératifs du développement durable.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Collomb pour son investissement personnel et le cœur qu'il a mis à réaliser la mise à jour du présent ouvrage.

Serge Bechart

Inspecteur de l'Éducation nationale
sciences et techniques industrielles

L'étude technologique dans la démarche de maintenance



Bref historique de l'automobile

1769 : L'ingénieur militaire français Cugnot construit le premier véhicule automobile « Le Fardier ». Véhicule à 3 roues (dont une est directrice), utilisant la vapeur d'eau comme force motrice.

1820 : Apparition des premières diligences à vapeur en Angleterre.

1851 : Découverte de la bobine de Ruhmkorff utilisée pour produire une étincelle électrique.

1859 : Premier accumulateur construit par Plante.

1860 : Premier moteur à explosion (deux temps), mis au point par le Belge Étienne Lenoir, utilisant le gaz de ville sans compression avant l'allumage.

1862 : Brevet du Français Alphonse Beau de Rochas sur le cycle théorique d'un moteur à explosion à quatre temps, fondement de tous les moteurs modernes.

1873 : Amédée et Léon Bollée construisent un véhicule à vapeur qui effectue le trajet Le Mans-Paris. Ils inventent la direction par deux roues pivotant aux extrémités d'un essieu fixe plus perfectionné que l'essieu mobile ou la roue directrice. Ils améliorent la transmission et le freinage.

1876 : Fabrication et commercialisation du moteur à quatre temps (souvent appelé cycle Otto), avec soupapes d'admission commandées par came et leviers, mis au point par l'Allemand Nikolaus August Otto (brevet de 1863 qui sera contesté et annulé en 1888 après quatre ans de procédures, l'antériorité du brevet de Beau de Rochas étant reconnue).

1883-1908 : Les 1^{ers} moteurs à essence sont créés par les Allemands Benz et Daimler. Les nouvelles automobiles sont des produits de luxe très chers et très inconfortables. Seuls les gens les plus riches peuvent se les offrir. Le démarrage des moteurs est difficile.

XIII

Bref historique de l'automobile

Figure 1 *Le Fardier à vapeur de Cugnot, l'ancêtre de l'automobile*

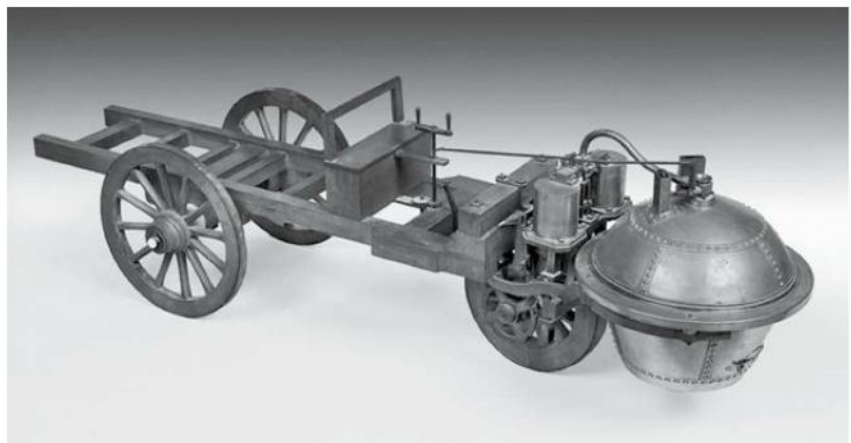
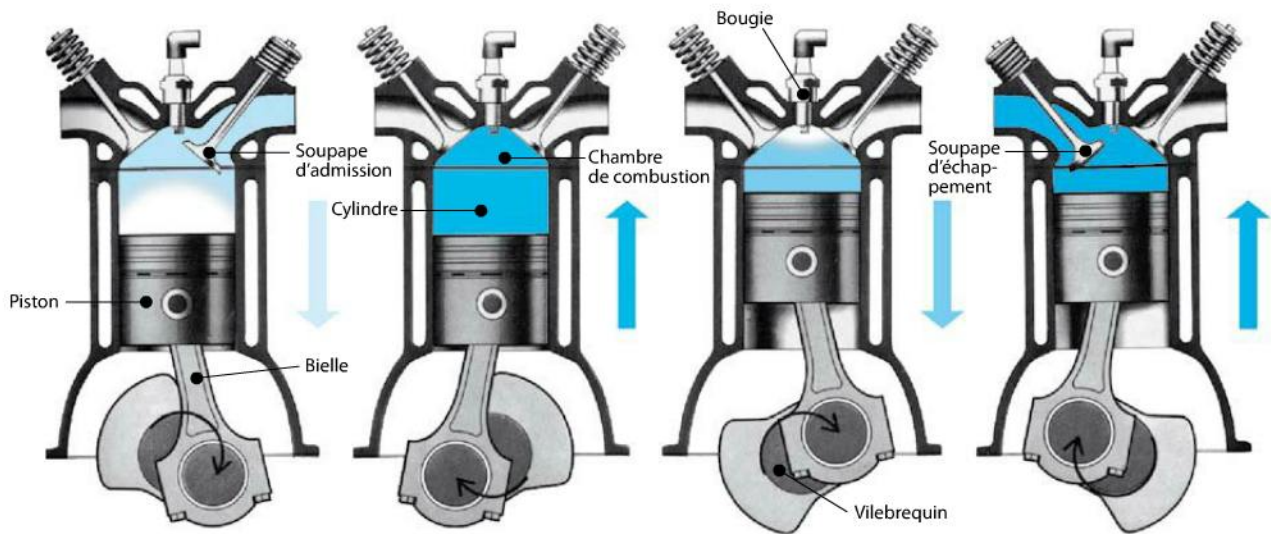


Figure 2 Principe du moteur à quatre temps



1889 : Invention du pneumatique John Boyd Dunlop.

1891 : Forest construit un moteur à quatre cylindres, à soupapes commandées.

1892 : Diesel prend son premier brevet : moteur devant fonctionner au charbon pulvérisé.

1897 : Premières expositions d'automobiles.

1898 : Pellegrin équipe une voiture avec un moteur du type Diesel.

1908-1945 : L'Américain Henry Ford lance la Ford T, la première voiture économique construite à la chaîne. En France, la Traction avant (les deux roues avant entraînent la voiture) de Citroën remporte un vif succès dans la société aisée, mais reste inaccessible aux gens modestes. Les villes et la campagne commencent à s'adapter (routes goudronnées, feux tricolores...).

1922 : Première réglementation de la circulation routière, création du Code de la route.

1945-1973 : La voiture est reine. Les modèles très économiques (Citroën 2 CV, Renault 4 CV, Austin Mini...) permettent à tout le monde de se l'offrir. L'essence est peu chère, les autoroutes commencent à relier les grandes villes. Mais il y a de plus en plus d'accidents et d'embouteillages.

1973-1985 : Une guerre au Moyen-Orient provoque la hausse brutale des prix du pétrole. L'essence devient chère. Les gouvernements prennent des mesures pour améliorer la sécurité (ceinture de sécurité, alcootests...) et réduire la pollution. Les constructeurs réfléchissent à des modèles ne fonctionnant pas au pétrole.

Depuis 1985 : Apparus dans les années 1980, les monospaces (comme l'Espace de Renault, ou la 806 de Peugeot) sont de grosses et hautes voitures pour les familles nombreuses. Leurs formes compactes ont depuis influencé les voitures plus petites (Citroën Xsara Picasso, Renault Mégane Scénic...).

Et demain l'hydrogène ? Les ressources en pétrole ne sont pas éternelles (au rythme où nous les consommons, il n'y en aura plus beaucoup dans 100 ans). Les constructeurs réfléchissent depuis longtemps aux moteurs qui peuvent fonctionner avec un autre carburant. L'électricité n'étant pas très pratique, c'est pour l'instant l'hydrogène qui a leur faveur.

Partie 1

Approche et découverte de l'automobile

Connaissance de l'automobile

chapitre 1



Figure 1.1 Concept car
(Document Citroën).

Le terme « automobile » qualifie tout engin capable de se déplacer par ses propres moyens, et qui transporte l'énergie nécessaire à son fonctionnement (figure 1.1).

Dans un ensemble appelé « châssis-carrosserie », on trouve les trois parties principales d'une automobile (figure 1.2) :

- » un compartiment renfermant le système de motorisation, lié mécaniquement aux roues motrices ;
- » une cellule recevant le conducteur et les passagers, appelée « habitacle » ;
- » un compartiment à bagages.

Il existe trois principaux types de véhicules routiers

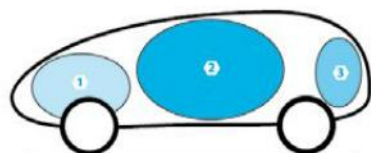


Figure 1.2 Véhicule de tourisme.

- ❶ Compartiment motorisation.
- ❷ Cellule passagers (habitacle).
- ❸ Compartiment à bagages.

1. Les **véhicules de tourisme** (figure 1.2) : voitures destinées au transport des passagers, qui seules ont conservé le nom usuel d'automobiles ;

2. Les **véhicules utilitaires** (figure 1.3) :

- » transports en commun (autobus, autocars) ;
- » transports de marchandises (camionnettes, camions porteurs, tracteurs et semi-remorques) ;
- » véhicules spéciaux : engins de travaux, véhicules de pompiers, etc. ;

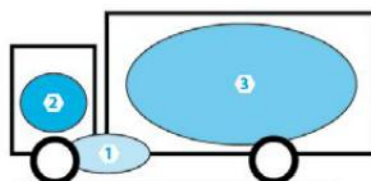


Figure 1.3 Véhicule utilitaire
(camion porteur).

- ❶ Motorisation.
- ❷ Châssis-cabine.
- ❸ Cellule spécifique au besoin d'usage : benne, bétailière, frigorifique, citerne, etc.

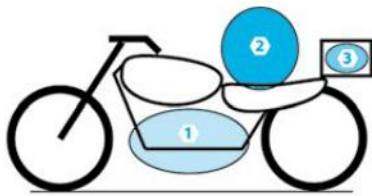


Figure 1.4 Véhicule léger : motorcycle.

- ❶ Motorisation.
- ❷ Pilote et passager.
- ❸ Bagages.

3. Les véhicules légers (figure 1.4) :

- » deux-roues : cyclomoteurs, motocycles,
- » trois-roues : triporteurs, ATC,
- » quatre-roues : voiturettes, quads.

Nous constatons que ces trois catégories de véhicules sont constituées des trois mêmes sous-ensembles.

Seule change leur disposition en fonction de l'usage auquel ils sont destinés.

Remarque

Cet ouvrage traite uniquement de la catégorie des véhicules de tourisme.

Conditions à remplir par une automobile

Parmi les conditions à remplir, on peut citer :

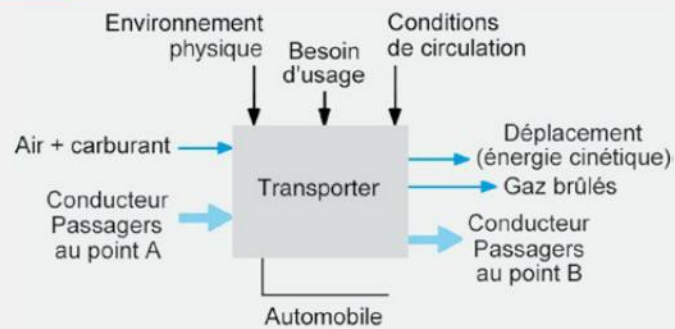
- » transporter les passagers et les marchandises avec un confort suffisant afin de limiter leur fatigue ;
- » protéger au mieux les occupants en cas de choc ;
- » atteindre des vitesses et accélérations suffisantes dans les limites du Code de la route ;
- » s'arrêter si besoin dans la distance la plus courte possible ;
- » conserver la trajectoire désirée par le conducteur quelles que soient les conditions atmosphériques (pluie, vent, etc.), de roulage (revêtement, profil de route) et de circulation (dangers à éviter) ;
- » rester fiable dans le temps ;
- » consommer peu d'énergie ;
- » polluer l'atmosphère le moins possible ;
- » posséder une ligne qui prenne en compte l'esthétique contemporaine et les critères de consommation et de rapport masse/puissance.

Figure 1.5
(Document Peugeot).



Fonction globale de l'automobile

Figure 1.6 Fonction globale : point de vue de l'utilisateur.

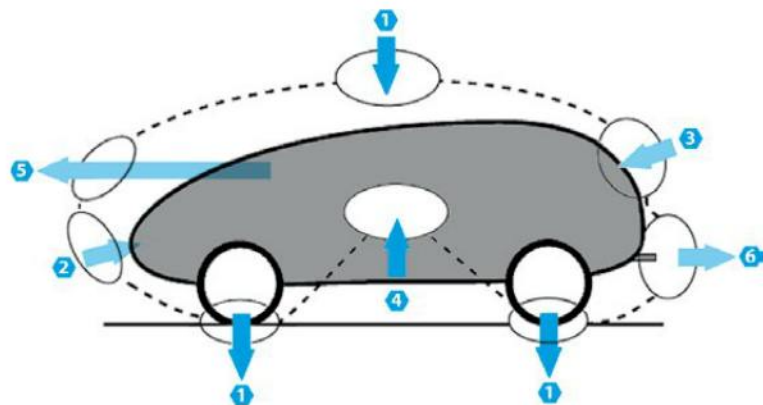


La figure 1.7 décrit les différentes interactions entre le véhicule et l'extérieur.

- » Le véhicule est en appui sur le sol par ses quatre roues sous l'action de la pesanteur ❶ et son poids $\vec{P} = M \cdot \vec{g}$ exerce une force pressante au sol.
- » Le poids réel ou apparent de chaque roue sur le sol ❶, donc son adhérence, est fonction de nombreux paramètres.
- » Les roues motrices transmettent leur énergie au sol grâce à leur adhérence avec celui-ci. Elles reçoivent leur énergie du moteur.
- » Le moteur a besoin pour fonctionner de recevoir :
 - une énergie potentielle ❸ (carburant stocké dans le véhicule),
 - de l'air ❷, disponible dans son environnement.
- » Si le véhicule est équipé d'un moteur thermique, il rejette des gaz brûlés ❹.
- » Le conducteur communique ses intentions en agissant sur les commandes à sa disposition ❺ : volant, levier, pédales, interrupteurs, etc.
- » Dès que le véhicule se déplace, il acquiert une énergie cinétique ❺.

Figure 1.7 Frontière d'étude du système.

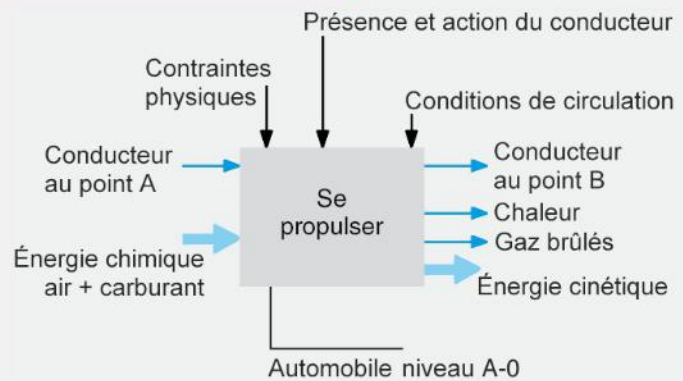
- ❶ Action de la pesanteur.
- ❷ Action de l'air.
- ❸ Stockage de l'énergie potentielle.
- ❹ Action du conducteur sur les commandes.
- ❺ Énergie cinétique.
- ❻ Gaz brûlés (chaleur perdue).



Fonction globale du point de vue de la maintenance

Figure 1.8 *Fonction globale.*

Point de vue de la maintenance.
ASD : Analyse systémique descendante.



Résumé

Définition

Une automobile est un véhicule qui progresse grâce à un moteur.

Parties principales

Les véhicules comportent trois parties :

- » l'habitacle qui protège les passagers,
- » le compartiment moteur qui reçoit le système de motorisation lié mécaniquement aux roues motrices,
- » le compartiment à bagages ou à marchandises.

Différents types de véhicules

- » véhicules de tourisme,
- » véhicules utilitaires,
- » véhicules légers.

Fonction d'usage

Transporter le conducteur et ses passagers d'un point à un autre.

Fonction globale

Transformer l'énergie potentielle du carburant en énergie cinétique, grâce au moteur et aux roues motrices.

Conditions à remplir

- » offrir un confort suffisant pour limiter la fatigue,
- » protéger les occupants en cas de choc,
- » avoir une puissance adaptée à toutes les conditions de circulation,
- » s'arrêter dans la distance la plus courte possible,
- » conserver la trajectoire désirée.

Testez vos connaissances



1. Dans une automobile, l'habitacle est :

- a ☐ le compartiment moteur
- b ☐ l'espace des passagers
- c ☐ le compartiment des bagages

2. Après enquête, vous constatez que la majorité des véhicules de tourisme sont :

- a ☐ à traction avant
- b ☐ à propulsion arrière
- c ☐ à quatre roues motrices

3. La fonction globale de l'automobile du point de vue de la maintenance est de :

- a ☐ transporter
- b ☐ se propulser
- c ☐ être esthétique

4. Si l'on charge le coffre arrière d'un véhicule, son centre de gravité :

- a ☐ se déplace vers l'avant
- b ☐ se déplace vers l'arrière
- c ☐ reste inchangé

5. Quel est le phénomène qui maintient les roues en contact avec le sol (à l'arrêt) ?

- a ☐ le sol sec ou mouillé
- b ☐ la température
- c ☐ la pesanteur

Entraînez-vous

1. Recherchez trois véhicules dont la disposition des éléments principaux (moteur, boîte de vitesses et roues motrices) est différente.
2. Pour chacun d'eux, citez la marque et le type et effectuez un schéma représentant la disposition des éléments.

Les sous-ensembles de l'automobile

chapitre 2

Les sous-ensembles d'une automobile, que l'on nomme également « systèmes », sont (figure 2.1) :

- ❶ la motorisation, qui comprend :
 - » le moteur thermique proprement dit ;
 - » l'injection (moteurs essence) ;
 - » l'allumage (moteurs essence) ;
 - » l'injection Diesel (moteurs Diesel) ;
 - » la charge (électrique) ;
 - » le démarrage (électrique).
- ❷ la transmission.
- ❸ le freinage.
- ❹ la suspension.
- ❺ la direction.
- ⬢ l'équipement électrique.

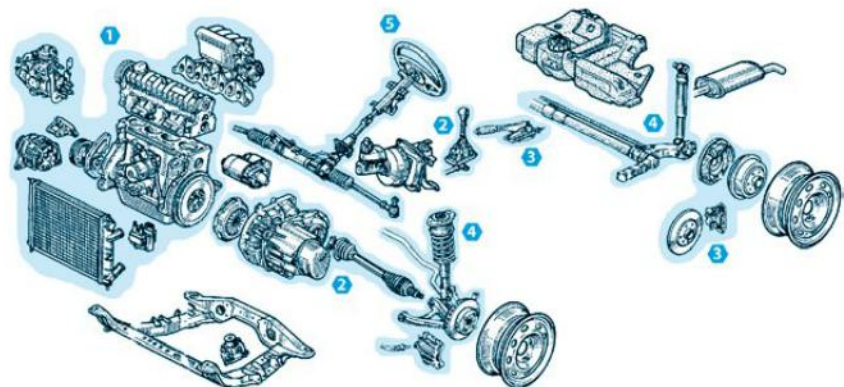


Figure 2.1 Les sous-ensembles
de l'automobile
(Document Renault).

2.1 Le système de motorisation



Figure 2.2 Moteur thermique
(Document Citroën/ETAI).

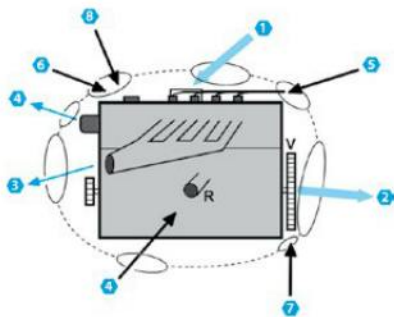


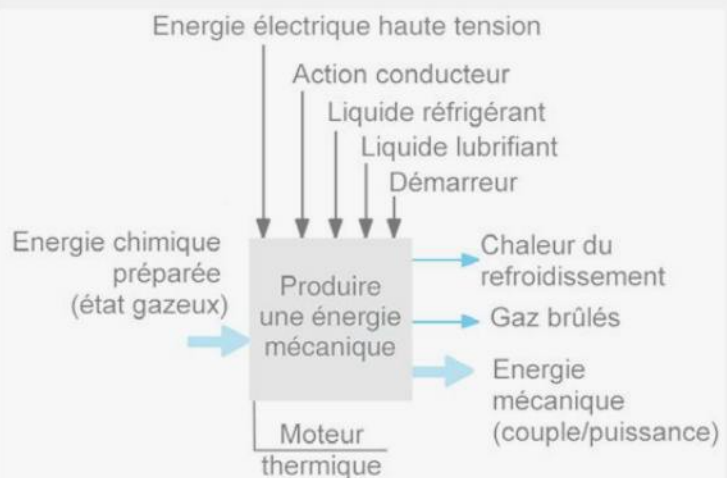
Figure 2.3 Frontière d'étude
du moteur.

R. Canalisations internes de refroidissement.
V. Volant moteur.

- 1 Le moteur thermique reçoit un mélange préparé, combustible du système d'alimentation. Il réalise une combustion grâce à une compression. Cette combustion est déclenchée par le système d'allumage pour le moteur essence.
- 2 Il produit une énergie mécanique disponible au volant moteur.
- 3 Il rejette des gaz brûlés (perte d'énergie et pollution).
- 4 Il évacue les calories en excédent par son système de refroidissement (présence de liquide).
- 5 Il reçoit le courant électrique haute tension nécessaire à l'allumage.
- 6 Le conducteur a une action sur l'accélérateur.
- 7 Le moteur reçoit du démarreur l'énergie mécanique nécessaire à son lancement.
- 8 Il reçoit aussi le lubrifiant nécessaire au fonctionnement de son système de graissage.

Fonction

Figure 2.4 Fonction globale
du moteur thermique

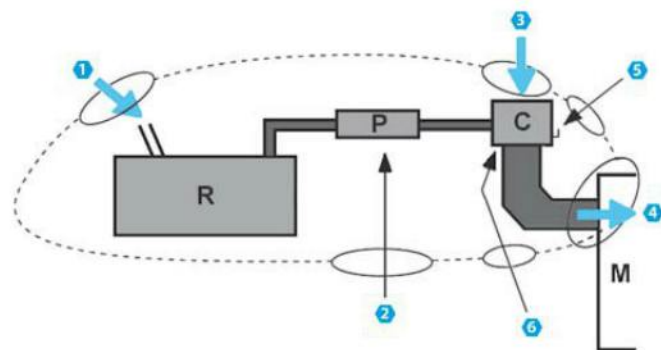


2.2 Le système d'alimentation en air et en carburant

- ❶ Le carburant est stocké dans le réservoir (R), aspiré et mis sous pression par la pompe d'alimentation (P).
- ❷ La pompe commandée électriquement refoule le carburant sous pression vers le système d'injection.
- ❸ L'air ambiant pénètre également dans le système d'injection : un mélange précis d'air et d'essence est réalisé.
- ❹ Le moteur (M) admet le mélange carburé.
- ❺ Le conducteur a une action sur l'accélérateur (volume de gaz admis).
- ❻ Les données moteur (fréquence de rotation, charge, etc.) ont une action sur les dosages.

Figure 2.5 *Frontière d'étude du système d'alimentation – injection.*

- ❶ Carburant
- ❷ Energie mécanique ou électrique
- ❸ Air
- ❹ Mélange carburé
- ❺ Accélérateur
- ❻ Paramètres moteur
- R Réservoir à carburant
- P Pompe d'alimentation
- C Système d'injection
- M Moteur : chapelle d'admission dans la culasse

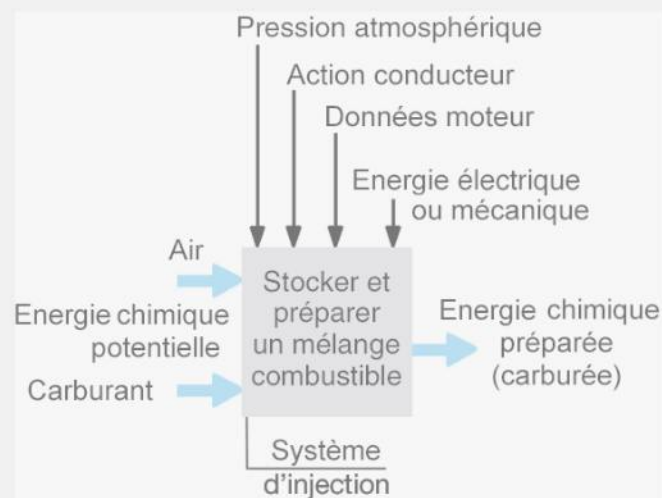


11

- 2 - Les sous-ensembles de l'automobile

Fonction

Figure 2.6 *Fonction globale du système d'alimentation – injection.*



2.3 Le système d'allumage

Le système d'allumage reçoit un courant électrique basse tension (12 à 14 V) en ❶.

Il produit des étincelles dont la chaleur permet le déclenchement de la combustion en ❷.

Le système de commande de la bobine d'allumage ❸ reçoit des informations :

- » sur la position du piston ❹ (par la position du volant moteur),
- » sur la fréquence de rotation du moteur ❺,
- » sur la pression dans la tubulure d'admission.

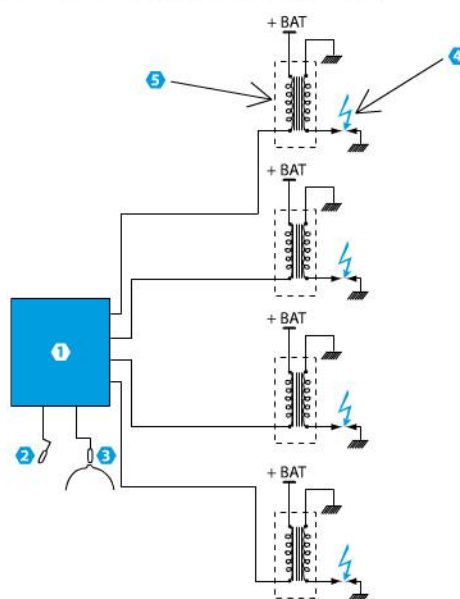
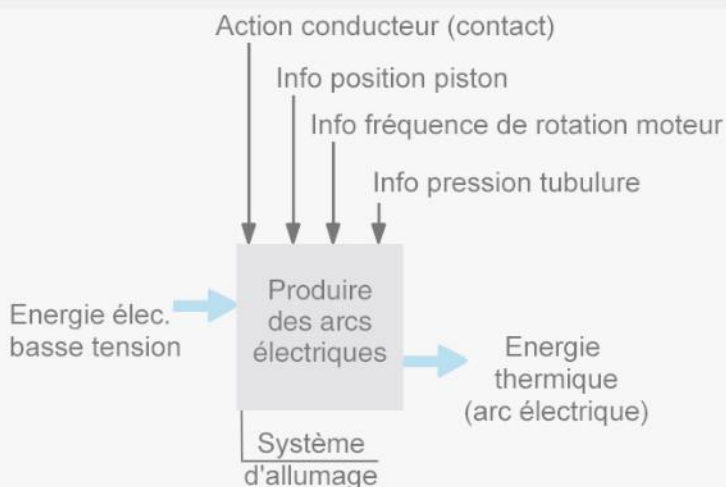


Figure 2.7 Système d'étude du système d'allumage.

Fonction

Figure 2.8 Fonction globale du système d'allumage.

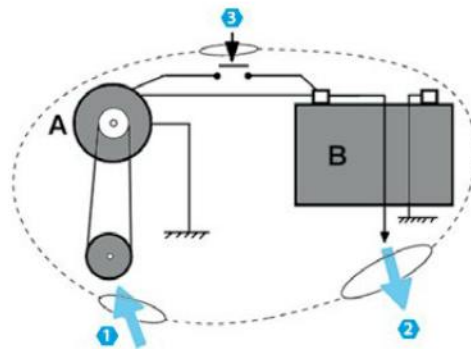


2.4 Le système de charge

- ❶ L'alternateur (A) reçoit l'énergie mécanique d'une des poulies du moteur.
- ❷ Il restitue un courant continu de tension sensiblement constante permettant le fonctionnement :
 - » des circuits électriques moteur (allumage),
 - » de l'équipement électrique du moteur tournant.
- ❸ Contact (combiné de démarrage/allumage).

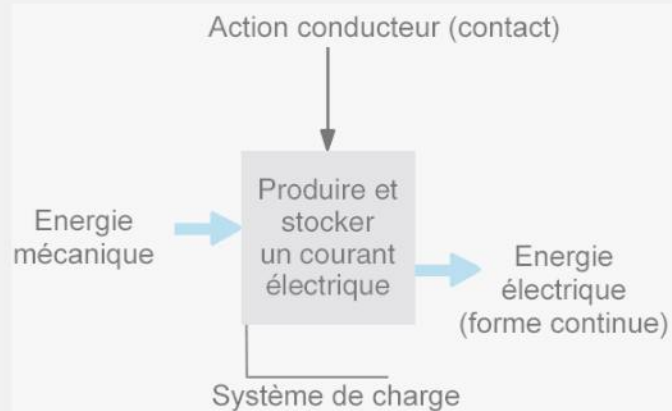
Figure 2.9 Frontières d'étude du système de charge.

- A.** Alternateur.
B. Batterie d'accumulateurs.
 ❶ Énergie mécanique du moteur.
 ❷ Énergie électrique utile.
 ❸ Contact.



Fonction

Figure 2.10 Fonction globale du système de charge ASD niveau A-O



2.5 Le système de démarrage

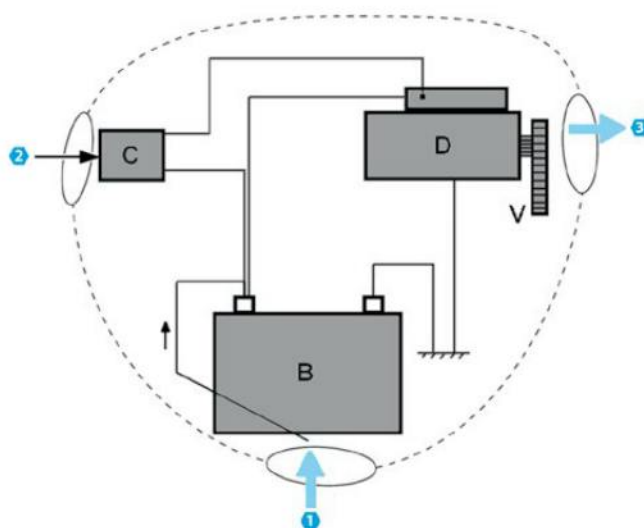
- ❶ L'énergie électrique qui provient du circuit de charge est stockée dans la batterie (B).
- ❷ Au moment du démarrage, le conducteur tourne la clé du combiné (C) et commande :
 - » les circuits électriques du moteur,
 - » le démarreur (D).
- ❸ Le moteur électrique du démarreur tourne, son pignon entraîne en rotation la couronne du volant moteur (V).

Lorsque le conducteur relâche la clé, le pignon est désengrené et le moteur électrique s'arrête.

14

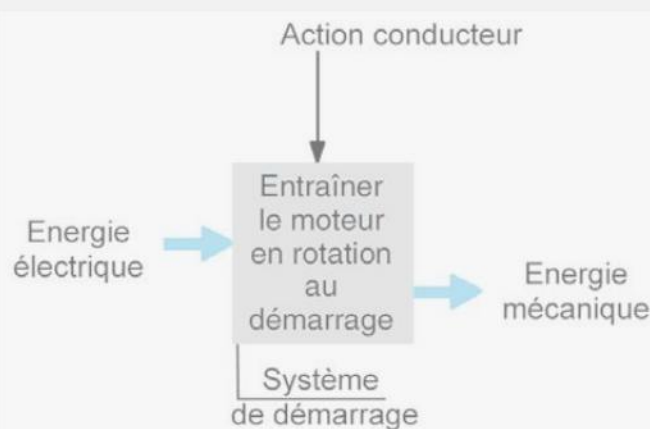
Figure 2.11 Frontière d'étude du système de démarrage.

- ❶ Énergie électrique venant de l'alternateur.
 - ❷ Action du conducteur.
 - ❸ Énergie mécanique (lancement du moteur).
- B.** Batterie d'accumulateurs.
C. Combiné de démarrage.
D. Démarreur.
V. Volant moteur.



Fonction

Figure 2.12 Fonction globale simplifiée du système de démarrage.

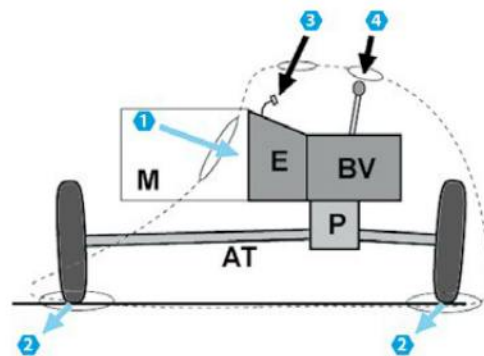


2.6 Le système de transmission

- ❶ Le système de transmission reçoit l'énergie mécanique du moteur (M) par le volant moteur.
- ❷ Il la transmet aux roues motrices.
- ❸ Le conducteur peut agir sur la pédale d'embrayage pour accoupler ou désaccoupler (E) la transmission.
- ❹ Le conducteur agit également sur le levier de vitesses qui commande les changements de rapports de démultiplication (BV).

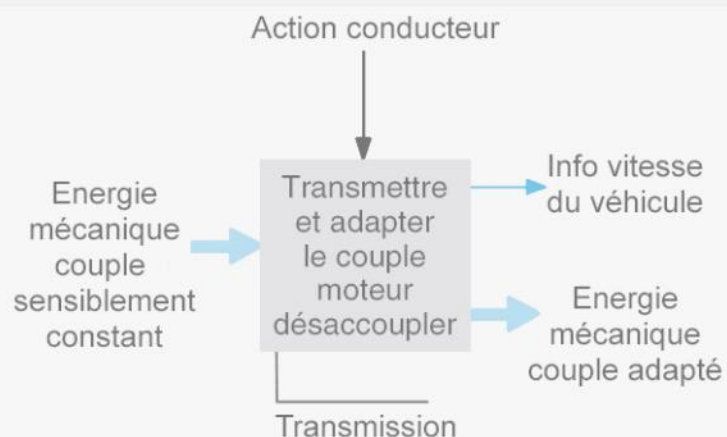
Figure 2.13 Frontière d'étude du système de transmission.

M. Moteur.
E. Embrayage.
BV. Boîte de vitesses.
P. Pont.
AT. Arbres de transmission.



Fonction

Figure 2.14 Fonction globale du système de transmission.

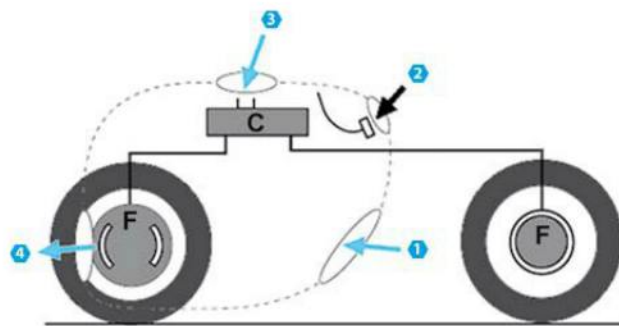


2.7 Le système de freinage

- ❶ Le véhicule possède une énergie cinétique :

$$E_c = \frac{Mv^2}{2}$$

- ❷ Le conducteur agit sur la pédale de freins.
❸ Le système de commande (C) reçoit de l'énergie sous diverses formes (assistance) mécaniques, hydrauliques, pneumatiques, électriques, afin d'amplifier l'effort du conducteur.
❹ Chaque élément de frein (F) transforme cette énergie en chaleur (énergie thermique) par frottement.

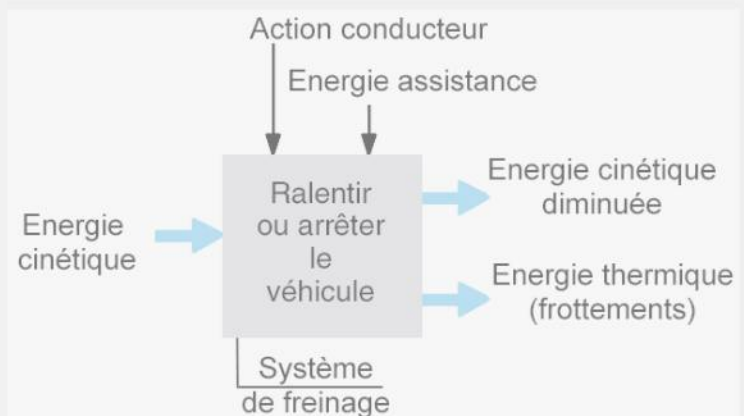


16

Figure 2.15 Frontière d'étude du système de freinage.

Fonction

Figure 2.16 Fonction globale du système de freinage.



2.8 Le système de suspension

- 1 Le poids du véhicule crée une force verticale de haut en bas qui s'appuie sur la tête du ressort (R).

Le ressort est interposé entre un point de la caisse et le bras de suspension lié à la roue.

- 2 Le pneumatique réalise le contact au sol.
- 3 Le profil irrégulier de la route communique à la roue un mouvement oscillatoire. Les chocs reçus par la roue lui communiquent une énergie cinétique ($\frac{Mv^2}{2}$).
- 4 L'énergie cinétique reçue par la caisse est diminuée, transformée en chaleur par torsion ou flexion du ressort et frottement de l'amortisseur (A).

L'adhérence des pneumatiques est assurée par l'action vers le bas des ressorts.

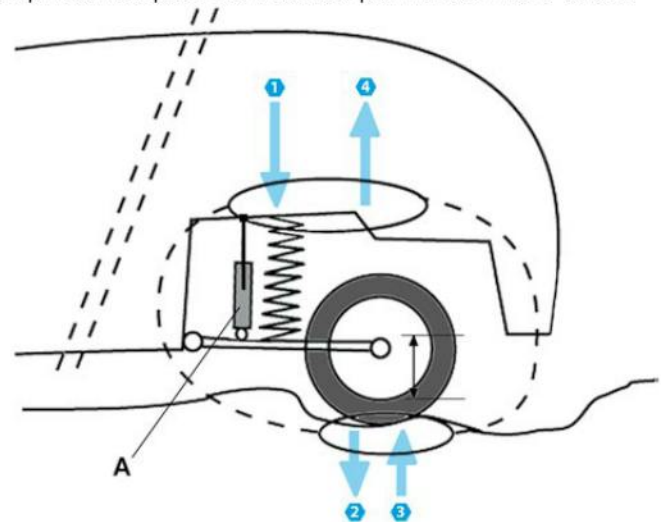


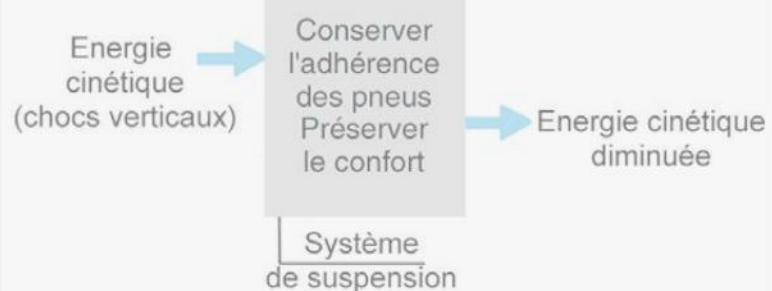
Figure 2.17 Frontière du système de suspension.

17

- 2 - Les sous-ensembles de l'automobile

Fonction

Figure 2.18 Fonction globale simplifiée du système de suspension.

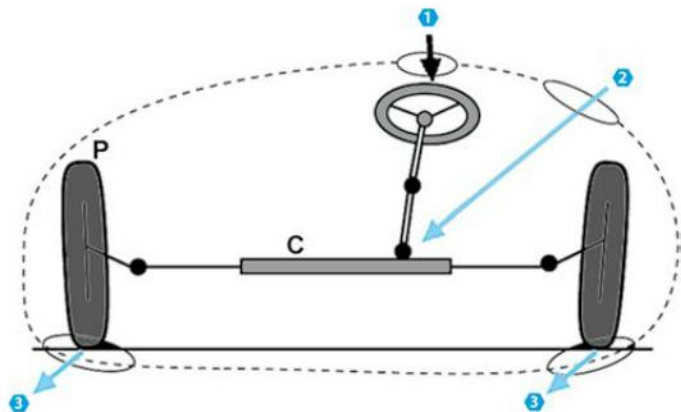


2.9 Le système de direction

- ❶ Le conducteur agit sur le volant.
- ❷ Les roues avant pivotent ensemble sur un axe fictif appelé « axe de pivot » (P) (en restant sensiblement parallèles) grâce à un mécanisme : crémaillère (C).

Figure 2.19 Frontière du système de direction.

- ❶ Action du conducteur.
- ❷ Action de l'assistance.
- ❸ Roues orientées ou non.

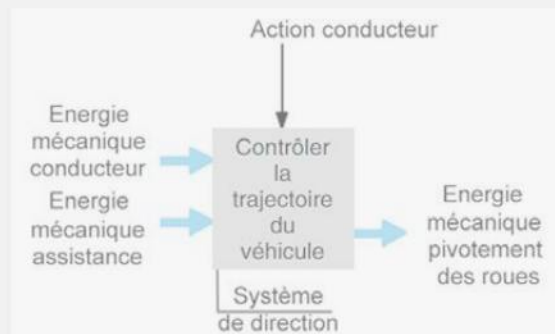


Remarque

Les roues directrices peuvent également être motrices. Elles participent également à la suspension. Cela nécessite une disposition particulière des axes de pivot appelée « géométrie du train avant ».

Fonction

Figure 2.20 Fonction globale du système de direction.



Résumons l'analyse fonctionnelle des sous-ensembles

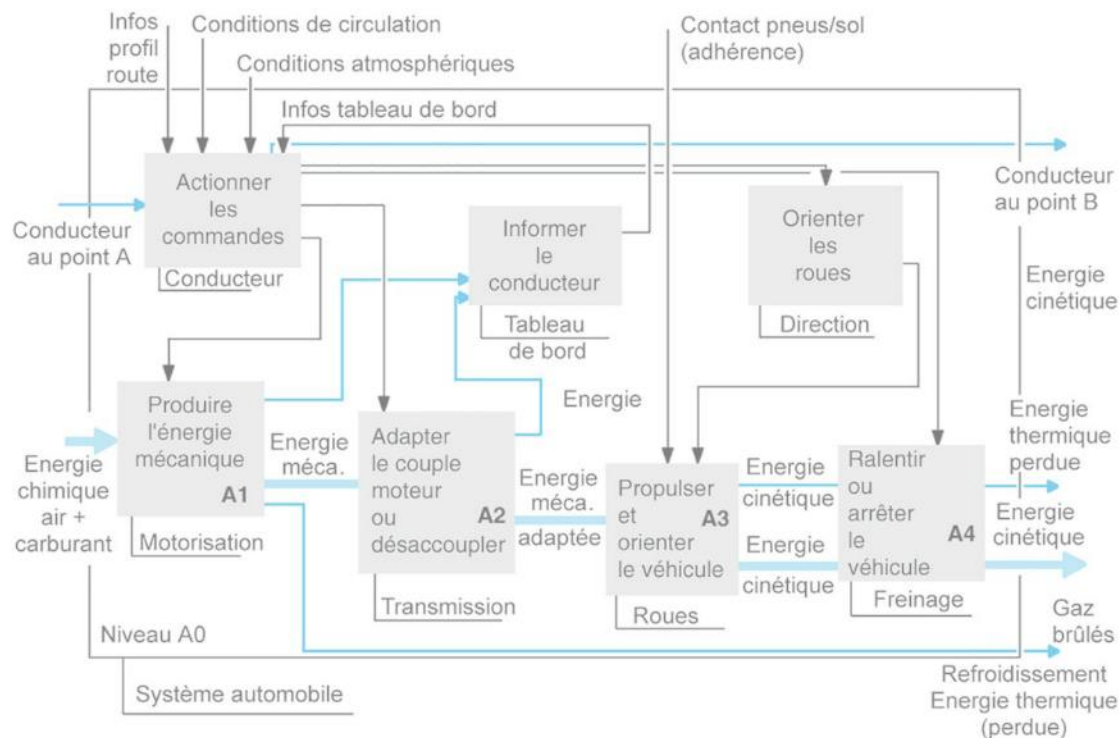


Figure 2.21 Analyse systémique descendante simplifiée du système automobile. Niveau A0 = 2^e niveau d'analyse du système. Point de vue de la maintenance.

Remarque

Pour ne pas alourdir l'analyse, certains sous-ensembles n'ont pas été représentés : système de suspension, d'éclairage, etc. Nous admettons ici que le système de motorisation comprend les systèmes de charge et de démarrage.

Résumé

Les différents sous-ensembles de l'automobile sont les suivants :

La motorisation qui comprend :

- » le moteur thermique qui transforme l'énergie chimique d'un mélange carburé en énergie mécanique,
- » le système d'alimentation air-essence qui stocke le carburant et prépare le mélange air-essence pour le rendre combustible,
- » le système d'allumage qui produit des arcs électriques à haute tension et dont l'énergie thermique permet le déclenchement de la combustion,
- » le système de charge qui produit et stocke l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de tous les circuits du véhicule,
- » le système de démarrage dont le moteur électrique permet le lancement du moteur thermique.

La transmission achemine l'énergie mécanique du moteur aux roues motrices et adapte le couple moteur au couple résistant.

Le freinage ralentit ou arrête le véhicule en dissipant, par frottement, l'énergie cinétique acquise par le véhicule.

La suspension absorbe une partie des chocs reçus par les roues et améliore la tenue de route et le confort des passagers.

La direction permet de maintenir ou de modifier la trajectoire du véhicule en orientant les roues directrices.

L'équipement électrique comprend un grand nombre de dispositifs, facteurs de confort et de sécurité.

Testez vos connaissances



1. Quel est le système qui produit l'énergie mécanique ?

- a ☐ la clé de contact
- b ☐ le moteur
- c ☐ la batterie

2. Quel est le système qui achemine l'énergie mécanique aux roues motrices ?

- a ☐ le système de charge
- b ☐ la motorisation
- c ☐ la transmission

3. Où le système de démarrage prend-il son énergie ?

- a ☐ à la clé de contact
- b ☐ à la batterie
- c ☐ à l'allumage

4. Le démarreur s'engrène directement sur :

- a ☐ le volant moteur
- b ☐ le volant de direction
- c ☐ la clé de contact

5. Le système de charge permet de charger :

- a ☐ les bagages
- b ☐ le logiciel
- c ☐ la batterie

Entraînez-vous

Recherchez sur un véhicule les différents éléments qui correspondent aux systèmes énumérés dans ce chapitre. Nommez-les et expliquez sommairement leur fonctionnement.

Le châssis-carrosserie

chapitre 3

Le châssis-carrosserie est l'ossature du véhicule, le bâti sur lequel sont fixés tous les éléments mécaniques (figure 3.1).

Cet ensemble doit :

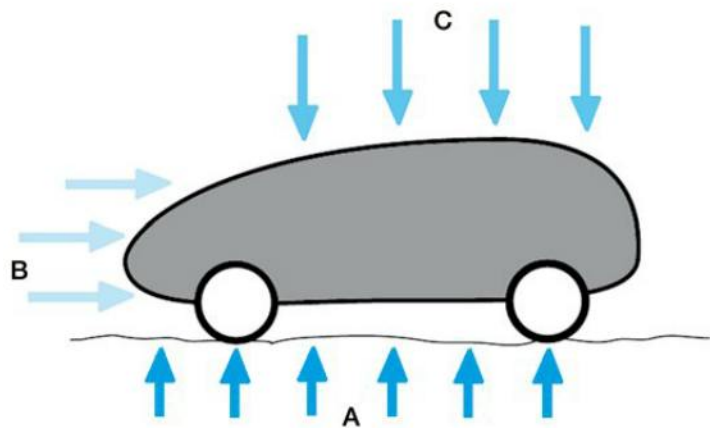
- » supporter tous les éléments mécaniques,
- » protéger des intempéries les éléments mécaniques et les passagers (étanchéité),
- » nécessiter le minimum d'énergie pour son déplacement,
- » préserver les passagers en cas d'accident,
- » conférer à l'ensemble un aspect esthétique agréable.

23

- 3 - Le châssis-carrosserie

Figure 3.1 Conditions à remplir pour le véhicule.

- A.** Actions de sol : résistance aux flexions, torsions et chocs.
- B.** Action du vent : profil adapté.
- C.** Action des intempéries : étanchéité.



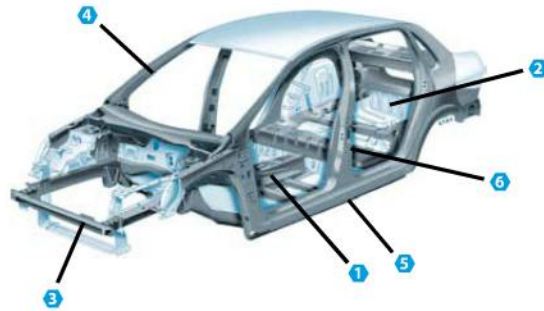
La figure 3.2 décrit les principaux éléments d'un ensemble châssis-carrosserie.

Les longerons et traverses sont constitués de tôles embouties formant les corps creux. Mais ce châssis allégé ne peut assurer la rigidité désirée.

La carrosserie et le châssis font partie d'un ensemble monobloc dont chaque élément participe à la rigidité de l'ensemble. On lui donne le nom de « coque auto-porteuse ».

Figure 3.2 Éléments constitutifs pour le véhicule (Document Peugeot).

- 1 Longerons ;
- 2 Traverses ;
- 3 Berceau moteur support train roulant (voie avant) ;
- 4 Montants ;
- 5 Bas de caisse ;
- 6 Pied milieu.



3.1 La carrosserie

Forme d'un véhicule

La forme d'un véhicule est conditionnée par plusieurs impératifs, notamment :

- » ses volumes intérieurs utiles aux éléments mécaniques et aux occupants,
- » sa stabilité (tenue de route) améliorée par la position basse du centre de gravité,
- » son aérodynamisme qui détermine l'énergie nécessaire à son déplacement.

Les principales caractéristiques dimensionnelles d'une automobile

- » La longueur hors tout ou totale.
- » La largeur et sa hauteur.
- » La voie : distance entre les plans moyens des roues d'un même essieu (elle n'est pas obligatoirement identique à l'avant et à l'arrière).
- » L'empattement : distance entre l'axe de la roue avant et celui de la roue arrière d'un même côté.

Toutes les caractéristiques dimensionnelles découlent des contraintes énumérées au paragraphe ci-dessus : habitabilité, stabilité, aérodynamisme (Figure 3.3).

La figure 3.3 donne un exemple des caractéristiques dimensionnelles d'une automobile.

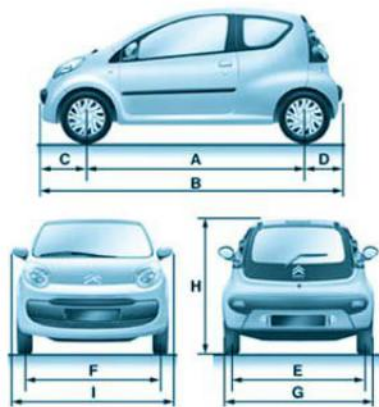


Figure 3.3 Caractéristiques dimensionnelles d'une automobile (Document Citroën).

- A. Empattement ;
- B. Longueur hors tout ou empattement total ;
- C. Porte-à-faux avant ;
- D. Porte-à-faux arrière ;
- E. Voie arrière ;
- F. Voie avant ;
- G. Largeur hors tout arrière ;
- H. Hauteur totale ;
- I. Largeur hors tout avant (en mm).

Il existe plusieurs versions de carrosseries automobiles

On peut distinguer, entre autres (figures 3.4 à 3.9) :

- » la berline,
- » le break,
- » le coupé,
- » le cabriolet,
- » le monospace,
- » le pick-up.

Remarque

On trouve également la limousine (berline rallongée), le 4 x 4, le spider, etc.

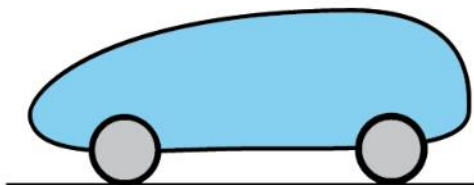


Figure 3.4 Berline.

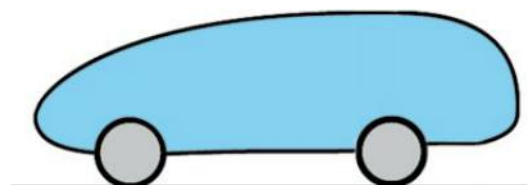


Figure 3.5 Break

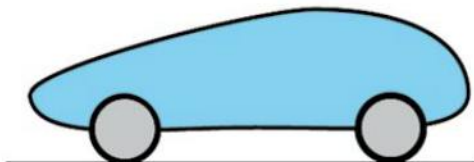


Figure 3.6 Coupé

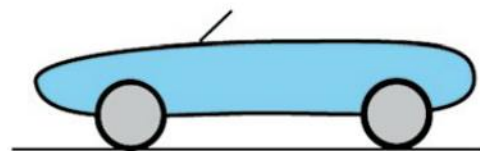


Figure 3.7 Cabriolet

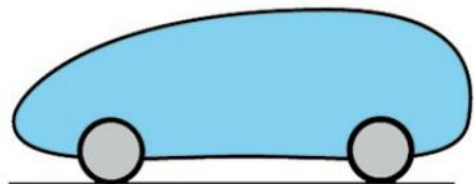


Figure 3.8 Monospace.

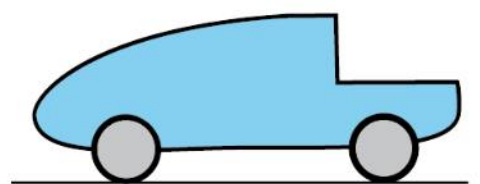


Figure 3.9 Pick-up.

L'aérodynamique est une science expérimentale qui a pour objet l'étude des mouvements relatifs d'un solide avec l'air. Pour se déplacer sur le sol, un véhicule doit vaincre deux forces :

Figure 3.10 Simulation numérique de soufflerie en 3D.



- » la résistance au roulement qui varie suivant :
 - la masse du véhicule,
 - la nature du contact pneu-sol.
- » la résistance à l'avancement qui varie suivant :
 - la forme du véhicule (profil),
 - sa surface frontale,
 - le carré de la vitesse.

Une carrosserie aérodynamique permet, soit, à consommation égale, d'augmenter la vitesse, soit, à vitesse égale, de consommer moins.

Sur la figure 3.10, on peut observer la simulation numérique en 3D d'un véhicule en soufflerie.

La forme d'un véhicule est conçue à partir :

- » des données des véhicules déjà conçus et commercialisés,
- » des mesures relevées en soufflerie lors des essais antérieurs,
- » du style désiré pour le véhicule (design).

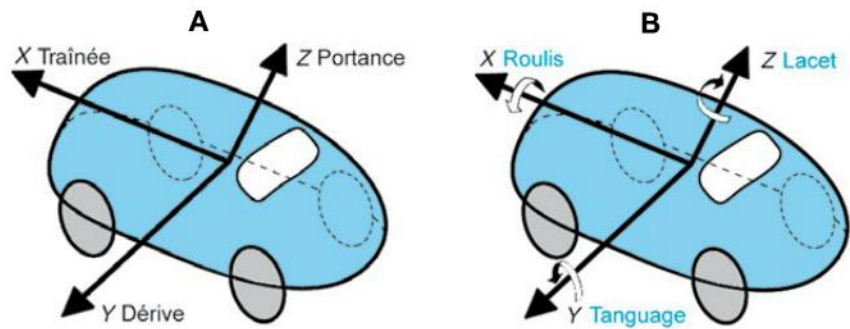
Un véhicule se déplaçant est soumis à l'action de trois forces (figures 3.11A) qui sont :

- » la traînée (F_x),
- » la dérive (F_y),
- » la portance (F_z).

On en calcule les moments par rapport aux axes X, Y et Z. Les moments produisent (figure 3.11B) :

- » pour la traînée, le roulis et la résistance à l'avancement,

Figure 3.11 Axe de mesure des forces aérodynamiques (A) et des moments (B) (Document Citroën).



- » pour la dérive, le tangage,
- » pour la portance, le lacet.

Pour la résistance à l'avancement, hormis la résistance au sol, seule la force de traînée est prise en compte. Pour la tenue de route, tous les paramètres interviennent.

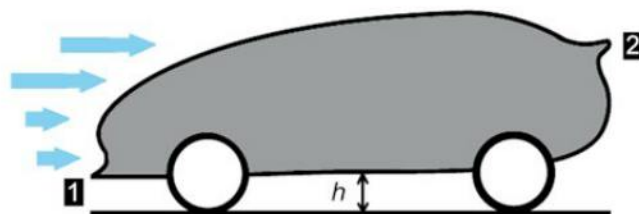
La stabilité du véhicule est inversement proportionnelle aux moments de forces.

Au fil des années, le coefficient aérodynamique des automobiles a été amélioré par (figure 3.12) :

- » l'abaissement de la garde au sol,
- » la diminution de la surface frontale,
- » la suppression des arêtes et angles vifs,
- » l'adjonction d'éléments correctifs :
 - spoiler ❶ : déflecteur placé à l'avant du véhicule qui réduit le débit d'air passant sous la caisse (diminution de la portance) ;
 - becquet ❷ : placé à l'arrière, ce déflecteur diminue la traînée.

Figure 3.12 Amélioration du coefficient aérodynamique.

- ❶ Spoiler.
 - ❷ Becquet.
- h : Garde au sol.



3.2 La sécurité des automobiles

Il faut distinguer :

- » la sécurité active dont le but est de limiter les risques d'accident,
- » la sécurité passive dont le but est de protéger les passagers en cas d'accident (figure 3.13).

La sécurité active

On peut intervenir auprès du conducteur :

- » en lui conseillant de ne pas prendre la route fatigué,
- » en lui interdisant la conduite en état d'ivresse (voir encadré),
- » en limitant la vitesse.

Éthylotest antidémarrage

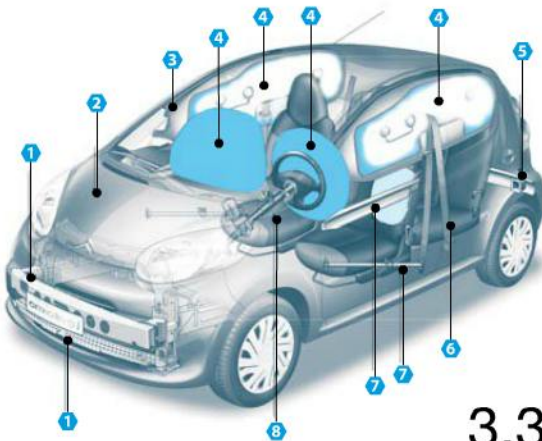
Avant de pouvoir démarrer la voiture munie d'un système d'éthylotest antidémarrage, le conducteur doit souffler dans une unité portable sans fil, de la taille d'une petite télécommande, disposée et rechargée dans un compartiment situé derrière la console centrale. L'alcoolémie du conducteur est analysée par l'unité portable, qui transmet les résultats au système de commande électronique de la voiture via signal radio. En cas de dépassement de la limite légale d'alcool par litre de sang, le démarrage du moteur est neutralisé. Grâce à des capteurs sophistiqués, il est impossible d'utiliser une source d'air externe, comme une pompe, pour tromper le système. Dans des situations d'urgence ou en cas de perte de l'unité portable, une fonction d'annulation peut être activée.

On réalise des équipements de sécurité :

- » L'ensemble du système de freinage est naturellement un système de sécurité active. Deux types de freins sont disponibles, les disques ou les tambours, et sont complétés par de nombreux dispositifs électroniques.
- » L'antiblocage qui permet un freinage sur une distance plus courte et en ligne.
- » On pourrait citer également : l'ESP (correcteur de trajectoire), l'aide au freinage d'urgence, l'éclairage xénon, les détecteurs de pluie, la suspension pilotée, la direction assistée, la climatisation, la détection de sous-gonflage, les sièges ergonomiques, etc.

Figure 3.13 Exemples de dispositifs de sécurité
(document PSA Peugeot Citroën).

- 1 Poutre et absorbeur de choc piéton.
- 2 Capot à absorption d'énergie.
- 3 Arceau de toit.
- 4 Air Bag.
- 5 Poutre arrière.
- 6 Ceinture à allongement contrôlé.
- 7 Renforts de porte.
- 8 Colonne de direction rétractable.



La sécurité passive

Les dispositifs technologiques qui améliorent la sécurité passive (figure 3.13) sont de plus en plus nombreux :

- » carrosserie avec zone d'absorption des chocs,
- » direction escamotable à colonne décalée,
- » airbag,
- » appui-tête,
- » structure des vitres,
- » renforts latéraux,
- » ceinture de sécurité avec prétensionneurs, etc.

3.3 Les effets d'un choc

29

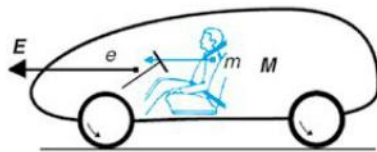


Figure 3.14 Éléments cinétiques accumulés par le véhicule.

Véhicule : $E_c = Mv^2/2$.
Conducteur : $e_c = mv^2/2$



Figure 3.15 Éléments mécaniques en cas de véhicule indéformable.

Un véhicule de masse M se déplaçant à une vitesse v possède une énergie cinétique E_c exprimée en joules :

$$E_c = \frac{Mv^2}{2}$$

Exemple

Un véhicule pesant 900 kg et roulant en ville à une vitesse d'environ 50 km/h (14 m/s) possède l'énergie cinétique suivante :

$$E_c = \frac{900 \times 14 \times 14}{2} = 88\,200 \text{ J}$$

Reprenons notre exemple et supposons, qu'en cas de choc frontal, la distance d'arrêt soit quasi nulle (0,05 m).

On sait que E_c est une énergie et qu'elle équivaut à un travail W , or :

$$W = F \cdot L$$

travail = force $\times$ distance

$$F = \frac{W}{L} = \frac{88\,200}{0,05} = 1\,764\,000 \text{ N}$$

soit 176 000 daN, soit l'équivalent en masse d'environ 170 tonnes !

Figure 3.16 (Document Renault).

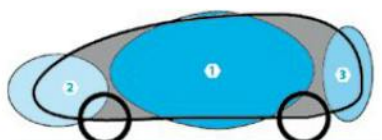


Figure 3.17 Véhicule déformable.

- ① Habitacle renforcé.
② et ③ Parties déformables.

L'avant et l'arrière du véhicule doivent donc se déformer le plus possible pour amortir les chocs. Pour ce faire on augmente les parties déformables (figure 3.17).

Lors d'un choc frontal, il faut protéger l'habitacle (figure 3.18).



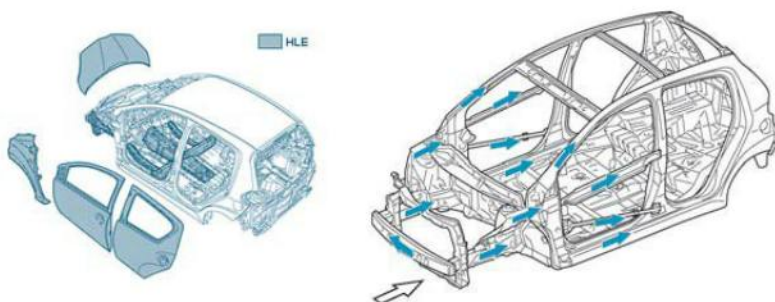
Figure 3.18 Choc frontal à 90 Km/h
(Document PSA).

Les éléments doivent donc se plier de telle manière que des éléments coupants ne viennent pas blesser les passagers à l'avant du véhicule. Ainsi, la colonne de direction est rétractable (figure 3.13) ; il en est de même du système de motorisation qui bascule sur ses supports et vient se loger sous l'habitacle (figure 3.19).

Remarque

L'énergie cinétique étant proportionnelle au carré de la vitesse, il n'est pas possible de protéger les passagers d'une manière absolue lorsque la vitesse est plus élevée.

Figure 3.19 Éléments du châssis –
carrosserie
(HLE : Tôle à haute résistance)
(Doc. Citroën).



Résumé

Fonctions, conditions

Le châssis-carrosserie doit :

- » supporter les éléments mécaniques (rigidité),
- » protéger la mécanique et les passagers des intempéries (étanchéité),
- » nécessiter le minimum d'énergie pour son déplacement (aérodynamisme),
- » installer confortablement les passagers (ergonomie),
- » faciliter la maîtrise du véhicule (sécurité primaire ou active),
- » préserver les passagers en cas d'accident (sécurité secondaire ou passive),
- » conférer à l'ensemble un aspect esthétique (style).

Constitution

Les véhicules particuliers sont constitués d'un ensemble dans lequel le châssis et la carrosserie sont confondus. Cet ensemble, appelé « monocoque » ou « coque autoporteuse », concilie la légèreté et la rigidité.

Il comprend un grand nombre d'éléments en tôle d'acier emboutie, assemblés le plus souvent par soudage. Des renforts sont prévus pour la fixation des éléments mécaniques. Après assemblage, la coque reçoit des traitements destinés à la protéger de la corrosion.

Caractéristiques dimensionnelles principales

- » longueur, largeur, hauteur hors tout,
- » voie, empattement, porte-à-faux avant et arrière, etc.,
- » aérodynamisme.

Une carrosserie aérodynamique permet :

- » à vitesse égale de consommer moins,
- » à consommation égale de rouler plus vite.

Les recherches s'effectuent en soufflerie sur des maquettes. On étudie les forces agissant sur le véhicule qui sont la traînée, la dérive et la portance.

Le coefficient de traînée (CX) et le coefficient aérodynamique (CXS) peuvent être diminués par :

- » un abaissement de la garde au sol,
- » une diminution de la surface frontale,
- » un adoucissement des arêtes vives,
- » l'adjonction d'éléments correctifs (spoilers, becquets).

Sécurité active

Systèmes destinés à éviter l'accident (tenue de route, freinage, etc.).

Sécurité passive

Destinée à diminuer la gravité des accidents :

- » habitacle indéformable,
- » parties avant et arrière à déformation contrôlée,
- » colonne de direction escamotable, airbag,
- » ceintures de sécurité à allongement contrôlé.

Testez vos connaissances



1. L'empattement d'un véhicule est :

- a ☐ la distance entre les axes des deux roues d'un même essieu
- b ☐ la distance entre l'axe de la roue avant et celui de la roue arrière
- c ☐ la distance entre l'axe d'une roue et le sol

2. La traînée d'un véhicule provoque :

- a ☐ le roulis
- b ☐ le tangage
- c ☐ le lacet

3. Afin de protéger les passagers en cas d'accident, le véhicule doit être :

- a ☐ entièrement rigide
- b ☐ à habitacle déformable
- c ☐ à avant et arrière déformables

Entraînez-vous

1. Recherchez les caractéristiques dimensionnelles du véhicule de votre choix.
2. Énumérez les dispositifs de sécurité passive qui l'équipent.

Partie 2

Le système de motorisation

Classification des moteurs

chapitre 4

4.1 Mise en situation

L'automobile peut être équipée de deux types de motorisation :

- » les moteurs électriques (figure 4.1) ;
- » les moteurs thermiques (figure 4.2).

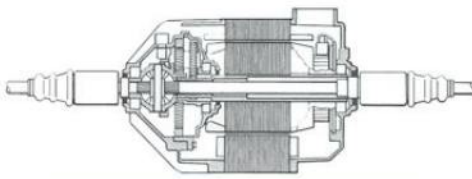


Figure 4.1 Moteur électrique.

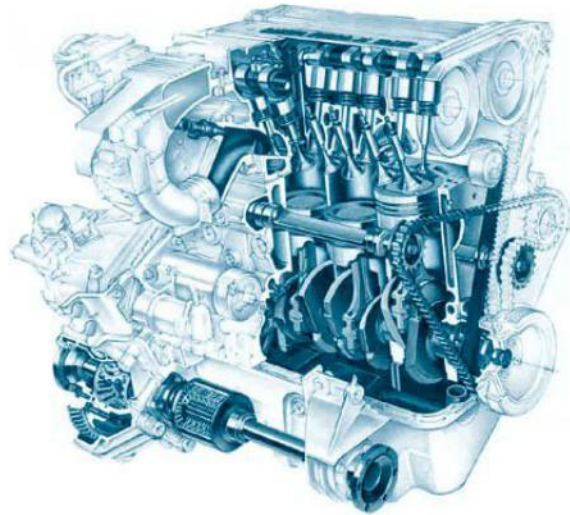


Figure 4.2 Moteur thermique.

Les moteurs électriques sont développés dans le chapitre 17 ; ils présentent certains avantages :

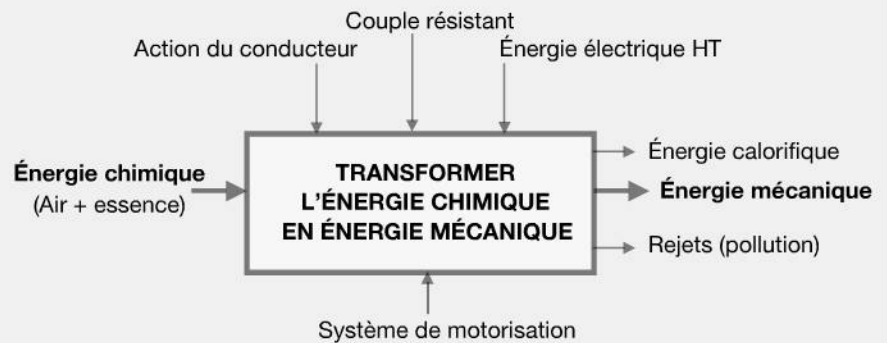
- » une pollution quasi nulle ;
- » un silence de fonctionnement ;
- » une simplicité de conduite.

Les principaux avantages du moteur thermique sont :

- » un rapport masse/puissance favorable ;
- » une autonomie importante qui les destine aux longues distances ;
- » une adaptation à l'automobile qui est le fruit d'un siècle d'évolution.

Fonction

Figure 4.3 Transformation énergétique dans un moteur.



Remarque

Le système « hybride » comporte un ou plusieurs moteurs électriques alimentés par un groupe électrogène à moteur thermique.

On distingue deux grandes familles de moteurs à combustion interne :

- » Les moteurs à explosion (à essence) (figure 4.4) dans lesquels la combustion du mélange air-essence est amorcée par l'étincelle d'une bougie d'allumage. Ils possèdent donc un système d'allumage commandé. Le mélange air-essence peut s'effectuer par l'injection d'essence.
- » Les moteurs à combustion (Diesel) (figure 4.5) dont la combustion est déclenchée par l'injection de gazole sous pression dans de l'air fortement comprimé. Il se produit une auto-inflammation, ce qui signifie que le mélange s'enflamme spontanément.



Figure 4.4 Moteur à explosion.



Figure 4.5 Moteur à combustion (Diesel).

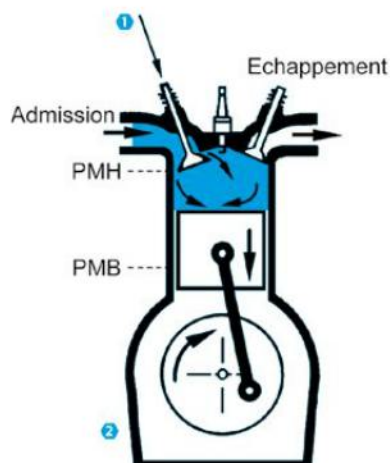


Figure 4.6 Moteur à quatre temps.

- 1 Soupapes.
- 2 Carter non étanche.

L'ingénieur français Beau de Rochas a défini, en 1862, le principe du cycle de fonctionnement des moteurs à combustion interne dont les phases sont :

- » 1. L'admission : aspiration d'air ou de mélange air-essence.
- » 2. La compression de l'air ou du mélange.
- » 3. L'inflammation rapide et la détente du piston.
- » 4. L'échappement des gaz brûlés.

Il existe trois types d'applications de ce cycle :

- » les moteurs à quatre temps (figure 4.6) qui réalisent le cycle en quatre courses de piston et deux tours de vilebrequin ;
- » les moteurs à deux temps (figure 4.7) qui réalisent le cycle en deux courses de piston et un tour de vilebrequin ;
- » les moteurs rotatifs (peu répandus) (figure 4.8) dont le mouvement rectiligne alternatif du piston classique est remplacé par la rotation d'un rotor qui réalise le cycle trois fois par tour.

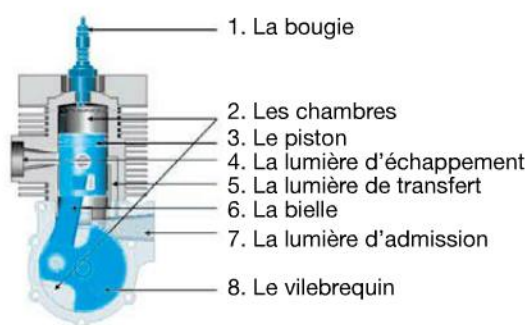


Figure 4.7 Moteur à deux temps.

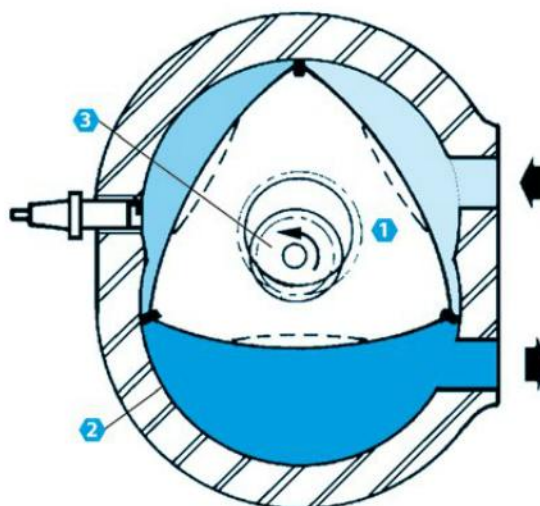


Figure 4.8 Moteur à piston rotatif.

- 1 Piston ou rotor.
- 2 Stator ou épitrochoïde.
- 3 Vilebrequin.

Ne pas confondre :

- » Injection indirecte essence : injection d'essence à basse pression en amont de la soupape d'admission au temps d'admission.
- » Injection directe essence (figure 4.9B) : injection d'essence sous haute pression directement dans la chambre de combustion pendant la phase d'admission.

- » Injection indirecte Diesel : injection de gazole à haute pression dans une chambre de précombustion en fin de compression.
- » Injection directe Diesel (figure 4.9A) : injection de gazole à très haute pression directement dans le cylindre en fin de compression.

Figure 4.9 Moteur à injection directe.



A. Moteur diesel à injection directe

B. Moteur essence à injection directe

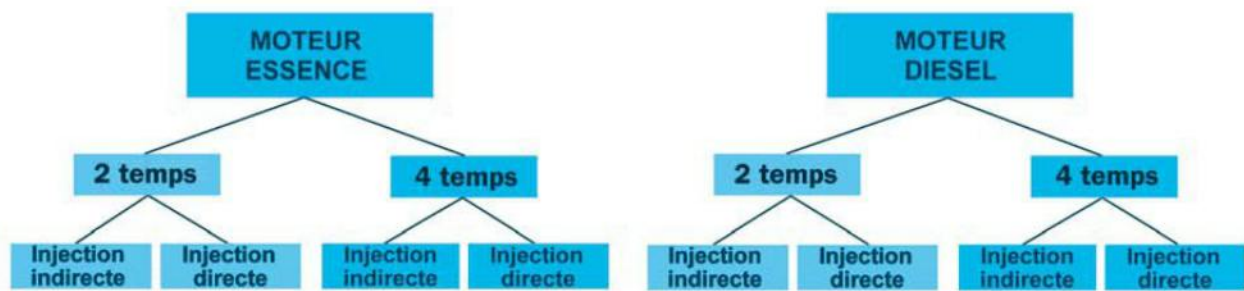


Figure 4.10 Récapitulation des différents types de moteurs thermiques.

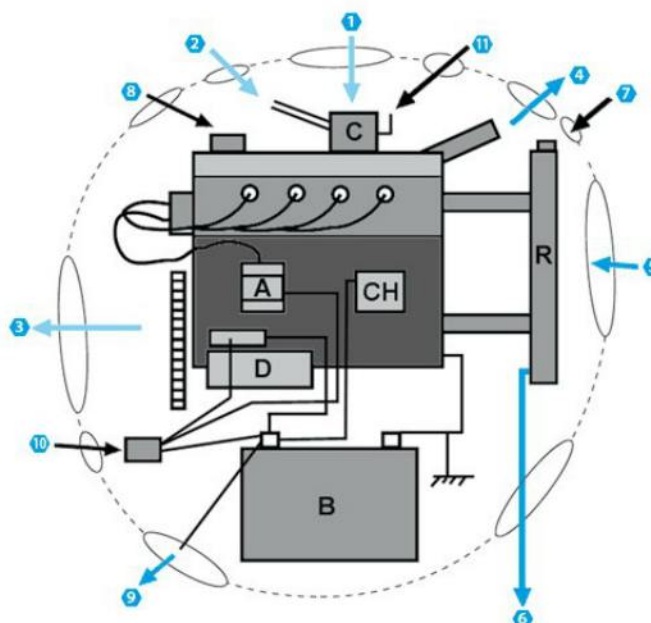
4.2 Le système de motorisation dans son ensemble

- 1 Admission d'air.
- 2 Admission de carburant (énergie chimique).
- 3 Production d'énergie mécanique.
- 4 Évacuation des gaz brûlés (énergie thermique perdue).
- 5 Passage d'air frais dans un échangeur (radiateur).

- ⑥ Évacuation de chaleur (énergie thermique perdue).
- ⑦ Présence d'un liquide réfrigérant.
- ⑧ Présence d'un lubrifiant.
- ⑨ Production d'énergie électrique.
- ⑩ Action du conducteur sur un combiné allumage/démarrage.
- ⑪ Action du conducteur sur l'accélérateur.

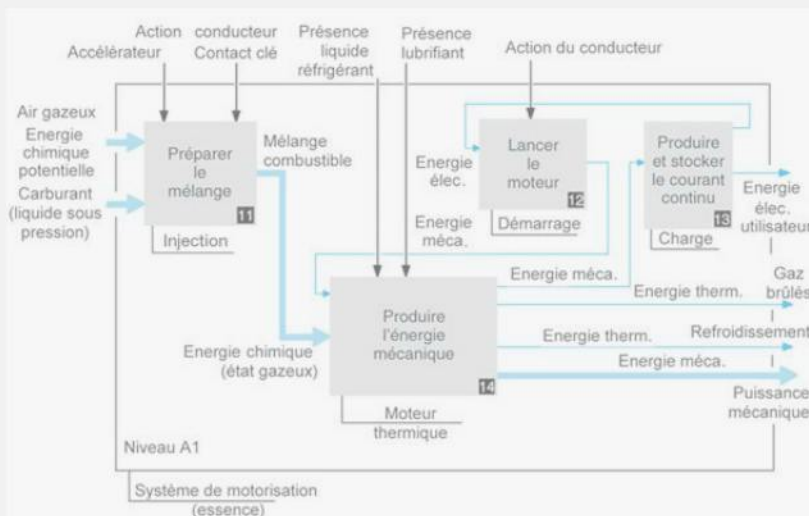
Figure 4.11 *Frontière d'étude du système de motorisation (ce système est développé dans la totalité du Tome 1).*

- A.** Système d'allumage.
- C.** Système d'injection.
- CH.** Système de charge.
- D.** Système de démarrage.
- R.** Système de refroidissement.



Fonction

Figure 4.12 *Analyse descendante du système de motorisation.*



Les véhicules de tourisme peuvent être équipés :

- » d'un moteur thermique essence, essence + gaz ou Diesel ;
- » d'un moteur électrique ;
- » des deux systèmes à la fois (ces véhicules appelés « hybrides » comportent un moteur thermique pour la propulsion et la production d'électricité et un ou plusieurs moteurs électriques pour la propulsion).

Résumé

Types de moteurs

- » moteurs électriques,
- » moteurs thermiques.

Familles de moteurs thermiques

- » à explosion : carburant essence, allumage commandé.
- » à combustion : carburant gazole, auto-inflammation sous haute pression.

Cycles de fonctionnement

Les phases du cycle Beau de Rochas sont :

- » l'admission,
- » la compression,
- » l'explosion-détente,
- » l'échappement.

Différents types de cycles

- » Deux temps, quatre temps, rotatifs.

Moteur à quatre temps à injection d'essence

Le carburant est injecté au temps d'admission derrière la soupape d'admission. La combustion est déclenchée par un système d'allumage.

Moteur à quatre temps à injection Diesel

Le carburant est injecté en fin de compression dans une préchambre ou directement dans le cylindre. La combustion s'effectue par auto-inflammation du carburant dans l'air surchauffé. Ces moteurs peuvent être « atmosphériques » ou « turbocompressés ».

Testez vos connaissances



1. Dans un véhicule hybride, quel est le type de moteur installé ?

- a ☐ *moteur thermique*
- b ☐ *moteur électrique*
- c ☐ *les deux types de moteurs*

2. La combustion du mélange dans un moteur à explosion est produite par :

- a ☐ *l'air fortement comprimé*
- b ☐ *l'étincelle produite par la bougie*
- c ☐ *l'auto-inflammation*

3. Dans le cycle Beau de Rochas, le deuxième temps est le temps :

- a ☐ *d'échappement*
- b ☐ *d'admission*
- c ☐ *de compression*

Entraînez-vous

1. Recherchez les différences de conception entre un moteur à injection d'essence et un moteur à injection Diesel.
2. Précisez les différences entre les bougies d'allumage et les bougies de préchauffage.
3. Recherchez les différences essentielles entre un moteur Diesel à injection indirecte et un moteur à injection directe à rampe commune.

Constitution des moteurs

chapitre 5

On distingue dans un moteur (figure 5.1) :

- » les parties fixes ;
- » les parties mobiles.

Figure 5.1 Les parties d'un moteur.

Parties fixes :

- ❶ Couvercle-culasse.
- ❷ Culasse.
- ❸ Bloc-moteur ou bloc-cylindres.
- ❹ Carter chapeaux de paliers.
- ❺ Carter inférieur.

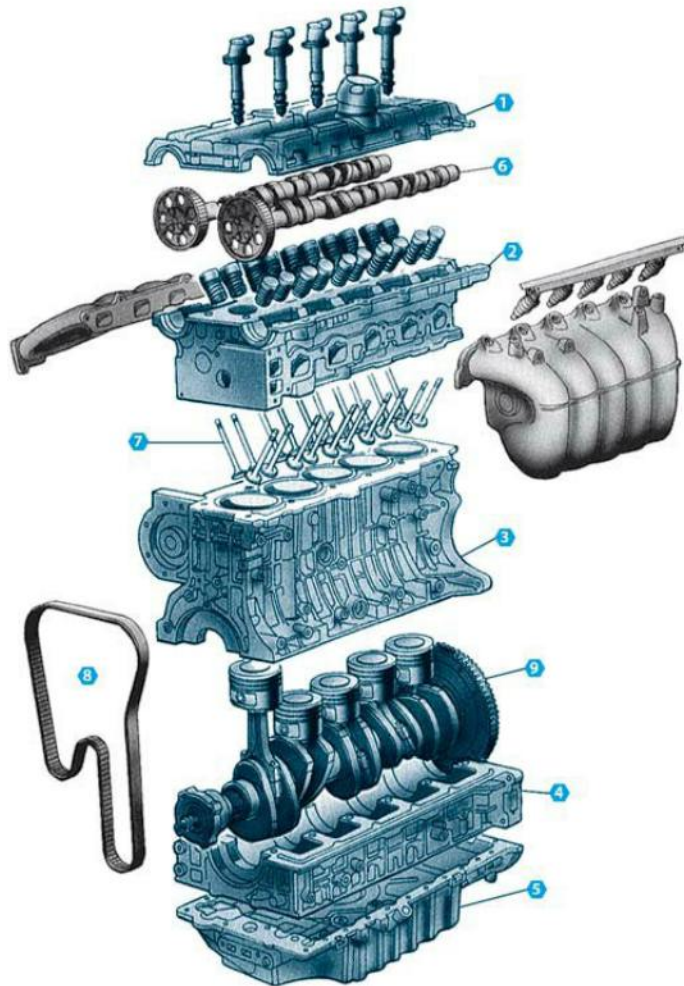
Parties mobiles :

Distribution :

- ❻ Arbres à cames.
- ❼ Soupapes.
- ❽ Courroie ou chaîne de distribution.

Équipage mobile :

- ❾ Volant moteur, bielles et pistons.



5.1 Les éléments fixes

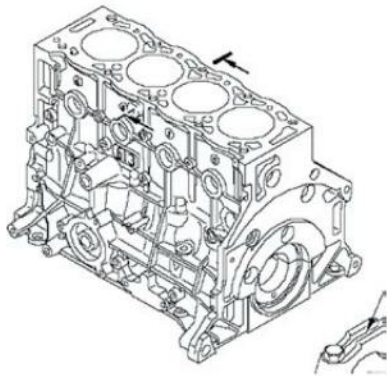


Figure 5.2 Bloc-moteur en fonte, alésage direct des cylindres.

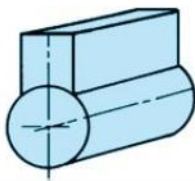


Figure 5.3 Cylindres en ligne.

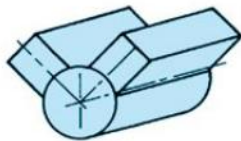


Figure 5.4 Cylindres en V.

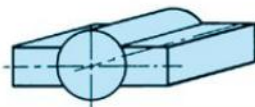


Figure 5.5 Cylindres à plat opposés.

Le bloc-moteur ou bloc-cylindres

Le bloc-moteur ou bloc-cylindres (figure 5.2) :

- » supporte le vilebrequin ;
- » permet le guidage des pistons ;
- » assure avec la culasse l'étanchéité des cylindres ;
- » permet le passage des canalisations de graissage et de refroidissement.

Le bloc-moteur doit :

- » être indéformable et répondre à des dispositions géométriques précises ;
- » résister aux pressions, torsions, frottements, variations de température ;
- » être d'une bonne conductibilité thermique (évacuation rapide des calories en excédent) ;
- » posséder la masse la moins élevée possible.

Les paliers dans lesquels tourbillonne le vilebrequin doivent être concentriques. On nomme cette ligne invisible « ligne d'arbre ». La ligne d'arbre doit être parallèle au plan de joint supérieur. À partir de deux cylindres, il est possible d'adopter les dispositions suivantes : en ligne (figure 5.3), en V (figure 5.4), à plat opposés (figure 5.5) (parfois en V, en W ou en étoile).

Les différents types de bloc-cylindres :

- » Bloc à alésage direct (figure 5.6) : certains blocs en fonte sont directement alésés, les cylindres et le bloc ne faisant qu'une seule pièce. En cas d'usure des cylindres, il est nécessaire de réalésier à une cote supérieure et d'adapter des pistons de plus fort diamètre.
- » Bloc à chemises amovibles : ce système facilite la fabrication ; il permet l'utilisation de matériaux différents pour le bloc et pour les cylindres (cylindres en fonte, bloc en alliage léger). La réparation est facilitée (remontage de chemises d'origine).
- » Chemises sèches (figure 5.7) : fourreau de faible épaisseur emmanché dans un bloc en fonte ou en alliage léger ; le remplacement est possible mais l'ajustement est serré ; il n'y a aucune communication avec l'eau de refroidissement.

- » Chemises humides (figure 5.8) : les chemises servent en même temps de paroi pour les conduits de refroidissement ; leur remplacement est aisé, mais l'étanchéité doit être particulièrement soignée. Les chemises sont en fonte centrifugée, elles sont également alésées, rectifiées et rodées.

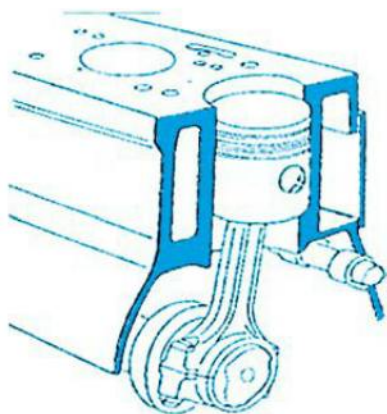


Figure 5.6 Bloc-cylindres à alésage direct.

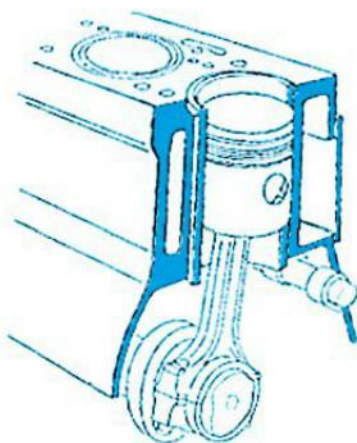


Figure 5.7 Chemises sèches.

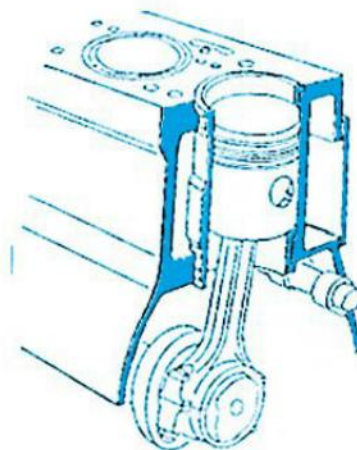


Figure 5.8 Chemises humides.

La culasse

La culasse assure la fermeture des cylindres dans leur partie supérieure, constituant ainsi la chambre de combustion. Elle permet :

- » l'arrivée et l'évacuation des gaz ;
- » la mise en position des éléments de la distribution et d'une partie de l'allumage ;
- » l'évacuation rapide des calories, le point le plus chaud du moteur étant précisément la chambre de combustion.

On utilise la fonte ou l'alliage d'aluminium moulé. Les contraintes mécaniques étant moins importantes que pour le bloc-moteur, les constructeurs ont presque abandonné la fonte au profit des alliages d'aluminium (alpac), en raison de sa légèreté et de sa très bonne conductibilité thermique.

Les procédés de fabrication sont les mêmes que pour le bloc-moteur.

Les chambres de combustion pratiquées dans la culasse ont une forme particulièrement étudiée (hémisphérique, bispérique) (figure 5.9). Elles peuvent également être totalement, ou partiellement, logées dans la tête du piston.

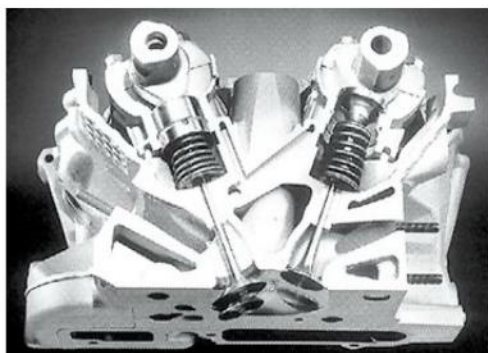


Figure 5.9 Coupe d'une culasse en alliage léger.

Leur forme doit faciliter le brassage des « gaz frais » et l'évacuation des gaz brûlés. Les conduits d'admission et d'échappement dans la culasse portent le nom de « chapelles ».

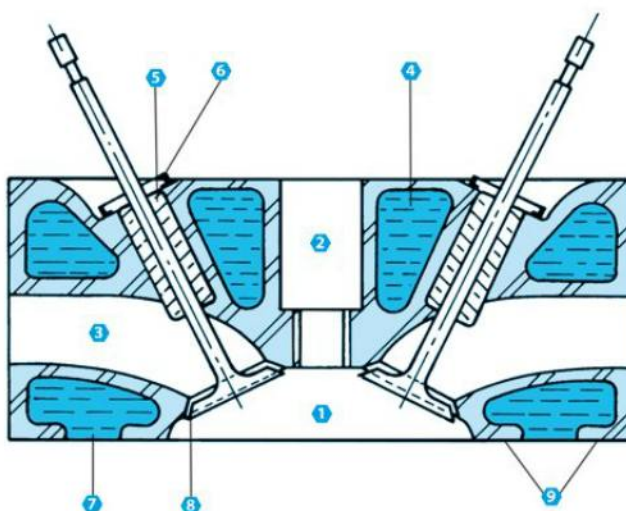
Un réseau de conduits de refroidissement est pratiqué dans toute la culasse, en particulier à proximité de la chambre de combustion, des soupapes et des bougies.

Ces conduits communiquent avec le bloc-cylindres par des trous pratiqués dans le plan de joint (figure 5.10).

Le plan de joint entre la culasse et le bloc-cylindres permet le passage de l'eau, des gaz comprimés et de l'huile sous pression vers la partie inférieure du moteur (figure 5.10).

Figure 5.10 Composantes d'une culasse.

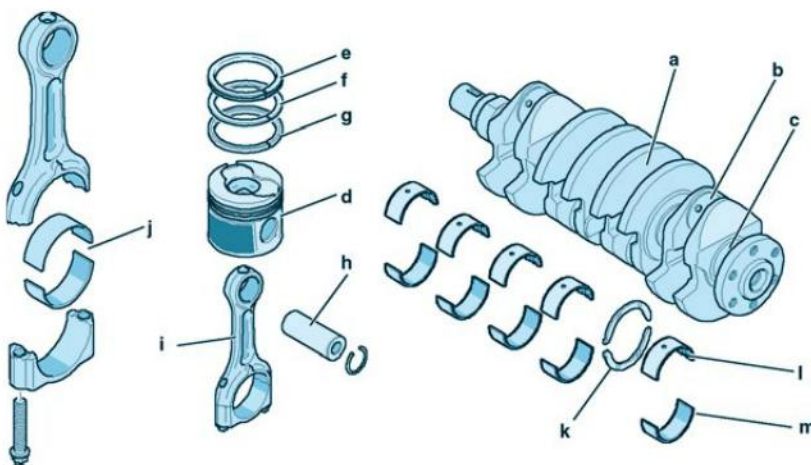
- 1 Chambre de combustion.
- 2 Cheminée de bougie.
- 3 Chapelle.
- 4 Canalisations de refroidissement.
- 5 Guide soupape.
- 6 Rondelle d'appui du ressort.
- 7 Communication avec le bloc.
- 8 Siège de soupape.
- 9 Plan de joint de culasse.



5.2 Les éléments mobiles

Figure 5.11 Les éléments mobiles.

- a : Vilebrequin ;
- b : Maneton ;
- c : Tourillon ;
- d : Piston ;
- e : Segment coup de feu ;
- f : Segment d'étanchéité ;
- g : Segment racleur ;
- h : Axe de piston ;
- i : Bielle ;
- j : Demi-coussinets de bielle ;
- k : Demi-cales de jeu longitudinal du vilebrequin ;
- l : Demi-coussinets supérieurs de palier vilebrequin ;
- m : Demi-coussinets inférieurs de palier vilebrequin.



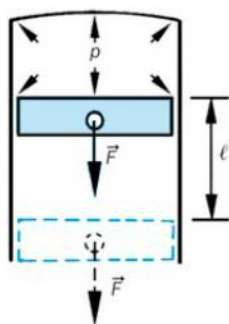


Figure 5.12 Force : $F = pS$;
Travail : $W = Fl$.

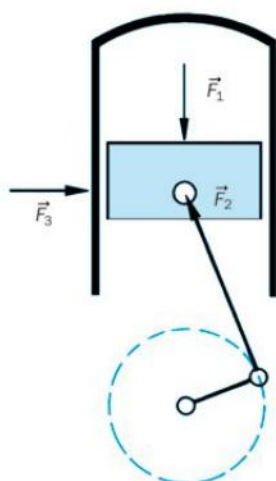


Figure 5.13 Actions reçues
par le piston.

Le piston

Le piston est la paroi mobile du cylindre. Il permet :

- » la compression des gaz frais grâce à la force qui lui est communiquée par la bielle :

$$p = F/S$$

- » la transformation au temps détente de la pression des gaz enflammés en une force :

$$F = pS$$

- » le déplacement de la force permet au moteur d'accomplir un travail (figure 5.12) :

$$W = Fl$$

Les variations de température qu'il subit sont très importantes. Son refroidissement est difficile à réaliser.

Les efforts mécaniques sont nombreux (figure 5.13) :

- » action des gaz sous pression ($\vec{F}_1$) ;
- » action de la bielle (force résistante) ($\vec{F}_2$) ;
- » action des parois du cylindre ($\vec{F}_3$) ;
- » forces d'inertie alternatives dues aux accélérations et décélérations du piston.

Le piston est en général moulé dans un matériau léger et d'une bonne conductibilité thermique, comme les alliages d'aluminium. La tête et le support d'axe, devant transmettre l'énergie mécanique, sont particulièrement renforcés (figure 5.14). Le piston se compose :

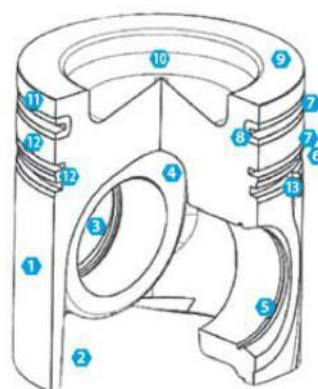
- » d'une tête ou culot dont le diamètre doit être inférieur à l'alésage du cylindre quelles que soient les dilatations ;
- » de segments situés dans des gorges pratiquées sur le pourtour du piston et qui assurent l'étanchéité ;
- » d'une jupe qui doit assurer le guidage à froid comme à chaud avec un minimum de frottement.

La force à transmettre par l'axe de piston étant élevée, sa surface de contact avec le piston et la bielle doit être importante. Il est fabriqué en acier cémenté trempé, puis rectifié. Sa mise en position est assurée par divers montages :

- » libre dans le piston et serré sur la bielle ;
- » libre dans la bielle et serré sur le piston ;

Figure 5.14 Piston.

- 1 Jupe
- 2 Bas de jupe / intérieur du piston
- 3 Trou d'axe
- 4 Bossage d'axe
- 5 Gorge de fixation pour circlips et arrêt d'axe
- 6 Gorge de segment racleur d'huile
- 7 Gorges pour segment de feu et segment de compression
- 8 Anneau porte segment
- 9 Fond de piston
- 10 Chambre de combustion
- 11 Cordon de feu
- 12 Zones de segmentation
- 13 Orifice pour retour d'huile



» libre dans la bielle et le piston : dans ce cas, il est arrêté à ses extrémités.

Les segments

Les segments sont des anneaux brisés, de section carrée ou parallélépipédique, travaillant en extension. Ils doivent assurer des pressions radiales uniformes sur les parois du cylindre (figure 5.15). La fonte douce qui les compose reçoit un chromage évitant une usure rapide par frottement. Leur position dans les gorges permet à la pression des gaz d'accentuer leur étanchéité.

Les segments pour moteur à quatre temps sont en général au nombre de trois :

Le segment de feu 1 ou premier segment d'étanchéité.

Le segment intermédiaire 2 ou deuxième segment d'étanchéité.

Ces deux premiers segments assurent l'étanchéité inférieure de la chambre de combustion.

Enfin, le segment racleur 3 empêche le film d'huile de remonter vers la chambre.

On peut donc prévoir que l'usure des segments ou du cylindre provoquera une perte de compression et une consommation d'huile.

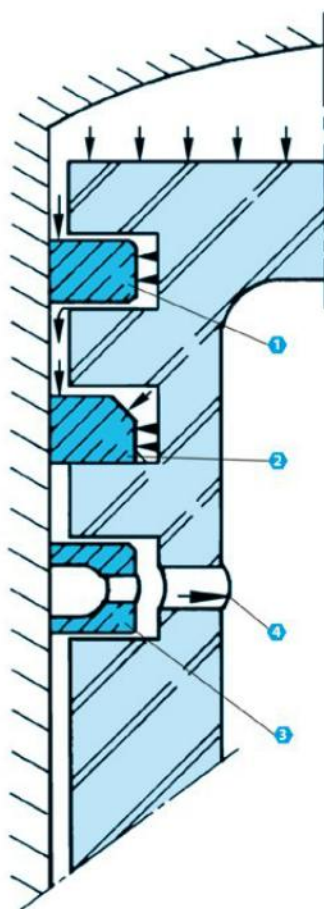


Figure 5.15 Les segments.

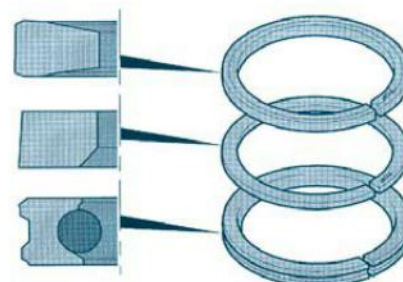
- Action de la pression.
- 1 Segment de feu.
- 2 Segment d'étanchéité.
- 3 Segment racleur.
- 4 Retour d'huile.

Figure 5.16 Différents types de segments.

Segment coup de feu supérieur trapézoïdal

Segment d'étanchéité inférieure conique

Segment racleur avec ressort spiroïdal



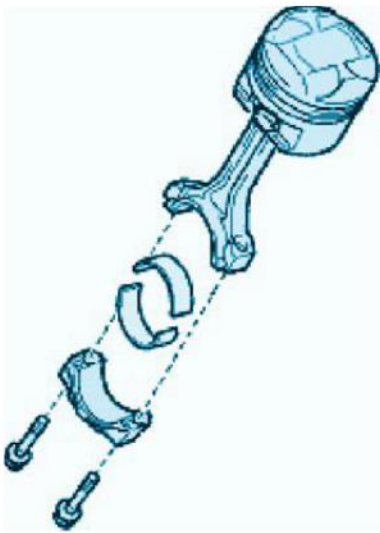


Figure 5.17 Piston et bielle.

La bielle

La bielle est l'élément intermédiaire qui permet la transmission des forces entre deux éléments animés de mouvements différents :

- » le mouvement rectiligne alternatif du piston ;
- » le mouvement circulaire continu du vilebrequin.

Par la combinaison des mouvements rapides du piston et du vilebrequin, cet élément est soumis à de multiples contraintes : compression, extension, flexion.

La bielle est en général matricée dans un acier mi-dur. Elle est parfois réalisée en alliage léger.

La section en « I » permet de diminuer la masse en conservant une bonne résistance à la flexion (flambage).

La tête et le pied ont une surface d'appui suffisamment large pour transmettre sans risque de détérioration des efforts importants (figure 5.18).

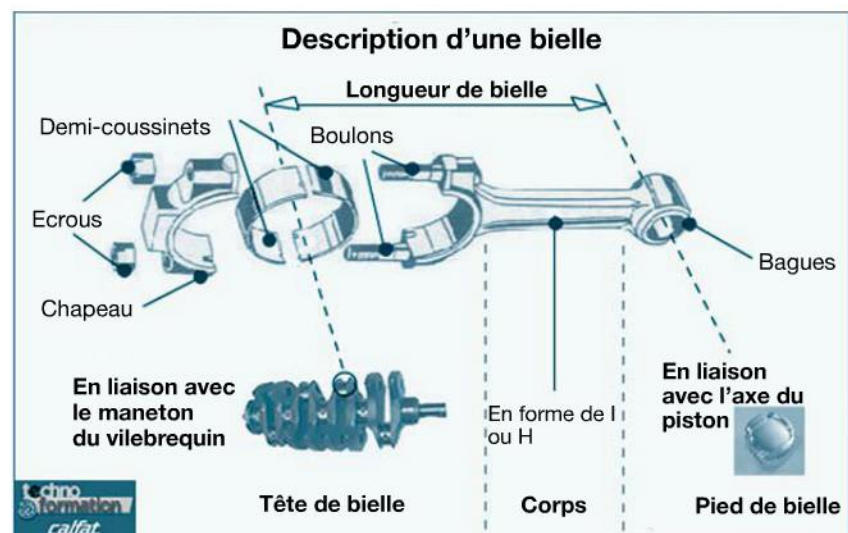


Figure 5.18 La bielle.

Le frottement entre la tête de bielle et le vilebrequin est diminué par l'interposition de coussinets facilement remplaçables (figure 5.18).

Les coussinets sont de larges bagues d'acier, en général en deux parties, recouvertes sur leur face intérieure d'une fine couche de métal antifriction appelé « régule ».

Le régule est composé de plomb, d'étain, d'antimoine et de cuivre. Le point de fusion de cet alliage est assez bas (400 °C). Lorsque le frottement entre la bielle et le vilebrequin devient anormalement grand, l'énergie calorifique dégagée provoque la fusion du régule. Le jeu devient alors excessif et provoque un cognement sourd très caractéristique.

« Couler une bielle » est donc l'incident qui provoque la fusion du régule par un frottement anormal.

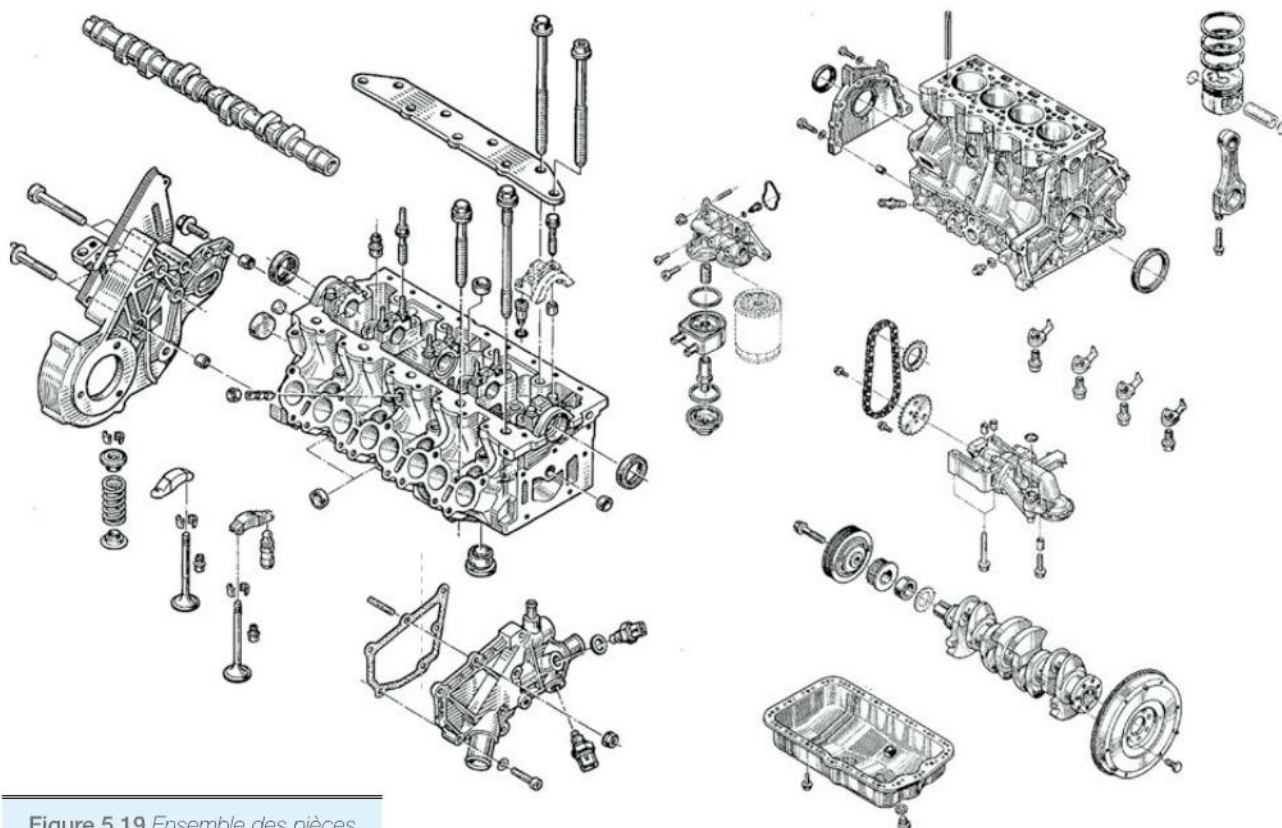


Figure 5.19 Ensemble des pièces constituant un moteur (Document Renault).

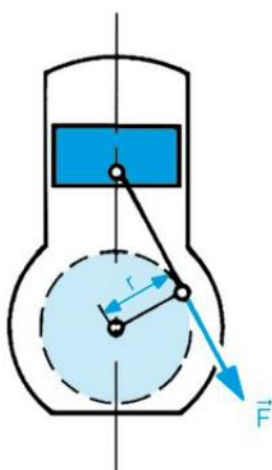


Figure 5.20 Mouvement circulaire continu.

Le vilebrequin

Le vilebrequin transforme la force qui lui est communiquée par la bielle en un couple ($C = Fr$).

Avec la bielle, il termine la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement circulaire continu (figure 5.20).

Il est soumis notamment :

- » aux torsions provenant des efforts opposés du couple moteur et du couple résistant (figure 5.21) ;
- » aux flexions, compressions, allongements et cisaillements (figure 5.22) ;
- » aux frottements au niveau des portées ;
- » aux vibrations provenant de la masse du vilebrequin lancé à grande vitesse (force centrifuge).

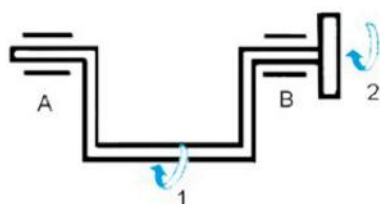


Figure 5.21 Torsions.

- 1 Couple moteur.
2 Couple résistant.

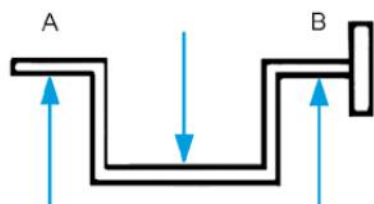
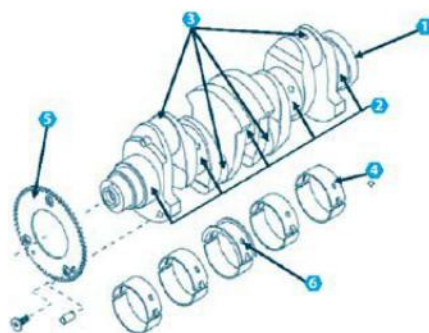


Figure 5.22 Flexions.

Figure 5.23 Vilebrequin.

- 1 Vilebrequin.
2 Cinq tourillons.
3 Quatre manetons.
4 Orifice de graissage.
5 Roue phonique.
6 Coussinet du banc central (réglage du jeu latéral).



Il doit être conçu de manière à résister aux efforts qui lui sont demandés (figure 5.23) :

- » bras de manivelle robustes :
 - grande surface des portées, manetons et tourillons ;
 - géométrie indéformable ;
 - alignement des axes de tourillons (ligne d'arbre) ;
 - alignement et parallélisme des axes de manetons entre eux et avec la ligne d'arbre ;
 - distance entre axes de manetons et axes de tourillons (course piston).
- » Équilibrage parfait.

L'équilibrage d'un vilebrequin s'effectue par la mise en place de masses ayant pour effet d'annuler les actions d'inertie centrifuge.

L'équilibrage se réalise en deux opérations appelées « équilibrage statique » et « équilibrage dynamique ».

Afin de régulariser le fonctionnement du moteur, on répartit les explosions-détentes d'une manière uniforme (figure 5.24).

Le cycle s'effectuant sur deux tours de vilebrequin, nous appliquons la formule :

$$\frac{720^\circ}{n} = \frac{\text{valeur angulaire du cycle}}{\text{nombre de cylindres}}$$

Soit, pour les moteurs à cylindres en ligne, une distance angulaire entre deux manetons consécutifs :

- » de deux cylindres = 360° ;
- » de quatre cylindres = 180° ;
- » de six cylindres = 120° .

Nous voyons que la forme du vilebrequin sera fonction de la répartition des temps moteur. Mais il faut également tenir compte de la disposition des cylindres : en V à 60° ou 90° , à plat opposés à 180° .

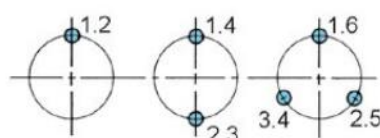


Figure 5.24 Position des manetons des vilebrequins pour moteur à deux, à quatre et à six cylindres en ligne.

Remarque

Lorsque deux pistons se trouvent ensemble au PMH (Point mort haut, cf. plus loin), l'un est en fin de compression – début de détente (allumage), l'autre est en fin d'échappement – début d'admission.

Les ordres de fonctionnement possibles pour les moteurs quatre cylindres :

- » Le moteur à quatre cylindres en ligne (figure 5.25).
- » Deux ordres sont possibles : 1-3-4-2 ou 1-2-4-3. L'ordre le plus couramment utilisé est le premier cité, pour des raisons de meilleur écoulement du fluide gazeux.
- » Le moteur à quatre cylindres à plat opposés (figure 5.26). Deux ordres sont possibles : 1-2-3-4 ou 1-4-3-2. L'ordre 1-4-3-2 est le plus approprié. Outre un meilleur remplissage, il permet une meilleure répartition de poussée sur vilebrequin.

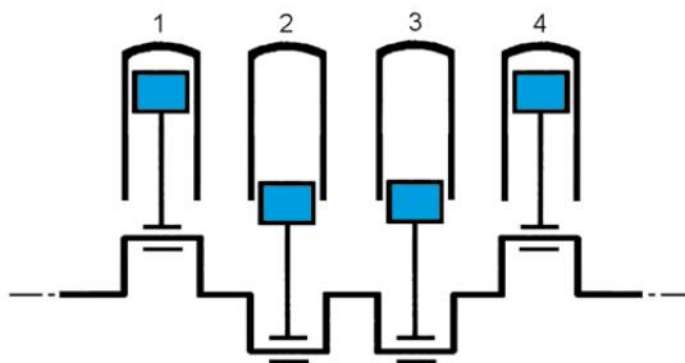


Figure 5.25 Quatre cylindres en ligne.

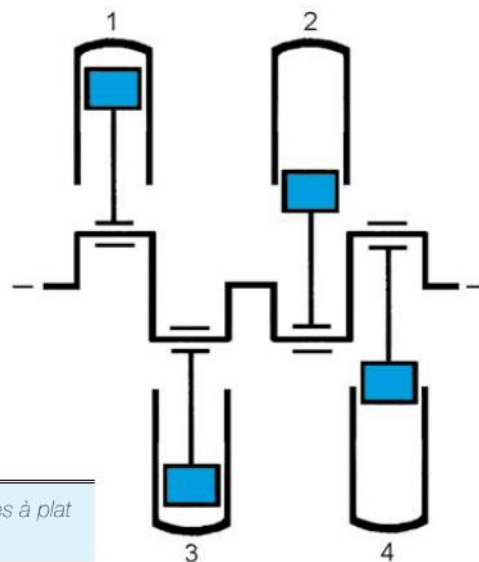
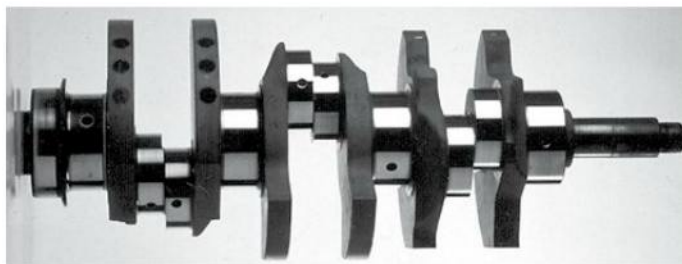


Figure 5.26 Quatre cylindres à plat opposés.

Remarque

Les dispositions en V ou à plat opposés permettent la fabrication de vilebrequins plus courts qui seront ainsi plus légers, plus robustes, moins flexibles et mieux équilibrés.

Figure 5.27 Vilebrequin pour moteur six cylindres en V muni de ses masses d'équilibrage (Document Citroën).



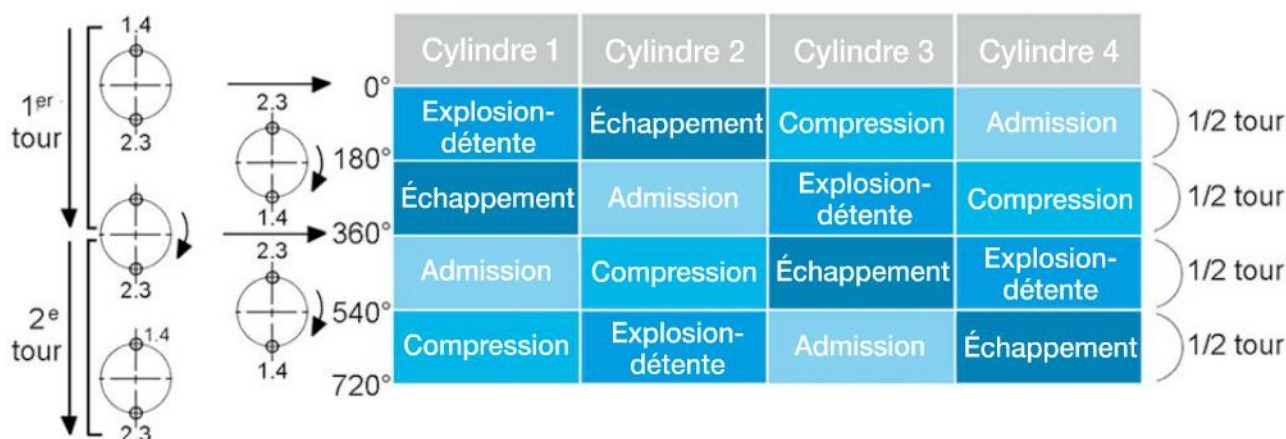


Figure 5.28 Tableau de fonctionnement d'un moteur à quatre cylindres à quatre temps (ordre d'allumage 1-3-4-2).

Remarque

Nous pouvons observer également qu'à chaque demi-tour, les quatre phases du cycle se déroulent simultanément dans les quatre cylindres (uniquement pour les moteurs à quatre cylindres).

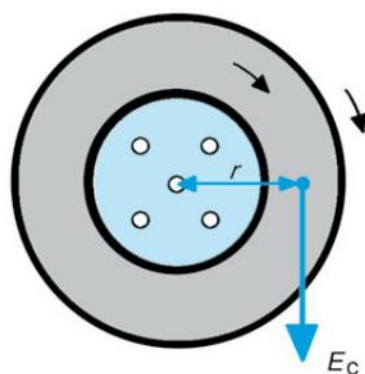


Figure 5.29 Énergie cinétique accumulée pendant la détente (temps moteur).

Formule générale

$$E_c = Mv^2/2$$

masse vitesse au carré appliquée à une masse en rotation

$$E_c = M\omega^2 r^2/2$$

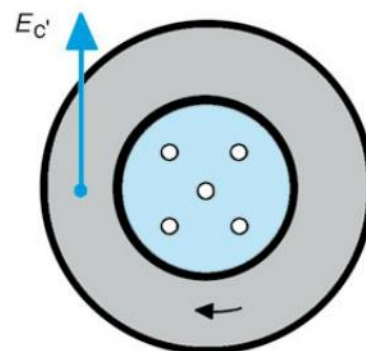
fréquence de rotation au carré rayon moyen

Les problèmes d'irrégularité de fonctionnement sont en grande partie compensés par le montage d'un volant d'inertie (volant moteur) de fort diamètre et de masse importante fixé en bout de vilebrequin.

L'énergie cinétique accumulée pendant le temps moteur (figure 5.29) est restituée pendant les temps non moteurs (temps résistants) (figure 5.30).

Figure 5.30 Restitution de l'énergie aux temps résistants.

$E_c' < E_c$ (loi de dégradation des énergies).

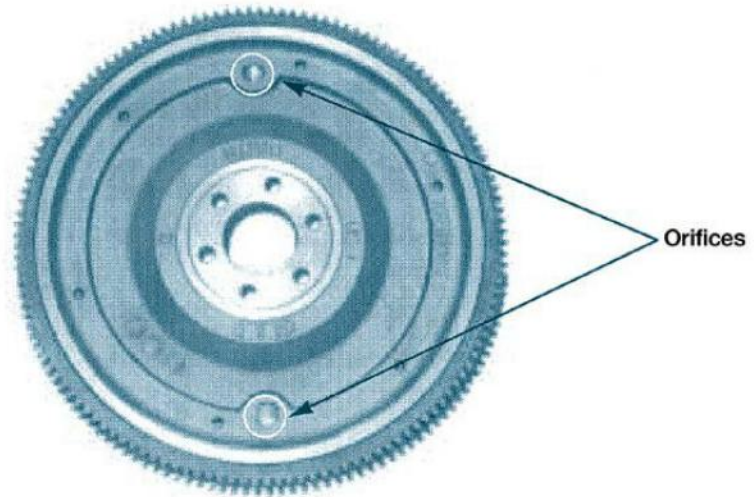


Remarque

La masse en mouvement est augmentée par la fixation sur le volant moteur :

- » du vilebrequin dont la masse est importante ;
- » des éléments d'embrayage ;
- » de la couronne de démarreur.

Figure 5.31 Orifices d'immobilisation du vilebrequin.



Remarque

Plus on augmente le nombre de cylindres et moins le volant moteur a une masse importante car les phases détente sont plus nombreuses.

Résumé

Les éléments fixes du moteur

Ils sont constitués par :

- » le bloc-moteur ou bloc-cylindres,
- » la culasse.

Les caractéristiques sont les suivantes :

1. l'ensemble bloc-cylindres - culasse doit être indéformable,
2. le bloc sert de support au vilebrequin,
3. le cylindre guide le piston,
4. la culasse ferme le haut des cylindres par l'intermédiaire d'un joint.

Il existe différents types de blocs-cylindres :

1. blocs à alésage direct,
2. blocs à chemises amovibles : sèches ou humides.

Réalisation :

Les blocs moteurs et culasses sont réalisés par moulage de fonte ou d'alliage d'aluminium (alpax), matériaux moulables et bons conducteurs de la chaleur.

Les éléments mobiles du moteur

Ils sont constitués par :

- » l'équipage mobile (vilebrequin, bielles, pistons, segments),
- » la distribution (arbres à cames, soupapes, ressorts).

Les caractéristiques du piston :

Il est la paroi mobile du cylindre et réalise les variations de volume nécessaires à la réalisation du cycle.

Il permet de transformer la pression en force motrice ($F = pS$).

Son déplacement accomplit un travail ($W = Fd$).

La réalisation du piston :

Moulé, en alliage léger (peu d'inertie).

La tête reçoit la pression, la force produite est transmise à l'axe, les gorges reçoivent les segments, la jupe assure le guidage.

Les caractéristiques des segments :

1. coup de feu ou première étanchéité,
2. intermédiaire ou deuxième étanchéité,
3. racleur d'huile.

Les caractéristiques de la bielle :

La bielle effectue la liaison entre le mouvement rectiligne alternatif du piston et le mouvement circulaire continu du vilebrequin.

La réalisation de la bielle :

En acier matricé : sa section est en général en « I » afin de limiter les risques de flambage. La tête est munie de coussinets antifriction dont la couche superficielle fond en cas d'échauffement anormal par défaut de graissage.

Les déséquilibres dans un moteur proviennent des actions d'inertie produites par les éléments mobiles en mouvement.

Ordre de fonctionnement

L'équilibrage des moteurs oblige à :

- » réaliser des vilebrequins de forme symétrique,
- » répartir uniformément les explosions par tour.

Le cycle à quatre temps s'effectue sur deux tours de vilebrequin, soit 720° .

L'écart angulaire entre deux explosions devra être $720^\circ/N$ (N étant le nombre de cylindres).

Autres éléments d'équilibrage

L'écart angulaire entre deux explosions est inversement proportionnel au nombre de cylindres.

Le mouvement circulaire pulsatoire du vilebrequin est régularisé par un volant d'inertie appelé « volant moteur ». Les vibrations peuvent être diminuées en modifiant leur fréquence grâce à des masses fixes appelées « Dampers ». Des arbres d'équilibrage, entraînés en rotation par le vilebrequin à une vitesse deux fois plus grande, ont pour rôle de diminuer les actions verticales et latérales produites par les ensembles pistons-bielles.

Testez vos connaissances

1. Comment nomme-t-on l'ensemble qui permet l'admission et l'évacuation des gaz ?

- a ☐ la distribution
- b ☐ l'équipage mobile
- c ☐ la segmentation

2. Quelle est la forme d'énergie qui permet de transformer le carburant en énergie mécanique ?

- a ☐ l'énergie thermique
- b ☐ l'énergie cinétique
- c ☐ l'énergie électrique

3. Laquelle de ces propositions correspond à la ligne d'arbre ?

- a ☐ l'axe des cylindres
- b ☐ l'axe des paliers
- c ☐ l'axe des bielles

4. Quel élément fait partie de l'ensemble mobile ?

- a ☐ la culasse
- b ☐ la bielle
- c ☐ le bloc-cylindres

5. À 3 000 tr/min, combien le vilebrequin fait-il de tours par seconde ?

- a ☐ 30 tr/s
- b ☐ 50 tr/s
- c ☐ 60 tr/s

6. Dans un moteur quatre temps à quatre cylindres, si le cylindre n°1 est en échappement, le cylindre n° 4 est-il :

- a ☐ en admission
- b ☐ en compression
- c ☐ en explosion-détente

Entraînez-vous

1. Recherchez les caractéristiques principales d'un bloc-moteur à alésage direct et celles d'un carter-cylindre à chemises amovibles. Indiquez à chaque fois le type de moteur et sur quel véhicule il peut être monté.
2. Relevez les caractéristiques d'un moteur à six cylindres en V.
3. Notez les écarts angulaires entre deux détentes.
4. Indiquez quels sont ses dispositifs d'équilibrage.
5. Relevez les caractéristiques des pistons, segments et bielles sur un moteur de votre choix.

5.3 Les éléments de la distribution

On nomme « distribution » l'ensemble des éléments qui permettent de réaliser l'ouverture et la fermeture des cylindres dans les conditions définies par l'épure circulaire du moteur.

La figure 5.32 décrit ces éléments de distribution.

Dans les moteurs à quatre temps, l'ouverture et la fermeture des cylindres sont réalisées par les soupapes 9.

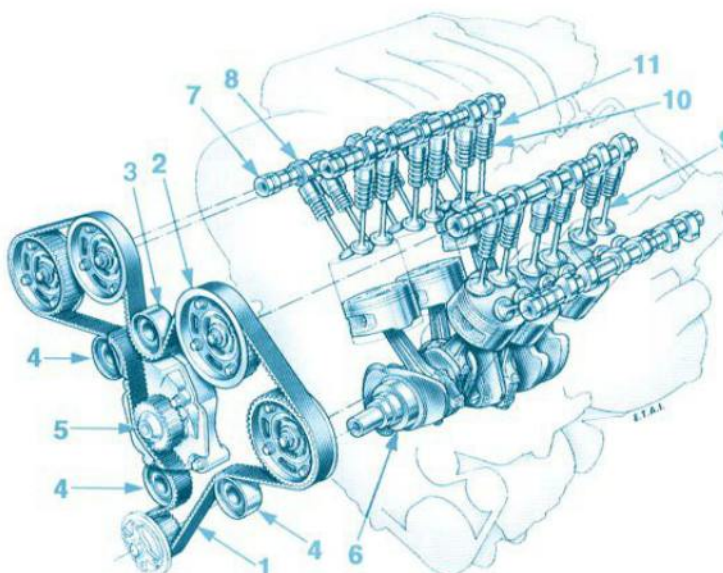
Une ouverture est réalisée par des cames montées sur un ou plusieurs arbres à cames 7.

La fermeture est assurée, en général, par des ressorts de rappel nommés « ressorts de soupapes » 10.

Des poussoirs 11 sont interposés entre les cames et les queues de soupapes.

Figure 5.32 Éléments de la distribution.

- 1 courroie de distribution ;
- 2 poulie d'arbre à cames ;
- 3 tendeur de courroie ;
- 4 galets fixe enrouleurs ;
- 5 pompe à eau ;
- 6 équipage mobile ;
- 7 arbre à cames ;
- 8 came ;
- 9 soupapes ;
- 10 ressort de soupape ;
- 11 poussoir.



On peut également rencontrer des moteurs à arbre à cames en tête (voir plus loin) équipés de culbuteurs (culbutés).

Plusieurs systèmes de liaison sont possibles entre l'arbre à cames et le vilebrequin :

- » Arbre à cames en tête : chaîne ou courroie.
- » Arbre à cames latéral : pignons ou chaîne.

La courroie crantée présente l'avantage d'être plus silencieuse que la chaîne, elle ne nécessite pas de système de lubrification et est d'un remplacement plus aisé (tendeur).

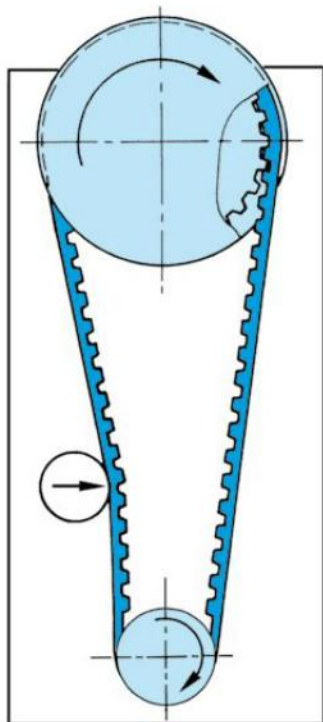


Figure 5.33 Moteur à arbre à cames en tête.

Exemple de liaison par courroie crantée.

→ = tendeur.

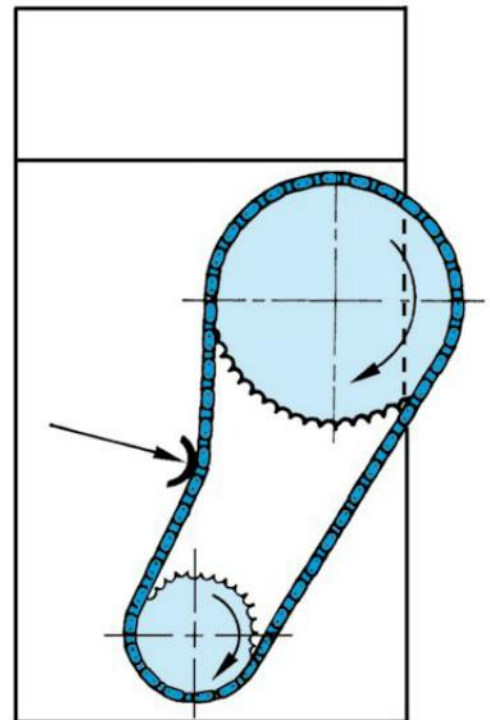


Figure 5.34 Moteur à arbre à cames latéral.

Exemple de liaison par chaîne.

L'arbre à cames

Plusieurs positions sont possibles pour les arbres à cames :

1. L'arbre à cames est appelé « en tête » lorsqu'il est placé sur la culasse à proximité immédiate des soupapes.

La distance avec le vilebrequin est plus grande mais il y a peu de pièces en mouvement (figures 5.32 et 5.33).

Les jeux et les usures sont faibles.

2. L'arbre à cames est appelé « latéral » lorsqu'il est situé sur le côté du bloc-moteur (figure 5.34). La distance avec le vilebrequin est plus courte, mais la liaison avec les soupapes comporte plus de pièces en mouvement. L'usure et les risques d'augmentation des jeux sont plus importants.

La vitesse de rotation est limitée par les risques de flambage (torsion) des tiges de culbuteurs.

Selon la disposition des cylindres et celle des soupapes, le moteur peut comporter un ou plusieurs arbres à cames :

- » moteur en ligne : un ou deux arbres à cames ;
- » moteur en V : deux ou quatre arbres à cames.



Figure 5.35 Arbre à cames.

Figure 5.36 Arbre à cames réalisé par moulage puis usiné.

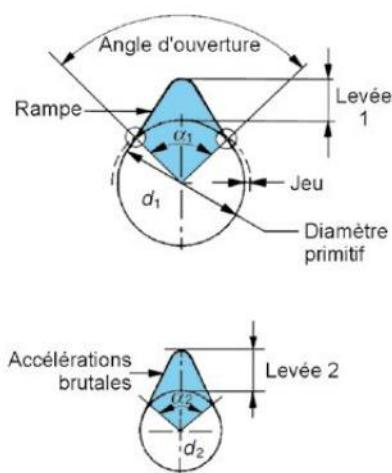


Figure 5.37 Forme des cames.

$$\alpha_1 = \alpha_2$$

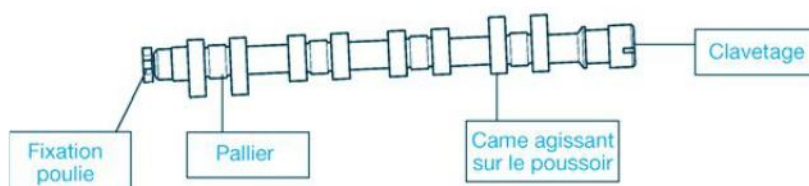
Levée 1 = Levée 2

$d_1 > d_2 \Rightarrow$ accélérations de la soupape moins brutales avec d_1 .



Figure 5.38 Arbre à cames et culbuteurs (document Citroën).

L'arbre à cames réalisé par moulage puis usiné (figure 5.36) comporte autant de cames qu'il y a de soupapes à actionner. Les surfaces frottantes sont traitées en général par cémentation.



Afin de permettre un passage de gaz correct, les cames devraient posséder une levée maximale importante. Mais cette hauteur est limitée par le dégagement insuffisant dans la chambre et par les accélérations importantes produites par un profil de came dont les rampes sont trop verticales.

Pour une hauteur de levée identique et un angle donné, on obtiendra une rampe moins verticale en augmentant le diamètre primitif de la came (figure 5.37). On obtiendra le même résultat (pour un même diamètre primitif) en augmentant l'angle d'ouverture (épure circulaire).

L'idéal serait :

- » l'ouverture instantanée de la soupape ;
- » son maintien ouvert pendant tout le temps d'admission ou d'échappement ;
- » sa fermeture instantanée.

Cela ne peut pas être réalisé par un système mécanique tel que la came.

La came doit parcourir un certain angle de rotation avant l'ouverture complète de la soupape. Si la rampe est trop brutale, les accélérations de la soupape lui feront acquérir une énergie cinétique qui sera proportionnelle au carré de la vitesse acquise et à la moitié de la masse de la soupape :

$$E_c = \frac{MV^2}{2}$$

Pour obtenir un passage de gaz suffisant, les constructeurs peuvent monter deux soupapes à la place d'une. Les avantages sont :

- » la diminution de la masse de chaque soupape ;
- » la diminution de la hauteur de levée de came, puisque la section de passage est plus importante (grâce aux deux sections de passage).

Les soupapes

Les soupapes sont exposées aux températures très élevées régnant dans la chambre de combustion (de l'ordre de 800 °C à l'ouverture de la soupape d'échappement).

La soupape d'échappement, qui s'ouvre en fin de détente et laisse passer des gaz brûlants, sera plus exposée que la soupape d'admission relativement refroidie par les gaz frais.

Figure 5.39 Soupapes.

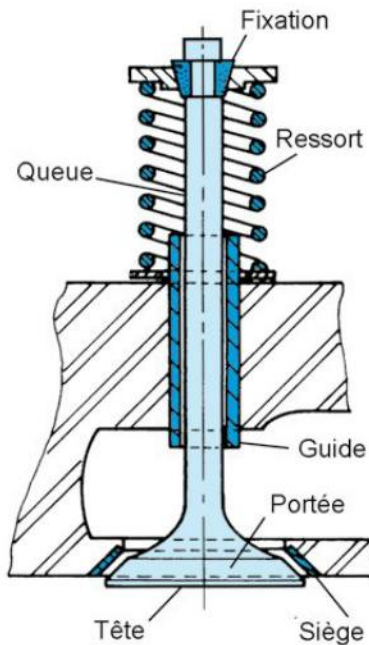
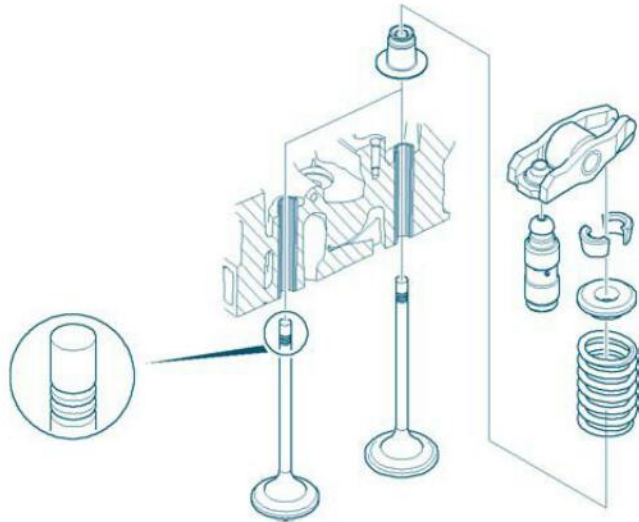


Figure 5.40 Montage des soupapes.

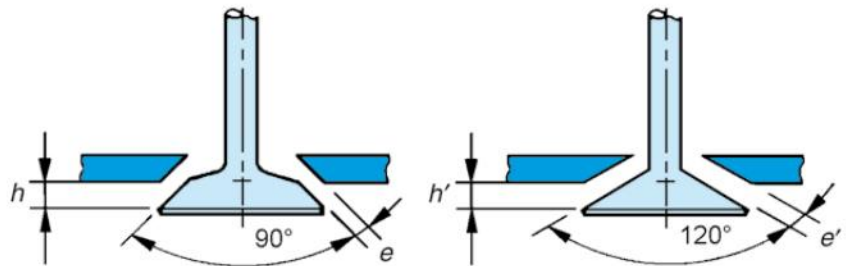
Figure 5.41 Angles de portée.

Si l'angle de portée est plus grand (120°), avec $h' = h$, on a $e' > e$.



La portée conique assure une étanchéité parfaite à la fermeture et un centrage correct évitant la déformation de la tige ou queue (figure 5.40).

Les angles de portée sont d'environ 90°. Les soupapes d'admission qui subissent des températures moins élevées peuvent avoir un angle de 120°, protégeant moins bien la soupape des déformations, mais offrant, pour une même hauteur de levée, une section de passage de gaz plus importante (figure.5.41).



Il doit exister un jeu fonctionnel entre la soupape et sa commande afin :

- » d'assurer une étanchéité parfaite des cylindres quelles que soient les dilatations ;

- » de respecter avec précision les points d'ouverture et de fermeture définis par le constructeur.

Si le moteur est équipé de culbuteurs, arbre à cames latéral (figure 5.42) ou en tête à attaque directe (figure 5.43), le réglage s'effectue sur le culbuteur lui-même.

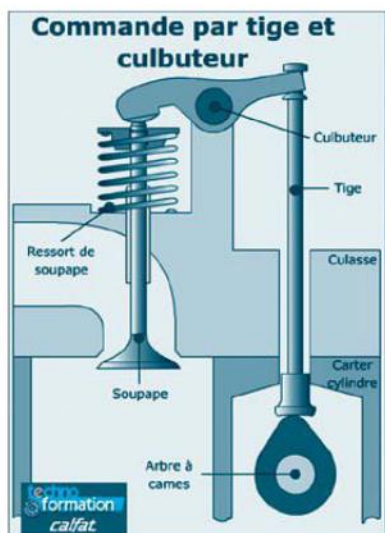


Figure 5.42 Commande par tige et culbuteur.

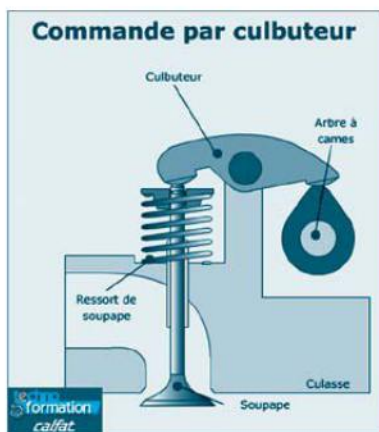


Figure 5.43 Commande par culbuteur.

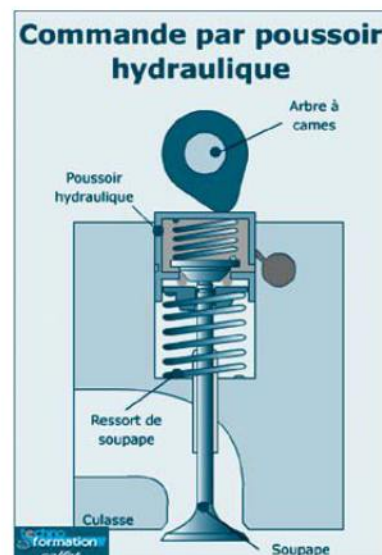


Figure 5.44 Commande par poussoir hydraulique.

Dans le cas des moteurs « culbutés », le martèlement de la tête du culbuteur sur la queue de soupape produit, à l'usage, un certain « marquage ». Ce phénomène a pour conséquence d'augmenter le jeu de fonctionnement.

La came devra tourner plus pour rattraper ce jeu supplémentaire avant d'attaquer réellement l'ouverture de la soupape. Pour la même raison, la soupape se fermera plus tôt. Il en résulte donc une diminution de l'angle total d'ouverture, définie par l'épure circulaire.

Les moteurs à arbre à cames à attaque directe par poussoir hydraulique (figure 5.44) permettent :

- » une diminution du nombre de pièces en mouvement ;
- » une diminution de l'usure ;
- » la fiabilité de ce système à long terme.

Le réglage du jeu peut s'effectuer en remplaçant les pastilles existantes par d'autres d'épaisseur différente.

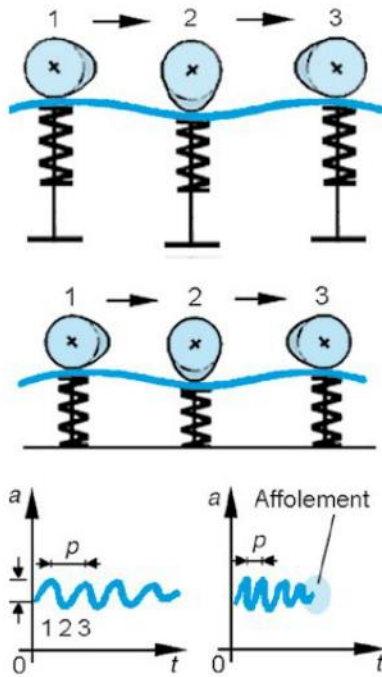


Figure 5.45 Décomposition du phénomène d'affolement des ressorts de soupape.

Si t diminue, les phases 1, 2, et 3 se rapprochent.
 a = amplitude, p = période, fréquence = x périodes (hertz) par seconde. Plus le temps imparti à la réalisation des phases diminue, plus la fréquence augmente.

Les ressorts

Les ressorts de rappel les plus couramment utilisés sont les ressorts à boudin (hélicoïdaux). Lorsqu'on comprime un ressort à une fréquence élevée, celui-ci risque d'entrer en résonance.

Il présente alors de graves perturbations (durcissement, rupture).

La fréquence d'entrée en résonance est variable en fonction des caractéristiques du ressort (diamètre de fil, hauteur, etc.). En automobile, on appelle les phénomènes d'entrée en résonance des ressorts et d'inertie des soupapes « affolement des soupapes » (figure 5.45). Celui-ci se produit notamment lorsque le moteur dépasse sa vitesse de rotation maximale (surrégime).

Il n'est pas possible de supprimer l'entrée en résonance d'un ressort, mais on peut reporter cette limite au-delà du régime maximal du moteur. Les constructeurs utilisent notamment :

- » des ressorts à pas variable (figure 5.46) ;

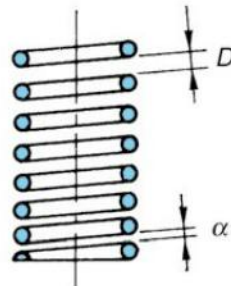


Figure 5.46 Ressorts à pas variable.

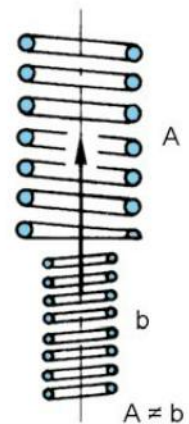


Figure 5.47 Ressorts antagonistes.

- » deux ressorts antagonistes (figure 5.47).

Les poussoirs

Les poussoirs servent d'intermédiaire direct ou indirect entre les queues de soupapes et les cames de l'arbre à cames.

Les ressorts de rappel des soupapes offrent une force résistante importante.

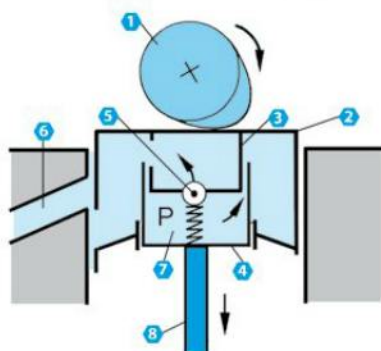
$$F_{p.u} = \frac{F}{S}$$

$F_{p.u}$ = Force pressante unitaire
 $\vec{F}$ = Force résistante des ressorts
 S = Surface de contact came/poussoir



Figure 5.48 Loi de Pascal.

Ouverture de la soupape



Fermeture de la soupape

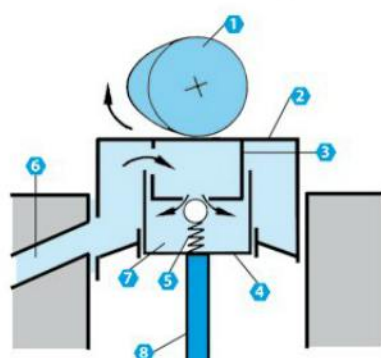


Figure 5.49 Poussoir hydraulique.

- ❶ Came.
- ❷ Poussoir.
- ❸ Piston.
- ❹ Cylindre.
- ❺ Ressort et clapet.
- ❻ Pression d'huile.
- ❼ Chambre de pression.
- ❽ Queue de soupape.

La surface importante du contact came/poussoir permet de diminuer la force pressante unitaire et diminue ainsi le frottement et l'usure (figure 5.48).

Les poussoirs hydrauliques ont pour avantage :

- » de maintenir un jeu de fonctionnement identique à toutes les températures de fonctionnement ;
- » de rattraper l'usure, donc d'être indéréglables ;
- » de mieux respecter l'épure du constructeur.

Fonctionnement :

- » Ouverture de la soupape. Le volume d'huile se trouvant dans la chambre ❷ est mis sous pression par la fermeture du clapet ❺. Une très légère fuite se produit avant la fermeture complète du clapet. Elle est calculée pour correspondre au jeu de fonctionnement. Le poussoir ❷, dans son ensemble, actionne la soupape ❽.
- » Fermeture de la soupape. La came ❶ n'est plus active, un léger coulisement du cylindre ❹ sur le piston ❸ permet l'admission d'une petite quantité d'huile par différence de pression. Les jeux sont rattrapés à la prochaine ouverture. La fuite calibrée avant fermeture du clapet correspondra toujours au jeu de fonctionnement optimal.

Résumé

La distribution est l'ensemble des éléments qui réalisent l'ouverture et la fermeture des cylindres. Dans les moteurs à quatre temps, cette fonction est remplie par les soupapes, commandées par les cames de l'arbre à cames.

Les éléments intermédiaires sont différents selon le type de moteur.

Soupapes

- » Constitution : tête large mais limitée par son encombrement et sa masse ; portée conique, angle de 90 à 120°.
- » Fabrication : acier au nickel, chrome, tungstène, molybdène ou acier caustique.

Cames

Le profil est adapté à la hauteur de levée, à l'angle d'ouverture défini par l'épure circulaire, ainsi qu'à la vitesse de rotation du moteur.

Ressorts de soupape

Ils sont en général à boudin ou hélicoïdaux. Le fonctionnement de chaque ressort est limité par sa fréquence d'entrée en résonance. Pour pallier cet inconvénient, les constructeurs utilisent : des ressorts à pas variables, antagonistes ou des commandes desmodroniques.

Éléments intermédiaires

Les poussoirs limitent l'usure des cames et des queues de soupapes. Ils peuvent être simples, à réglage par pastilles ou hydrauliques. Les poussoirs hydrauliques maintiennent un jeu de fonctionnement correct à toutes les températures.

Jeu de fonctionnement

Le jeu aux soupapes permet :

- » d'assurer l'étanchéité à toutes les températures ;
- » de régler avec précision les angles de distribution.

Positions de l'arbre à cames

Latéral, en tête avec ou sans culbuteurs ; un, deux ou quatre arbres à cames.

Systèmes de liaison

Engrenages, pignons reliés par chaîne ou par courroie crantée.

Testez vos connaissances



1. Lorsque le moteur tourne à 3 000 tr/min, combien de fois chaque soupape s'ouvre-t-elle et se referme-t-elle par minute ?
 - a ☐ 1 500 fois
 - b ☐ 3 000 fois
 - c ☐ 6 000 fois
2. Dans l'exemple précédent, quel est le délai entre deux ouvertures de soupape ?
 - a ☐ 1 seconde
 - b ☐ 1/50 de seconde
 - c ☐ 1/25 de seconde
3. Dans un moteur à arbre à cames en tête à attaque directe, le jeu se règle par :
 - a ☐ des vis aux culbuteurs
 - b ☐ des pastilles calibrées
 - c ☐ la courroie de distribution
4. Si le jeu d'une commande de soupape est trop grand, le temps d'ouverture de la soupape :
 - a ☐ augmente
 - b ☐ diminue
 - c ☐ reste inchangé

65

- 5 - Constitution des moteurs

Entraînez-vous

1. Citez un type de moteur avec arbre à cames en tête avec culbuteurs, et un type avec arbre à cames à attaque directe.
2. Relevez toutes les caractéristiques de leur système de distribution.

Les caractéristiques des moteurs

chapitre 6

Les moteurs thermiques à combustion interne se caractérisent principalement par :

- » l'alésage ;
- » la course ;
- » le nombre et la disposition des cylindres ;
- » la cylindrée ;
- » le rapport volumétrique ;
- » le couple moteur ;
- » la puissance maximale ;
- » la puissance fiscale.

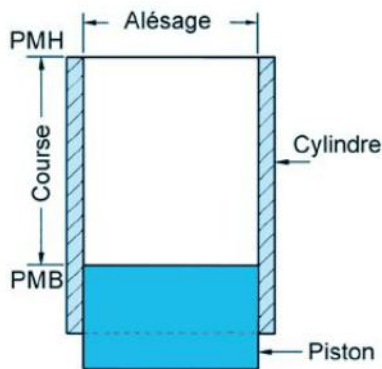


Figure 6.1 Alésage et course.

L'alésage est le diamètre intérieur du cylindre. La course est la distance comprise entre le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB) (figure 6.1). La cylindrée est le volume total des cylindres d'un moteur exprimé en centimètres cubes ou en litres.

La cylindrée unitaire (d'un seul cylindre) est égale à :

$$\pi \left(\frac{A}{2} \right)^2 C \quad \text{ou} \quad \frac{\pi A^2 C}{4}$$

avec A = alésage en centimètres,

C = course en centimètres.

La cylindrée totale qui est égale à :

$$\pi \left(\frac{A}{2} \right)^2 C n \quad \text{ou} \quad \frac{\pi A^2 C n}{4}$$

avec n = nombre de cylindres.

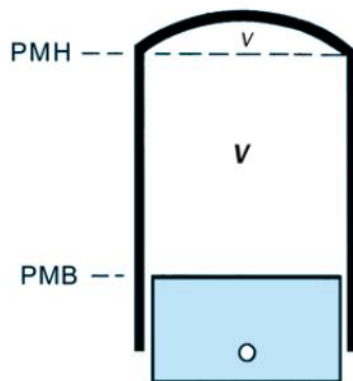


Figure 6.2 Volume du cylindre lorsque le piston est au PMB : $(V + v)$.

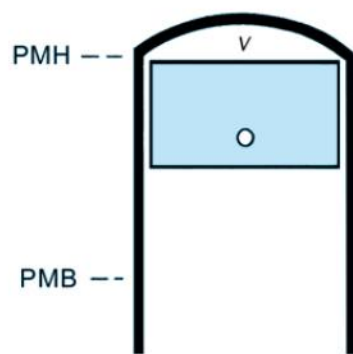


Figure 6.3 Volume du cylindre lorsque le piston est au PMH : (v) .

Remarque

On exprime également la cylindrée en litres. 1 litre valant 1 000 cm³, on peut dire, par exemple, qu'un moteur de 2 000 cm³ est un moteur de 2 litres.

On différencie également les moteurs selon leur rapport alésage/course :

- » alésage < course : **moteur à course longue** ;
- » alésage = course : **moteur carré** ;
- » alésage > course : **moteur super-carré**.

Le rapport volumétrique est le rapport existant entre le volume total du cylindre lorsque le piston est au PMB ($V + v$) (figure 6.2) et le volume restant lorsque le piston est au PMH (v) (figure 6.3).

Ce volume (v) correspond à la chambre de combustion.

Le rapport volumétrique se représente par la lettre ρ :

$$\rho = \frac{V + v}{v}$$

ρ : rapport volumétrique,

V : cylindrée unitaire,

v : volume de la chambre de combustion,

et le résultat se présente sous la forme d'une fraction.

Exemple

$$\frac{8,5}{1} ; \frac{9}{1} \text{ ou } 9 \text{ pour } 1.$$

Remarque

Si V croît, v restant constant : ρ croît.

Si v croît, V restant constant : ρ décroît.

Si ρ croît, la pression de fin de compression croît.

Le couple moteur : La pression qui agit sur la tête du piston lui communique une force d'intensité $F = ps$.

Déterminons l'intensité de la composante efficace de $\vec{F}$.

$$(F_1) \text{ sur la bielle : } F_1 = \frac{F}{\cos \alpha}.$$

Le moment du couple moteur sera :

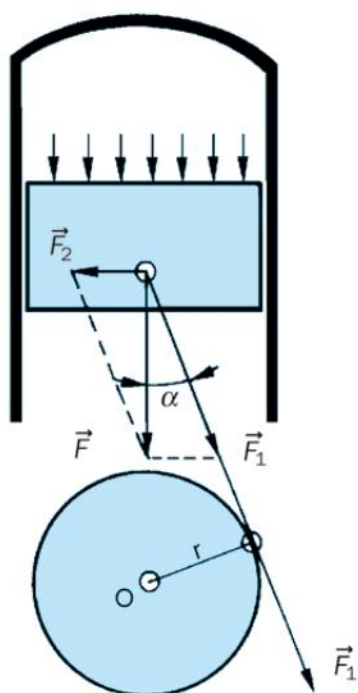


Figure 6.4 Décomposition des forces agissant sur le maneton du vilebrequin.

$$\mathcal{M}_{(O)}(\vec{F}_1) = F_1 \cdot r$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{Moment du couple} \\ \text{de } F_1 \text{ par rapport} \\ \text{à } O \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Force normale} \\ \text{à la bielle} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{rayon du bras} \\ \text{de manivelle} \end{array} \right)$$

$\downarrow$ $\downarrow$ $\downarrow$
 $N \cdot m$ N m

Le moment du couple moteur (ou couple moteur) est donc le produit de la force sur la bielle par la longueur du bras de maneton de vilebrequin (figure 6.4).

Pour mesurer le couple moteur on utilise des appareils qui, reliés directement à l'arbre moteur, créent un couple résistant tendant à le freiner. Ces appareils portent le nom de « freins ».

Le travail (W) est égal au produit de la force sur la bielle (F_1) par le déplacement du point d'application de la force (d ou l) :

$$W = F_1 \cdot \ell$$

$\downarrow$ $\downarrow$ $\downarrow$
 J N m

Déplacement de la force pour un tour : $\ell = 2\pi r$.

Travail de la force pour un tour : $W = F_1 \cdot 2\pi r$.

Le produit $F_1 r$ déterminant le couple moteur, on a :

$$F_1 \cdot r = \mathcal{M}_{(O)}(\vec{F}_1) = \mathcal{C}$$

et $W = F_1 \cdot 2\pi r = 2\pi \mathcal{C}$

Pour un nombre de tours donnés (n), le travail sera :

$$W = 2\pi n \mathcal{C}$$

On peut observer que le couple le plus élevé se situe lorsque la bielle et le bras du vilebrequin forment un angle de 90° (figure 6.4).

Le couple moteur est donc le résultat du travail moteur (W) transmis par l'ensemble bielle-vilebrequin, mesuré sur l'arbre moteur.

La puissance est égale au quotient du travail par le temps :

$$\frac{\text{travail}}{\text{temps}} = \frac{W \text{ (en joules)}}{t \text{ (en secondes)}} = P \text{ (en watts)}$$

Soit pour n tours par minute :

$$P = \frac{W}{t} = \mathcal{C} \cdot \frac{2\pi n}{60} \text{ et } \frac{2\pi n}{60} = \omega$$

(ω est la vitesse angulaire en radians par seconde)

$$P = \mathcal{C} \cdot \omega$$

watts = N · m · rad/s

Exemple

Couple moteur = 20 daN · m = 200 N · m ;

vitesse de rotation = 3 000 tr/min :

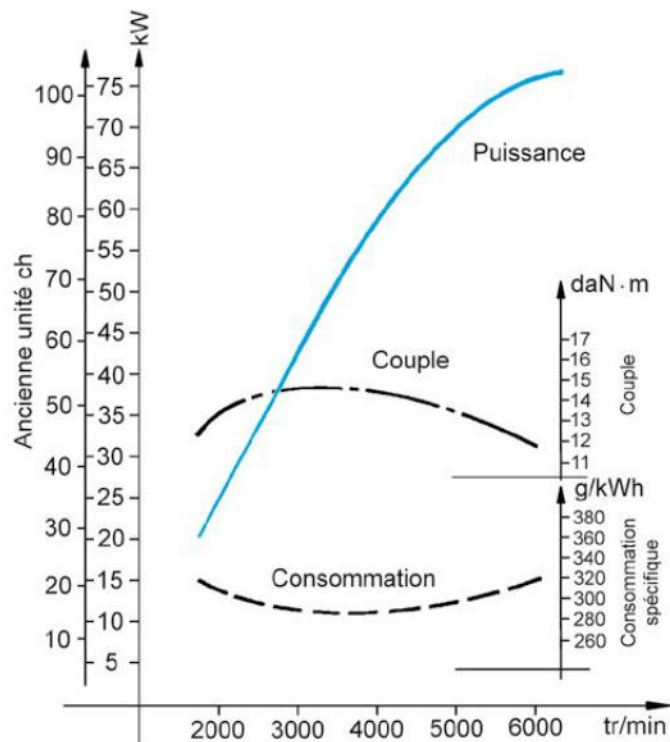
$$P = \frac{200 \times 2 \times 3,14 \times 3\,000}{60} = 62\,800 \text{ W, soit } 62,8 \text{ kW.}$$

Remarque

On peut encore trouver l'ancienne unité de puissance des moteurs qui était **le cheval-vapeur (ch)** : 1 ch = 736 W.

Dans l'exemple ci-dessus, 62,8 kW donneraient 62,8 / 0,736 soit environ 84 ch.

Figure 6.5 Courbe de puissance, couple et consommation spécifique d'un moteur.



Les normes ISO (internationales) et Afnor (françaises) imposent le watt (W) comme unité de puissance universelle. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la puissance effective d'un moteur, elles portent le nom des organismes qui les préconisent :

- » SAE (*Society of Automobile Engineers*) : Système américain qui consiste à relever la puissance du moteur dépourvu de ses accessoires (pompe à eau, alternateur, ventilateur, etc.), réglages

de l'avance à l'allumage et du système d'injection réajustés pour chaque régime. Le résultat est un chiffre assez élevé, les conditions de contrôle en font une puissance idéale assez théorique.

- » DIN (*Deutsche Industrie Normen*) dite « norme européenne » : Dans ces essais, le moteur doit entraîner tous ses accessoires, les réglages ne pouvant pas être modifiés en cours d'essai (réglages de série). Il s'agit donc d'une puissance effective plus proche de la réalité.
- » CUNA (*Commissione Tecnica di Unificazione nell'Auto-veicolo*) : Système italien, compromis entre les normes DIN et SAE. Pas d'accessoires comme pour les essais SAE, mais des réglages de série comme pour le système DIN.

La puissance fiscale exprimée en chevaux-vapeur fiscaux (CV) a été instaurée par les services fiscaux français afin de pouvoir calculer certains impôts sur les automobiles. On l'appelle également « puissance administrative ».

Son calcul est bien effectué à partir des caractéristiques du moteur, mais les coefficients qui sont appliqués donnent un résultat très éloigné de la puissance effective.

$$\text{Puissance fiscale} = \left(\frac{\text{CO}_2}{45} \right) + \left(\frac{P}{40} \right)^{1,6}$$

CO_2 est le taux de monoxyde de carbone.

P est la puissance en KW.

Caractéristiques complémentaires :

- » Couple spécifique : couple moteur pour un litre de cylindrée (daN . m/L).
- » Puissance spécifique : puissance effective (DIN ou SAE) pour un litre de cylindrée (kW/L).
- » Consommation spécifique : masse du combustible en grammes, en fonction de l'énergie fournie (g/kWh).

Résumé

Alésage : diamètre des cylindres.

Course : distance entre le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB).

Cylindrée unitaire : volume d'un cylindre.

Cylindrée totale : volume de tous les cylindres du moteur.

Calcul de la cylindrée (en cm³)

$$\text{Cylindrée unitaire : } \pi \left(\frac{A}{2} \right)^2 C \text{ ou } \frac{\pi A^2 C}{4}$$

$$\text{Cylindrée totale : } \pi \left(\frac{A}{2} \right)^2 C n \text{ ou } \frac{\pi A^2 C n}{4}$$

$$\text{Rapport volumétrique : } \rho = \frac{V + v}{v}.$$

$$\text{Couple moteur (en N} \cdot \text{m ou daN} \cdot \text{m)} : \mathcal{C} = F_1 \cdot r.$$

Travail mesuré à l'arbre moteur pour un tour : $W = 2\pi\mathcal{C}$ et pour n tours : $W = 2\pi n\mathcal{C}$.

Appareils de mesure des couples et des puissances

Freins mécaniques, électromagnétiques, hydrauliques.

Puissance effective (en watts)

$$P = \frac{2\pi n\mathcal{C}}{60}$$

$$P = \mathcal{C} \cdot \omega \text{ (en N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad/s)}.$$

Puissance fiscale (en CV)

Valeur permettant d'établir une classification des véhicules, par les services fiscaux français.

Puissance spécifique (en kW/L)

Puissance effective pour un litre de cylindrée.

Testez vos connaissances



1. L'alésage du moteur est :

- a ☐ la hauteur du cylindre
- b ☐ le diamètre du cylindre
- c ☐ le volume du cylindre

2. Quelle est la cylindrée totale d'un moteur à quatre cylindres ayant les caractéristiques suivantes : alésage 70 mm, course 62 mm ?

- a ☐ 1 330 cm³
- b ☐ 954 cm³
- c ☐ 4 540 cm³

3. Comment nomme-t-on le type de moteur décrit à la question 2 ?

- a ☐ carré
- b ☐ super-carré
- c ☐ à course longue

4. Quel est le rapport volumétrique de ce moteur, sachant que le volume de la chambre de combustion est de 30 cm³ ?

- a ☐ 8,9/1
- b ☐ 9,4/1
- c ☐ 9,7/1

5. Si l'on rectifie le plan de joint de culasse :

- a ☐ le rapport volumétrique augmente
- b ☐ le volume du cylindre augmente
- c ☐ le rapport volumétrique diminue

73

- 6 - Les caractéristiques des moteurs

Entraînez-vous

1. Calculez la cylindrée d'un moteur quatre cylindres ayant les caractéristiques suivantes : alésage 77 mm ; course 65,6 mm.
2. Calculez le rapport volumétrique du même moteur sachant que $v = 38 \text{ cm}^3$.
3. Calculez la puissance effective d'un moteur tournant à 6 000 tr/min, dont le couple moteur est de 12 daN.m à ce régime. Donnez le résultat en kilowatts.
4. Recherchez les caractéristiques d'un moteur de votre choix.

Le fonctionnement des moteurs

chapitre 7

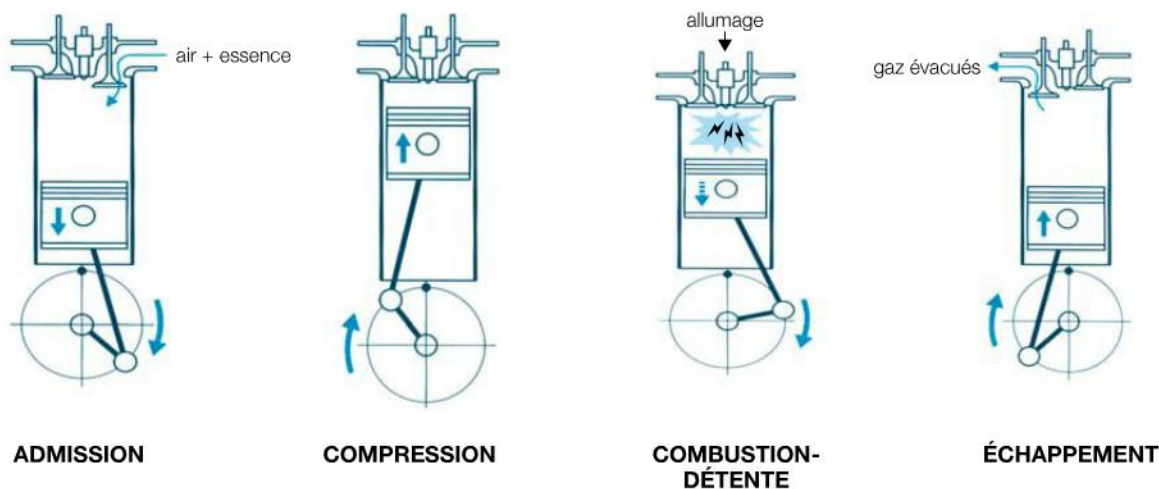
7.1 Le cycle à quatre temps

Il s'agit d'une série d'opérations qui se succèdent dans un ordre déterminé et à la fin desquelles le mécanisme se retrouve dans sa position de départ. Le tableau suivant présente le Principe du cycle à quatre temps.

Numéro du temps	Nom de la phase	Déplacements		Positions des soupapes		Opérations
		Piston	Vilebrequin	Adm.	Échap.	
1^{er} temps	Admission	↓	1/2 tour	O*	F*	Le piston en descendant crée une baisse de pression favorisant l'aspiration des gaz ou de l'air.
2^e temps	Compression	↑	1/2 tour	F	F	Le piston comprime les gaz jusqu'à ce qu'ils n'occupent plus que la chambre de combustion (pression + chaleur).
3^e temps	Inflammation-détente Temps moteur	↓	1/2 tour	F	F	L'étincelle d'une bougie (pour un moteur essence) ou l'injection de gazole comprimé (pour un moteur Diesel) enflamme le mélange. La chaleur dégagée dilate le gaz qui pousse violemment le piston vers le bas.
4^e temps	Échappement	↑	1/2 tour	F	O	En remontant, le piston chasse les gaz brûlés. Le moteur est à nouveau prêt à effectuer le premier temps.

* O = ouvert ; F = fermé.

Cycle à quatre temps d'un moteur essence



Une soupape, appelée soupape d'admission, est ouverte lorsque le piston descend. L'air frais et l'essence sont aspirés et se mélangent.

Les soupapes sont fermées et le piston remonte. Le mélange d'air et d'essence est comprimé et la pression monte à environ 10 bar.

Une bougie crée une étincelle et allume le mélange. La pression monte à environ 80 bar. Cette pression pousse le piston vers le bas et donne de la puissance au moteur.

La soupape d'échappement est ouverte et le piston remonte. Les gaz sont évacués par l'échappement. Le cycle 4 temps peut recommencer.

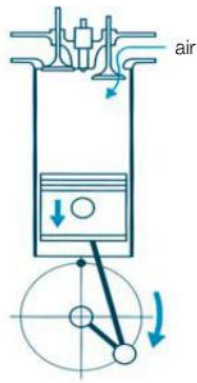
Figure 7.1 Cycle à quatre temps d'un moteur essence.

Cycle à quatre temps d'un moteur Diesel

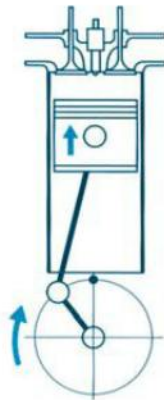
Le moteur Diesel est un moteur à combustion interne qui est capable de consommer des carburants lourds tels que gazole, fuel, mazout.

La combustion est déclenchée par auto-inflammation du carburant dans de l'air fortement comprimé.

Comme le moteur à essence, le moteur Diesel à quatre temps réalise les phases du cycle moteur en quatre courses de piston.

**ADMISSION**

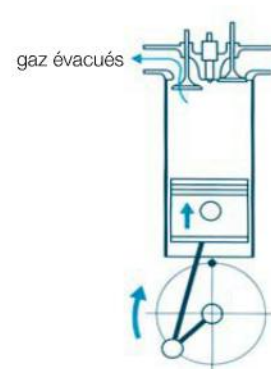
Aspiration d'air.

**COMPRESSION**

Compression de l'air.
 $P > 20 \text{ bar}$.
 $T > 400 \text{ °C}$.

**COMBUSTION-DÉTENTE**

Injection du carburant en fin de compression.
 Il s'enflamme au contact de l'air surchauffé.

**ÉCHAPPEMENT**

Évacuation des gaz brûlés.

Figure 7.2 Cycle à quatre temps d'un moteur Diesel.

Récapitulons

PMH 0°	PMB 180°	PMH 360°	PMB 540°	PMH 720°
←		←		←
admission		compression	inflammation -détente	
échappement				
1 ^{er} tour			2 ^e tour	
←			←	

Remarque

Nous constatons qu'il n'y a qu'un temps moteur tous les deux tours de vilebrequin. Pour éviter les à-coups, on est obligé de placer un volant moteur en bout de vilebrequin (figure 7.3).

Le rôle du volant moteur est de régulariser le mouvement de rotation de l'arbre moteur. Grâce à sa masse, il emmagasine une partie de l'énergie mécanique au temps moteur et la restitue aux temps résistants.

Lorsqu'il y a plusieurs cylindres, on répartit les explosions afin que les temps moteurs se succèdent régulièrement dans les divers cylindres.

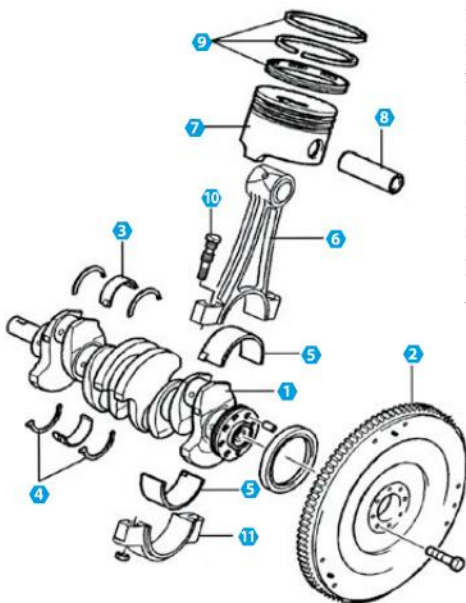
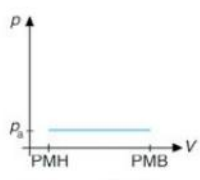
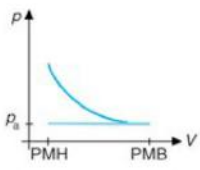
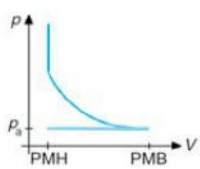
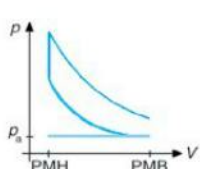
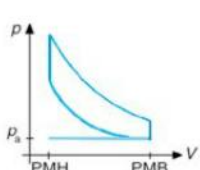
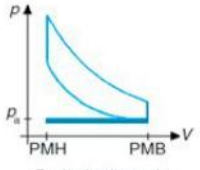


Figure 7.3 Équipage mobile et son volant moteur.

- | | | |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| ① vilebrequin | ⑤ coussinet de bielle | ⑨ segments |
| ② volant moteur | ⑥ bielle | ⑩ vis de chapeau de bielle |
| ③ coussinet de palier | ⑦ piston | ⑪ chapeau de bielle |
| ④ cales latérales | ⑧ axe de piston | |

Le diagramme théorique d'un moteur quatre temps (pour un moteur essence)

Temps	Course du piston	Position des soupapes	Volume	Pression	Température	Représentation graphique
Admission	Du PMH au PMB	Adm. : O Échap. : F	$\nearrow$	p_a	Extérieure	 Droite parallèle à l'axe horizontal
Compression	Du PMB au PMH	Adm. : F Échap. : F	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	 Courbe ascendante
Inflammation	PMH	Adm. : F Échap. : F	=	$\nearrow$	$\nearrow$	 Droite parallèle à l'axe vertical
Détente	Du PMH au PMB	Adm. : F Échap. : F	$\nearrow$	$\searrow$	$\searrow$	 Courbe descendante
Échappement	PMB	Adm. : F Échap. : O	=	$\searrow$	$\searrow$	 Droite verticale
Échappement	Du PMB au PMH	Adm. : F Échap. : C	$\searrow$	p_a	Extérieure	 Droite horizontale confondue avec l'admission

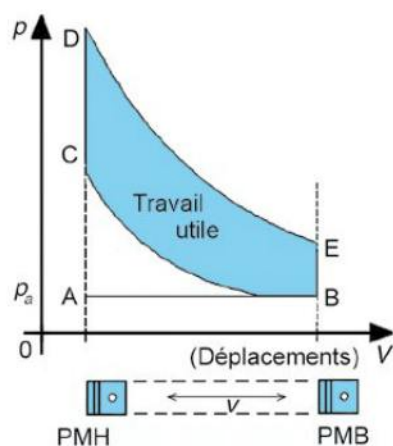


Figure 7.4 Diagramme théorique d'un moteur.

Nous pouvons mettre en évidence les variations de volume et de pression par un diagramme (figure 7.4) dans lequel nous plaçons :

- » en abscisse (horizontalement), les déplacements du piston ou variations de volume ;
- » en ordonnée (verticalement), les variations de pression, la pression extérieure étant la pression atmosphérique symbolisée par p_a .

Ce diagramme est dit « théorique », car il est volontairement simplifié et ne tient pas compte des facteurs suivants :

- » temps mis par les soupapes à s'ouvrir ;
- » délai d'inflammation du mélange ;
- » inertie des gaz ;
- » échanges de chaleur avec l'extérieur.

Le travail développé par une force est égal au produit de la force par son déplacement :

$$W = Fd$$

W = travail, en joules,

F = force, en newtons,

d = déplacement, en mètres.

Si nous considérons que la pression des gaz est transformée en force par le piston ($F = ps$), nous pouvons évaluer le travail fourni par le moteur en observant le diagramme (figure 7.4).

Le travail moteur est représenté par l'aire ADEBA. Les temps résistants sont représentés par l'aire ABCA.

Le travail utile du moteur est :

$$(\text{travail moteur ADEBA}) - (\text{temps résistants ABCA})$$

7.2 Les différences de fonctionnement et de conception entre un moteur essence et un moteur Diesel

Le tableau suivant expose les différences de fonctionnement entre le moteur à essence et le moteur Diesel.

Moteur à essence	Moteur Diesel
La préparation du mélange air/carburant est effectuée en amont de la soupape d'admission. Le mélange pénètre dans le cylindre au temps d'admission.	Le mélange s'effectue en fin de compression directement dans la chambre de combustion.
Le mélange est porté à une température légèrement inférieure à sa température d'auto-inflammation. Le complément d'énergie calorifique est fourni par un arc électrique commandé. Celui-ci déclenche l'inflammation. La vitesse de combustion est maintenue à la limite de la détonation. Le mélange brûle théoriquement à volume constant.	L'air est porté à une température supérieure à celle d'auto-inflammation du carburant. La combustion est déclenchée par le début d'injection. Le carburant brûle à mesure de son introduction dans le cylindre. La détonation est recherchée en début de combustion. La pression est théoriquement maintenue constante pendant une grande partie du temps.

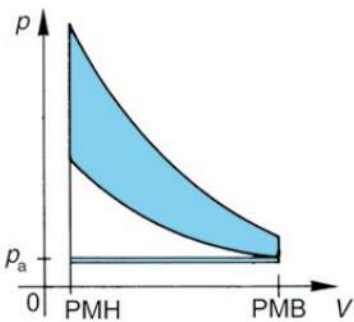


Figure 7.5 Moteur à essence : diagramme théorique, combustion à volume constant.

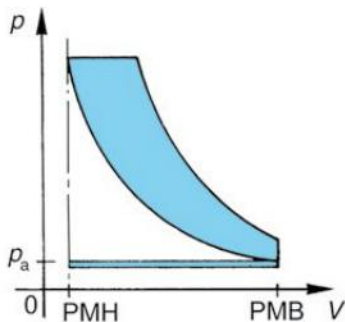


Figure 7.6 Moteur Diesel : diagramme théorique, combustion à pression constante.

Le cycle théorique ne se vérifie pas dans la pratique, puisque, par simplification, nous avons volontairement omis certains phénomènes qui ont leur importance.

Exemples

La mise en mouvement d'un fluide gazeux s'effectue avec un certain retard par rapport au moment de sa commande ou de son arrêt. Cela est dû à son inertie.

Les variations de température sont modifiées par les échanges de chaleur avec l'extérieur.

La combustion complète du mélange demande un certain temps.

Lorsque le moteur fonctionne, le diagramme change :

1. Admission (courbe AB). La pression p est supérieure à p_a du fait de l'accumulation des gaz dans la tubulure d'admission, puis le recul rapide du piston crée une baisse de pression dans la deuxième partie de AB :

$$p < p_a \text{ au point B}$$

2. Compression (courbe BC). La courbe de compression se trouve en dessous de la courbe théorique, puisque son point de départ B est en dessous de p_a . Elle est également modifiée par les échanges de chaleur.

3. Inflammation détente (courbe CDE). Pendant le temps que dure la combustion, le piston recule. La verticale va s'abaisser en une courbe dont la pression maximale sera plus faible. De plus, pendant la détente, les gaz chauds perdent une partie de leur chaleur. La pression décroît plus rapidement que dans le moteur théorique.

4. Échappement (courbe EA). La chute de pression se fait progressivement pour n'approcher la pression à l'admission qu'en fin de course du piston. Pendant toute la course, il règne une contre-pression due à la poussée rapide du piston.

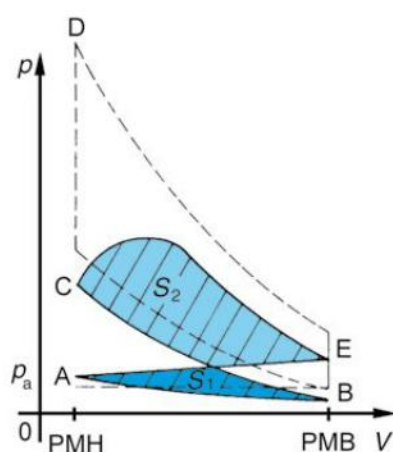


Figure 7.7 Diagramme réel avant réglage.

Conclusions :

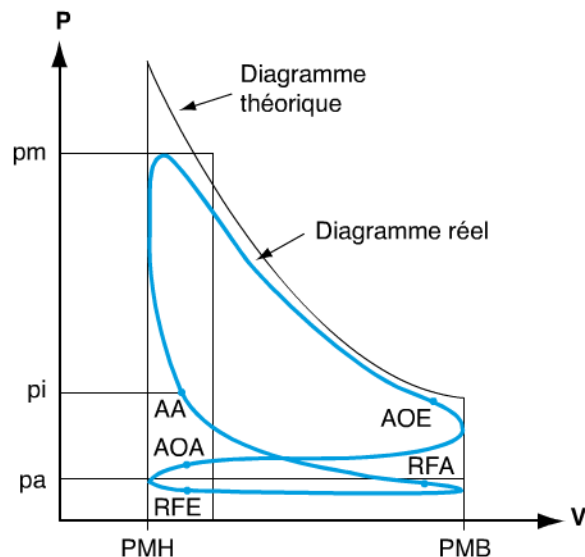
1. Les temps utiles perdent une partie de leur surface.
2. Les temps résistants augmentent (figure 7.7) :

$$S_2 - S_1 = \text{travail utile insuffisant}$$

Il est nécessaire, pour remédier à ces inconvénients, d'augmenter le temps d'ouverture des soupapes afin d'éviter le freinage des gaz.

Le point d'allumage devra être avancé pour tenir compte du délai d'inflammation.

Figure 7.8 Diagramme réel après réglage.



Les réglages à apporter au diagramme réel :

- » Avance à l'ouverture de l'admission (AOA). Cette avance évite l'arrêt de la veine gazeuse devant une soupape fermée et améliore ainsi le taux de remplissage. La soupape d'admission s'ouvrira donc avant la fermeture complète de la soupape d'échappement. Il n'y a pas de risque de mélange avec les gaz d'échappement, car les gaz frais, par la vitesse acquise (inertie), chassent les gaz brûlés en pénétrant dans le cylindre.
- » Retard à la fermeture de l'admission (RFA). On profite de l'inertie des gaz pour augmenter le remplissage et ne refermer la soupape qu'après le PMB. La diminution du temps de compression est compensée par une pression de début de compression plus élevée.
- » Avance à l'allumage (AA). Elle permet de répartir l'explosion de part et d'autre du PMH. La pression maximale se trouve ainsi augmentée.
- » Avance à l'ouverture de l'échappement (AOE). Elle permet d'avancer la chute de pression des gaz brûlés afin de limiter leur tendance à la contre-pression.
- » Retard à la fermeture de l'échappement (RFE). On profite de l'inertie des gaz pour faciliter leur évacuation complète. La soupape d'échappement se fermera donc au début du temps admission.

Remarque

Le taux de remplissage est le rapport entre la quantité de mélange admis dans les cylindres et la quantité théoriquement admissible ; taux de remplissage maximal = 1 ; taux de remplissage moyen = 0,5.

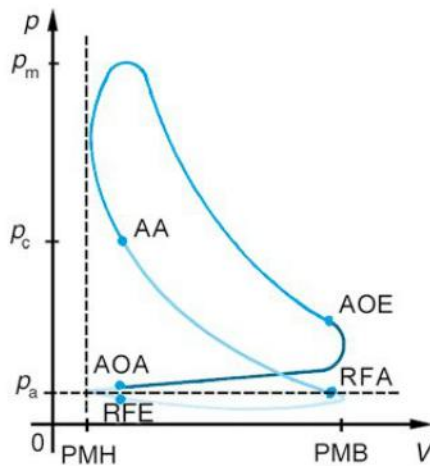


Figure 7.9 Diagramme réel après réglage.

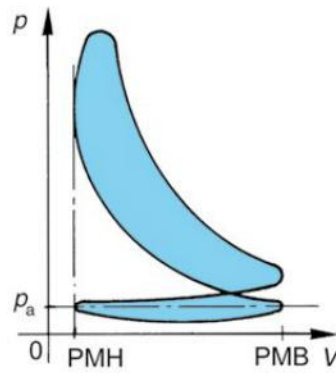


Figure 7.10 Cycle Diesel : diagramme réel.

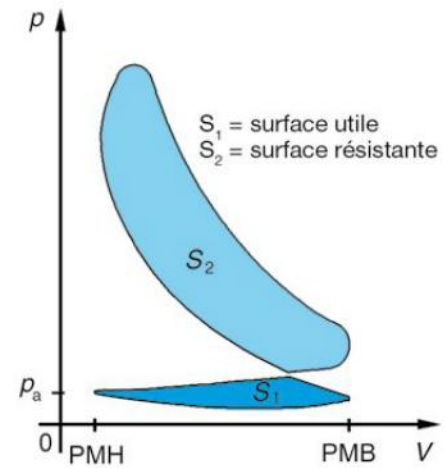


Figure 7.11 Comparaison des aires du diagramme.

Remarque

L'aire S_2 a augmenté, l'aire S_1 a diminué. Le travail utile du moteur est plus important (figure 7.11).

7.3 Particularités du moteur 3 cylindres

Pour répondre aux exigences croissantes en termes de réduction des émissions polluantes (CO_2 notamment), certains constructeurs se dotent d'une nouvelle famille de moteurs. Cette nouvelle génération de moteurs atmosphériques remplace certains moteurs 4 cylindres avec un niveau de puissance équivalent. Son cahier des charges est très ambitieux vis-à-vis des moteurs remplacés :

- » réduction des émissions de CO_2 : -25 % par rapport aux moteurs 4 cylindres équivalents ;
- » amélioration acoustique et diminution des vibrations ;
- » performance : couple à bas régime et puissance au meilleur niveau ;
- » optimisation de la masse : -25 kg par rapport aux moteurs 4 cylindres équivalents.

Poussés par la législation contraignant à la réduction des émissions de CO_2 , les constructeurs ont accéléré des développements tous

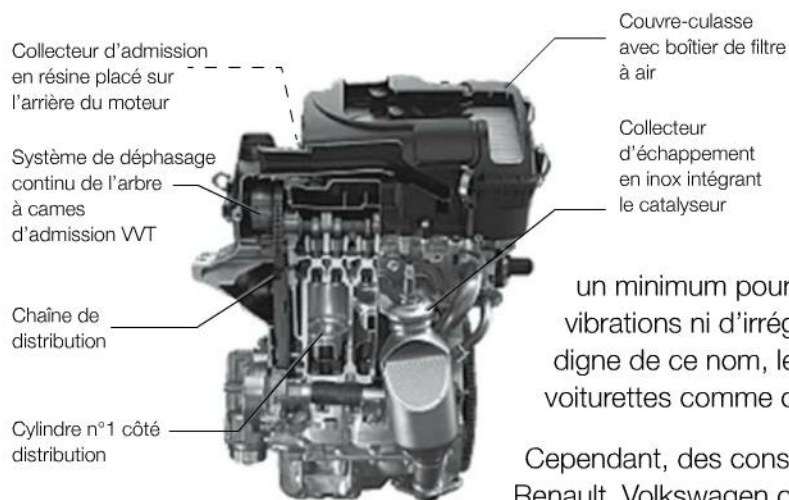


Figure 7.12

azimuts qui vont aussi bénéficier au consommateur en réduisant parallèlement la consommation de carburant. Un des moyens les plus efficaces de parvenir à ce but est la réduction du nombre de cylindres. Mais 4 étaient jusqu'ici considérés comme

un minimum pour un fonctionnement sans trop de vibrations ni d'irrégularités cycliques sur une automobile digne de ce nom, les 3 cylindres étant réservés aux voitures comme celles de Daihatsu, Suzuki, Smart ou VW.

Cependant, des constructeurs tels que Ford, Peugeot-Citroën, Renault, Volkswagen ou même... BMW vantent désormais les mérites de leurs nouveaux et relativement puissants 3 cylindres, une configuration qui est désormais affublée de toutes les vertus. Les choses ont apparemment changé, notamment grâce à la turbo suralimentation, au volant bi-masse et quelques innovations.

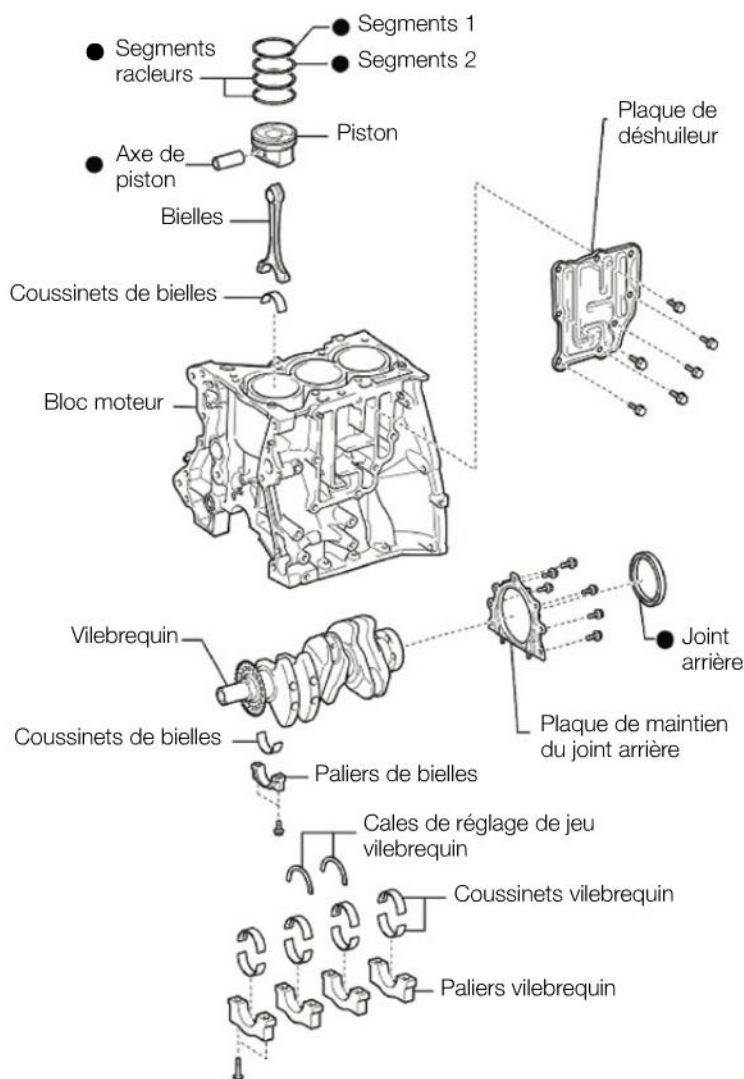


Figure 7.13 Moteur 3 cylindres :
pistons et vilebrequin.

● À utilisation unique

Le temps moteur est tous les 240 degrés de rotation du vilebrequin (720 / 3).

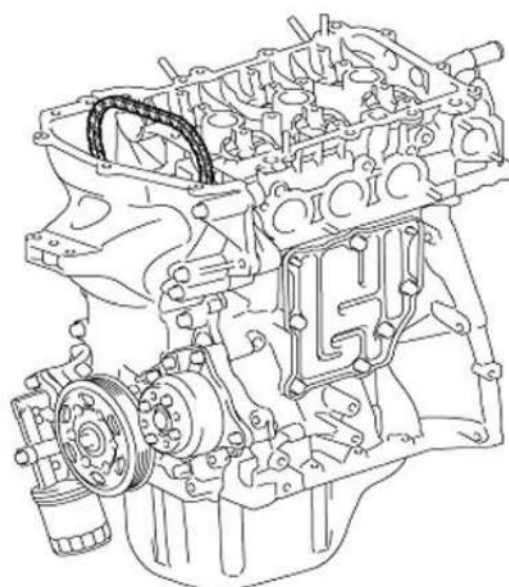
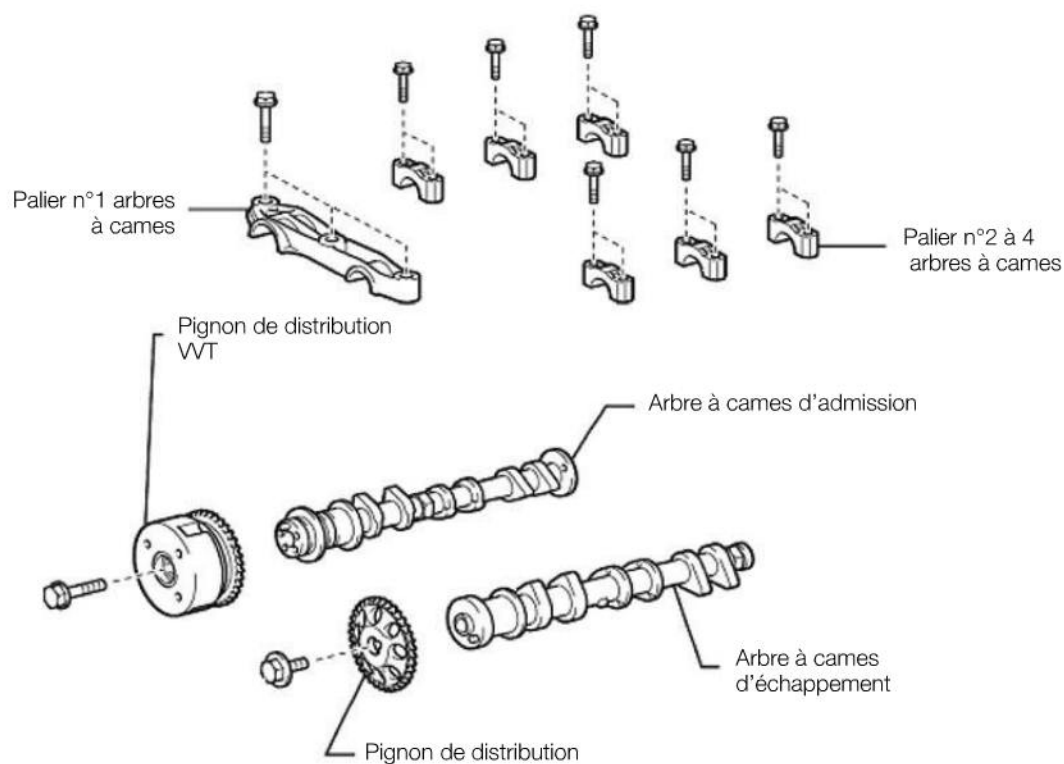
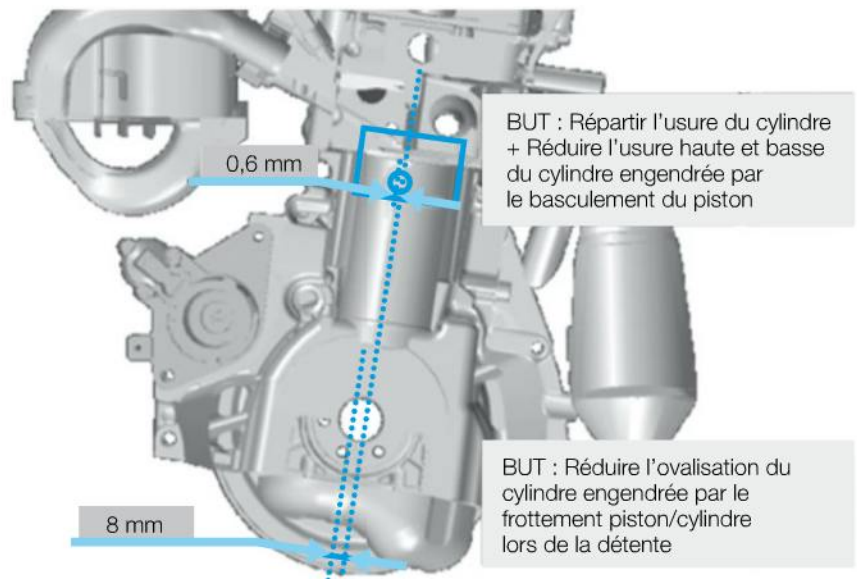


Figure 7.14 Moteur 3 cylindres : admission et échappement.

Principe de fonctionnement

Décalage du vilebrequin et de l'axe du piston

Figure 7.15



86

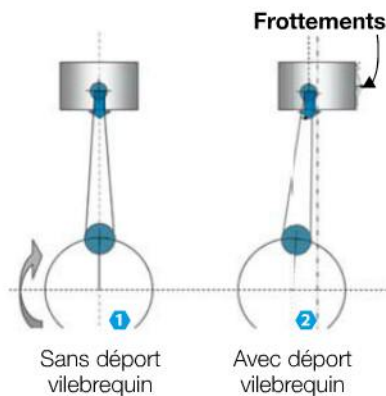


Figure 7.16 Au PMH.

- 1 Cas 1
- 2 Cas 2

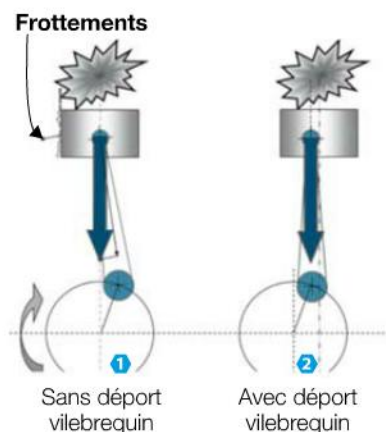


Figure 7.17 Montée en pression.

Intérêt du décalage de vilebrequin

Au PMH (figure 7.16)

Le déport de vilebrequin permet de réduire l'ovalisation du cylindre par l'usure due au frottement entre le piston et le cylindre lors de la détente.

Premières remarques :

Le PMH correspond à l'alignement piston/bielle/vilebrequin lorsqu'on n'a pas de décalage (cas 1).

Le PMH correspond à l'alignement bielle/vilebrequin lorsqu'on a le décalage (cas 2), la verticale du piston formant un angle par rapport à la bielle.

Lors de la montée du piston (compression, échappement), l'angle entre la bielle et le vilebrequin est inférieur dans le cas 1 que dans le cas 2.

Conséquences :

Dans ces phases de montée du piston, les frottements entre le piston et la chemise sont supérieurs dans le cas 2 que dans le cas 1.

Cela peut paraître un inconvénient, mais les forces engendrées sont faibles, et c'est le prix à payer pour gagner dans une autre phase de fonctionnement moteur, lorsque les forces sont bien supérieures, à savoir lors de la détente....

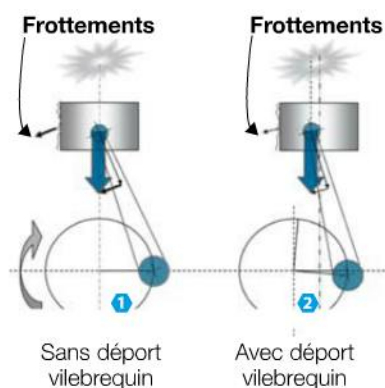


Figure 7.18 Pendant la détente.

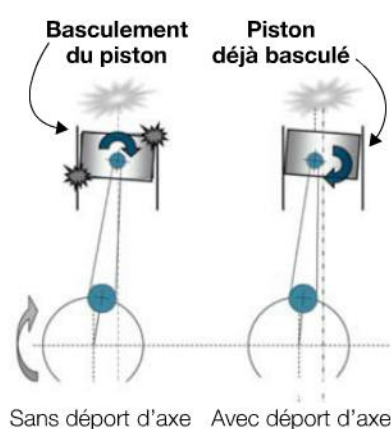


Figure 7.19 Au PMH.

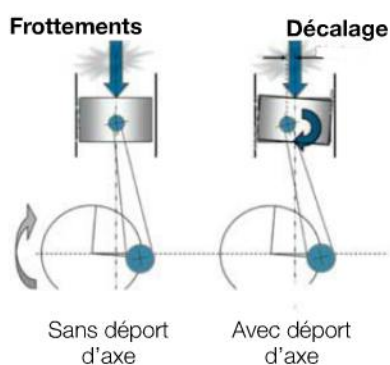


Figure 7.20 Pendant la détente.

Montée en pression (figure 7.17)

Lors de la combustion, il y a un pic de pression dans le cylindre un peu après le PMH.

D'un point de vue « Frottements » :

Dans le cas 1, l'angle entre la force appliquée sur la tête du piston et la bielle commence à être important. Cela a pour effet d'engendrer des frottements importants entre le piston et le cylindre.

Dans le cas 2, quand la pression est maximale dans le cylindre, l'angle entre la force de pression et la bielle est nul ou très faible. Par conséquent, les frottements sont beaucoup plus faibles, d'où une usure plus faible et un rendement plus élevé.

Pendant la détente (figure 7.18)

Dans la même idée que pour la phase précédente, les frottements sont plus faibles dans le cas 2 pendant toute la durée de descente du piston.

Intérêt du décalage d'axe de piston

Au PMH (figure 7.19)

Intérêt 1 : le déport de piston permet de réduire l'usure haute du cylindre due aux chocs créés par le basculement du piston au PMH.

Grâce au déport de l'axe, le piston est déjà basculé lors de l'apparition des fortes pressions dans le cylindre, ce qui élimine les chocs de basculement.

Remarque : le basculement du piston est exagéré dans l'intérêt de l'image (figure 7.19).

Pendant la détente (figure 7.20)

Intérêt 2 : le déport de piston permet de réduire l'ovalisation des cylindres par répartition de l'usure lors de la détente.

Le déport de l'axe augmente légèrement les efforts piston/cylindre, mais ces forces responsables de l'usure sont réparties de chaque côté du piston.

Résumé

Principe du cycle à quatre temps

Le cycle à quatre temps s'effectue en quatre courses de piston, soit deux tours de vilebrequin.

La rotation du vilebrequin pendant le cycle est égale à : $360^\circ \times 2 = 720^\circ$.

Le temps moteur est le troisième temps : inflammation-détente.

Les trois autres temps – admission, compression et échappement – sont appelés « temps résistants ».

Diagramme théorique

Diagramme idéal ne tenant pas compte de certains phénomènes se produisant dans le cylindre.

On place les variations de volume en abscisse (horizontalement) et les variations de pression en ordonnée (verticalement).

Principe du moteur Diesel

Le moteur Diesel est un moteur capable d'utiliser des carburants lourds tels que gazole, fuel, mazout, huiles lourdes, etc.

La combustion est déclenchée par auto-inflammation du carburant.

Fonctionnement du moteur Diesel

Seul l'air est aspiré au temps d'admission. Il est comprimé à une pression élevée et porté à une température supérieure à celle d'auto-inflammation du carburant. Au troisième temps, le gazole est injecté sous pression. Il s'enflamme spontanément et brûle tant que dure l'injection.

Notions de travail

Le travail moteur est calculé par la formule $W = F.d$.

Le travail utile du moteur est égal à l'aire totale du diagramme moins l'aire représentée par les temps résistants.

Critique du diagramme théorique

Les hypothèses de départ ne sont pas vérifiées :

- » l'ouverture des soupapes n'est pas instantanée ;
- » la combustion ne se fait pas dans un temps nul ;
- » la pression ne s'équilibre pas dès qu'une soupape est ouverte ;
- » il se produit des échanges de chaleur avec l'extérieur.

Diagramme réel avant réglage

Travail utile insuffisant et temps résistants trop importants.

Diagramme réel après réglage

- » Avance à l'ouverture de l'admission (AOA) avant le PMH et retard à la fermeture de l'admission (RFA) après le PMB : l'amélioration du remplissage permet d'obtenir une pression de début de compression plus élevée.
- » L'avance à l'allumage (AA) répartit la combustion de part et d'autre du PMH : il se produit une augmentation de la pression et de la durée du temps de détente.

- » Avance à l'ouverture de l'échappement (AOE) avant le PMB et retard à la fermeture de l'échappement (RFE) après le PMH.
- » Diminution de l'aire des temps résistants.

Dispositions technologiques

Dans les moteurs, ces réglages sont réalisés par la distribution.

Testez vos connaissances

1. Lors d'un cycle à quatre temps, le piston fait :

- a ☐ 2 courses
- b ☐ 4 courses
- c ☐ 8 courses

2. Lors d'un cycle à quatre temps, le vilebrequin fait :

- a ☐ 1 tour
- b ☐ 2 tours
- c ☐ 4 tours

3. Le temps moteur est le temps :

- a ☐ de compression
- b ☐ d'explosion-détente
- c ☐ d'échappement

4. On obtient un meilleur remplissage du moteur en augmentant l'angle :

- a ☐ AOA
- b ☐ AOE
- c ☐ RFE

5. Au temps de compression, la pression et la température des gaz :

- a ☐ augmentent
- b ☐ diminuent
- c ☐ restent constantes

6. Dans un moteur Diesel, l'injection du carburant s'effectue au début du temps :

- a ☐ d'admission
- b ☐ de compression
- c ☐ d'explosion-détente

Entraînez-vous

1. Sachant que la pression de début de compression d'un moteur est de 1 bar et sa cylindrée unitaire de 400 cm^3 , calculez la pression de fin de compression sachant que v est égal à 40 cm^3 . Nous supposons que la température reste constante.
2. Quelles modifications faudra-t-il apporter aux aires des diagrammes pour augmenter le travail utile des moteurs ?
3. Recherchez dans des manuels techniques les réglages de la distribution sur deux moteurs de votre choix.
4. Indiquez le type du moteur et la valeur des réglages pour chacun d'eux.

La distribution

chapitre 8

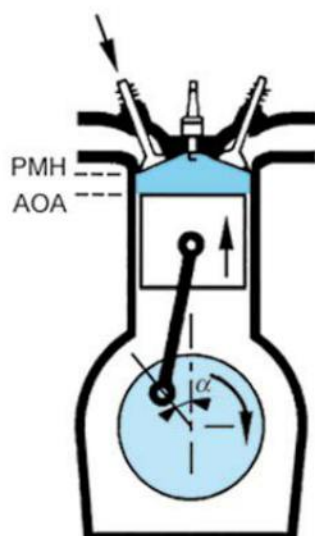


Figure 8.1 Positions respectives des éléments en AOA.

Rappel des réglages apportés au moteur afin d'augmenter son travail :

Pour le temps admission :

- » AOA = avance à l'ouverture de l'admission ;
- » RFA = retard à la fermeture de l'admission.

Pour le temps échappement :

- » AOE = avance à l'ouverture de l'échappement ;
- » RFE = retard à la fermeture de l'échappement.

Le piston se trouve quelques millimètres avant ou après les points morts au moment des avances et des retards (figure 8.1).

Exemple

En AOA, le piston se trouve quelques millimètres avant le PMH, vers la fin du temps échappement du cycle précédent.

On observe que dans cette position, le maneton de bielle se trouve positionné quelques degrés avant la verticale.

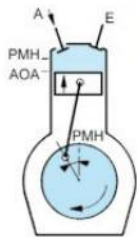
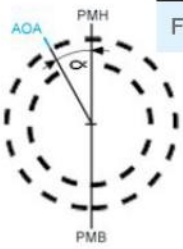
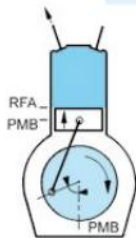
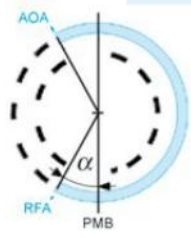
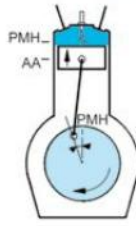
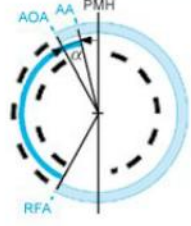
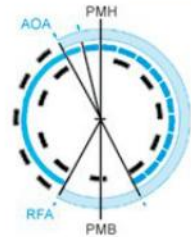
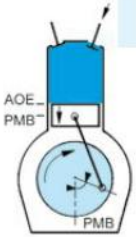
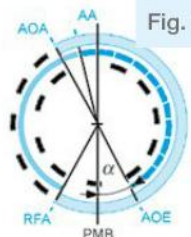
En constatant qu'à chaque position du piston correspond une position angulaire du vilebrequin, nous pouvons indiquer les valeurs des réglages :

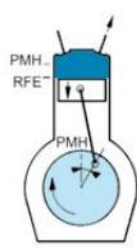
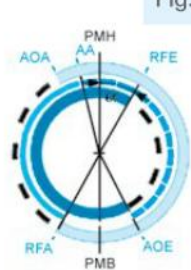
- » soit en millimètres de course du piston ;
- » soit en degrés de rotation du vilebrequin.

Si nous supposons que le maneton de bielle laisse une trace sur son sillage pendant sa rotation, nous pouvons tracer l'épure circulaire des angles de distribution.

L'épure circulaire

L'épure circulaire des angles de distribution est la représentation graphique qui permet de visualiser les angles de la distribution d'un moteur (tableau suivant et figures 8.2 à 8.12).

Réglage temps	Position piston	Position vilebrequin	Position relative soupape-piston-vilebrequin	Tracé de l'épure circulaire
AOA début admission	x millimètres avant PMH	x degrés avant PMH	 Fig. 8.2	 Fig. 8.3
RFA fin admission	x millimètres après PMB	x degrés après PMB	 Fig. 8.4	 Fig. 8.5
AA fin compression	x millimètres avant PMH	x degrés avant PMH	 Fig. 8.6	 Fig. 8.7
Inflammation détente			Temps moteur	 Fig. 8.8
AOE début échappement	x millimètres avant PMB	x degrés avant PMB	 Fig. 8.9	 Fig. 8.10

Réglage temps	Position piston	Position vilebrequin	Position relative soupape-piston-vilebrequin	Tracé de l'épure circulaire
RFE fin échappement	x millimètres après PMH	x degrés après PMH	 Fig. 8.11	 Fig. 8.12

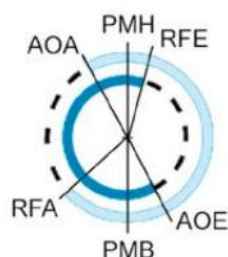


Figure 8.13 Épure asymétrique.

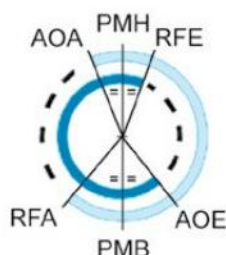


Figure 8.14 Épure symétrique.

Nous constatons que, comme dans le diagramme réel, le temps d'échappement se termine alors que le temps d'admission est déjà commencé. On appelle ce point le « croisement des soupapes », ou la « balance des soupapes ».

Les épures peuvent posséder des angles indifférents (épures asymétriques) (figure 8.13) ou des angles tels que $AOA = RFE$ et $AOE = RFA$ (épures symétriques) (figure 8.14).

Remarque

Les épures circulaires se représentent toujours en tournant vers la droite quel que soit le sens réel de rotation du moteur.

8.1 Le système de distribution

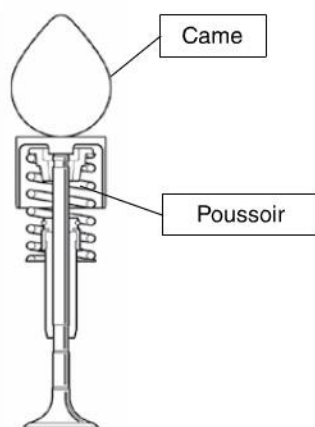


Figure 8.15 Commandes des soupapes.

Chaque soupape est commandée par une came (figure 8.15). L'ensemble des cames est monté sur un arbre appelé « arbre à cames ».

Les cames permettent de transformer le mouvement de rotation de l'arbre en un mouvement rectiligne alternatif des soupapes.

L'ensemble arbre à cames-vilebrequin devra posséder un système de liaison parfaitement synchronisé.

Si nous observons l'épure circulaire, nous voyons que, sur les deux tours de vilebrequin, chaque soupape – admission ou échappement – ne s'ouvre qu'une fois. L'arbre à cames devra donc tourner à demi-vitesse du vilebrequin (figure 8.16).

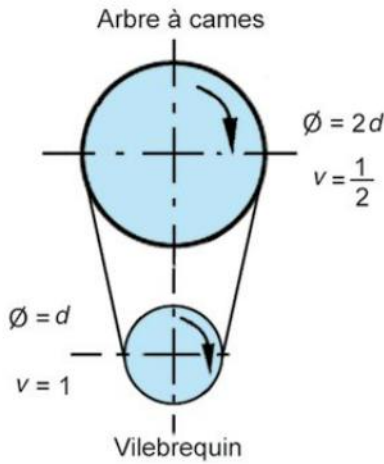


Figure 8.16 Liaison arbre à cames-vilebrequin.

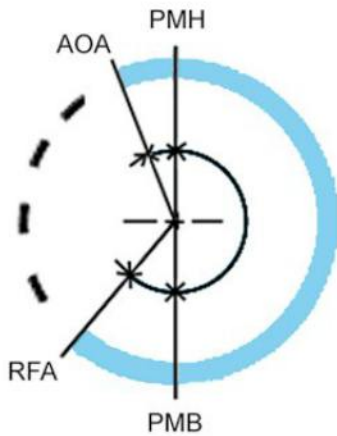


Figure 8.17 Angle du temps d'admission :
 $\alpha_{vileb} = AOA + 180^\circ + RFA.$

Le cycle à quatre temps est réalisé en deux tours de vilebrequin (720°) et un tour d'arbre à cames (360°).

Exemple de calcul de l'angle de rotation de l'arbre à cames (figure 8.17)

Si $AOA = 15^\circ$ et $RFA = 45^\circ$, l'angle total parcouru pendant l'admission par le vilebrequin est :

$$15 + 180 + 45 = 240^\circ$$

L'angle parcouru par le vilebrequin pendant un temps est égal à l'angle d'avance à l'ouverture + 180° + angle de retard à la fermeture :

$$\alpha_{vileb} = AOA + 180^\circ + RFA$$

Puisque, lorsque le vilebrequin fait un tour, l'arbre à cames n'en fait qu'un demi, si le vilebrequin tourne de 240° , l'arbre à cames

tournera de : $\frac{240}{2} = 120^\circ$ (figure 8.18).

L'angle parcouru par l'arbre à cames pendant un temps est égal à l'angle parcouru par le vilebrequin divisé par deux :

$$\alpha_{arbre \text{ à cames}} = \frac{\alpha_{vileb}}{2}$$

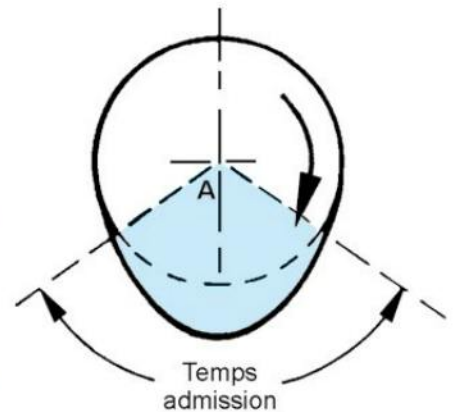


Figure 8.18 Angle du temps d'admission.

$$\alpha_{arbre \text{ à cames}} = \frac{\alpha_{vileb}}{2}$$

8.2 La distribution variable

Description

C'est un système qui permet de faire varier les moments d'ouverture et de fermeture des soupapes d'un moteur, voire parfois leurs levées en fonction du régime, de la charge et de la demande d'accélération.

L'intérêt est d'élargir la plage de régime d'utilisation du moteur tant sur le plan de la puissance, du couple à bas régime. Cela a pour

conséquence une baisse de consommation et de pollution et une amélioration du confort de conduite.

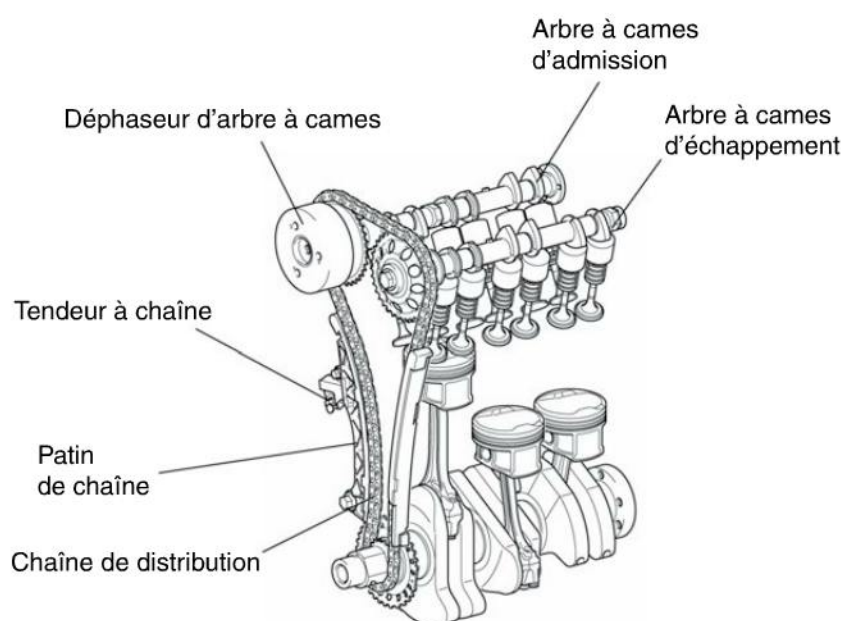
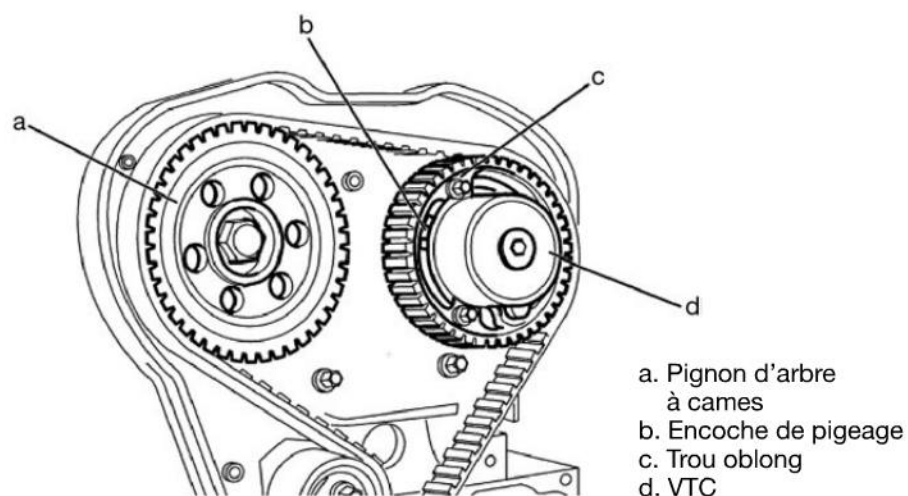


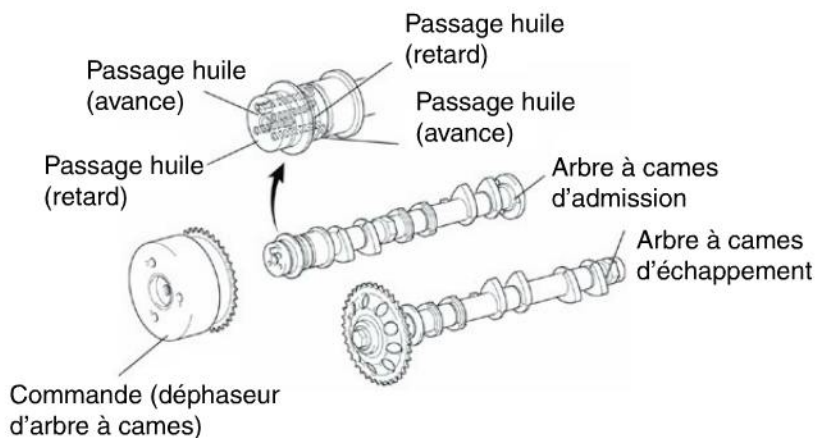
Figure 8.19 La distribution variable.

Arbres à cames et soupapes

Des orifices de passage d'huile sont prévus dans l'arbre à cames d'admission afin de fournir la pression d'huile moteur nécessaire au fonctionnement du système.

L'électrovanne de commande se trouve à l'avant de l'arbre à cames d'admission.

Figure 8.20 Arbres à cames.



La figure 8.21 donne la zone de fonctionnement du déphaseur d'arbre à cames.

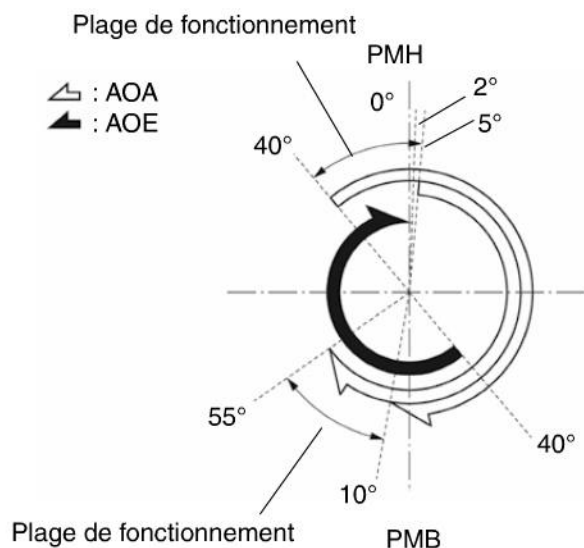


Figure 8.21 Zone de fonctionnement du déphaseur d'arbre à cames.

Principe

Lorsque le moteur tourne, le calculateur peut piloter une électrovanne qui commande le circuit d'arrivée de l'huile moteur sous pression et ferme le circuit de retour au carter.

Le piston du déphaseur d'arbre à cames subit la pression de l'huile moteur et se déplace en comprimant le ressort de rappel. Ce déplacement provoque la rotation de l'arbre à cames d'admission.

Résumé

Présentation

L'épure circulaire est la représentation graphique des angles de la distribution.

Les angles sont exprimés en degrés d'avance ou de retard par rapport aux points morts.

Angle AOA : x degrés avant PMH.

Angle RFA : x degrés après PMB.

Angle AOE : x degrés avant PMB du second tour.

Angle RFE : x degrés après PMH.

Réalisation pratique

L'ouverture et la fermeture des soupapes sont commandées par des cames montées sur un arbre à cames.

L'arbre à cames est synchronisé avec le vilebrequin.

L'arbre à cames tourne à demi-vitesse du vilebrequin.

Synchronisation des mouvements

L'angle parcouru par le vilebrequin pendant un temps est égal à :

Angle d'avance à l'ouverture + 180° + angle de retard à la fermeture.

L'angle parcouru par l'arbre à cames pendant ce même temps est égal à :

Angle parcouru par le vilebrequin divisé par deux.

Les cames d'admission et d'échappement sont calées à environ 90° l'une de l'autre dans l'ordre échappement puis admission.

Testez vos connaissances



1. À quelle vitesse tourne l'arbre à cames par rapport au vilebrequin ?

- a ☐ à la même vitesse
- b ☐ 2 fois moins vite
- c ☐ 2 fois plus vite

2. Quel est l'organe moteur qui permet l'ouverture et la fermeture des soupapes ?

- a ☐ l'arbre à cames
- b ☐ le vilebrequin
- c ☐ le piston

3. Lorsque deux soupapes d'un même cylindre s'ouvrent immédiatement l'une après l'autre, elles s'ouvrent dans l'ordre :

- a ☐ admission/compression
- b ☐ admission/échappement
- c ☐ échappement/admission

4. Quelle est la position du piston au point AOE ?

- a ☐ avant le PMH
- b ☐ avant le PMB
- c ☐ au PMH

98

Entraînez-vous

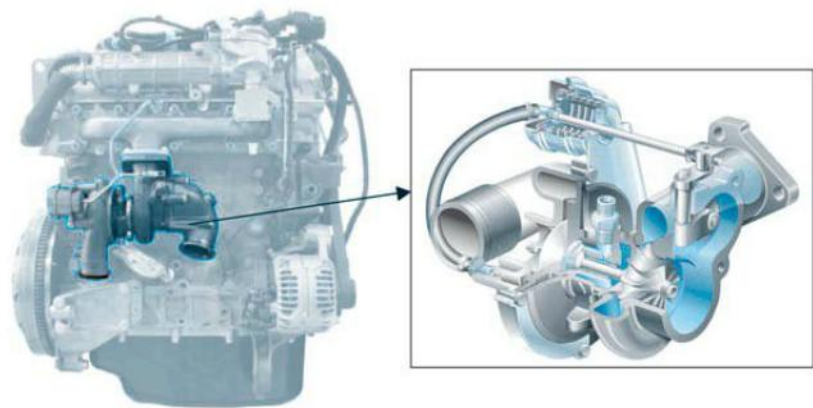
1. Donnez les positions respectives du maneton de bielle et de la soupape d'échappement en AOE, et tracez le schéma correspondant.
2. Donnez l'angle parcouru par la came d'échappement dans le cas où $AOE = 60^\circ$ et $RFE = 20^\circ$.
3. Relevez les valeurs des angles d'un moteur dont l'épure de distribution est symétrique et ceux d'un moteur dont l'épure est asymétrique. Tracez les épures circulaires correspondantes.

La suralimentation des moteurs thermiques

chapitre 9

9.1 Mise en situation

Figure 9.1 Moteur
avec turbocompresseur.



Nous avons pu voir précédemment qu'il était possible :

- » d'augmenter le rapport volumétrique,
- » d'augmenter la fréquence de rotation du moteur,
- » d'augmenter sa cylindrée.

Ces possibilités ne seront efficaces que si le remplissage du moteur est correctement réalisé.

Le taux de remplissage est la masse de mélange réellement admise dans les cylindres par rapport à la masse théoriquement admissible en fonction de la cylindrée du moteur.

On constate que, malgré les améliorations apportées à la distribution (croisement des soupapes), le taux de remplissage est toujours inférieur à 1.

Le meilleur remplissage se situe aux environs de 0,85 (soit 85 %). Ce chiffre diminue avec l'augmentation de la fréquence de rotation du

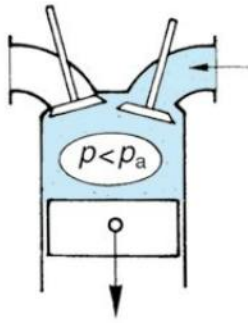


Figure 9.2 Moteur atmosphérique au temps d'admission.

p : pression dans le cylindre.
 p_a : pression atmosphérique.

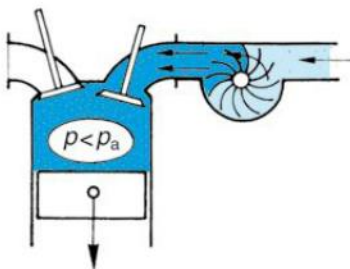


Figure 9.3 Principe de la suralimentation. Temps d'admission.

moteur : dépression plus forte, pertes de charge importantes, temps d'ouverture des soupapes réduit. Le moteur tourne en fait le plus souvent avec un remplissage d'environ 70 %.

Il est possible d'augmenter la vitesse de pénétration de l'air ou du mélange dans la chambre en augmentant sa pression d'admission. Cette disposition est réalisée grâce à un compresseur qui permet une suralimentation du moteur (figures 9.2 et 9.3).

Caractéristiques principales des compresseurs

Rapport de compression : C'est le rapport entre la pression de l'air en sortie de compresseur et sa pression d'entrée.

Débit : C'est la masse d'air comprimé fournie par le compresseur pendant l'unité de temps, on l'exprime en kilogrammes par seconde.

Régime du compresseur : C'est la fréquence de rotation du compresseur.

Il existe deux types de compresseurs :

- » les **compresseurs volumétriques**, à commande mécanique,
- » les **compresseurs centrifuges**, appelés « turbocompresseurs ».

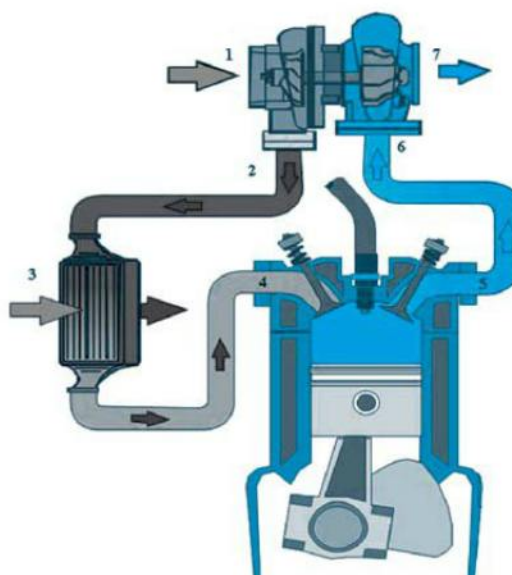
9.2 Analyse structurelle

Le turbocompresseur est équipé d'une soupape de décharge (*wastegate*) afin de limiter la pression de suralimentation. L'ouverture de la soupape de décharge est réalisée par une capsule pilotée (mécaniquement ou électroniquement) par la pression d'admission prise en sortie de compresseur.

Un échangeur thermique qui est destiné à refroidir l'air avant son admission dans les cylindres est placé à la sortie du compresseur. L'échangeur refroidit l'air comprimé avant l'admission dans les cylindres pour en augmenter la densité, ce qui permet d'améliorer le remplissage du moteur.

Figure 9.4 Principe du turbocompresseur.

- ❶ Entrée compresseur reliée au filtre à air ;
- ❷ Sortie compresseur ;
- ❸ Échangeur ou intercooler ;
- ❹ Conduit d'admission ;
- ❺ Conduit d'échappement ;
- ❻ Entrée turbine ;
- ❼ Sortie turbine, reliée au tube de descente d'échappement.



Le système de régulation

La pression de suralimentation sur une voiture de série est comprise entre 0,3 bar et 1 bar au-dessus de la pression atmosphérique, cela va dépendre de la conception du moteur (rapport volumétrique ρ notamment « compris entre 7,5 et 9,5 dans ce cas pour un moteur essence ») et du tempérament que l'on veut donner au moteur (couple à bas/moyen régime ou puissance à haut régime).

Dans tous les cas il va falloir maintenir une pression maximum acceptable pour le moteur. Il existe deux systèmes principaux de régulation :

La régulation mécanique

La soupape, ou clapet de décharge, est directement commandée par la pression régnant dans le collecteur d'admission ; quand la pression devient supérieure à la force du ressort + la pression atmosphérique, le clapet s'ouvre créant une dérivation pour les gaz d'échappement, le régime de la turbine chute alors faisant aussi chuter la pression.

La régulation électronique

La pression mesurée par le capteur de pression absolue est transmise au calculateur d'injection qui en fonction des paramètres moteur et conducteur (Température de l'eau, régime, charge, position accélérateur, rapport engagé...) va décider de la commande du clapet de décharge via l'électrovanne de régulation de pression.

Celle-ci, commandée par un signal électronique, va permettre une mise en relation plus ou moins importante avec la dépression de la

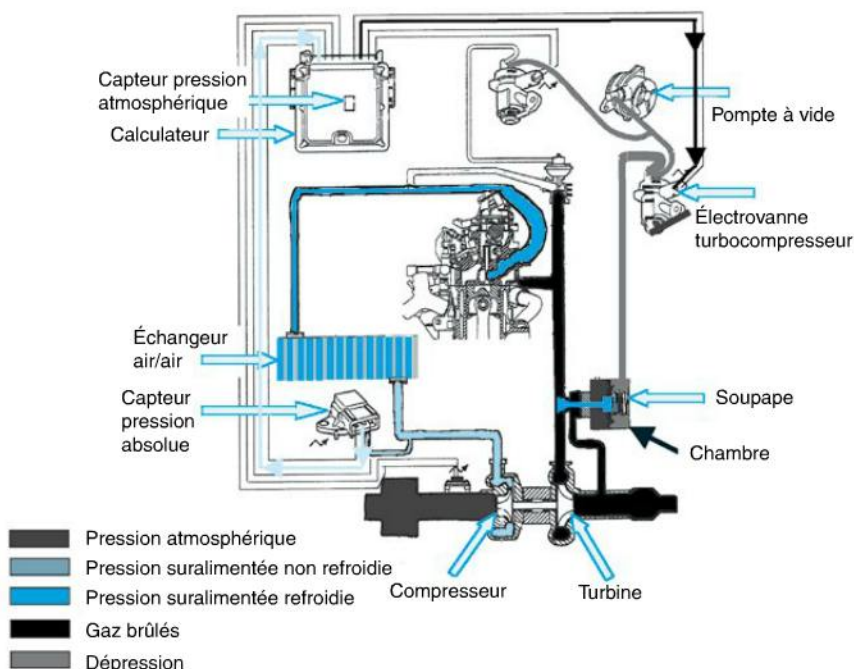


Figure 9.5 Soupape de décharge (Wastegate).

pompe à vide, ouvrant par conséquent plus ou moins le clapet de décharge.

Il est à noter qu'au repos dans ce cas le clapet de décharge est ouvert, et qu'il faut que le calculateur commande l'électrovanne pour que celui-ci soit fermé et que le turbo monte en pression...

Figure 9.6 Régulation électronique..



L'échangeur

La compression d'un gaz augmente sa température. Lorsque la température d'un gaz augmente, on constate une dilatation de ses molécules. Dans un moteur, la dilatation des molécules d'air ou de mélange admis provoque une diminution sensible du remplissage.

Pour remédier à ce défaut, le circuit d'admission peut être équipé d'un refroidisseur, ou échangeur thermique, placé entre le turbo et la chapelle d'admission.

On rencontre deux types d'échangeurs :

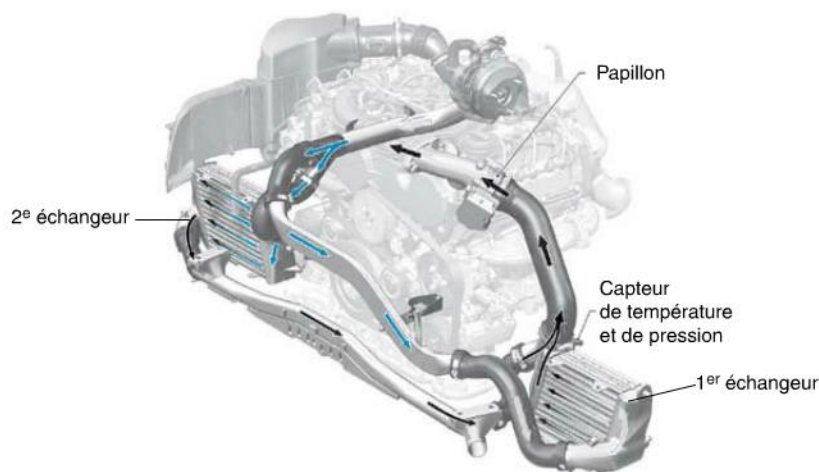
- » le premier et le plus courant en automobile est celui qui est placé dans un flux d'air quand le véhicule est en déplacement. Soit devant le radiateur derrière la calandre, soit sous le capot avec une ouverture pour canaliser l'air. Quelques fois, lorsque la place dans le compartiment moteur ne permet pas un montage permettant un flux d'air efficace, un ventilateur est monté avec l'intercooler.



Figure 9.7 Échangeur.

- » Le deuxième type d'*intercooler* que l'on rencontre, a priori chez les poids lourds (mais parfois en automobile), est refroidi par circulation d'eau moteur. Il s'agit d'un échangeur air/eau et non plus air/air. Cela autorise l'installation n'importe où dans le compartiment moteur mais il ne permet pas d'abaisser la température en dessous de 80 °C, température du liquide de refroidissement.

Figure 9.8 Échangeur refroidi par circulation d'eau moteur.



103

9.3 Analyse fonctionnelle

Principe de fonctionnement du compresseur volumétrique

Deux rotors, dont l'un est entraîné mécaniquement, tournent en sens opposé dans une chambre de forme adaptée. L'arrivée d'air à la pression atmosphérique se fait en A. On constate qu'un certain volume d'air se trouve emprisonné entre deux dents de chaque rotor. Pendant la rotation, les deux volumes passent en R.

Le débit de la pompe est proportionnel à sa fréquence de rotation.

Le débit de la pompe étant supérieur au débit demandé par le moteur, on constate une montée en pression de l'air d'admission.

L'entraînement mécanique est réalisé grâce à une courroie liée au vilebrequin (figure 9.10). Les diamètres des deux poulies permettent une surmultiplication (environ $\frac{2}{1}$).

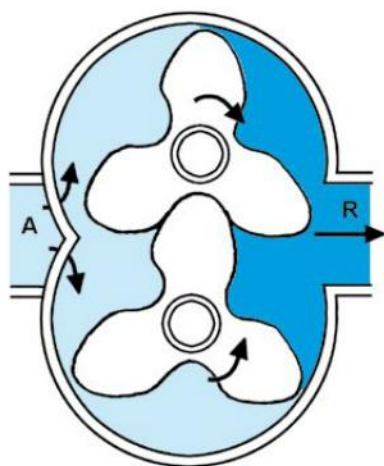


Figure 9.9 Principe du fonctionnement du compresseur volumétrique.

A. Aspiration.
R. Refoulement.

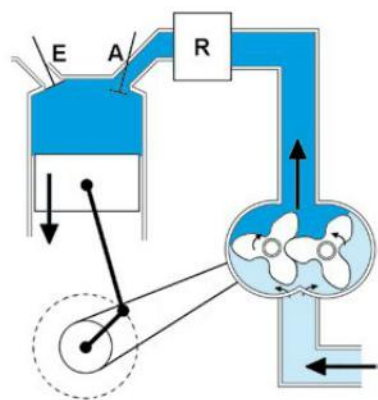


Figure 9.10 Système d'entraînement du compresseur.

- R. Refroidissement ou échangeur.
A. Admission.
E. Échappement.

Principaux avantages du système

Ce compresseur mécanique, actionné directement par le vilebrequin, offre l'avantage d'une réaction immédiate à l'accélération et permet ainsi au moteur de disposer d'un couple important à bas régime.

En supprimant le « temps de réponse » lié au turbo, il contribue à diminuer les émissions de gaz polluants lors des accélérations brutales.

Remarque

Sur les modèles les plus évolués, le compresseur peut être débrayé. Le débrayage et l'embrayage sont commandés par un calculateur qui analyse en permanence les paramètres moteur, notamment la charge.

Principe de fonctionnement du turbocompresseur

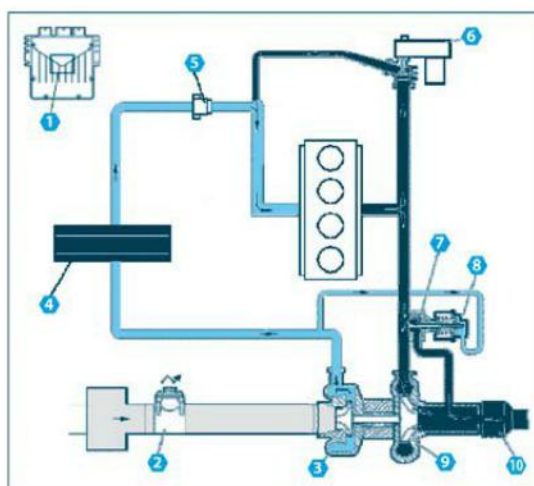
Le turbocompresseur comprend deux turbines reliées entre elles par un arbre commun. Chaque turbine est placée dans une chambre indépendante.

La turbine d'entraînement (roue de turbine) est actionnée par les gaz d'échappement encore sous pression à leur sortie du moteur.

La turbine de suralimentation (roue de compresseur centrifuge) aspire l'air extérieur et le refoule en amont de la soupape d'admission. La turbine doit avoir une faible inertie et freiner le moins possible les gaz d'échappement. Sa vitesse de rotation est très élevée (jusqu'à 200 000 tr/min).

Figure 9.11 Fonctionnement du turbocompresseur.

- 1 Capteur de pression atmosphérique (intégré au calculateur d'injection).
- 2 Débitmètre d'air + sonde de température d'air.
- 3 Compresseur d'admission d'air.
- 4 Refroidisseur d'air de suralimentation.
- 5 Capteur de température et pression tubulure d'admission.
- 6 Actionneur EGR + capteur de position.
- 7 Soupape de décharge (waste-gate).
- 8 Capsule de commande (par la pression de suralimentation)
- 9 Turbine d'échappement.
- 10 Catalyseur.



Remarque

À faible régime du moteur, la pression des gaz d'échappement est insuffisante pour permettre la suralimentation. Le moteur comporte donc deux phases de fonctionnement :

- » à bas régime, une phase atmosphérique dans laquelle le moteur fonctionne sans l'aide du turbocompresseur,
- » à haut régime, une phase suralimentée dans laquelle l'action du turbo est à sa pleine efficacité, le taux de remplissage est alors supérieur à 1.

Principaux avantages du système

La pression de fin de compression est augmentée.

La puissance au litre du moteur est supérieure, donc il y a un meilleur rapport masse/puissance.

Le rendement du cycle est légèrement supérieur.

À puissance égale, la consommation peut diminuer, notamment si le turbo équipe un moteur à injection.

Le moteur est peu sensible aux différences de pression atmosphérique.

Remarque

La pression de fin de compression élevée en phase suralimentée nécessite une diminution du rapport volumétrique.

On peut également décroiser les soupapes.

Le moteur ne peut pas fournir une puissance élevée en phase atmosphérique.

Pour optimiser la suralimentation des moteurs thermiques les fabricants de turbos ont inventé le turbo à géométrie variable, car l'ensemble turbine compresseur a un poids qui provoque une inertie dans la montée en régime du turbo (temps de réponse) qui bien qu'il ait largement diminué avec le progrès, reste encore perceptible. Le moteur n'a donc en général un apport de pression complet qu'entre 2 500 tr et le régime maxi environ, d'où ce système.

Principe :

- On fait varier la section de passage des gaz d'échappement.
- On fait varier l'orientation des gaz d'échappement sur la turbine.

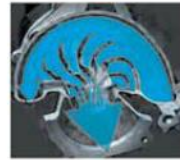
Construction :

- Par articulation des palettes sur un disque actionné par une biellette.
- Par position de la biellette réglée par l'actionneur électrique.

Figure 9.12 Turbo
à géométrie variable
(Document Porsche).

1. Carter de la turbine
2. Ailettes orientables
3. Roue de la turbine
4. Moteur électrique
pour orienter les ailettes
5. Orientation des ailettes
6. Carter du compresseur
7. Roue du compresseur
8. Clapet de dérivation
9. Arrivée d'huile
10. Arrivée du liquide de refroidissement

Ailettes
orientables
fermées



Ailettes
orientables
fermées



Le rendement d'une machine est le quotient de l'énergie utile restituée par l'énergie totale absorbée (figure 9.13) :

$$\text{rendement} = \frac{\text{énergie utile restituée}}{\text{énergie totale absorbée}}$$

$$\eta = \frac{W_u}{W_a}$$

En vertu du principe de dégradation de l'énergie, il est impossible d'obtenir une transformation totale dans la forme désirée. Dans toute transformation, nous constatons l'apparition d'énergie thermique, qui, lorsqu'elle n'est pas désirée, est de l'énergie perdue.

Le rendement est un nombre sans unité toujours inférieur à 1. Toutefois, on exprime souvent le rendement sous forme de pourcentage.

Exemple

Rendement = 0,35 = 35 %.

Remarque

Les termes utilisés doivent être identiques. Pour l'énergie, il est nécessaire d'utiliser le joule.

On peut employer ses correspondances :

- en électricité, on emploie le wattheure (1 Wh = 3 600 J) ;
- en thermique, la calorie (1 cal = 4,19 J).

Il est également possible d'exprimer le rendement par comparaison des puissances :

$$\text{rendement} = \frac{\text{puissance utile fournie}}{\text{puissance absorbée}}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

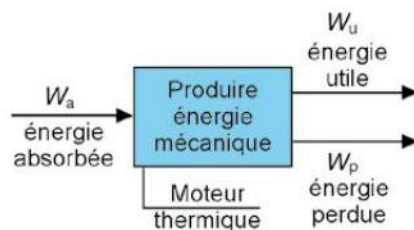


Figure 9.13 Transformation
de l'énergie.

Énergie absorbée =
énergie utile + énergie perdue.

Le rendement d'un moteur thermique est le produit de trois rendements qui sont :

- » Le rendement thermodynamique théorique : rapport entre l'énergie calorifique potentielle contenue dans le carburant et l'énergie thermique que le moteur fournirait s'il fonctionnait exactement selon le cycle théorique. Ce rendement croît avec le rapport volumétrique, ce qui explique que le moteur Diesel ait un rendement supérieur à celui du moteur essence.
- » Le rendement du cycle : rapport entre l'énergie agissant sur le piston et l'énergie théoriquement récupérable.
- » Le rendement mécanique : rapport entre l'énergie mécanique réellement récupérée sur l'arbre moteur et l'énergie agissant sur le piston.

Origines des pertes d'énergie

Nous avons vu que ces pertes se produisent toujours sous forme d'énergie thermique (source chaude) dissipée dans l'atmosphère (source froide) (figure 9.14).

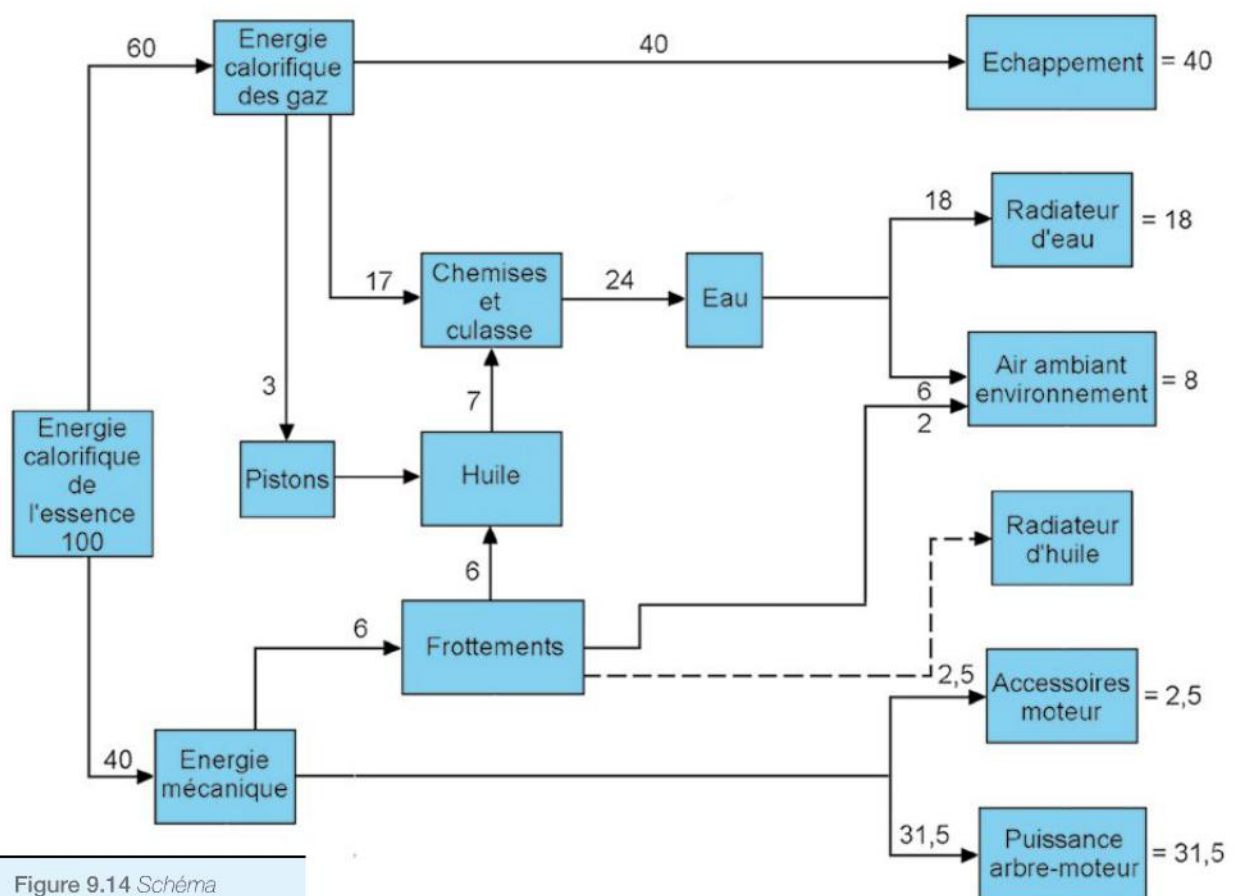


Figure 9.14 Schéma du bilan thermique d'un moteur (exemple) en %.

- » Les échanges thermiques avec l'extérieur (refroidissement, gaz d'échappement) ;
- » Les frottements des pièces mécaniques et l'entraînement des accessoires (pompe à eau, alternateur...).

Possibilités d'augmentation du rendement du moteur

Augmenter le rapport volumétrique : Si cela est possible dans une certaine mesure pour les moteurs Diesel, nous savons que le rapport volumétrique des moteurs à essence est limité par l'indice d'octane du carburant.

Augmenter le remplissage : La dimension des soupapes est limitée par leur masse (inertie) et leur encombrement dans la chambre.

On peut utiliser un compresseur d'air (suralimentation) à condition que l'amélioration apportée ne soit pas compensée par l'énergie absorbée par le compresseur. La contre-pression qui peut se produire au moment de l'évacuation des gaz d'échappement est également une perte d'énergie.

Mieux utiliser la chaleur : La température de fonctionnement d'un moteur est maintenue aux environs de 120 °C en sortie de culasse. Augmenter cette température provoque tous les inconvénients étudiés (cf. chapitre 11 ; Fusion ou serrage des pièces mécaniques, auto-allumage, etc.).

Conclusion

Nous voyons que les moteurs thermiques d'automobile actuels ne permettent plus d'améliorations sensibles de leur rendement.

Leur fiabilité et la grande expérience des constructeurs dans ce type de moteur nous laissent supposer qu'ils seront utilisés encore longtemps, mais nous pouvons penser que d'autres types de machines seront mis en service progressivement (pile à combustible, moteurs électriques, véhicules hybrides, etc.).

Résumé

La suralimentation

La suralimentation permet de faire pénétrer l'air ou le mélange d'admission dans le cylindre à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Le remplissage est amélioré.

À cylindrée égale, les performances du moteur sont supérieures. On utilise en général un turbocompresseur entraîné par la vitesse des gaz d'échappement sous pression à leur sortie du moteur.

- » Le turbocompresseur doit posséder une faible inertie et tourner à très grande vitesse.
- » Le rendement d'un moteur est le rapport entre l'énergie disponible sur l'arbre moteur et l'énergie absorbée sous forme de carburant :

$$\text{Rendement} = \frac{\text{énergie utile restituée}}{\text{énergie absorbée}}$$

Le rendement global du moteur est le produit de trois rendements :

- » rendement thermodynamique théorique,
- » rendement du cycle réel,
- » rendement mécanique.

Le rendement d'un moteur essence est d'environ 30 à 35 %, celui d'un moteur Diesel de 35 à 40 %. Cette différence provient essentiellement de la différence de rapport volumétrique.

Testez vos connaissances



1. Dans un moteur suralimenté (par rapport à un moteur atmosphérique), le rapport volumétrique est :

- a ☐ moins élevé
- b ☐ plus élevé
- c ☐ le même

2. Dans un moteur suralimenté, la pression de fin de compression est :

- a ☐ moins élevée
- b ☐ plus élevée
- c ☐ la même

3. La turbine du turbocompresseur est commandée par :

- a ☐ l'arbre à cames
- b ☐ l'air d'admission
- c ☐ les gaz d'échappement

4. Le rendement d'un moteur correspond au rapport :

- a ☐ énergie fournie/énergie restituée
- b ☐ énergie restituée/énergie fournie
- c ☐ puissance fournie/masse du véhicule

110

Entraînez-vous

1. Effectuez une recherche sur le turbocompresseur équipant le moteur de votre choix. Donnez toutes les caractéristiques du moteur turbo comparées à celles du même type de moteur en version « atmosphérique ».
2. Recherchez le principe de fonctionnement de la pile à combustible.

Partie 3

Les circuits complémentaires

Le circuit de graissage

chapitre 10

10.1 Mise en situation

Le carter inférieur ❶ reçoit la quantité d'huile moteur nécessaire par l'orifice de remplissage ❸.

L'huile est mise sous pression par une pompe à huile ❷ entraînée mécaniquement. L'énergie mécanique nécessaire est prise sur un élément tournant (arbre à cames ou vilebrequin).

Le moteur comporte un réseau de canalisations permettant d'amener l'huile de graissage automatiquement sur tous les points de frottement.

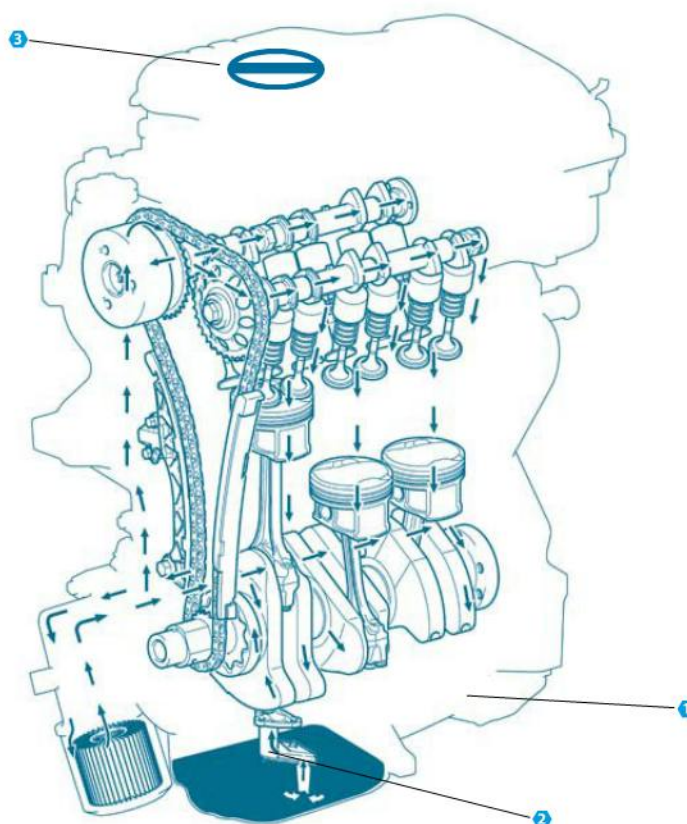


Figure 10.1 Circuit de graissage.

- ❶ Carter inférieur.
- ❷ Pompe à huile.
- ❸ Orifice de remplissage.

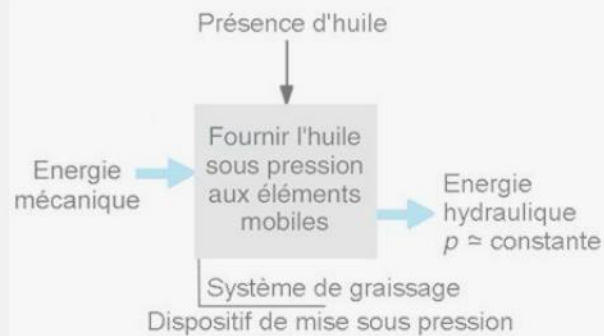
Le système de graissage fournit aux éléments mobiles l'huile sous pression nécessaire pour éviter leur frottement et leur usure (figure 10.2).

La circulation de l'huile permet également l'évacuation des calories en certains points du moteur.

Le système de graissage participe au refroidissement du moteur.

Fonction

Figure 10.2 Fonction globale du dispositif de mise sous pression.



114

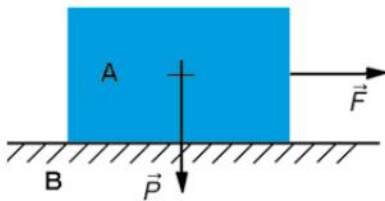


Figure 10.3
Déplacement = frottement.

$$f = \frac{F}{P}$$

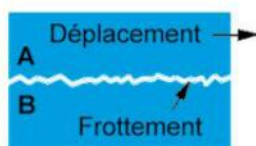


Figure 10.4 Profil grossier des surfaces en contact.

Notion de frottement

Pour faire glisser une pièce (A) en appui sur un support (B), il est nécessaire d'exercer une force (F) parallèle au plan de contact. Elle est destinée à vaincre la résistance au glissement appelée « frottement » (figure 10.3).

Le travail résistant produit par le frottement des pièces est une perte d'énergie qui affecte le rendement des mécanismes.

Un dégagement de chaleur au niveau des surfaces en contact le confirme. Il provoque dilatations et grippages.

Le frottement s'accompagne d'une usure des surfaces (figure 10.4).

Le frottement dépend du coefficient de frottement qui est le rapport entre la force nécessaire au mouvement et le poids de la pièce à déplacer :

$$f = \frac{F}{P}$$

Le frottement n'est pas proportionnel aux dimensions des surfaces ni au poids des pièces. En effet, pour une pièce deux fois plus lourde :

$$f = \frac{2F}{2P} = C^{te}$$

Il est fonction des matériaux constituant les surfaces en contact.

Exemple

Fonte sur fonte : $f = 0,15$.

Acier rectifié sur bronze : $f = 0,05$.

Le coefficient de frottement peut être réduit :

- » Par le choix des matériaux : métaux antifriction.
- » Par l'amélioration de l'état des surfaces : rectification, polissage, chromage.
- » Par le graissage : interposition d'un corps gras qui compense les aspérités microscopiques et sépare les deux pièces (A) et (B) par un film d'huile d'épaisseur variable (figure 10.5).

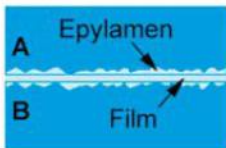


Figure 10.5 – Graissage onctueux.

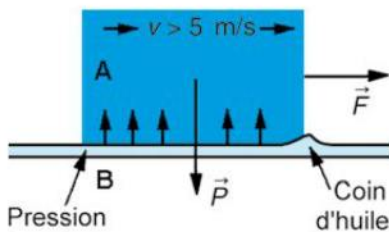


Figure 10.6 Phénomène du coin d'huile.

Si la pression unitaire des pièces en contact est élevée ($p = F/S$) et que la vitesse relative des surfaces est importante ($v > 5 \text{ m/s}$), les deux surfaces se séparent par une montée en pression de l'huile interposée.

Ce phénomène est favorisé par la formation d'un coin d'huile (figure 10.6). Les pièces n'étant plus en contact, le coefficient de frottement peut passer de 0,05 à 0,005 (principe du ski nautique).

Prenons l'exemple d'un tourillon de vilebrequin dans son palier et admettons que l'espace libre soit rempli d'huile.

On s'aperçoit que dès que le tourillon a une vitesse relative par rapport au palier fixe, les pièces se placent dans une position concentrique et ne sont plus en contact.

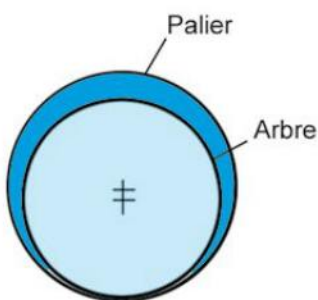


Figure 10.7 Arrêt.

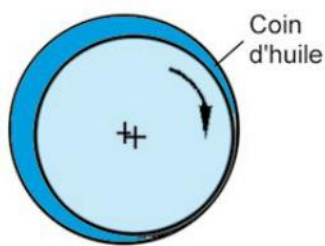


Figure 10.8 Départ.

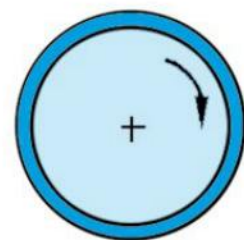


Figure 10.9 Rotation.
Graissage hydrodynamique.

Chaque ensemble à graisser comporte une arrivée d'huile sous pression ❶ et un départ vers d'autres éléments à graisser du circuit ❷ (figure 10.10).

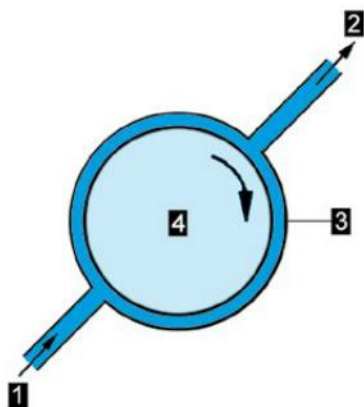


Figure 10.10 Circulation de l'huile dans les paliers.

- 1 Arrivée d'huile sous pression.
- 2 Départ vers les autres éléments à graisser.
- 3 Palier.
- 4 Tourillon.

Les couples manetons/têtes de bielle comportent des jeux permettant des fuites latérales contrôlées.

Cette huile est projetée sous la tête des pistons et sur les parois des cylindres grâce à la force centrifuge acquise par la rotation.

La pompe à huile comporte une crépine d'aspiration permettant de retenir les particules les plus grossières.

Le filtre à huile 4 se compose d'une feuille de fibre poreuse pliée en accordéon. La surface de filtrage est très importante sous un faible volume.

En cas de colmatage, le clapet du by-pass laisse circuler l'huile sans passer par le filtre. Les impuretés sont alors centrifugées dans les canalisations du vilebrequin qui se bouchent et diminuent le débit et la pression d'huile.

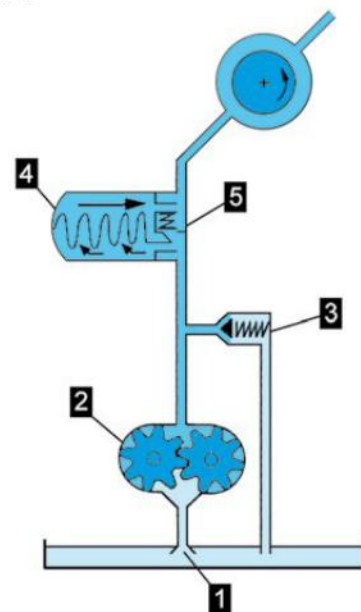


Figure 10.11 Mise sous pression et filtrage

- 1 Crépine.
- 2 Pompe à huile à engrenage.
- 3 Clapet de décharge.
- 4 Filtre à huile.
- 5 By-pass.

10.2 Analyse structurelle

Le carter d'huile

Le carter a pour rôle de contenir l'huile dont le moteur a besoin pour sa lubrification.

Sa capacité est donc variable (en fonction des caractéristiques et du type de moteur), il est donc nécessaire lors d'un échange d'huile de rechercher sa contenance (doc. constructeur, RT, etc.).

La crépine de la pompe à huile et la jauge sont toujours positionnées au point le plus bas du carter (bien surveiller les chocs sous carter qui peuvent obstruer ou endommager la pompe à huile).

Les masses d'équilibrage du vilebrequin trempent dans l'huile du carter, pour qu'une lubrification par barbotage et projection soit assurée lors de la rotation du vilebrequin.



Figure 10.12 Carter d'huile.

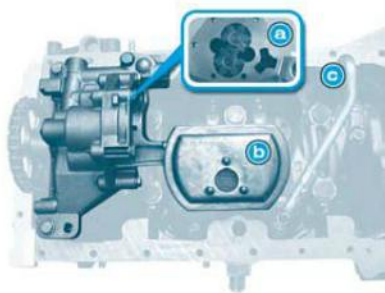


Figure 10.13 Pompe à huile.

- a** : Pompe à engrenages ;
b : Préfiltre d'aspiration ;
c : Guide jauge à huile.

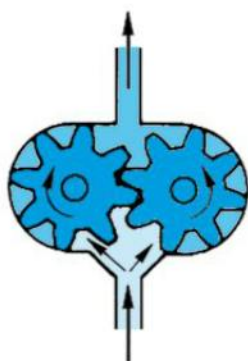


Figure 10.14 Pompe à engrenages.

La pompe à huile

Les pompes sont de types volumétriques aspirantes et refoulantes, elles peuvent être :

- » à engrenages (figure 10.14),
- » à rotor (figure 10.15),

Leur principe de fonctionnement est identique :

- » Aspiration : le volume de la chambre d'aspiration augmente, la pression devient inférieure à la pression qui règne dans le carter inférieur, l'huile est alors aspirée.
- » Refoulement : le volume de la chambre de refoulement diminue, la pression augmente, car $PV = C^{te}$.

Le débit et la pression sont proportionnels à la vitesse de rotation du moteur.

La pression et le débit sont régulés par le clapet de décharge.

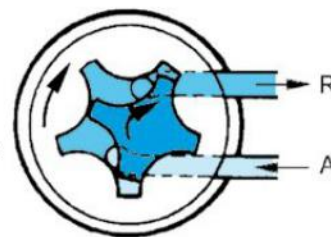


Figure 10.15 Pompe à rotor.

Le filtre à huile

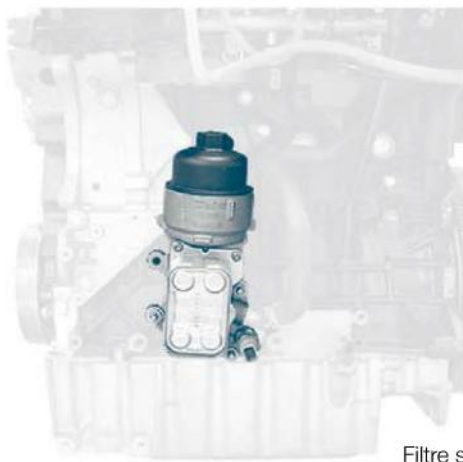
Il a pour rôle d'éliminer les impuretés en suspension dans l'huile qui pourrait altérer les pièces.

Le filtre contenu dans une enveloppe en tôle ou sous forme de cartouche filtrante est en papier ou en toile.

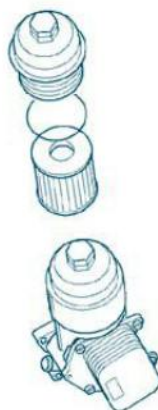
Il est en règle générale monté en série, toute l'huile venant de la pompe passe dans le filtre.

Il est équipé d'un clapet de sécurité (by-pass incorporé au filtre) qui permet le passage de l'huile en cas d'obstruction.

Figure 10.16 Filtre à huile.



Filtre sous forme de cartouche filtrante



Filtre contenu dans une enveloppe en tôle

Le manoccontact de pression d'huile

Le manoccontact de pression d'huile qui est implanté sur le moteur permet d'indiquer au conducteur un problème sur la pression d'huile.

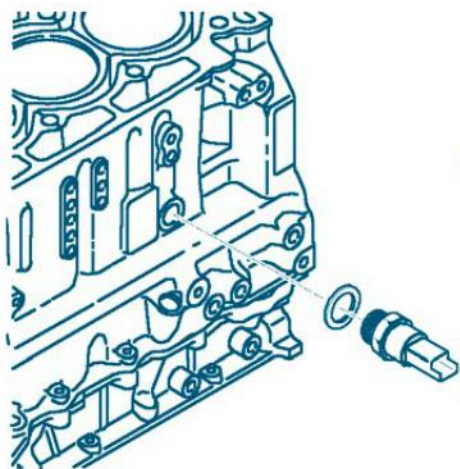


Figure 10.17 Manoccontact de pression d'huile.

Capteur de température/niveau

Ce capteur est fixé dans le carter-cylindre, il a deux fonctions :

- » jauge électrique :
information utilisée par le combiné pour informer le conducteur du niveau d'huile moteur.
- » température d'huile moteur :
information utilisée par l'unité de commande pour déterminer la température de l'huile moteur.

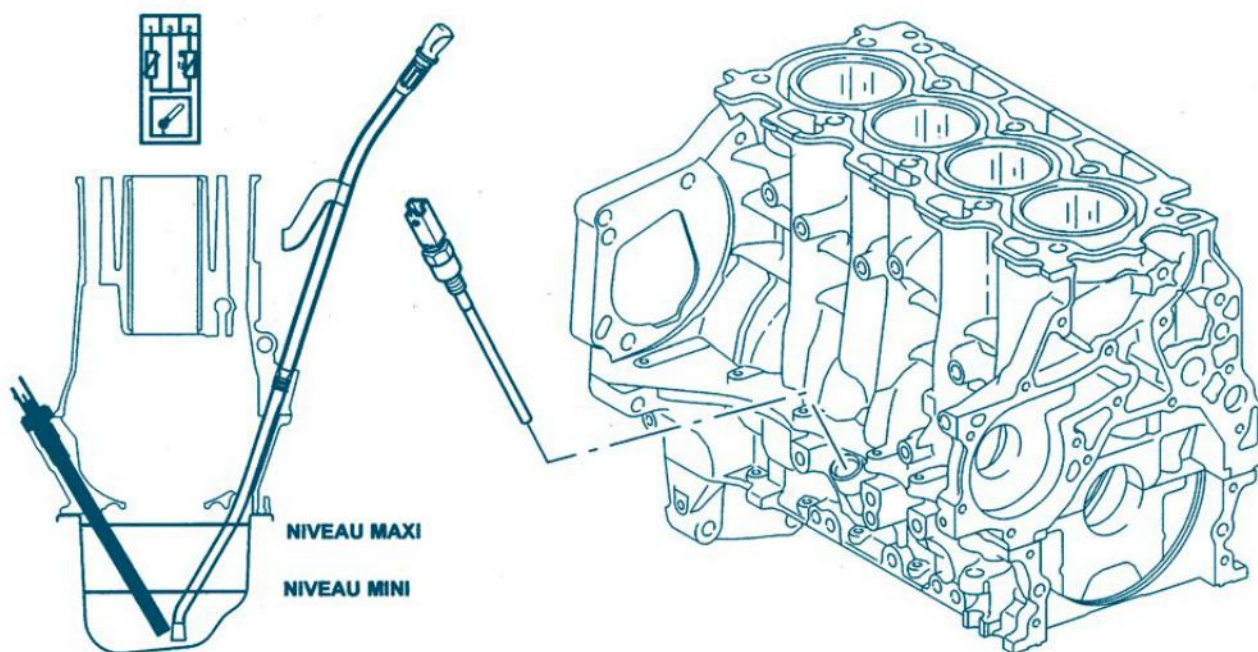


Figure 10.18 Capteur de température.

Le graissage onctueux

Une couche de lubrifiant est interposée entre les surfaces. L'épilamen vient combler les irrégularités du métal et permet un frottement gras, diminuant sensiblement le frottement.

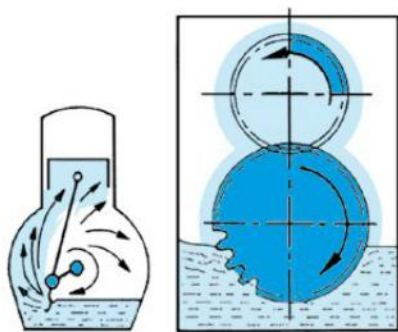


Figure 10.19 Graissage par barbotage.

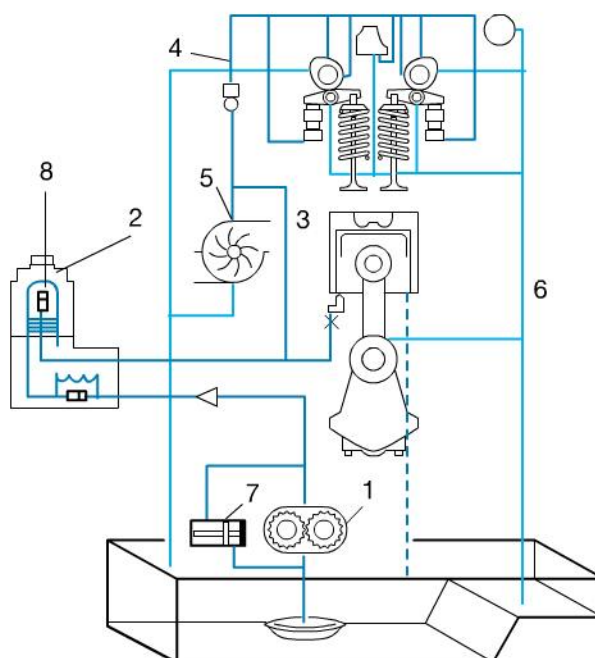
Dans ce cas, le renouvellement de l'huile est assuré par barbotage (figure 10.19) et/ou projection. La pénétration de l'huile jusqu'aux paliers est facilitée par des rainures hélicoïdales pratiquées sur les flasques des éléments. Elle est contrariée par la force centrifuge qui agit en sens inverse.

Ce système de graissage convient pour certains éléments du moteur ainsi qu'aux organes de transmission.

10.3 Analyse fonctionnelle

Figure 10.20 Analyse fonctionnelle.

- ❶ La pompe à huile ;
- ❷ Le filtre à huile ;
- ❸ Circuits de lubrification du carter-cylindre ;
- ❹ Circuits de lubrification de la culasse ;
- ❺ Circuit de lubrification du turbo ;
- ❻ Circuits de retour d'huile ;
- ❼ Dispositif de régulation de la pression d'huile ;
- ❽ by-pass (incorporé au filtre).



La pompe à huile ❶ aspire l'huile du carter et la refoule dans le circuit avec une pression qui est fonction de l'ensemble des débits contrôlés réalisés grâce aux jeux de fonctionnement. La pression est régulée quelle que soit la vitesse de rotation du moteur par le clapet de décharge ❼.

L'huile est filtrée, le by-pass ❽ ayant pour rôle de permettre la circulation d'huile malgré le colmatage du filtre ❷.

Une canalisation principale appelée « rampe d'huile » (❸ et ❹) permet la distribution de l'huile sous pression aux éléments à lubrifier.

Les éléments sont graissés de façon différente selon la force pressante qui maintient les pièces en frottement :

- » Graissage hydrodynamique (sous pression) :
 - vilebrequin : manetons et tourillons dans bielles et paliers,
 - arbre à cames : tourillons dans paliers,
 - poussoirs hydrauliques.
- » Graissage onctueux (par projection) : cames de l'arbre à cames, poussoirs (autres qu'hydrauliques), queues de soupapes, axes de pistons, cylindres.

Fonction

Figure 10.21 Analyse descendante du dispositif de mise sous pression.

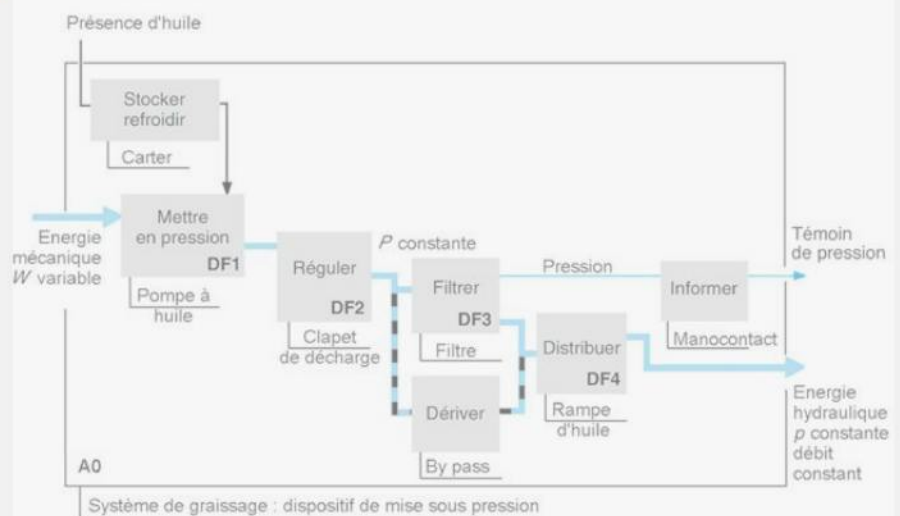
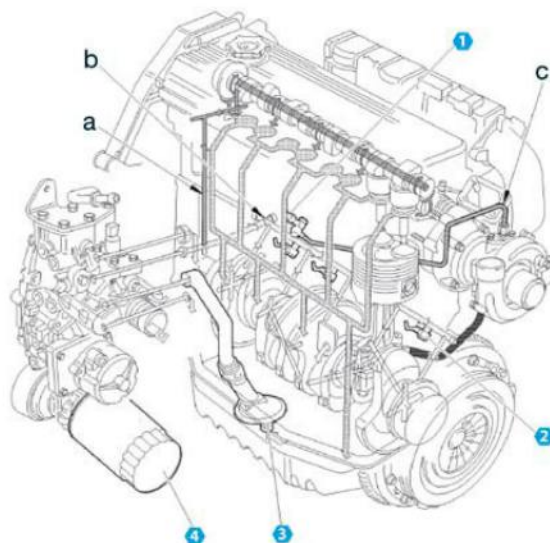


Figure 10.22 Circuit de graissage du moteur.

- ① Manocontact de pression d'huile.
- ② gicleur de fond de piston.
- ③ crépine d'aspiration d'huile.
- ④ cartouche de filtre à huile.
- (a) : canal de lubrification des paliers d'arbre à cames.
- (b) : canaux de lubrification du vilebrequin.
- (c) : canal de lubrification du turbocompresseur.



Le rôle du lubrifiant

- » Réduire les frottements, par conséquent économiser l'énergie.
- » Combattre l'usure.
- » Protéger.
- » Participer au refroidissement.
- » Contribuer à l'étanchéité.
- » Garder propres les surfaces et les circuits.
- » Absorber les chocs et réduire le bruit.
- » Permettre la mise en route de l'organe à lubrifier à toutes températures.
- » Transmettre l'énergie dans les systèmes hydrauliques.

Il doit assurer également des fonctions passives : moussage, aération, neutralité vis-à-vis des élastomères, des plastiques et des peintures.

Un lubrifiant se compose d'une base de pétrole et de plusieurs additifs.

Les huiles de base utilisées dans la fabrication de lubrifiants viennent de deux origines essentielles :

- » minérale (issue du pétrole) ;
- » synthétique (issue de la pétrochimie).

Le mélange de ces deux bases dans le lubrifiant fini donne un produit appelé semi-synthèse ou synthèse.

Les pétroliers divisent les gammes de lubrifiants en 5 catégories :

- » huiles à bases minérales : ces huiles sont d'origine naturelle ;
- » huiles synthétiques : ces huiles sont obtenues par réaction chimique (condensation ou estérification) ;
- » huiles semi-synthétiques : ces huiles sont des mélanges de bases minérales et de bases synthétiques ou hydrotraitées (huile minérale purifiée par traitement hydrogène) ;
- » huiles économie d'énergie : ces huiles peuvent être formulées avec toutes les huiles de base citées ci-dessus. Les niveaux de performances peuvent être variables car ces huiles peuvent être de niveaux différents (bas de gamme/haut de gamme) ;
- » huiles « Low SAPS » : nouveau type de lubrifiant mis au point en 2004.

Les huiles Low SAPS (ACEA C) sont des huiles répondant aux nouvelles normes européennes en matière de protection de l'environnement. Low signifie « bas » en anglais ; SA : Sulfated Ash (cendres sulfatées) ; P : Phosphorus (Phosphore) ; S : Sulphur

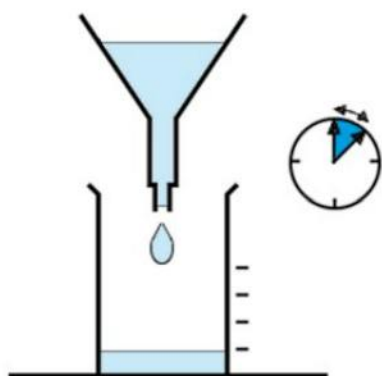


Figure 10.23 Viscosité élevée.

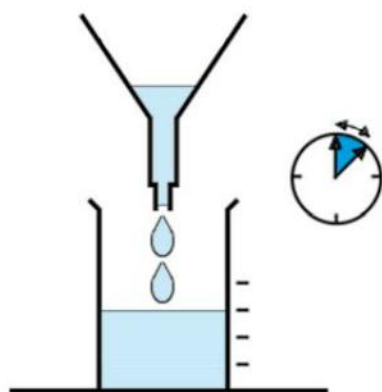


Figure 10.24 Faible viscosité.

Viscosité : quantité écoulee par un orifice calibré dans un temps donné à température constante.

(Soufre). Ce type d'huile était une réponse à la norme Euro 4 et devient incontournable pour répondre à la norme EURO 5.

La faible teneur en cendres sulfatées, phosphore et soufre des huiles Low SAPS a pour effet de réduire :

- » l'encrassement des systèmes de post-traitements comme les filtres à particules pour les moteurs diesel ;
- » la perte d'efficacité des catalyseurs pour les moteurs à essence.

Les caractéristiques des huiles

- » Viscosité : C'est la difficulté d'écoulement dans un tube, à température donnée. Elle se mesure en degrés Engler, et selon la norme SAE elle se traduit en indice de viscosité (figures 10.23 et 10.24).
- » Fluidité : C'est l'inverse de la viscosité, elle se mesure en degrés Barbey.
- » Stabilité : L'huile doit résister à la décomposition et à l'altération.
- » Onctuosité : C'est la qualité d'adhérence de l'huile aux surfaces à lubrifier.

La viscosité des huiles monogrades diminue avec l'augmentation de température. Aussi utilise-t-on pour les moteurs d'automobile des huiles multigrades.

Leur composition les rend également détergentes, ce qui leur permet de conserver les impuretés (particules de carbone) en suspension jusqu'à ce qu'elles se trouvent retenues par le filtre à huile.

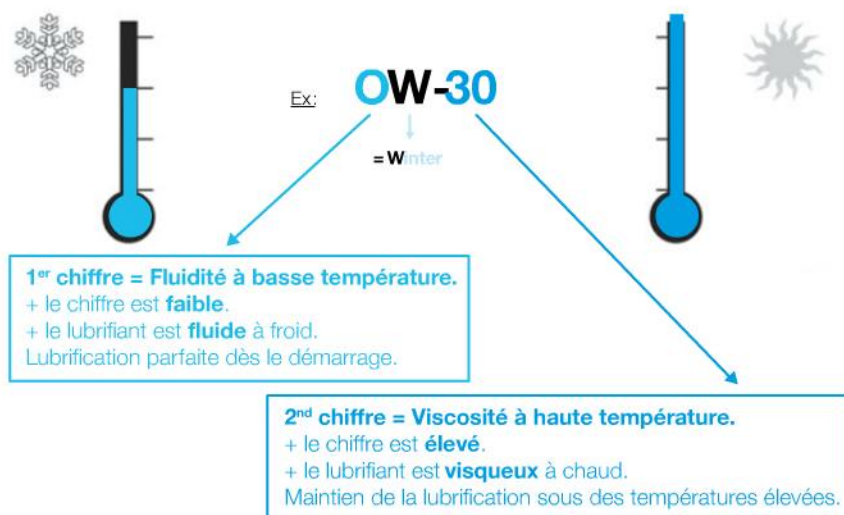


Figure 10.25 Exemple d'huile multigrade

Remarque

Certaines huiles contiennent des additifs antifriction, antisouffre, etc.

Les normes de qualité des huiles

Il existe deux types de normes. La norme API (*American Petroleum Institute*) est établie par des organismes internationaux (les essais sont effectués sur des moteurs américains).

Les conditions d'utilisation des véhicules européens n'étant pas les mêmes que celles des véhicules américains, les constructeurs européens ont décidé de créer leurs propres normes ACEA (Association des constructeurs européen d'automobiles).

La norme ACEA en matière de lubrifiant correspond à une lettre et un chiffre. Les lettres A et B indiquent le type de moteur concerné, C indique une huile à bas taux de cendres.

- » A : essence ;
- » B : Diesel ;
- » C : Low SAPS essence et Diesel.

Les chiffres 1, 2, 3, 4, 5 indiquent la performance et/ou le caractère Fuel Eco (économie de carburant).

Le chiffre précédé de la lettre A ou B correspond au type d'huile suivant :

- » A/B 1 : huiles « économies de carburant » ;
- » A/B 2 : huiles minérales (performances de base) ;
- » A/B 3 : huiles hautes performances ;
- » A/B 4 : huiles spécifiques à certains moteurs diesel injection directe ;
- » A/B 5 : huiles très hautes performances qui permettent une baisse de la consommation de carburant.

	Technologie			
	Non Low SAPS		Low SAPS	
	Non fuel éco	Fuel éco	Non fuel éco	Fuel éco
Très hautes performances Injection directe Diesel	A3/B4	A5/B5	C3 C4	C1 C2
Hautes performances	A3/B3	A1/B1		

Rappel : les huiles à bas taux de cendres permettent l'augmentation de la durée de vie du filtre à particules.

Le taux de cendre passe de 1,6 % sur les huiles actuelles à 0,8 % sur les huiles low SAPS (valeurs maximales admises).

- » C3 : taux modéré de cendres ;
- » C2 : taux modéré de cendres et économie de carburant ;
- » C1 : très bas taux de cendres et économie de carburant ;
- » C4 : très bas taux de cendres.

Exemple

Exemples de ce qu'on peut trouver sur un bidon d'huile :

Moteur essence		Moteur Diesel	
API SJ	ACEA A3	API CG4	ACEA B3
API SH	ACEA A2	API CF4	ACEA B2
API SG	ACEA A1	API CD/CF/CE	ACEA B1

Plus le chiffre A ou B est élevé, plus l'huile est performante.

Résumé

Inconvénients des frottements

- » Le frottement produit un travail résistant et une dissipation de chaleur provoquant des pertes d'énergie.
- » Il provoque l'usure et le grippage des pièces.

Le coefficient de frottement est un nombre sans unité $f = \frac{F}{P}$ qui est fonction des matériaux mis en contact.

Rôle du graissage

- » Le graissage diminue le coefficient de frottement.
- » Un graissage onctueux permet un frottement gras, le renouvellement de l'huile est assuré par barbotage ou simple écoulement.
- » Le graissage hydrodynamique sépare les pièces grâce à la formation du coin d'huile.

Réalisation du graissage des moteurs

- » La circulation de l'huile est assurée par une pompe et des canalisations. La pression est régulée.
- » Les éléments du moteur graissés sous pression sont : le vilebrequin, l'arbre à cames, la rampe de culbuteur.
- » Les éléments lubrifiés par écoulement ou projection sont : les pistons, la partie inférieure des cylindres, les cames, la chaîne de distribution, etc.
- » La purification de l'huile est assurée par un filtre.

Types de pompes

Les pompes peuvent être : à engrenages, à rotor.

Qualités demandées aux huiles de graissage

- » Les qualités des huiles de graissage sont : la viscosité, la fluidité, la stabilité, l'onctuosité.
- » Elles peuvent être monogrades ou multigrades.

L'origine des huiles est : minérale, végétale ou synthétique.

Testez vos connaissances



1. Dans un moteur d'automobile, le vilebrequin est graissé par :

- a ☐ *barbotage*
- b ☐ *aspersion*
- c ☐ *pression*

2. Quel est l'élément qui permet de maintenir une pression d'huile sensiblement constante dans le circuit ?

- a ☐ *le clapet de décharge*
- b ☐ *le manomètre*
- c ☐ *le filtre à huile*

3. Quel est l'élément qui permet au conducteur de contrôler la pression d'huile ?

- a ☐ *le clapet de décharge*
- b ☐ *le manomètre*
- c ☐ *la jauge d'huile*

4. Couler une bielle, c'est :

- a ☐ *la fusion du coussinet*
- b ☐ *le flambage de la bielle*
- c ☐ *perdre une bielle*

5. Les queues de soupapes sont graissées :

- a ☐ *sous pression*
- b ☐ *par aspersion*
- c ☐ *par barbotage*

6. Les paliers de l'arbre à cames sont graissés :

- a ☐ *sous pression*
- b ☐ *par aspersion*
- c ☐ *par barbotage*

Entraînez-vous

1. Que se produit-il lorsque la pompe à huile est utilisée ?
2. Recherchez les caractéristiques des huiles préconisées pour trois types de moteurs différents et trois types de boîtes de vitesses différentes.
3. Nommez les éléments du moteur graissés sous pression et ceux graissés par aspiration.

Le circuit de refroidissement

chapitre 11

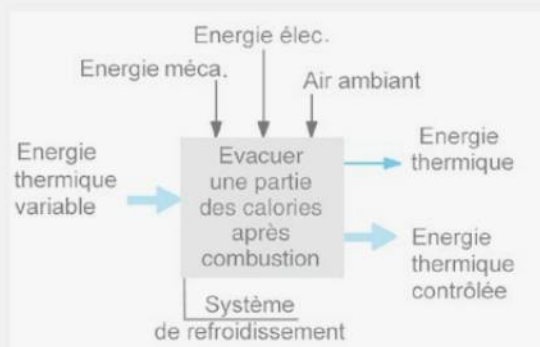
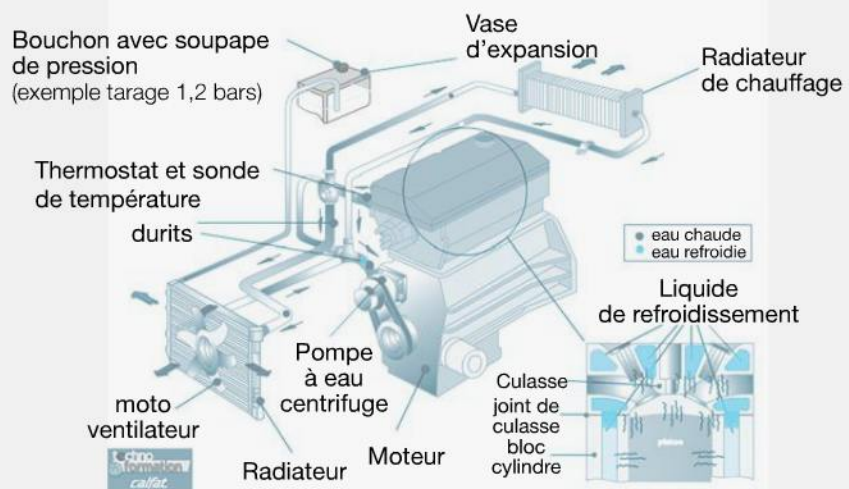
11.1 Mise en situation

Le moteur thermique produit de la chaleur (énergie thermique). Nous verrons que pour le bon fonctionnement du moteur, il est nécessaire d'évacuer une partie de ces calories et de maintenir une température constante. Le bloc-moteur et la culasse sont donc aménagés pour permettre la circulation d'un fluide réfrigérant qui sort du moteur par la durite supérieure, passe dans un radiateur soumis à l'air ambiant et retourne au moteur par la durite inférieure (figure 11.1).

127

Fonction

Figure 11.1 Circuit de refroidissement.



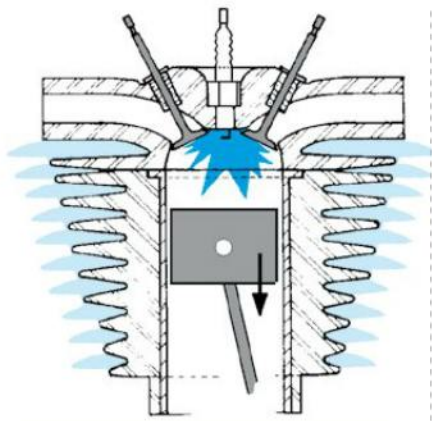


Figure 11.2 Refroidissement par air.

La chaleur dégagée par le moteur provient essentiellement de la combustion des gaz au temps d'explosion. La température au moment de l'inflammation atteint 2 000 °C. Au temps d'échappement, les gaz qui passent autour de la soupape et parcourent la tubulure sont encore à une température d'environ 800 °C. On peut y ajouter, à une plus faible proportion, les divers frottements.

En l'absence d'un système de refroidissement efficace, nous constatons :

- » une dilatation des pièces provoquant une diminution des jeux, une difficulté de lubrification et un serrage ;
- » une diminution du taux de remplissage par dilatation des gaz avant leur entrée dans la chambre ;
- » l'inflammation spontanée du mélange air-essence (température d'auto-inflammation 400 °C) ;
- » la formation de points chauds provoquant l'auto-allumage ;
- » une modification des propriétés de métaux (fluage, détrempe, fusion) ;
- » la décomposition et la carbonisation des lubrifiants.

Nous étudierons uniquement le refroidissement par liquide de refroidissement, car le refroidissement par air n'est plus utilisé en automobile.

Il est important de maintenir dans le moteur une température de fonctionnement régulière autant que possible afin de ne pas affecter son rendement thermique. Elle favorise également la vaporisation de l'essence et permet une combustion correcte. Une température de fonctionnement trop basse provoque :

- » une combustion trop lente et incomplète (perte de puissance et pollution) ;
- » une condensation des vapeurs d'essence ;
- » l'essence liquide se trouvant sur les parois des cylindres dissout le film d'huile protecteur.

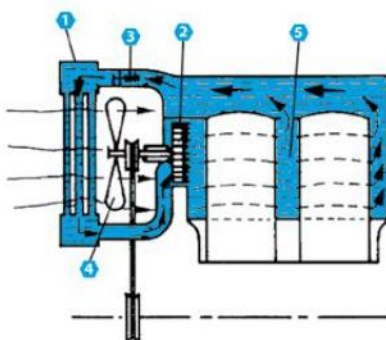


Figure 11.3 Moteur refroidi par eau.

- ❶ Radiateur.
- ❷ Pompe à eau.
- ❸ Thermostat.
- ❹ Ventilateur.
- ❺ Chambre d'eau.

11.2 Analyse structurelle

Le radiateur

Le liquide chaud est dirigé vers la partie supérieure du radiateur et revient dans la partie inférieure au fur et à mesure de son refroidissement dans le radiateur. Le radiateur qui est conçu de manière à offrir une grande surface de contact du liquide avec l'air évacue la chaleur « récupérée » au contact des cylindres.

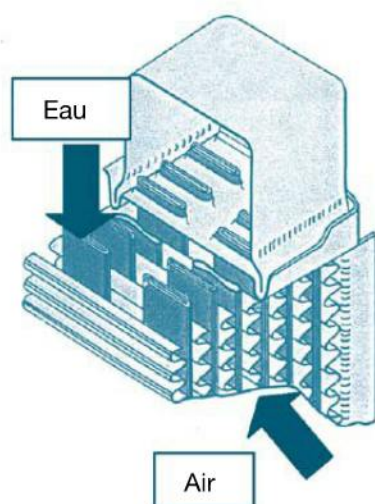
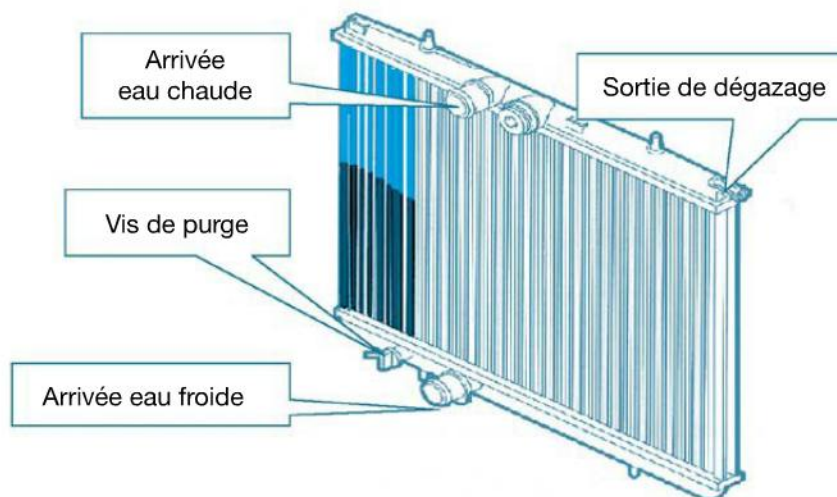


Figure 11.4 Radiateur.



Le circuit d'eau

L'eau, qui se trouve dans les chambres d'eau de la culasse et autour des cylindres, doit être refroidie après avoir absorbé la chaleur dégagée par le moteur. L'eau se déplace dans le moteur du bas vers le haut par différence de masse volumique (figure 11.5). Ce phénomène s'appelle le « thermosiphon » et existe dans toute circulation de fluide naturelle.

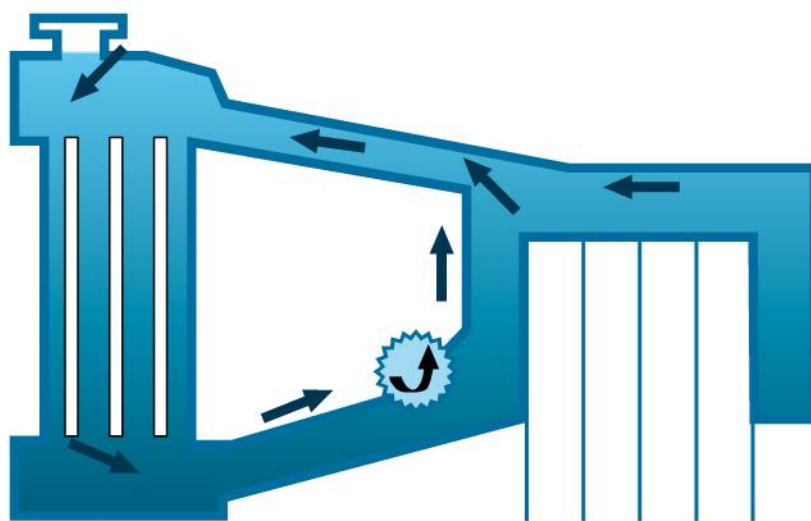


Figure 11.5 Le circuit d'eau.

Ce système présente un problème : la vitesse d'écoulement d'eau est trop faible (15 cm/s). On ajoute à ce système une pompe à eau.

La pompe à eau

La pompe à eau permet le brassage de l'eau et en augmente la vitesse. Il s'agit le plus souvent d'une pompe centrifuge entraînée par courroie. Elle comporte un carter circulaire à l'intérieur duquel tourne une roue à ailettes. Sous l'effet de la force centrifuge, l'eau

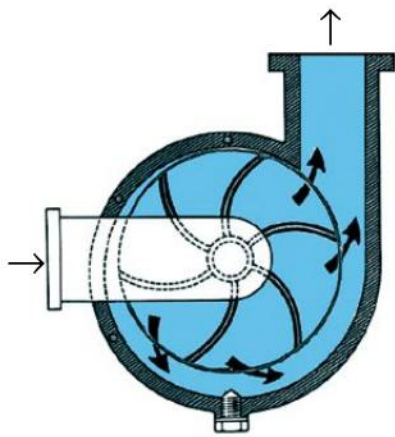


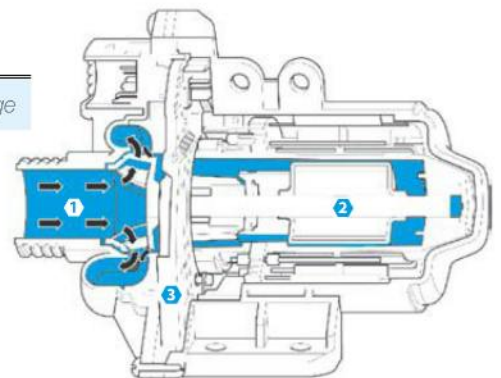
Figure 11.6 Pompe à eau.

est chassée à la périphérie de la roue, créant ainsi une dépression à l'entrée de la pompe. L'axe de la roue est excentré pour faciliter l'évacuation de l'eau vers la sortie de la pompe. Cette disposition pourra permettre de plus une légère circulation d'eau par thermosiphon après l'arrêt du moteur ou en cas de panne.

Certains constructeurs montent une pompe à eau centrifuge électrique sur leurs moteurs (figure 11.7). Le régime de la pompe est ainsi rendu indépendant de celui du moteur et le débit peut donc être régulé en fonction des besoins réels de refroidissement. De plus, la pompe peut continuer à tourner si nécessaire après l'arrêt moteur chaud pour éviter une éventuelle surchauffe de la culasse. La puissance consommée par la pompe n'est que de 0,2 kW alors qu'avec un entraînement conventionnel par le vilebrequin, ce chiffre peut atteindre 2 kW.

Figure 11.7 Pompe à eau centrifuge

- ❶ Pompe.
- ❷ Moteur.
- ❸ Module électronique.



La puissance du moteur électrique immergé est commandée par le module électronique (❸) intégré à la pompe. Le module électronique est relié au boîtier électronique de gestion moteur.

Le boîtier électronique de gestion moteur détermine la puissance de refroidissement nécessaire à partir de la charge du moteur, du type d'utilisation et des données des sondes de température. Sur la base de ces données, le boîtier électronique de gestion moteur donne la consigne appropriée à la pompe à liquide de refroidissement électrique. La pompe à liquide de refroidissement détermine elle-même sa vitesse de rotation à partir de cette consigne. Le moteur de la pompe à liquide de refroidissement est traversé par le liquide de refroidissement du système. Cela permet de le refroidir ainsi que de refroidir le module électronique. Les paliers de la pompe à liquide de refroidissement électrique sont lubrifiés par le liquide de refroidissement.

Le vase d'expansion et son système de pressurisation

Le niveau reste constant grâce à l'utilisation d'un vase d'expansion muni d'une soupape à double effet (figure 11.8).

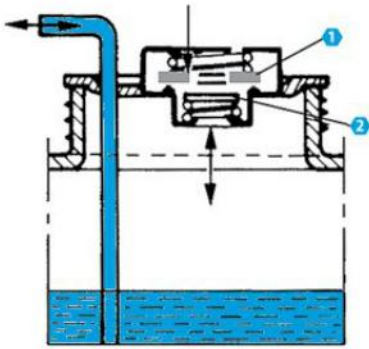


Figure 11.8 Soupape à double effet.

- 1 Soupape de pression.
- 2 Soupape de dépression

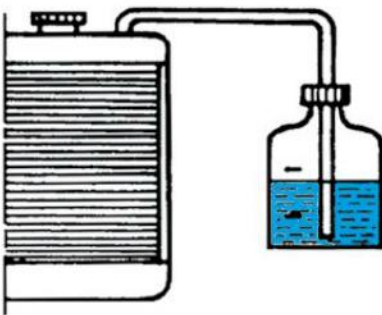


Figure 11.9 Circuit fermé avec vase d'expansion.

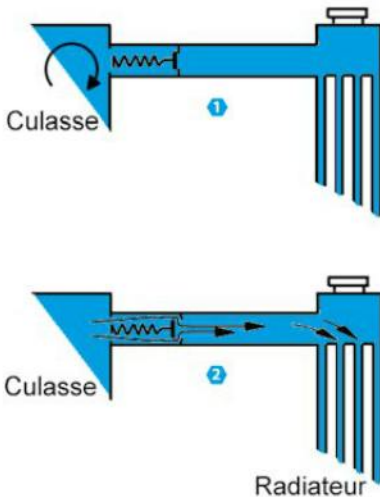


Figure 11.11 Fonctionnement du thermostat.

Exemple :

- 1 Moteur froid ou $t < 80\text{ °C}$: thermostat fermé.
- 2 $t > 80\text{ °C}$: thermostat ouvert.

Lors de la montée en température, le liquide se dilate, le trop-plein passe dans le vase (figure 11.9). Lorsque la pression de fonctionnement est atteinte, la soupape de pression quitte son siège.

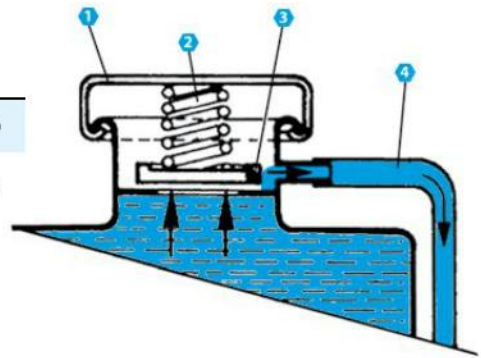
Lors du refroidissement, la soupape de pression est fermée, le liquide se rétracte et crée un vide dans le circuit. Lorsque la pression devient inférieure à la pression atmosphérique, la soupape de dépression s'ouvre.

Le liquide repart vers le radiateur par différence de pression.

Il est possible d'augmenter sensiblement la température de fonctionnement du moteur sans atteindre l'ébullition en maintenant le circuit sous une légère pression (figure 11.10). On améliore ainsi la combustion et le rendement du moteur. Ce résultat est obtenu par la mise en place d'une soupape de pression (3). La pression sera réglée par le tarage de son ressort (2).

Figure 11.10 Circuit sous pression

- 1 Bouchon de remplissage du radiateur.
- 2 Ressort taré.
- 3 Soupape.
- 4 Tube de trop-plein.

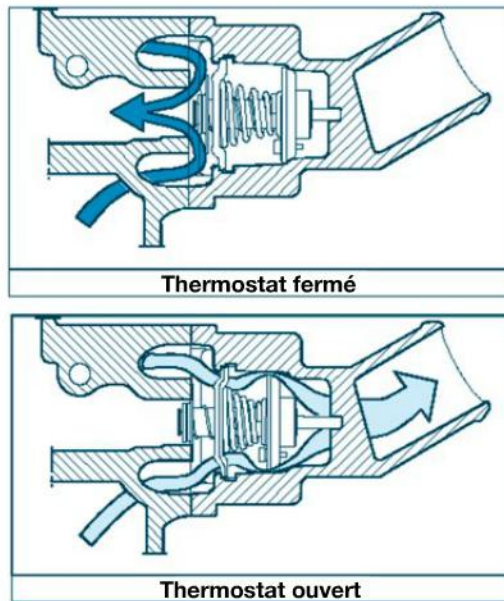


Le thermostat

Le fonctionnement à froid du moteur présente, comme nous l'avons vu, plusieurs inconvénients. On utilise un thermostat qui agit en interdisant la circulation du liquide de refroidissement tant que le moteur n'a pas atteint sa température de fonctionnement.

Il s'agit d'une soupape incorporée dans le circuit dont l'ouverture est conditionnée par la température du liquide (figure 11.12). À froid, la soupape est fermée, le liquide, qui ne peut circuler vers le radiateur, va s'échauffer rapidement. La température de fonctionnement est atteinte. Le liquide chaud produit par exemple la dilatation du soufflet métallique. Le thermostat s'ouvre à la température pour laquelle il a été conçu.

Figure 11.12 Thermostat.



Quand le thermostat est en position fermée, le liquide de refroidissement ne traverse pas le radiateur.

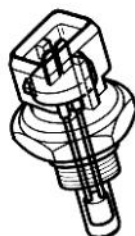
Quand le thermostat est en position ouverte, le liquide de refroidissement traverse le radiateur avant de retourner vers la culasse.

La sonde de température et l'indicateur de niveau

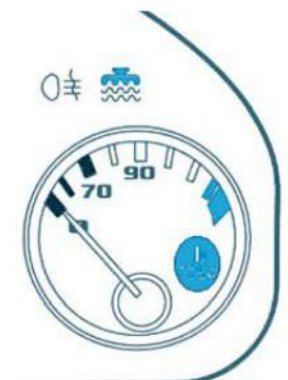
Il y a sur le circuit de refroidissement :

- » une sonde de température de liquide de refroidissement qui informe les systèmes embarqués et le conducteur sur la valeur de température du liquide ;
- » une jauge de niveau de liquide placée sur le vase d'expansion ou sur le radiateur ;
- » une deuxième sonde de température maxi placée sur le boîtier d'eau qui allume un voyant d'alerte en cas de défaillance (montée en température).

Figure 11.13 Sonde de température



STOP



Le ventilateur

Il doit assurer le passage de l'air à travers le radiateur pour refroidir l'eau. Pour maintenir le moteur à température constante, la ventilation doit être permanente. Il s'agit d'un ventilateur électrique tournant à grande vitesse. Il est placé sur le radiateur, les pales du ventilateur étant très près des faisceaux. Sa vitesse de rotation est indépendante de celle du moteur. Il peut se trouver éloigné du moteur (moteur transversal). La commande est effectuée par un thermocontact électrique placé sur le radiateur qui permet la fermeture ou non du circuit d'alimentation électrique du motoventilateur.

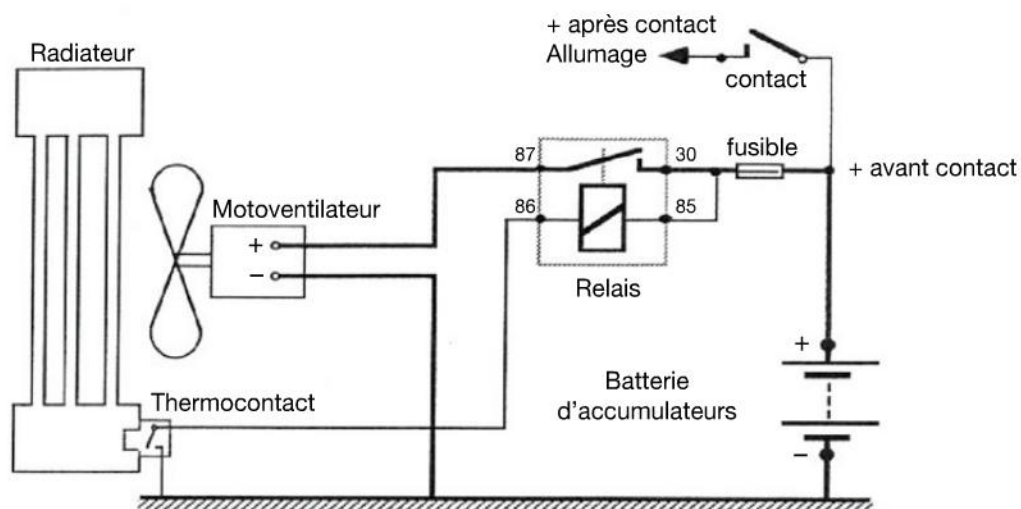


Figure 11.14 Circuit électrique du motoventilateur

En cas de service dur (véhicule de charge, traction d'une caravane) ou sur les véhicules équipés de la climatisation, il est possible d'utiliser un radiateur offrant une plus grande surface à l'air ou de placer un second motoventilateur ou un ventilateur à deux vitesses.

Remarque

La forme du radiateur doit être compatible avec l'aérodynamisme du véhicule.

11.3 Analyse fonctionnelle

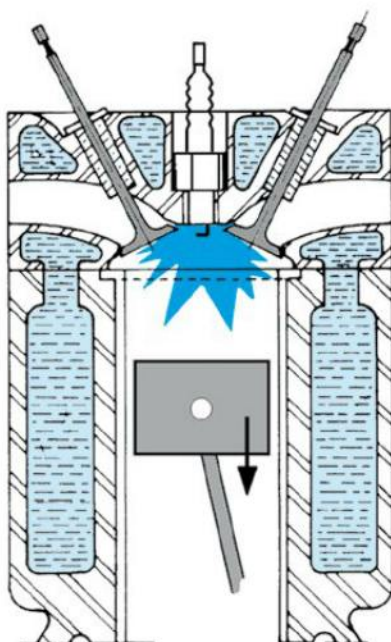


Figure 11.15 Refroidissement par eau.

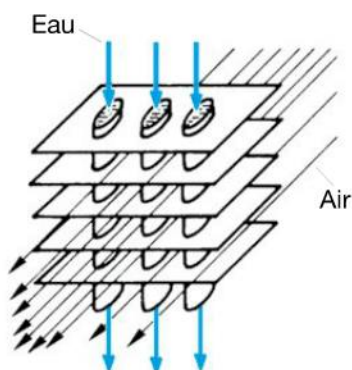


Figure 11.16 Faisceau de radiateur.

Les éléments constituant les parois de la chambre de combustion doivent être réalisés dans des métaux possédant une bonne conductibilité thermique et une chaleur massique élevée. Les parois doivent être minces et offrir une grande surface de contact avec le fluide réfrigérant. Le fluide doit circuler à une vitesse proportionnelle au dégagement des calories.

Remarque

Le rendement médiocre des machines thermiques s'explique par la perte considérable d'énergie provoquée par l'évacuation de ces calories.

Dans le système de refroidissement par eau (figure 11.15), l'eau sert d'agent de transmission des calories entre la chambre de combustion et l'air.

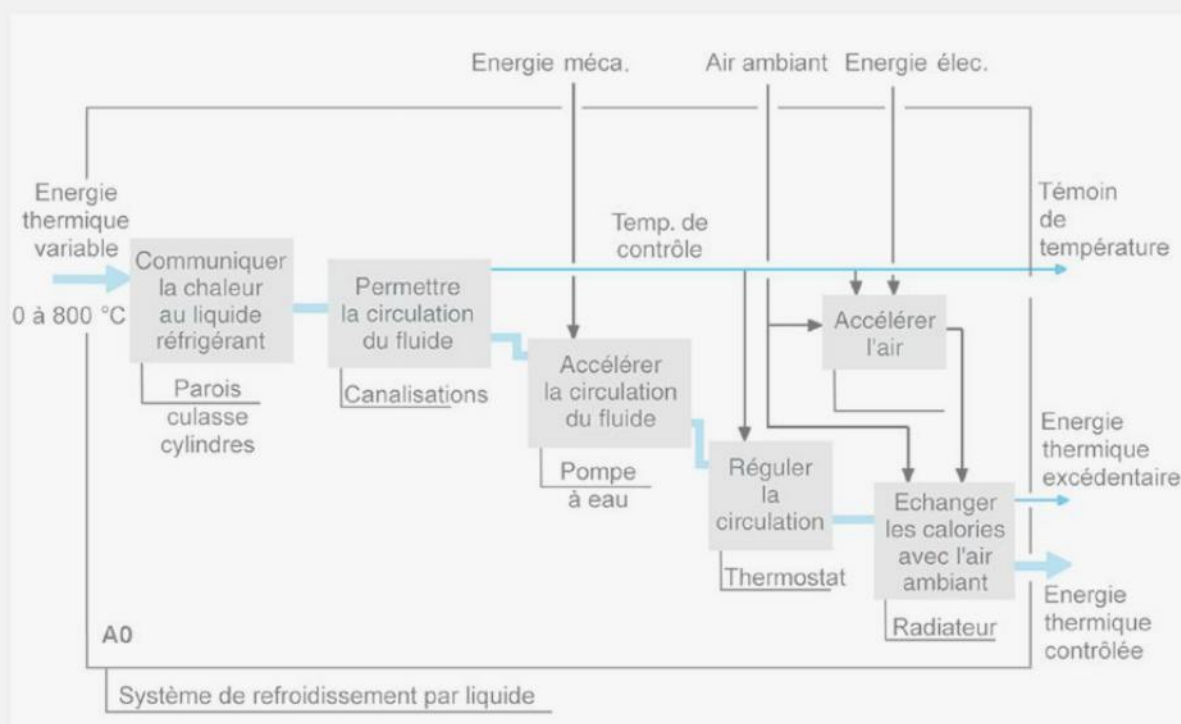
La culasse et les cylindres comportent des chambres d'eau. La circulation de l'eau est assurée vers le radiateur où se produit l'échange avec l'air (figure 11.16).

La variation de température peut avoir une influence sur plusieurs paramètres, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

	Matériaux	Remplissage	Huile
Si la température augmente.	Modification des caractéristiques (fluage, détrempeage...). Dilatation, jeux réduits.	Le remplissage diminue (dilatation des gaz). Auto-inflammation.	La viscosité diminue. Le pouvoir lubrifiant baisse, décomposition, carbonisation.
Si la température diminue.	Les jeux augmentent.	Le remplissage augmente. La qualité du mélange diminue.	La viscosité augmente. La résistance au mouvement augmente. Plus d'énergie perdue.

Fonction

Figure 11.17 Analyse descendante du système de refroidissement par liquide. Niveau A0.



135

L'évaporation de l'eau forme un dépôt calcaire qui obstrue les fines canalisations du radiateur. On utilise de préférence un liquide spécial de refroidissement composé d'eau déminéralisée et d'antigel toutes saisons pour :

- » Pouvoir transférer une grande quantité de chaleur du moteur vers le radiateur ;
- » Avoir une température de congélation très basse – 15 à – 35 °C ;
- » Avoir une température d'ébullition élevée 110 °C ;
- » Protéger les différents matériaux contre les risques d'oxydation ;
- » Ne pas altérer les composants non métalliques comme les durites ou joints.

Résumé

Origine de la chaleur

La chaleur dégagée par le moteur provient principalement de la combustion des gaz au temps d'explosion.

On peut y ajouter les divers frottements mécaniques.

Inconvénients d'une chaleur exagérée

Une trop forte chaleur produit :

- » des dilatations,
- » une diminution du taux de remplissage,
- » l'auto-inflammation du mélange,
- » une modification des propriétés des métaux,
- » une décomposition des lubrifiants.

Réalisation du refroidissement

Le refroidissement s'effectue par contact des métaux constituant la chambre de combustion avec un fluide réfrigérant.

Ces métaux doivent posséder une bonne conductibilité thermique.

Les parois doivent être minces et offrir une grande surface de contact avec le fluide. Celui-ci doit circuler à une vitesse proportionnelle au dégagement des calories.

Refroidissement par eau

Un liquide de refroidissement circule dans la culasse et autour des cylindres. Il est accéléré par une pompe à eau et refroidi dans un radiateur. L'air traversant le radiateur est activé par un ventilateur.

Un thermostat facilite la montée en température du moteur.

Le point d'ébullition est reculé grâce à une mise sous pression.

Le niveau est maintenu constant grâce à un vase d'expansion muni d'une soupape à double effet.

Le ventilateur est commandé par un thermocontact électrique : motoventilateur.

Testez vos connaissances



1. Citez deux matières bonnes conductrices de la chaleur utilisées pour faciliter le refroidissement des moteurs (2 réponses) :

- a ☐ l'acier
- b ☐ le cuivre
- c ☐ la fonte
- d ☐ l'aluminium
- e ☐ le plomb

2. La conductibilité thermique est la faculté pour une matière à :

- a ☐ retenir la chaleur
- b ☐ se laisser traverser par la chaleur
- c ☐ produire de la chaleur

3. Quel élément facilite la montée en température du moteur ?

- a ☐ le thermocontact
- b ☐ le thermostat
- c ☐ la sonde de température

4. Quel est l'élément qui commande la mise en route du (ou des) motoventilateur(s) ?

- a ☐ le thermocontact
- b ☐ le thermostat
- c ☐ la sonde de température

5. Quel est l'élément qui permet de maintenir le circuit de refroidissement sous pression ?

- a ☐ le thermostat
- b ☐ la sonde de température
- c ☐ la soupape du vase d'expansion

137

- 11 - Le circuit de refroidissement

Entraînez-vous

1. Relevez les températures d'ouverture du thermostat, de mise en route et d'arrêt du motoventilateur sur un moteur de votre choix.
2. Recherchez le système employé pour effectuer le chauffage de l'habitacle dans les véhicules à refroidissement par eau.

Partie 4

La combustion et l'alimentation en carburant

Les combustibles et la combustion

chapitre 12

12.1 Les combustibles



Figure 12.1 Raffinerie des Donges.
Reformatage régénératif
(Document Elf. © Houlbreque).

On nomme « combustible » toute matière dont la combustion produit de l'énergie calorifique.

Les combustibles sont formés principalement de carbone et d'hydrogène et peuvent être :

- » d'origine végétale : bois, lignite, houille,
- » d'origine minérale : pétrole (figure 12.1).

Ces combustibles doivent :

- » posséder un haut pouvoir calorifique : quantité de chaleur (W) dégagée par la combustion de l'unité de masse (en joules par kilogramme) ;
- » dégager cette énergie dans un temps très court ;

$$P = \frac{W}{t}$$

- » se présenter sous une forme compatible avec la combustion interne des moteurs.

On choisit les combustibles, liquides ou gazeux, dont le mélange intime avec l'air est aisé.

Ces combustibles sont appelés « carburants » ou « hydrocarbures ».

Ils proviennent :

- » de la distillation du pétrole brut : essence, gazole ;
- » de réserves géologiques gazeuses : gaz naturel ;
- » de la distillation de végétaux : alcool éthylique ;

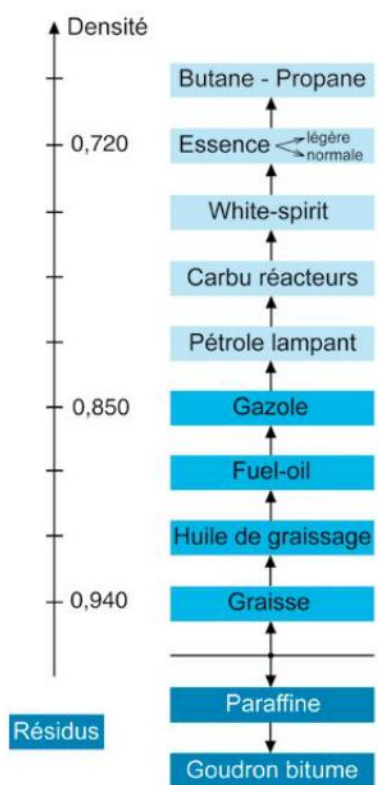


Figure 12.2 Classement des produits selon leur masse volumique (densité).

- » de la transformation de la houille : benzol, méthane ;
- » de réactions chimiques à partir d'hydrocarbures mis en présence d'un catalyseur ou d'un autre élément : essence synthétique, essence de craquage, éthylène.

Le pétrole est une huile minérale naturelle très visqueuse et de couleur foncée. Il s'est formé au cours de centaines de millions d'années par un lent processus de décomposition de substances organiques.

Le raffinage est le traitement qui permet d'extraire les divers composants.

Le pétrole brut est soumis à une première distillation qui permet de séparer les produits en fonction de leur température d'ébullition.

On recueille successivement les vapeurs dégagées dans une tour de distillation (figure 12.2). Les produits sont récupérés en commençant par les plus légers, comme le butane et le propane, et en finissant par les huiles les plus lourdes et les graisses.

En fin d'opération, il ne reste que des résidus bitumeux.

Afin d'obtenir de plus grandes quantités d'essence, certains fuels peuvent être soumis à une seconde distillation.

Elle est effectuée sous pression en présence d'un catalyseur produisant une dislocation des molécules d'hydrocarbure. L'essence ainsi produite se nomme « essence de craquage » (ou « de cracking »).

Les caractéristiques des carburants courants sont présentés dans le tableau suivant.

Carburant	Pouvoir calorifique (cal/kg)	Densité	Température d'inflammation	Tendance à la détonation
Essence	11 – 12 000	0,72	380 °C	Dépend de son indice d'octane : de 84 à 100
Alcool	5 – 7 000	0,8	460 °C	Aucune
Gazole	10 – 11 000	0,85	400 °C	Dépend de son indice de cétane
Benzol	10 000	0,9	420 °C	Faible
Gaz de pétrole liquéfié GPL	10 – 11 000	2,2	400 °C	Faible

Il existe plusieurs types d'essences pour automobiles. Selon le type de performances recherchées, les constructeurs réalisent des moteurs différents notamment dans :

- » le rapport alésage/course,
- » la cylindrée,
- » le rapport volumétrique,
- » la forme des chambres de combustion.

Pour une combustion optimale, nous verrons que la vitesse d'inflammation doit être la plus élevée possible sans atteindre la détonation.

Les moteurs les plus sensibles à la détonation utilisent un carburant d'indice d'octane élevé.

Figure 12.3 Les différents carburants disponibles en France.



143

L'indice d'octane est un nombre sans unité désignant la résistance à la détonation d'un carburant.

On obtient cet indice en comparant le comportement du carburant à tester avec celui de l'heptane qui est très détonant et de l'octane qui détone difficilement (figure 12.4).

Remarque

Un carburant d'indice d'octane 90 est un carburant qui se comporte comme un mélange de 90 % d'octane et 10 % d'heptane.

Pour augmenter l'indice d'octane, d'autres carburants sont incorporés à l'essence tels que l'alcool, le benzol, les essences de craquage, les essences synthétiques (le benzol améliore la miscibilité de l'alcool dans l'essence).

De nos jours la présence de plomb tétraéthyle a été supprimée car il est :

- » nuisible pour la santé,
- » incompatible avec les catalyseurs d'échappement (pots catalytiques).

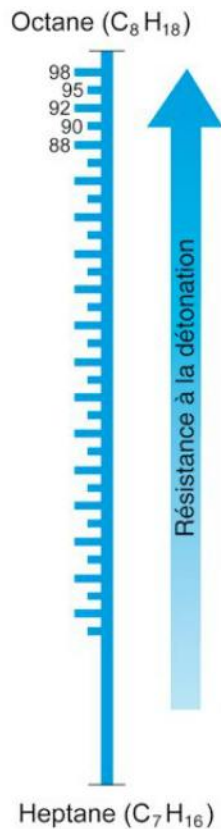


Figure 12.4 Indice d'octane : principe.

L'absence de plomb représente un progrès important en matière de pollution atmosphérique par diminution des polluants rejetés par les moteurs thermiques : les vapeurs de plomb disparaissent, et grâce à l'utilisation de l'injection d'essence et des pots catalytiques les taux de CO (monoxyde de carbone) et de HC (hydrocarbures imbrûlés) diminuent.

Les carburants lourds comprennent :

- » le mazout, } moteurs et chaudières industriels
- » le fuel, }
- » le gazole (véhicules à moteur Diesel),

Ils sont caractérisés par leur indice de cétane.

Il s'agit d'un nombre indiquant la vitesse d'inflammation du gazole par rapport à deux hydrocarbures-étalons :

- » le cétane, dont la vitesse d'inflammation est nulle ;
- » l'alpha-méthyle-naphtalène dont la vitesse est infinie.

12.2 Les biocarburants

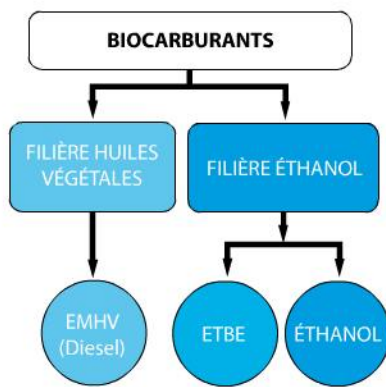


Figure 12.5 Filières de production des biocarburants

Pour répondre aux différentes contraintes en termes de disponibilité des ressources énergétiques d'origine fossile et pour contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, de multiples solutions sont envisagées. Une de ces solutions passe par les biocarburants.

Un biocarburant est un carburant issu de la biomasse, c'est-à-dire obtenu à partir d'une matière première végétale, animale ou de déchets). Les biocarburants sont en général mélangés à des carburants d'origine fossile.

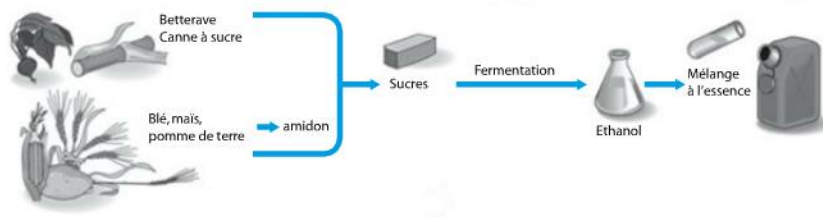
Le développement des biocarburants vise à la fois à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à apporter une réponse à l'épuisement des réserves mondiales d'énergies fossiles. Il permet également de réduire la dépendance énergétique et offre de nouveaux débouchés aux filières agricoles.

Les deux grandes filières de production des biocarburants sont la filière essence et la filière diesel.

La filière biocarburant essence

La filière biocarburant essence comprend l'éthanol et l'ETBE.

Figure 12.6 Production de l'éthanol
(source : IFP Énergies Nouvelles)



La production de l'éthanol dite de « première génération » est réalisée à partir de plantes sucrières (betterave, canne à sucre...) ou de plantes amylacées (pomme de terre, manioc...).

L'éthanol issu du processus de production de première génération ne remplacera jamais les besoins pétroliers. En effet, les volumes potentiels de production et la concurrence directe de cette production avec les filières alimentaires restent problématiques.

Cependant, son utilisation à petite échelle en mélange à l'essence permet de réduire la teneur en carbone du carburant et permet ainsi de limiter les émissions de CO_2 .

Un deuxième procédé appelé de « deuxième génération » est déjà utilisé, mais reste encore dans une phase de développement.

À l'avenir, les biocarburants seront produits à partir de la biomasse cellulosique, c'est-à-dire de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, provenant essentiellement :

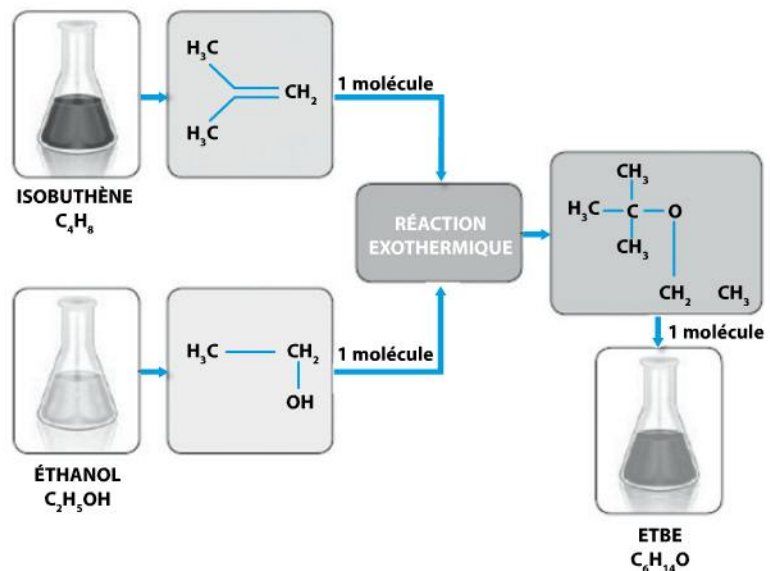
- » de cultures dédiées (peupliers, eucalyptus) ;
- » de résidus agricoles (pailles de céréales, tiges de maïs) ;
- » ou de déchets organiques comme les boues des stations d'épuration.

La production de biocarburants de deuxième génération à partir de cette biomasse cellulosique s'effectue :

- » soit par la **voie thermochimique** pour la production de carburant diesel de synthèse ;
- » soit par la **voie biochimique** pour la production d'éthanol.

L'ETBE (éther éthyle tertiobutyle, *ethyl tert-butyl ether* en anglais) est un produit de synthèse fabriqué à partir d'éthanol et d'isobutène issu du raffinage du pétrole.

Figure 12.7 Production de l'ETBE



L'utilisation de carburant comprenant de l'ETBE ne pose pas de problèmes particuliers : l'ETBE est un excellent composant des essences et présente par rapport à l'éthanol l'avantage d'une tension de vapeur favorable et d'une parfaite compatibilité avec les autres composants.

De plus l'ETBE a l'avantage d'avoir des propriétés énergétiques beaucoup plus proches de celles de l'essence (heptane) et d'être insensible à l'eau, ce qui supprime les problèmes de démixtion.

La filière biocarburant gazole

La filière biocarburant gazole correspond aux EMHV (esters méthyliques d'huiles végétales), qui sont fabriqués à partir d'huiles végétales, de graisses animales ou d'huiles usagées recyclées.

Figure 12.8 Production de l'EMHV
(source : IFP Énergies Nouvelles)



Les biocarburants oléagineux ne peuvent être mélangés qu'au gazole, ils interviennent donc seulement dans les moteurs **Diesel**. Ils sont obtenus à partir de graines oléagineuses contenant de l'huile comme le colza, l'arachide ou encore le soja. Pour fabriquer un biocarburant à partir de ces oléagineux, deux méthodes différentes sont utilisées :

- » soit une **pression à froid** de ces graines puis une filtration de l'huile pour obtenir une huile végétale pure (HVP). Cette huile possède des inconvénients, en effet sa viscosité ne permet pas

de l'utiliser dans les moteurs Diesel puisqu'il faut un préchauffage préalable de l'huile. Cette technique de production est appelée « filière courte » car elle ne demande pas l'intervention d'un procédé industriel ;

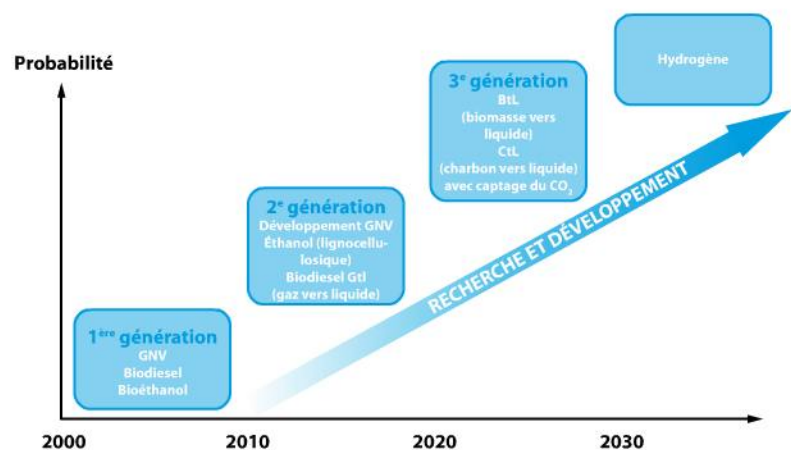
- » soit une **transestérification** pour obtenir une huile végétale brute (HVB) c'est-à-dire du Diester (compression des mots diesel et ester) ou encore appelé du Biodiesel. Cette technique de production est appelée « filière longue » car elle demande l'intervention d'un procédé industriel. On obtient alors un EMHV qui est en fait le Biodiesel.

Enfin, l'EMHV peut être utilisé pur ou en mélange. L'utilisation pure en substitution totale du gazole n'est pas réglementée et nécessite des adaptations du véhicule. Aujourd'hui, l'EMHV est principalement utilisé en mélange à des teneurs variant de quelque pourcent jusqu'à 30 % de carburant utilisé.

En outre, il faut noter que toutes les huiles végétales peuvent être utilisées comme carburant. Cependant les considérations de prix, le rendement des cultures et le bilan écologique excluent de nombreuses huiles contenant ces défauts. L'huile d'olive, par exemple, aboutirait à un prix de revient exorbitant. Ainsi l'huile de colza, de maïs, d'algues et les huiles de recyclage (friture) offrent des meilleures perspectives à la fabrication du biocarburant.

Synthèse des développements futurs d'énergie alternative

Figure 12.9 Les développements futurs d'énergie alternative



12.3 La combustion

La combustion est l'ensemble des phénomènes physiques, chimiques et thermodynamiques qui accompagnent la combinaison d'un combustible avec l'oxygène. Il y a combustion interne lorsque ces opérations se déroulent à l'intérieur même du moteur.

Le rôle de la combustion est de transformer l'énergie chimique potentielle contenue dans le carburant en énergie thermique ou calorifique (figure 12.10).

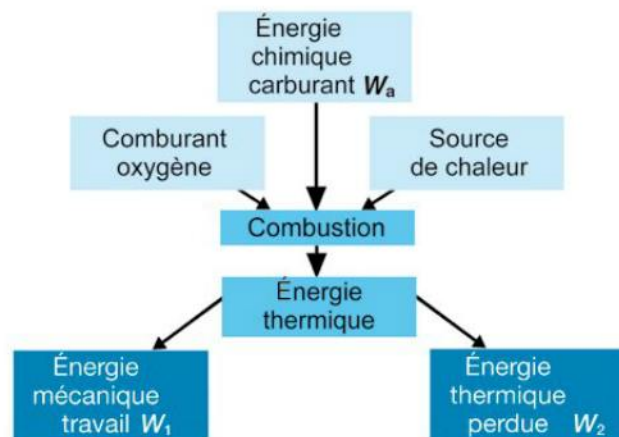


Figure 12.10 Transformation de l'énergie.

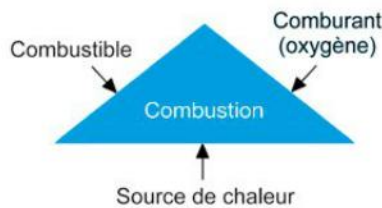


Figure 12.11 Les trois éléments nécessaires à la combustion.

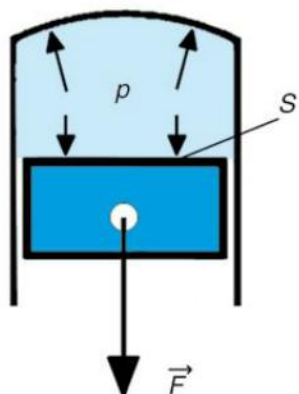


Figure 12.12 Transformation de l'énergie. $F = pS$.

Il est nécessaire de mettre en présence (figure 12.11) :

- » un carburant à haut pouvoir calorifique,
- » un comburant – l'oxygène de l'air,
- » une source de chaleur.

Le carburant et le comburant doivent se combiner parfaitement.

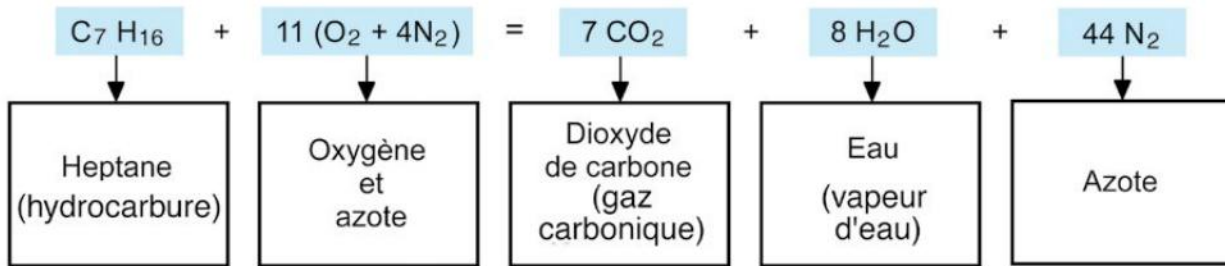
Il faut donc préparer un mélange combustible.

L'apport de chaleur permet d'amener le mélange combustible à sa température d'inflammation.

L'élévation de température qui accompagne la combustion provoque une montée en pression des gaz contenus dans la chambre de combustion. La force mécanique communiquée au piston sera proportionnelle à cette pression et à la section intérieure du cylindre ($F = pS$) (figure 12.12).

L'énergie mécanique fournie par le moteur est proportionnelle à l'énergie contenue dans le carburant et à la qualité de la combustion.

La combustion parfaite d'un carburant uniquement constitué d'heptane combiné à l'oxygène pur peut se traduire par l'équation chimique suivante :



De nombreux facteurs modifient les données de cette combustion théorique :

- » l'air ne contient que 21 volumes d'oxygène pour 78 d'azote (gaz neutre incombustible), ainsi que quelques gaz rares ;
- » les carburants contiennent des additifs qui modifient leur composition ;
- » la combustion est souvent incomplète (vitesse de combustion insuffisante).

Le mélange combustible est introduit dans les cylindres au temps d'admission.

La compression amène le mélange à une température légèrement inférieure à la température d'auto-inflammation.

L'arc électrique produit par la bougie d'allumage fournit le complément de chaleur au moment précis où le début de combustion est désiré.

Cet apport complémentaire de chaleur va permettre l'inflammation de la couche de mélange se trouvant à proximité immédiate de la bougie. La chaleur dégagée par cette combustion partielle produit un dégagement de chaleur qui permet l'inflammation de la couche suivante. L'opération se reproduit jusqu'à complète combustion du mélange.

Pour obtenir une puissance importante, il est nécessaire que la vitesse d'inflammation soit très élevée :

$$P = \frac{W}{t}$$

La vitesse d'inflammation sera d'autant plus grande que :

- » le mélange sera bien préparé ;
- » la pression et la température du mélange seront grandes.

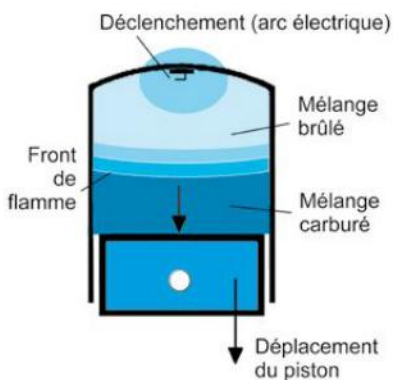


Figure 12.13 Propagation de la flamme.
Poussée progressive sur le piston.

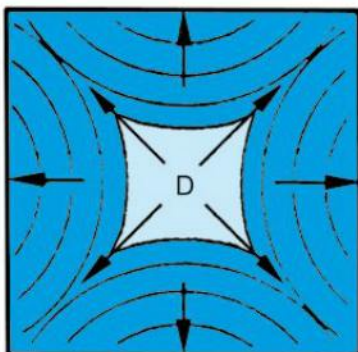


Figure 12.14 Principe de la détonation.

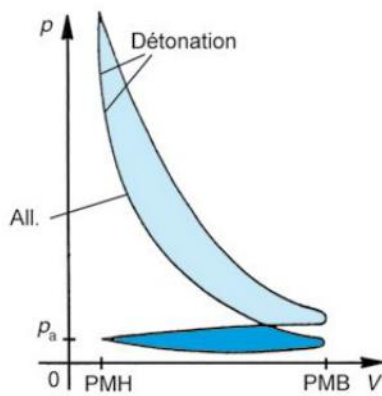


Figure 12.15 Avance à l'allumage trop importante.

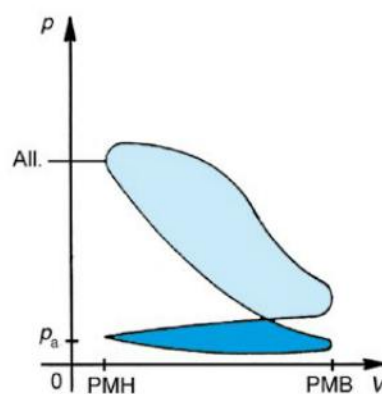


Figure 12.16 Allumage retardé, combustion trop lente.

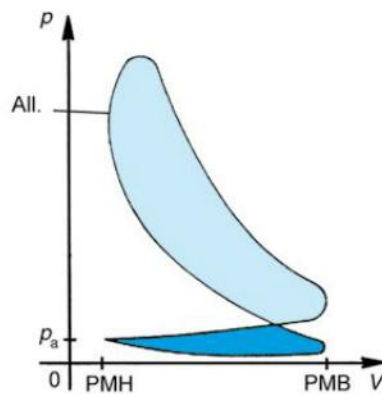


Figure 12.17 Combustion normale.

Si nous supposons le mélange combustible et le remplissage idéals et que nous déclenchons la combustion dans un vase clos, nous constatons que la combustion de la première couche a pour effet d'augmenter la pression dans la chambre, sachant qu'une élévation de pression provoque une augmentation de température. La pression dans la chambre devient si forte qu'il va se produire une inflammation simultanée de toute la masse.

On appelle ce phénomène la « détonation » (figure 12.14).

La détonation peut produire :

- » une perte de puissance,
- » un échauffement anormal du moteur,
- » le fluage ou la fusion des éléments en contact avec la flamme,
- » une fatigue des organes mécaniques.

Les facteurs pouvant provoquer une détonation peuvent être :

- » une avance à l'allumage ou à l'injection trop importante (figure 12.15),
- » un rapport volumétrique trop élevé,
- » un carburant mal adapté,
- » un déplacement du piston trop lent par rapport au taux de remplissage,
- » une température anormale du moteur,
- » une présence de points chauds provoquant plusieurs fronts de flamme,
- » un mauvais brassage du mélange.

Il ne faut pas confondre :

- » la détonation, qui est une vitesse de combustion très élevée provenant de l'inflammation brutale et globale de toute la masse ;
- » l'auto-allumage, qui est le déclenchement de la combustion sans qu'il soit nécessaire de provoquer un arc électrique ;
- » l'auto-inflammation, qui est l'inflammation spontanée du carburant injecté dans une atmosphère sous pression et à une température élevée (Diesel).

Résumé

Origine des combustibles pour automobiles

Les combustibles pour moteurs sont d'origine végétale ou minérale. Ils se présentent à l'état liquide ou gazeux. Ils possèdent un haut pouvoir calorifique et dégagent cette énergie dans un temps très court. Ces combustibles sont appelés « carburants » ou « hydrocarbures ». Le traitement de la houille donne le benzol, le méthane. La distillation des végétaux produit l'alcool éthylique. La première distillation du pétrole permet de séparer le butane, le propane, l'essence, le gazole, etc. Certaines réactions chimiques réalisées à partir de pétrole ou de houille produisent l'essence synthétique, l'essence de craquage, l'alcool méthylique.

Caractéristiques de l'essence

L'essence pour les automobiles possède un haut pouvoir calorifique (12 000 cal/kg) et s'enflamme à une température de 380 °C. Sa résistance à la détonation dépend de son indice d'octane. L'indice d'octane est un nombre établi en comparant le carburant testé à deux hydrocarbures connus : l'heptane (très détonant) et l'octane (peu détonant). On augmente l'indice d'octane de l'essence par addition d'alcool, de benzol, d'essence de craquage et d'essence synthétique.

Caractéristiques du gazole

Le gazole possède un pouvoir calorifique de 10 000 kcal/kg, il s'enflamme spontanément à une température de 400 °C.

L'indice de cétane est le nombre qui caractérise la vitesse d'inflammation du gazole par rapport à deux hydrocarbures connus : le cétane et l'alpha-méthyle-naphtalène.

Réalisation de la combustion

La combustion permet la transformation de l'énergie chimique contenue dans le carburant en énergie thermique ou calorifique. L'élévation de température qui accompagne la combustion provoque une montée en pression des gaz.

La force communiquée au piston est proportionnelle à la pression des gaz et à la section intérieure du cylindre ($F = pS$).

Pour réaliser une combustion, il faut mettre en présence un carburant, un comburant (oxygène de l'air) et une source de chaleur.

Le front de flamme doit se déplacer à une vitesse élevée à la limite de la détonation.

La vitesse d'inflammation sera d'autant plus grande :

- » que le mélange sera bien préparé,
- » que la pression et la température du mélange seront élevées.

Détonation

La détonation est l'inflammation simultanée de toute la masse. La détonation est provoquée par un remplissage trop important par rapport à la vitesse de recul du piston, un rapport volumétrique incompatible avec le carburant utilisé, trop d'avance à l'allumage, une température anormale du moteur.

Auto-allumage

L'auto-allumage est le déclenchement de l'allumage par d'autres éléments que la bougie.

Auto-inflammation

L'auto-inflammation est l'inflammation spontanée du mélange par élévation de la température.

Testez vos connaissances

1. Quelle est la conséquence si l'on met du gazole dans un moteur à essence ?

- a ☐ *auto-allumage*
- b ☐ *arrêt du moteur*
- c ☐ *destruction du moteur*

2. Quelle est la conséquence si l'on met de l'essence dans un moteur Diesel ?

- a ☐ *auto-allumage*
- b ☐ *arrêt du moteur*
- c ☐ *destruction du moteur*

3. Quelle est la conséquence si l'on met du sans-plomb 95 à la place du sans-plomb 98 ?

- a ☐ *auto-allumage*
- b ☐ *arrêt du moteur*
- c ☐ *destruction du moteur*

4. L'indice d'octane d'un carburant correspond à :

- a ☐ *son pouvoir calorifique*
- b ☐ *sa résistance à la détonation*
- c ☐ *sa volatilité*

5. Quels sont les avantages des carburants sans plomb par rapport à l'ancien « super » ?

- a ☐ *plus légers*
- b ☐ *protection des soupapes*
- c ☐ *moins de pollution*

Entraînez-vous

1. Effectuez une recherche sur deux carburants secondaires mais utilisés dans certains véhicules : le GPL et le Diester.
2. Quel est le combustible non pétrolier utilisé dans les moteurs à pile à combustible ?

Le mélange combustible

chapitre 13

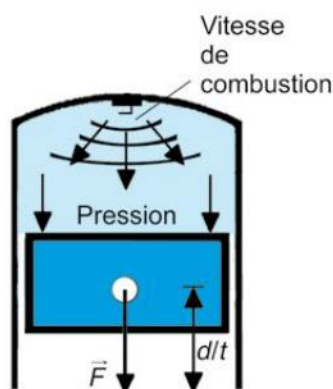


Figure 13.1 Combustion rapide :

- Montée en pression et détente rapides.
- Puissance.

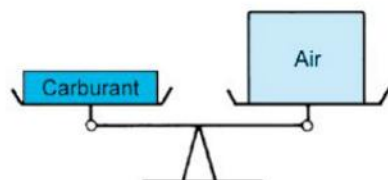


Figure 13.2 Dosage.

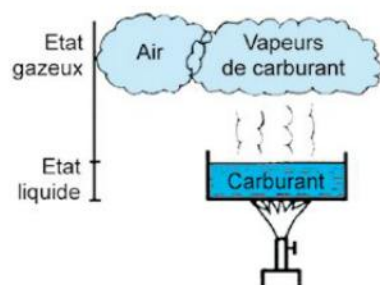


Figure 13.3 Vaporisation.

Le mélange combustible est le mélange intime du carburant avec l'air dans des proportions précises afin d'obtenir une combustion rapide et complète (figure 13.1).

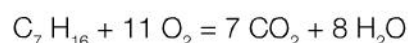
Les qualités requises pour une bonne combustion sont :

- » brûler à une très grande vitesse à la limite de la détonation (puissance),
- » dégager toute l'énergie latente contenue dans le carburant.

Plusieurs opérations sont à effectuer pour réaliser ce mélange combustible :

- » La quantité du carburant par rapport à l'air doit être soigneusement proportionnée ; nous appellerons cette opération le « dosage » (figure 13.2).
- » Pour mélanger le carburant et l'oxygène, il est nécessaire que les deux corps se trouvent dans le même état physique (gazeux). Si le carburant est liquide, il devra être transformé en gaz ; cette opération est la « vaporisation » (figure 13.3).
- » Chaque molécule du carburant devant, pour brûler, être entourée de molécules d'oxygène, il est nécessaire d'obtenir une parfaite homogénéité du mélange.

Prenons le cas de la combustion de l'essence et reportons-nous à l'équation chimique de combustion de ce carburant, nous trouvons :



Si nous admettons que l'essence utilisée est uniquement composée d'heptane et que l'air ambiant contient, en masse, 23 % d'oxygène, connaissant la masse atomique de chaque corps (carbone = 12, hydrogène = 1 et oxygène = 16) :

$$12 \times 7 + 16 = 100 \text{ g d'heptane brûlent dans } 22 \times 6 = 352 \text{ g d'oxygène.}$$

Ces 352 g d'oxygène étant contenus dans :

$$\frac{352 \times 100}{23} = 1\,530 \text{ g d'air.}$$

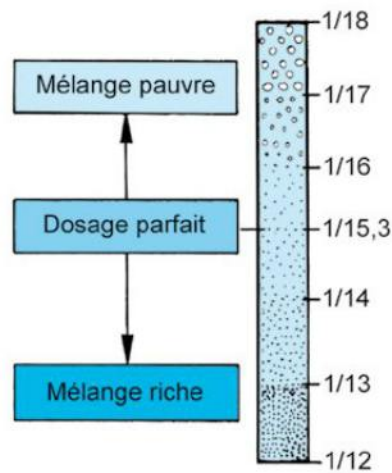


Figure 13.4 Dosage air/essence pour 1g d'essence.

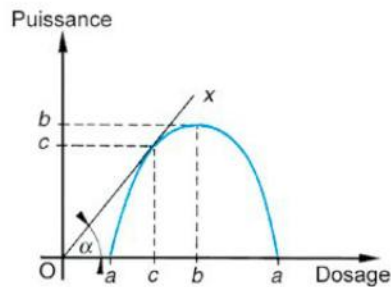


Figure 13.5 Conditions : remplissage et vitesse de rotation constants.

- a. Limite de combustibilité.
- b. Dosage de puissance maximale.
- c. Dosage de rendement maximal.

Nous constatons qu'il faut 15,3 g d'air pour faire brûler 1 g d'essence.

Ce dosage constitue le dosage parfait (figure 13.4).

Remarque

Un mélange comportant un dosage de moins de 15,3 g d'air pour 1 g d'essence est appelé « mélange riche ». S'il comporte plus de 15,3 g d'air, nous le nommerons « mélange pauvre ».

Si nous alimentons un moteur placé sur un banc d'essai avec des mélanges d'air et d'essence différents, nous faisons les constatations suivantes :

- » En dessous d'un dosage essence/air de 1/28 ainsi qu'au-dessus de 1/8, le mélange est incombustible ou ne permet aucune puissance (puisque la puissance P est égale au produit du couple $\mathcal{C}$ par la fréquence de rotation ω , avec ici $\mathcal{C} = 0$) : $P = \mathcal{C} \cdot \omega$.
- » Si l'on enrichit, nous constatons que la puissance augmente ; la puissance maximale est obtenue avec un dosage de 1/12,5. Si nous continuons à enrichir, la puissance diminue de nouveau pour tomber à zéro au dosage de 1/8. Nous constatons que le dosage de puissance maximale (1/12,5) est plus riche que le dosage parfait.
- » Si nous cherchons le rendement maximal (meilleur rapport puissance/consommation), nous constatons que le dosage correspondant se situe au point de tangente de la droite Ox dont l'origine est le O du diagramme, avec la courbe de puissance (figure 13.5).

Le mélange est parfaitement homogène lorsque le carburant est complètement vaporisé au moment de son inflammation.

La vaporisation devra se réaliser au fur et à mesure du cheminement du mélange dans les tubulures d'admission pour se terminer dans la chambre de combustion, le brassage final ayant lieu pendant la compression.

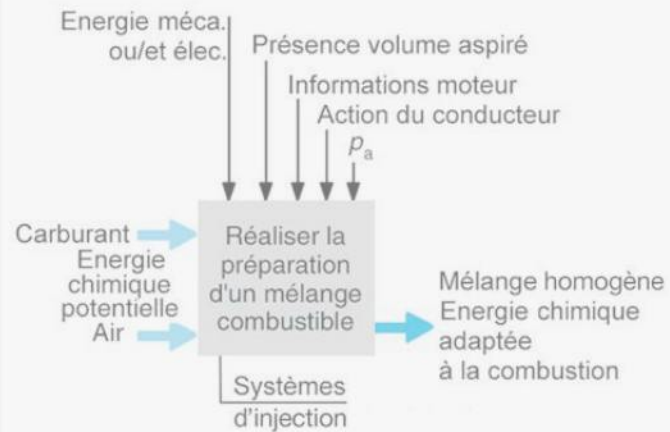
Remarque

La vaporisation du carburant produisant une dilatation du mélange, il y a intérêt à provoquer celle-ci le plus près possible des cylindres afin d'améliorer le taux de remplissage, d'où l'intérêt des systèmes d'injection essence qui injectent juste avant la soupape d'admission.

Les conditions que nous venons de définir peuvent être réalisées par injection du carburant dans la tubulure d'admission (injection d'essence) ou directement dans les cylindres.

Fonction

Figure 13.6 Fonction globale des systèmes d'injection



Résumé

Définition

Le mélange combustible est le mélange intime du carburant avec l'air dans des proportions précises afin d'obtenir une combustion rapide et complète.

Réalisation

Il est nécessaire de réaliser :

- » Le dosage du carburant et de l'air.
- » Le dosage parfait pour un carburant composé d'heptane qui est de 1 g d'essence pour 15,3 g d'air.
- » Le dosage de puissance maximale d'un moteur qui est de 1/12,5.
- » Le dosage de rendement maximal qui varie entre 1/13 et 1/18 selon le taux de remplissage des cylindres.
- » La vaporisation qui permet de faire passer le carburant de l'état liquide à l'état gazeux. Celle-ci est d'autant plus importante que la surface du carburant en contact avec l'air est importante, que la température de réchauffage est grande et que la pression du milieu est basse (dépression).
- » L'homogénéité afin que chaque molécule d'essence soit entourée de molécules d'air. L'homogénéité est réalisée par un brassage du mélange dans les tubulures d'admission et se terminant dans la chambre de combustion au moment de la compression.

Le mélange combustible est réalisé par injection.

Testez vos connaissances



1. Un mélange riche est un mélange riche en :

- a ☐ *mélange*
- b ☐ *air*
- c ☐ *essence*

2. Pour obtenir le rendement optimal du moteur, il faut un mélange :

- a ☐ *riche (1/12,5)*
- b ☐ *moyen (1/15)*
- c ☐ *pauvre (1/18)*

3. Quel est le rôle de la pompe à essence ?

- a ☐ *stocker le carburant*
- b ☐ *mettre en pression*
- c ☐ *distribuer le carburant*

4. Quels sont les deux corps résultant de la combustion parfaite d'un carburant (2 réponses) ?

- a ☐ *l'hydrogène*
- b ☐ *le gaz carbonique*
- c ☐ *l'oxyde de carbone*
- d ☐ *l'oxygène*
- e ☐ *l'hydrocarbure*

156

Entraînez-vous

1. Sur le véhicule de votre choix, relevez dans la revue technique les caractéristiques de tous les éléments qui composent le système d'alimentation/injection.
2. Calculez le nombre de litres d'air nécessaires pour faire brûler un litre d'essence dans le cas du dosage de rendement maximal (1 g d'essence pour 18 g d'air).

Les systèmes d'injection

chapitre 14

14.1 L'injection indirecte essence

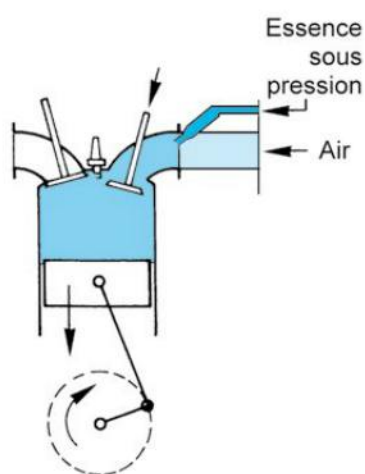


Figure 14.1 Mélange combustible effectué par injection multipoint.

Mise en situation

Pour que les cylindres reçoivent un mélange parfaitement combustible, il faut :

- » effectuer un dosage air/essence adapté à toutes les conditions de fonctionnement (vitesse de rotation, charge, température) ;
- » rendre le mélange parfaitement homogène (atomisation) ;
- » le répartir uniformément dans les différents cylindres.

Le système d'injection fait une analyse permanente des paramètres moteur tels que :

- » la fréquence de rotation,
- » le volume d'air admis,
- » la position du papillon des gaz,
- » la température du moteur.

La quantité de carburant nécessaire à la combustion instantanée est donc calculée avec une grande précision.

De plus le système d'injection permet une consommation plus faible ainsi qu'une diminution de la pollution, grâce à la qualité du mélange et à la mise en place de catalyseur de gaz d'échappement.

Figure 14.2 Injection multipoint :
– cheminement plus direct,
– répartition uniforme.

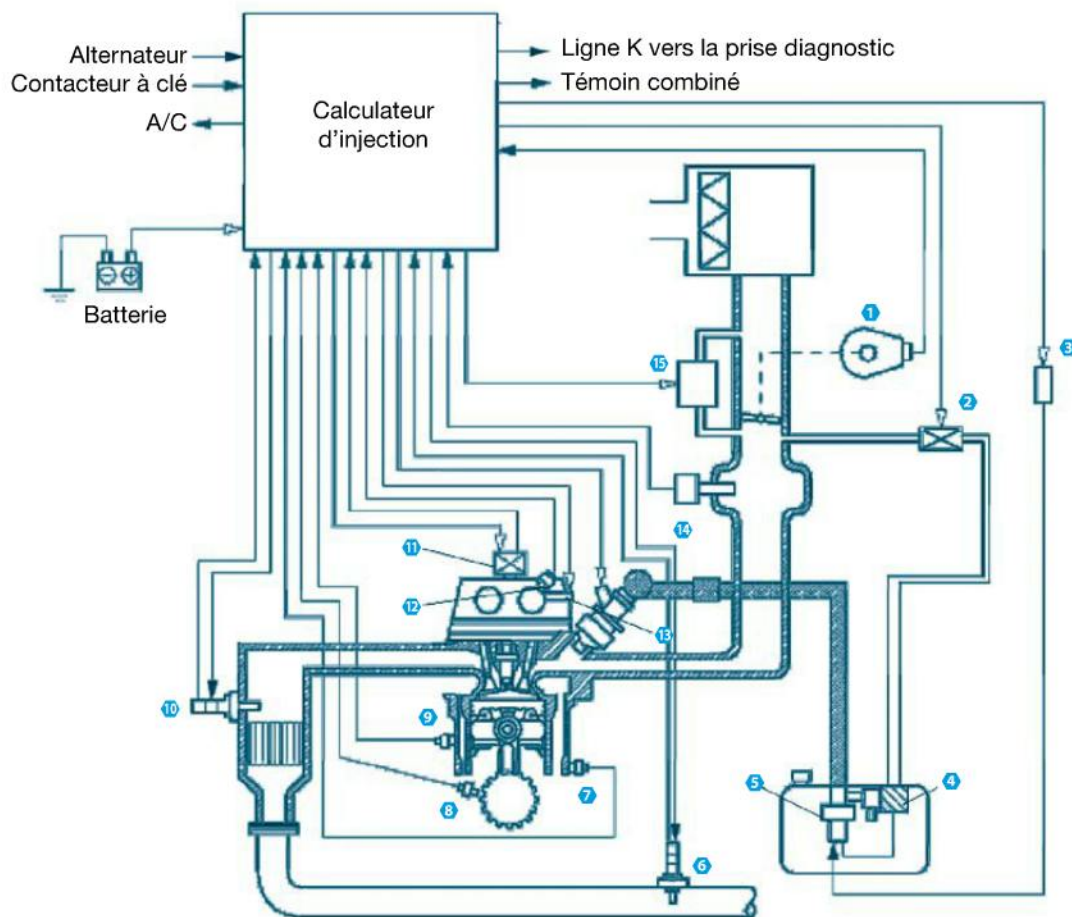
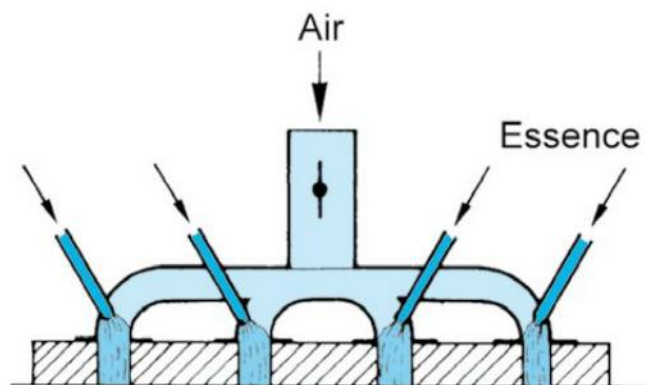


Figure 14.3 Système d'injection.

- ① Capteur position papillon des gaz ;
- ② Électrovanne canister ;
- ③ Relais pompe essence ;
- ④ Canister ;
- ⑤ Pompe à essence ;

- ⑥ Sonde à oxygène aval ;
- ⑦ Capteur de cliquetis ;
- ⑧ Capteur régime et position moteur ;
- ⑨ Capteur température moteur ;
- ⑩ Sonde à oxygène amont ;

- ⑪ Bobines d'allumage ;
- ⑫ Capteur de phase ;
- ⑬ Électrovanne VVT ;
- ⑭ Capteur pression collecteur ;
- ⑮ Actuateur de ralenti.

Analyse structurelle

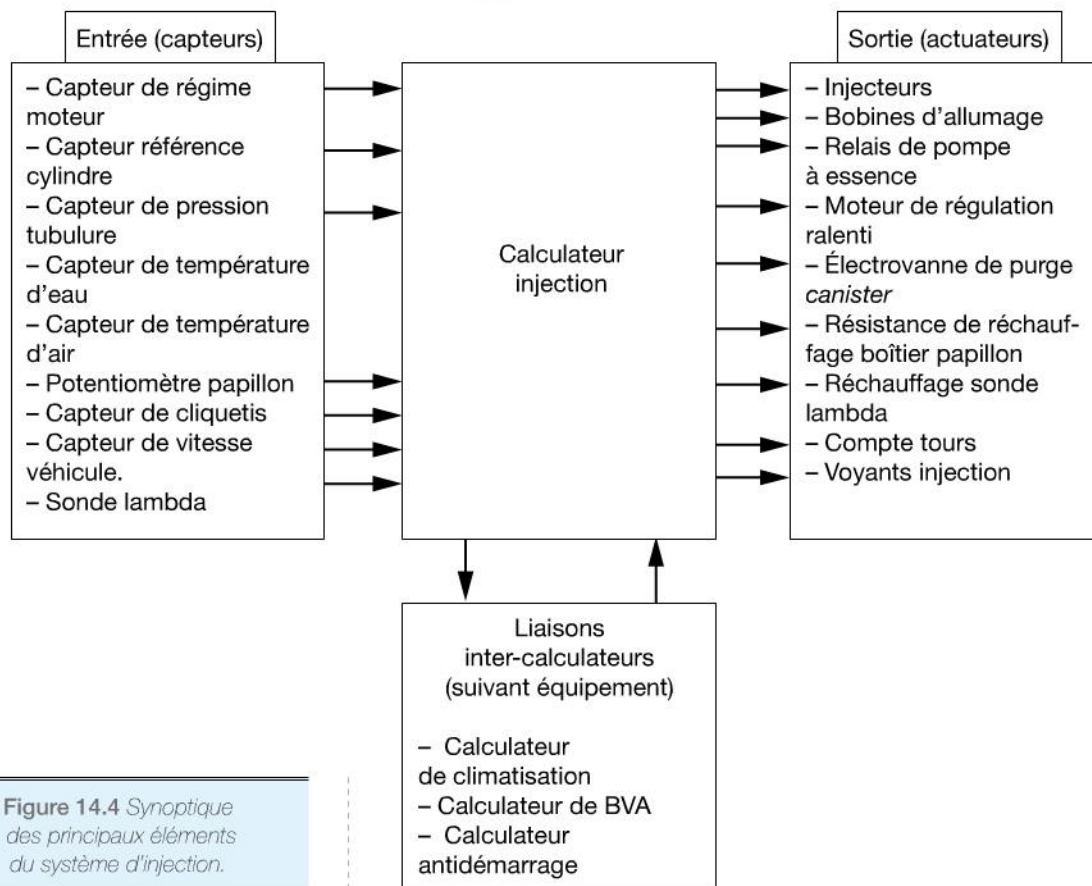


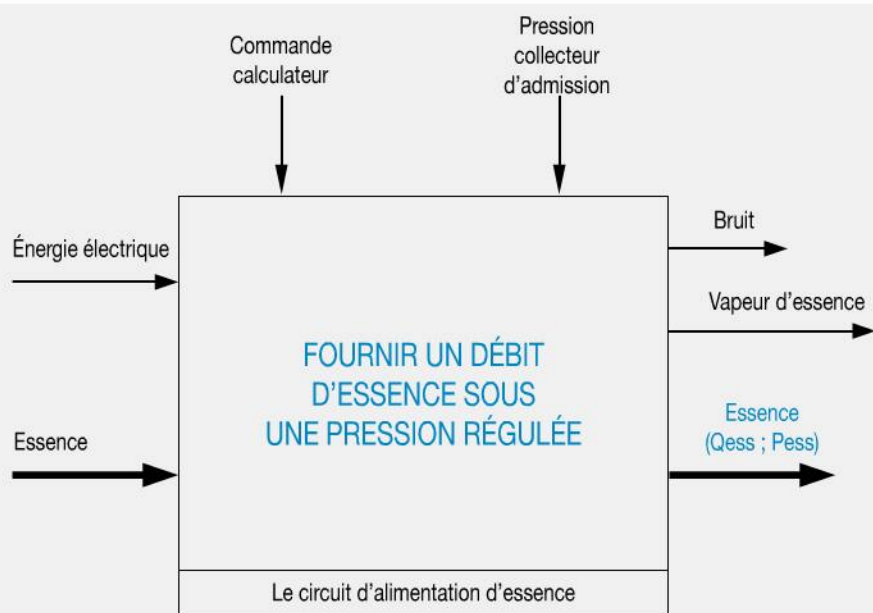
Figure 14.4 Synoptique des principaux éléments du système d'injection.

159

Le circuit d'essence

Fonction

Figure 14.5 Le circuit d'essence.



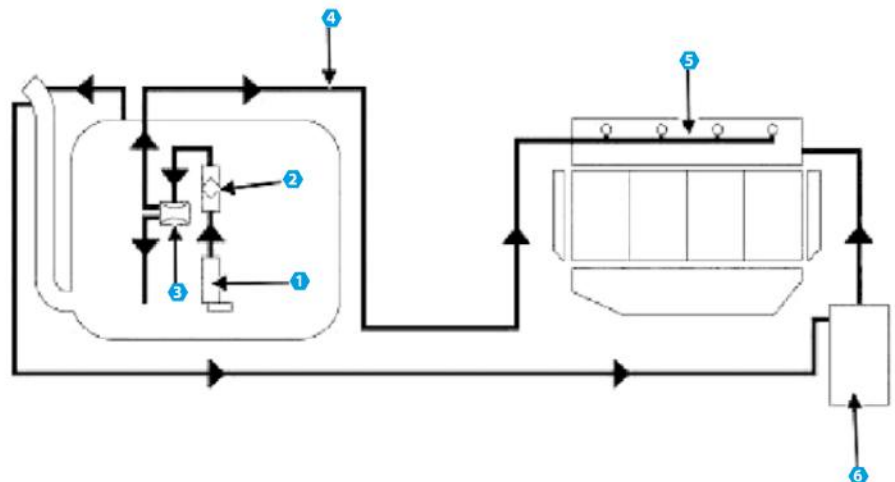
Sur les systèmes actuels le circuit d'alimentation de carburant est sans retour. La pression d'alimentation ne varie pas en fonction de la charge du moteur.

Le circuit est composé :

- » d'une rampe + les injecteurs qui permettent de pulvériser le carburant dans la tubulure d'admission ⑤ sans raccord de canalisation de retour et sans régulateur de pression d'alimentation,
- » d'une canalisation ④ unique venant du réservoir,
- » d'un ensemble d'alimentation « pompe-jauge - filtre » à essence équipé du régulateur de pression ③ qui maintient une différence de pression entre la pression d'essence et la pression collecteur,
- » de la pompe ① qui permet d'envoyer de l'essence sous pression et du filtre à essence ② qui retient les impuretés contenues dans le carburant (le tout situé dans le réservoir),
- » d'un réservoir de recirculation des vapeurs d'essence (*canister*) ⑥ qui permet aux vapeurs de carburant régnant dans le réservoir d'être absorbées par le charbon actif.

Figure 14.6 Schéma fonctionnel du circuit d'alimentation en essence.

- ① Pompe à carburant.
- ② Filtre à carburant.
- ③ Régulateur de pression d'alimentation en carburant.
- ④ Canalisation d'alimentation en carburant.
- ⑤ Rampe d'injection.
- ⑥ Réservoir de réaspiration des vapeurs d'essence

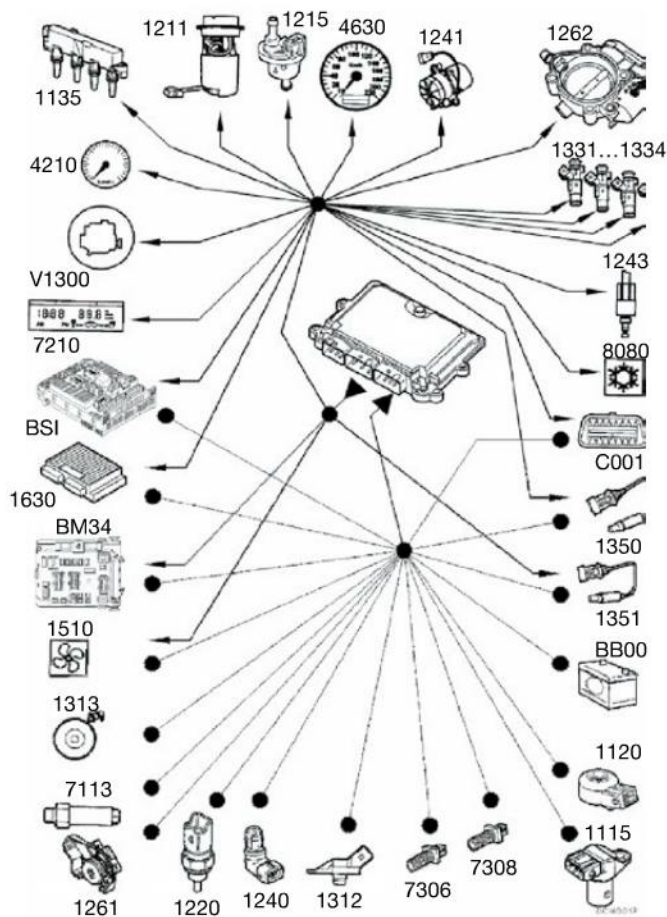


La partie commande

Le calculateur gère l'injection et l'allumage. Il dispose d'un certain nombre d'entrées (exemple : régime moteur, position papillon, température moteur...) destinées à l'informer des conditions de fonctionnement du moteur. Il analyse ces données d'entrée pour pouvoir commander en sortie des actionneurs (exemple : injecteurs, électrovanne de purge *canister*...).



Figure 14.7 Pompe à carburant (à gauche) et injecteur (à droite).



Nomenclature

BB00	-	Batterie
C001	-	Connecteur diagnostic
BSI	-	Boîtier servitude intelligent
BM34	-	Boîtier servitude moteur (BSM)
0004	-	Combiné
1115	-	Capteur référence cylindre
1120	-	Capteur cliquetis
1135	-	Bobine d'allumage
1211	-	Pompe jauge à carburant
1215	-	Électrovanne canister
1220	-	Capteur température eau moteur
1240	-	Capteur température air admission
1241	-	Pompe Pulsair (pompe à air)
1243	-	Électrovanne de distribution variable
1261	-	Capteur position pédale accélérateur
1262	-	Papillon motorisé
1312	-	Capteur pression air admission
1313	-	Capteur régime moteur
1320	-	Calculateur injection ECM
1331	}	Injecteurs
1332		
1333		
1334		
1350	-	Sonde à oxygène amont
1351	-	Sonde à oxygène aval
1510	-	Motoventilateur
1630	-	Calculateur boîte de vitesse automatique
4630	-	(Compteur) vitesse véhicule
4210	-	Compte tours
7113	-	Capteur Pression Direction Assistée
7210	-	Ordinateur de bord
7306	-	Contacteur embrayage (régulateur de vitesse)
7308	-	Contacteur de frein (régulateur de vitesse)
8080	-	Calculateur de climatisation
9035	-	Station combiné (BTO)
V1300	-	Voyant diagnostic

Figure 14.8 Les différents éléments (Document PSA).

Le calculateur a pour rôle :

- » d'exploiter les renseignements fournis par les sondes,
- » d'élaborer les commandes pour préparer l'injection,
- » de commander la mise en action des injecteurs.

Le calculateur détermine le temps d'ouverture de l'injecteur T_i en fonction d'une cartographie intégrée dans ses mémoires.



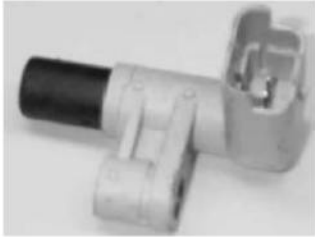
Figure 14.9 Le calculateur.

Les principaux capteurs et actionneurs

Les deux paramètres principaux nécessaires aux calculs de base de l'injection sont :

- » le régime moteur ;
- » la pression collecteur admission.

Capteurs et actionneurs	Figure	Fonction
Capteur température eau moteur		La sonde de température d'eau moteur informe le calculateur contrôle moteur de l'état thermique du moteur en mesurant la température du liquide de refroidissement.
Capteur température air		Cette information, associée à celle du régime moteur et de la pression d'admission, permet au calculateur d'évaluer la masse d'air absorbée et de corriger le mélange air-carburant. Cette thermistance peut être intégrée au capteur de pression absolue.
Papillon motorisé		La position du papillon est déterminée par l'action du moteur qui lui-même est commandé par le calculateur contrôle moteur. La gestion du ralenti est également assurée par ce moteur.

Potentiomètre papillon		Le potentiomètre papillon est implanté sur le boîtier papillon lorsqu'il n'y a pas de papillon motorisé et transmet à ce dernier une tension variable en fonction de la position papillon.
Capteur régime et position moteur		Lorsque les dents du volant défilent devant le capteur, il se crée une variation du champ magnétique qui induit dans le bobinage une tension alternative (signal sinusoïdal) dont la fréquence et l'amplitude sont proportionnelles à la vitesse de rotation moteur.
Capteur référence cylindre		Ce capteur permet au calculateur de phaser les commandes des injecteurs et des bobines d'allumage en mode séquentiel (cylindre par cylindre), de diminuer l'avance à l'allumage du ou des cylindres pour exprimer le phénomène de cliquetis et reconnaître le ou les cylindres pour les ratés d'allumage. Il permet aussi de contrôler le fonctionnement des électrovannes de distribution variable.
Capteur pression absolue (tubulure)		Le capteur de pression absolue mesure en permanence la pression régnant dans la tubulure d'admission. Ce capteur de pression est de type piézorésistif (résistance variant avec la pression).
Moteur pas à pas		Ce moteur pas à pas contrôle un débit d'air pris en dérivation du papillon des gaz dans le but suivant : Fournir un débit d'air additionnel (départ à froid). Réguler un régime de ralenti. Améliorer les retours ralenti (effet <i>dasch-pot</i>) en augmentant le nombre de pas hors ralenti, afin d'avoir un retour ralenti sans à-coups.
Capteur cliquetis		Ce capteur permet de détecter le cliquetis, phénomène vibratoire dû à une inflammation détonante du mélange dans la chambre de combustion.
Capteur vitesse véhicule		Il permet au calculateur de connaître en permanence la vitesse du véhicule et lui fournit une information de phase de ralenti : véhicule arrêté véhicule roulant : vitesse supérieure à 2 km/H.

La sonde à oxygène amont		Cette sonde est implantée sur l'échappement, à l'entrée du catalyseur, et délivre en permanence au calculateur une tension signalant la teneur en oxygène des gaz d'échappement (qualité de la combustion).
La sonde à oxygène aval		Ces sondes implantées sur l'échappement, à la sortie du précatalyseur, délivrent en permanence au calculateur une tension signalant la teneur en oxygène des gaz d'échappement (donc de la qualité de la combustion et du rendement du pot catalytique). Cette tension, analysée par le calculateur, permet de corriger le temps d'injection et de déduire par là même l'efficacité du pot catalytique.
Les injecteurs		Les impulsions électriques, en provenance du boîtier électronique injection, engendrent un champ magnétique dans l'enroulement de l'électro-aimant ; le noyau est attiré, et l'aiguille de l'injecteur se soulève de son siège. Le carburant est pulvérisé en amont du siège de soupape.

Analyse fonctionnelle

Principe de fonctionnement : Il est nécessaire de mesurer la quantité d'air aspirée par le moteur afin de pouvoir doser la quantité d'essence correspondante pour obtenir un dosage « parfait » adapté à toutes les situations.

La quantité de carburant à injecter est déterminée à partir de l'estimation du remplissage en air du moteur.

Cette quantité de carburant calculée est ensuite ajustée par :

- » correction auto-adaptative pour la richesse ;
- » compensation de la quantité d'essence apportée par le *canister* ;
- » compensation en phase transitoire (accélération, annulation en phase coupure...) ;
- » régulation en boucle fermée de la richesse.

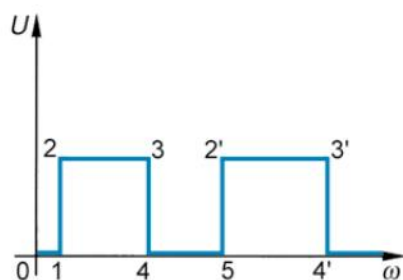


Figure 14.10 Régulation des créneaux de commande électronique des injecteurs.

Les injecteurs électromagnétiques sont alimentés sous une pression constante pendant des temps plus ou moins longs et synchronisés avec le cycle. Les injecteurs sont munis d'électrovannes qui réagissent à ces excitations (figure 14.10).

Fonction

Figure 14.11 Analyse descendante.

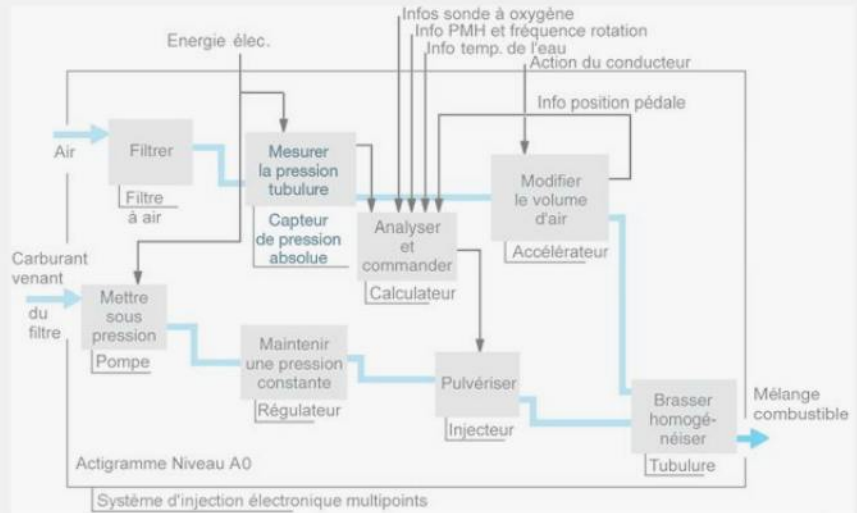
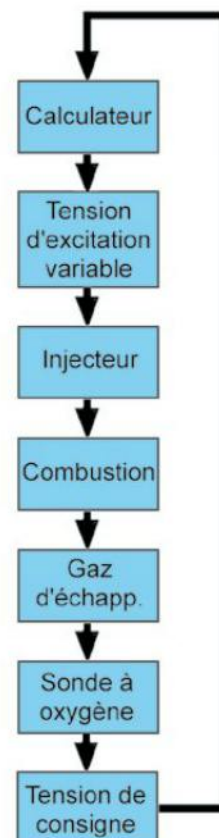


Figure 14.12 Principe du contrôle de la richesse par sonde à oxygène (ou « lambda »).



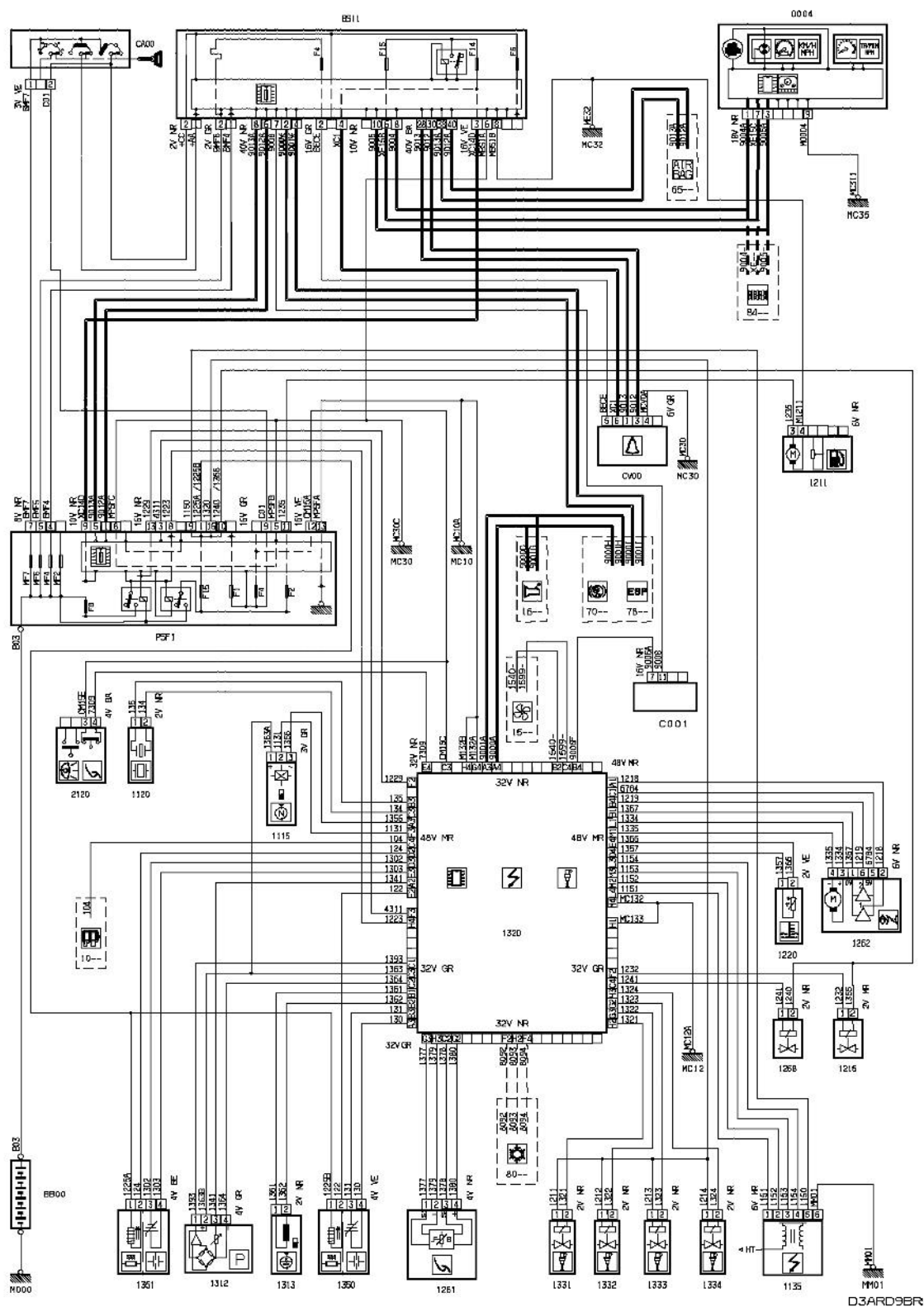


Figure 14.13 Exemple d'un schéma électrique de gestion moteur (Document, Citroën).

Résumé

Les deux paramètres principaux nécessaires aux calculs de base de l'injection essence sont :

- » le régime moteur,
- » la pression collecteur admission.

Principe

Les systèmes d'injection ont pour principe commun un dosage plus précis du carburant par une mesure permanente :

- » de la pression d'air aspiré par les cylindres,
- » de la charge du moteur,
- » de sa température, etc.

Ils présentent les avantages suivants :

- » augmentation des performances du moteur (puissance, couple),
- » réduction de consommation et de taux de polluants,
- » amélioration de la souplesse du moteur.

L'injection indirecte essence

La pression régnant dans la tubulure d'admission est mesurée par un capteur de pression absolue placé sur la tubulure d'admission, qui permet d'adapter le débit injecté aux différents états de charge du moteur et aux différences de pression atmosphérique. Le calculateur reçoit des informations sous forme de signaux électriques sur : la pression tubulure et la température de l'air, la température de l'eau, le déclenchement de l'allumage, la vitesse d'ouverture du papillon, la vitesse de rotation du moteur, la teneur en oxygène de la sonde « lambda ». Il transforme ces informations en une tension de commande des injecteurs électromagnétiques, le début, la durée et la fin de l'injection étant fonction des paramètres d'entrée.

Testez vos connaissances



1. Le capteur de PMH envoie ses informations :

- a ☐ au régulateur
- b ☐ au calculateur
- c ☐ à l'accélérateur

2. L'ouverture et la fermeture des injecteurs sont commandées par :

- a ☐ le régulateur
- b ☐ le calculateur
- c ☐ l'accélérateur

3. Quelle est la fonction de la sonde à oxygène ?

- a ☐ produire de l'oxygène
- b ☐ mesurer l'oxygène
- c ☐ purifier l'oxygène

4. La masse d'air admise est contrôlée par un :

- a ☐ multimètre
- b ☐ thermomètre
- c ☐ capteur de pression absolue

5. La quantité d'essence injectée est contrôlée par :

- a ☐ le régulateur
- b ☐ le calculateur
- c ☐ l'injecteur

168

Entraînez-vous

1. Recherchez le type d'injection utilisé sur le moteur de votre choix. Relevez toutes les caractéristiques du moteur et de son équipement d'injection.
2. Décrivez le fonctionnement d'un pot catalytique.
3. Recherchez le principe de fonctionnement, sur un véhicule qui en est équipé, du système d'injection double : essence/GPL ou GNV.

14.2 L'injection directe essence

Mise en situation

Figure 14.14 Moteur à injection directe.



L'injection directe essence est avant tout une voie de réduction de la consommation, et donc des émissions de CO_2 . En effet, le règlement européen prévoit pour l'avenir des émissions de CO_2 de plus en plus limitées. Ce gain de consommation provient de trois facteurs :

- » Le fait d'injecter directement le carburant dans la chambre de combustion est plus précis et permet un gain de consommation de l'ordre de 8 %.
- » La combustion est moins sensible au cliquetis. De ce fait, le rapport volumétrique peut être augmenté avec une incidence bénéfique sur le rendement du moteur.
- » En mode stratifié, le moteur peut fonctionner papillon des gaz en pleine ouverture entraînant une réduction des pertes par pompage.

Certains constructeurs annoncent sur certains moteurs une économie de carburant pouvant atteindre 20 %.

Analyse structurelle

Principe

Un bloc pompe-filtre-régulateur situé dans le réservoir alimente en carburant sous faible pression (5 bar) la pompe haute pression.

Entraînée mécaniquement par le moteur, la pompe HP alimente en haute pression (50 à 120 bar) la rampe d'injection.

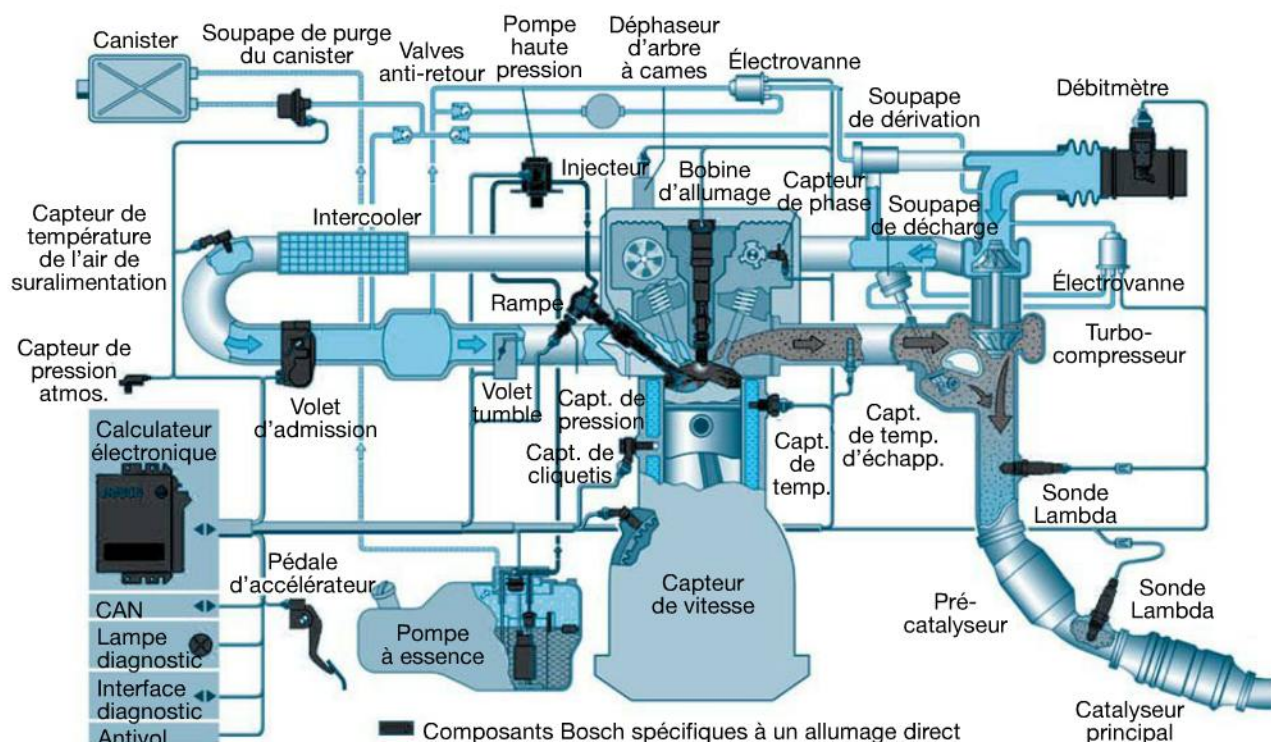


Figure 14.15 Principe de l'injection directe essence.

Les quatre injecteurs électromagnétiques ou piézo-électriques injectent directement dans la chambre de combustion la quantité de carburant déterminée par le calculateur en jouant sur le temps d'ouverture et la pression dans la rampe.

La pompe haute pression permet d'injecter le carburant sous haute pression (entre 50 et 120 bar). Elle est reliée à la rampe commune par une canalisation dont l'échange est obligatoire à chaque dépose.

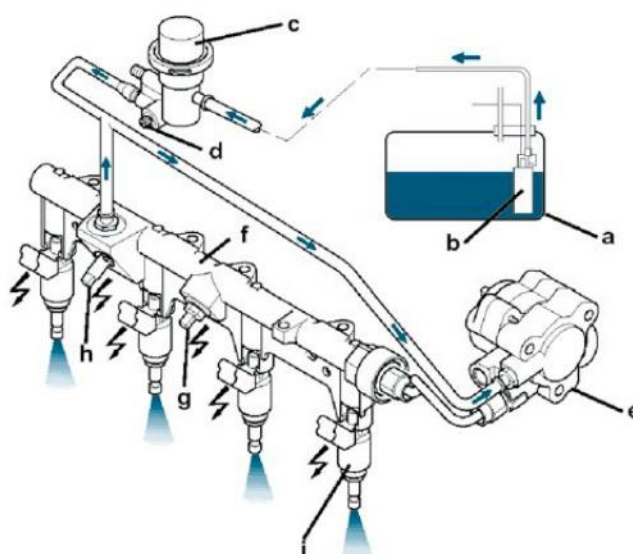


Figure 14.16 Éléments caractéristiques de l'injection directe essence.

- a :** réservoir ;
- b :** pompe de gavage et jauge ;
- c :** amortisseur de pulsations ;
- d :** valve Schrader ;
- e :** pompe haute pression ;
- f :** rampe commune ;
- g :** capteur de pression ;
- h :** régulateur de pression ;
- i :** injecteurs.

La rampe d'injection commune, en aluminium, a plusieurs fonctions :

- » stockage temporaire du carburant sous pression,
- » amortissement des pulsations créées par les injections,
- » liaison entre les éléments du circuit haute pression.

Le capteur haute pression mesure la valeur de la pression du carburant dans la rampe commune.

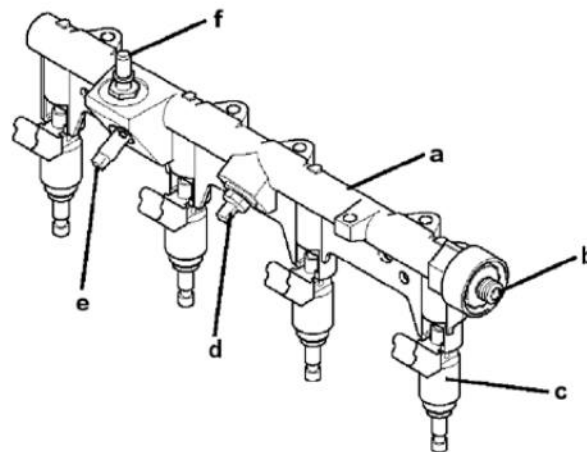
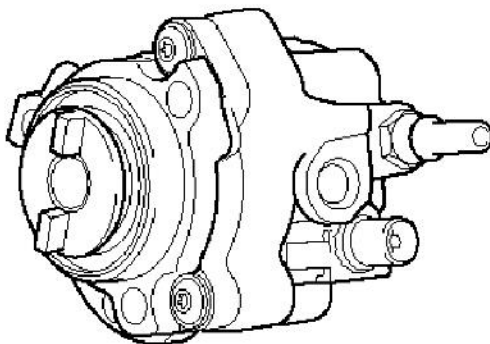
Le régulateur de pression module la haute pression dans la rampe en fonction des phases de fonctionnement.

L'amortisseur de pulsations est placé sur la tubulure d'alimentation de la pompe basse pression.

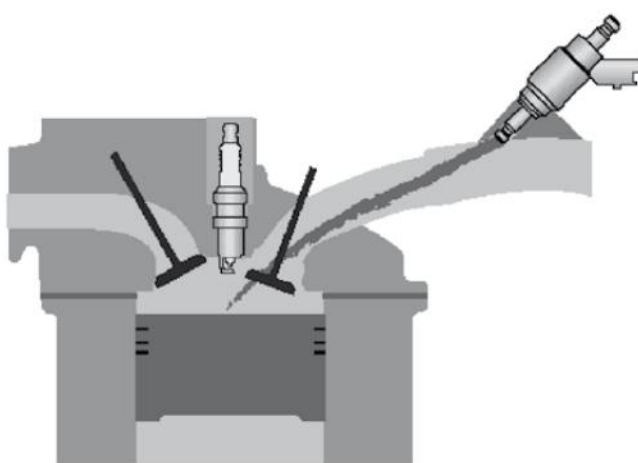
Il porte la valve Schrader utilisée pour certaines mesures ou pour faire chuter la pression.

Figure 14.17 Pompe haute pression et rampe commune.

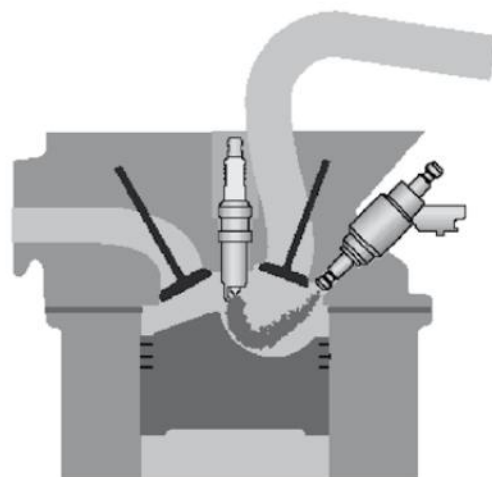
- a** rampe d'injection commune ;
- b** entrée haute pression ;
- c** injecteurs ;
- d** capteur haute pression ;
- e** régulateur de pression ;
- f** tube de décharge.



Analyse fonctionnelle



Injection indirecte



Injection directe

Figure 14.18 Injections directe et indirecte essence.

Dans un moteur à injection indirecte, le carburant est injecté dans la tubulure d'admission en amont des soupapes d'admission. La quantité injectée est toujours dosée pour obtenir un mélange homogène proche du rapport stœchiométrique (richesse 1).

Dans le moteur à injection directe, le carburant est injecté dans le cylindre. Suivant le mode de fonctionnement, le point d'injection varie entre le début admission et la fin de compression.

La quantité injectée dépend également du mode de fonctionnement.

On distingue deux modes de fonctionnement (figure 14.19) :

- » Le mode stratifié pauvre (B).
- » Le mode homogène (A).

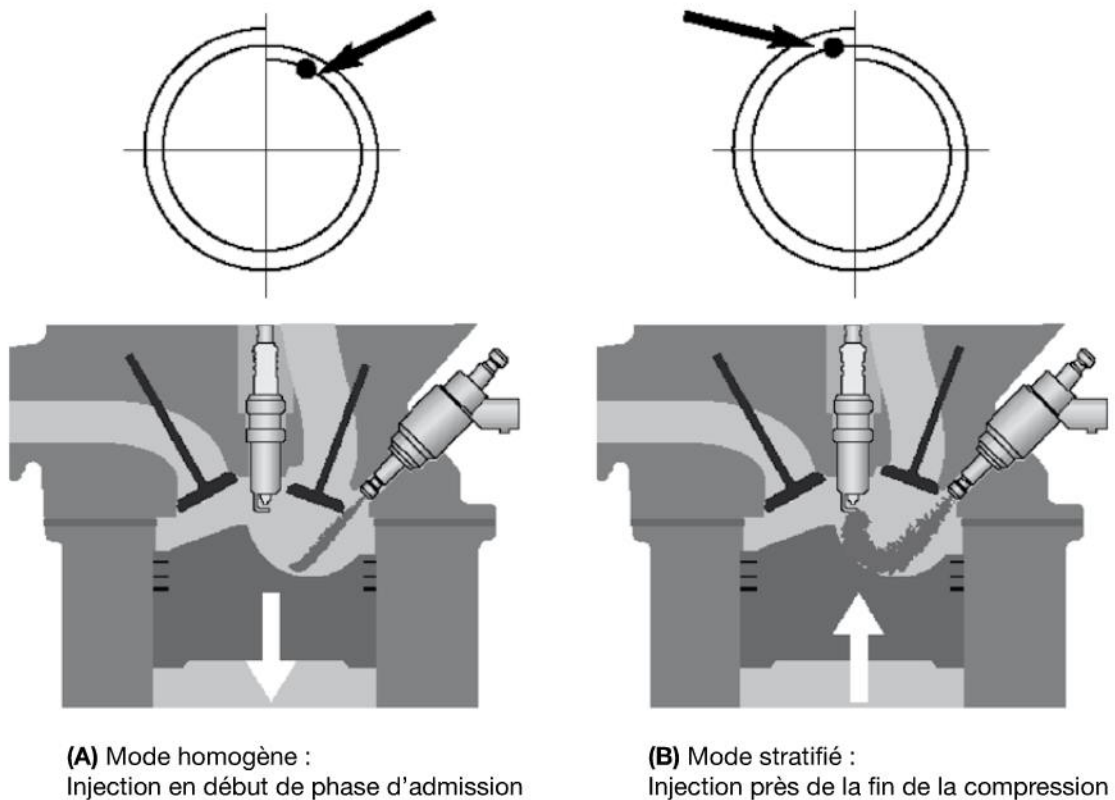


Figure 14.19 Deux modes de fonctionnement.

Fonctionnement en mode stratifié (B)

Dans ce cas, la richesse de fonctionnement du moteur est très nettement inférieure à 1. Afin d'assurer un déclenchement correct de la combustion, la charge est alors concentrée autour de la

bougie grâce à l'aérodynamique interne de la chambre de combustion : c'est la stratification. Ce procédé peut être employé uniquement pour les fonctionnements en faible charge ou charge partielle.

Avantages :

- » Le papillon des gaz reste ouvert, et le couple moteur est fonction de la quantité injectée. Ceci diminue les pertes par pompage.

Inconvénients :

- » Le mélange étant très pauvre, le taux de NOx dans les gaz d'échappement est élevé et nécessite donc un traitement compliqué (stockage des NOx + régénération). En Europe, la trop grande proportion de soufre dans l'essence compromet le traitement des NOx.
- » Ceci peut être nettement amélioré en remplaçant l'excès d'air par des gaz d'échappement grâce à un fort taux de recyclage EGR.
- » Il n'y a plus de dépression dans la pipe d'admission pour le servofrein.

Fonctionnement en mode homogène (A)

La richesse du mélange est maintenue à 1. L'injection se déroule principalement en phase admission. Le couple est directement fonction de l'ouverture du papillon des gaz.

Avantages :

- » La gestion du mélange dans la chambre de combustion est plus aisée.
- » Le fonctionnement à un lambda de 1 facilite la dépollution.

Inconvénients :

- » On ne bénéficie plus du gain de consommation lié à l'ouverture totale du papillon des gaz.

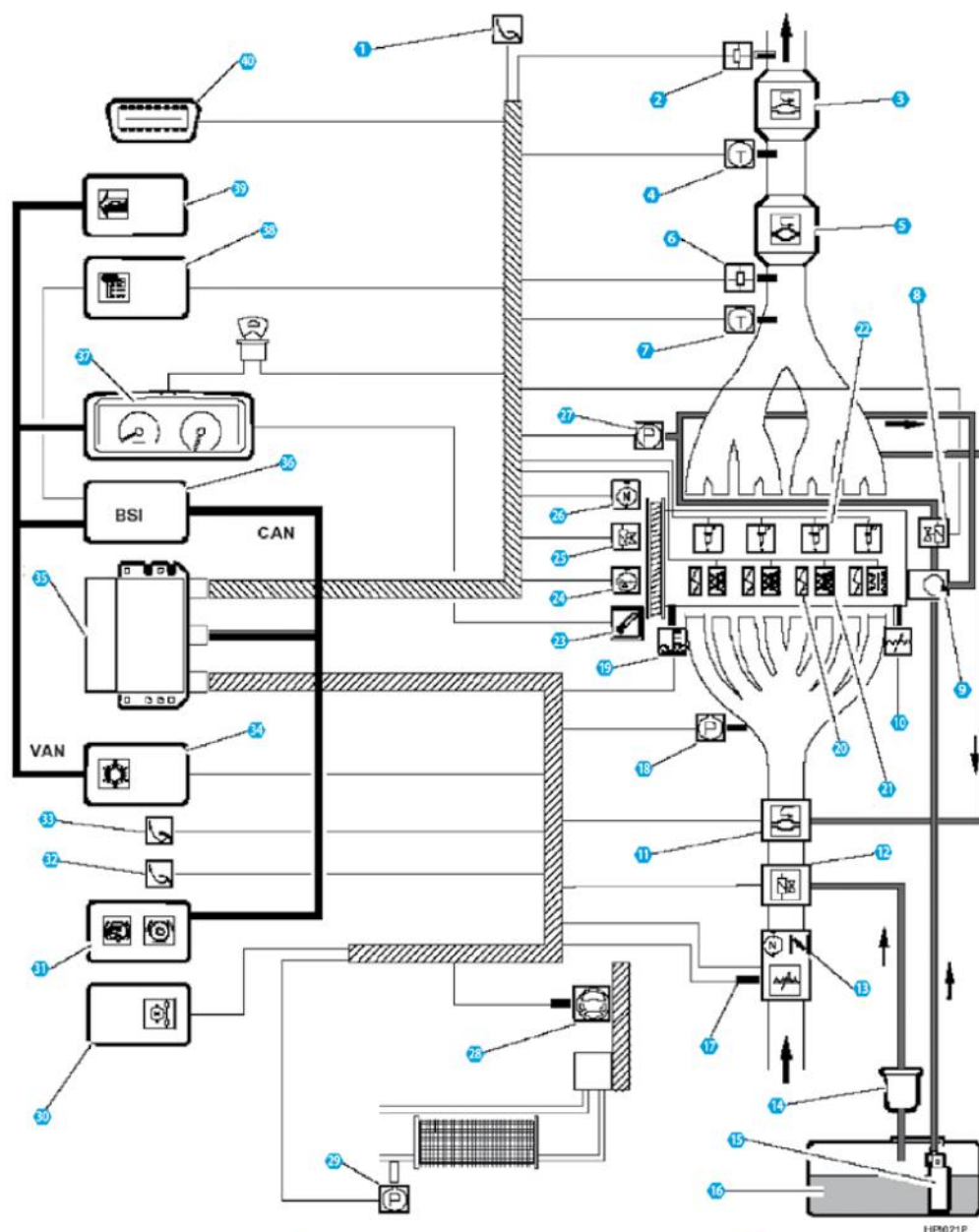


Figure 14.20 Synoptique général
(Document PSA).

- 1 Capteur de position de pédale d'accélérateur ;
- 2 Sonde à oxygène aval ;
- 3 Pot catalytique ;
- 4 Capteur de température gaz d'échappement aval ;
- 5 Précatalyseur ;
- 6 Sonde à oxygène amont ;
- 7 Capteur de température gaz d'échappement amont ;
- 8 Régulation haute pression carburant ;
- 9 Pompe haute pression carburant ;
- 10 Capteur de cliquetis ;
- 11 Vanne de recyclage des gaz d'échappement (EGR) ;

- 12 Électrovanne de purge canister ;
- 13 Boîtier papillon motorisé ;
- 14 Canister ;
- 15 Pompe de gavage (basse pression) + filtre à carburant + régulateur de pression carburant (circuit basse pression carburant) ;
- 16 Réservoir à carburant ;
- 17 Sonde température d'air ;
- 18 Capteur de pression tubulure d'admission ;
- 19 Sonde de température d'eau moteur ;
- 20 Bougies d'allumage ;
- 21 Boîtier bobines compact ;
- 22 Injecteurs ;
- 23 Sonde de température d'huile moteur ;
- 24 Capteur de régime moteur ;
- 25 Électrovanne de commande du déphaseur d'arbre à cames

- 26 Capteur de position arbre à cames ;
- 27 Capteur haute pression carburant ;
- 28 Manocontact de direction assistée ;
- 29 Capteur pression circuit de réfrigération ;
- 30 Motoventilateur(s) ;
- 31 Bloc ABS ;
- 32 Contacteur pédale d'embrayage ;
- 33 Contacteur pédale de frein ;
- 34 Calculateur de climatisation ;
- 35 Calculateur d'injection ;
- 36 Boîtier de servitude intelligente ;
- 37 Combiné : compte-tours électronique + voyant diagnostic + voyant d'alerte température d'eau moteur ;
- 38 Antidémarrage électronique ;
- 39 Fonction régulation de vitesse ;
- 40 Prise diagnostic centralisée.

14.3 L'injection Diesel

Mise en situation

Depuis le premier moteur Diesel inventé par Rudolf Diesel en 1897, ce type de moteur n'a cessé d'évoluer. Aujourd'hui les motoristes sont contraints de mettre sur le marché des moteurs moins polluants, moins bruyants, moins gourmands en carburant mais à l'inverse ils doivent être de plus en plus performants.

Les dispositifs d'injection Diesel ont pour points communs de fournir à la chambre de combustion :

- » du gazole pulvérisé et réparti,
- » un moment d'injection précis,
- » une quantité injectée adaptée.

Ces conditions doivent être remplies :

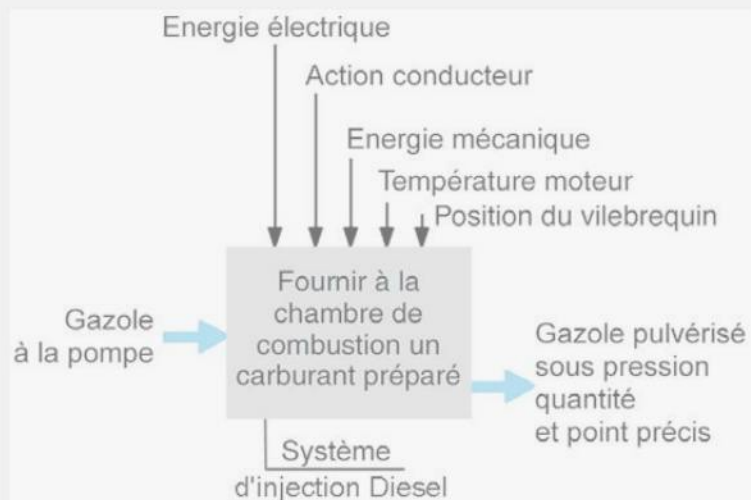
- » au départ à froid,
- » à l'accélération,
- » en conduite économique,
- » au ralenti.

175

- 14 - Les systèmes d'injection

Fonction

Figure 14.21 Fonction globale des systèmes d'injection Diesel. Actigramme A-O.



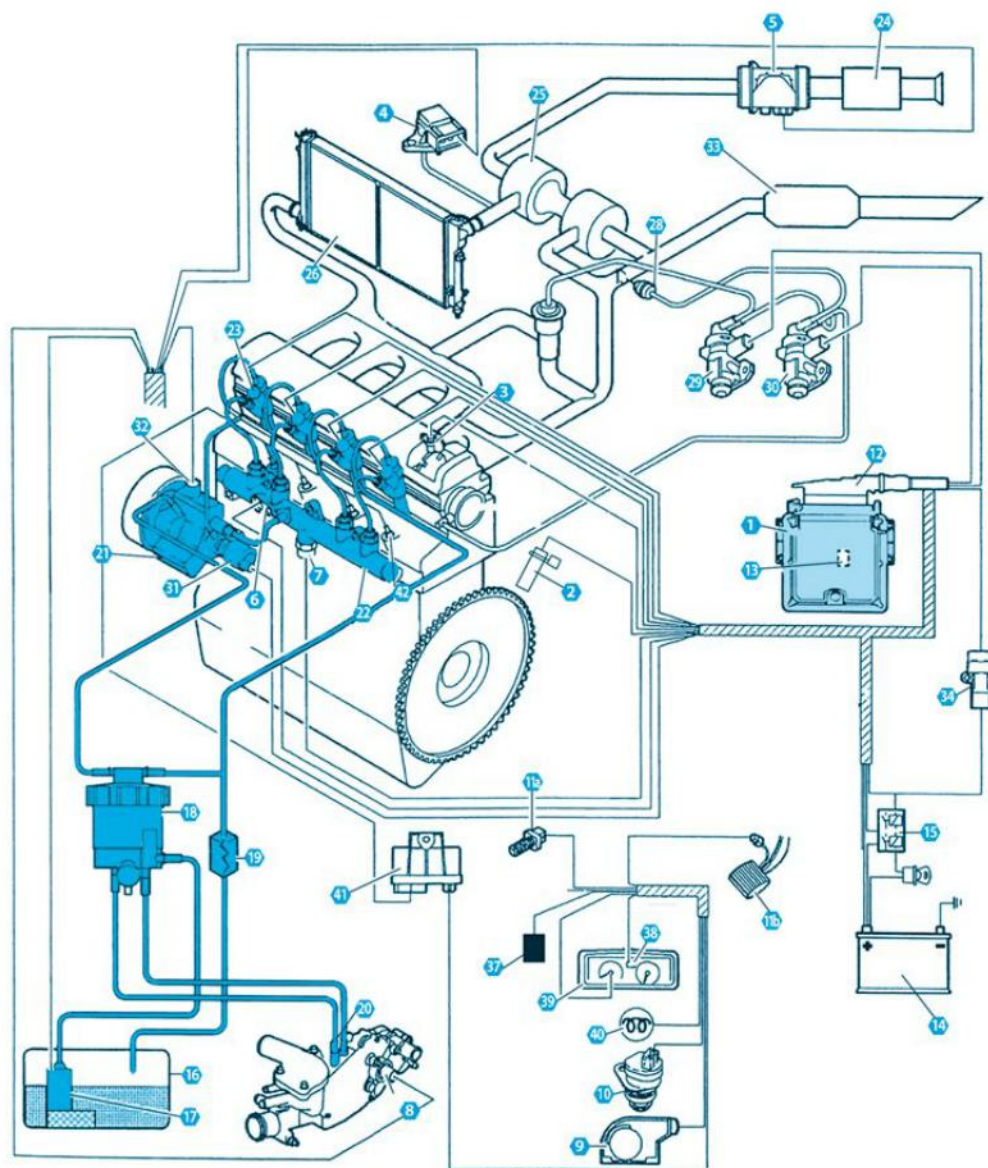


Figure 14.22 Organisation de la gestion d'un moteur à injection directe à rampe commune (document Citroën).

- 1 Calculateur de gestion moteur.
- 2 Capteur de régime moteur
- 3 Capteur de position arbre à cames.
- 4 Capteur pression tubulure d'admission.
- 5 Débitmètre d'air.
- 6 Sonde de température combustible.
- 7 Capteur haute pression combustible.
- 8 Sonde de température d'eau.
- 9 Capteur pédale d'accélérateur.
- 10 Capteur de vitesse véhicule.
- 11 a et b Contacteur pédale de frein.
- 12 Connexion 88 bornes.
- 13 Capteur de pression atmosphérique.

- 14 Batterie.
- 15 Relais double injection.
- 16 Réservoir à combustible.
- 17 Pompe à combustible.
- 18 Filtre à combustible et régulateur de basse pression.
- 19 Refroidisseur de combustible.
- 20 Réchauffeur de combustible.
- 21 Pompe haute pression.
- 22 Rampe d'injection commune haute pression.
- 23 Injecteurs.
- 24 Filtre à air.
- 25 Turbocompresseur.
- 26 Échangeur thermique air/air.
- 28 Capsule de commande soupape régulatrice de suralimentation.
- 29 Électrovanne de régulation de recyclage (EGR).

- 30 Électrovanne de régulation de pression de suralimentation.
- 31 Régulateur haute pression combustible.
- 32 Désactivateur du 3^e piston de pompe haute pression.
- 33 Ligne d'échappement.
- 34 Interrupteur à inertie.
- 37 Antidémarrage électronique.
- 38 Information consommation.
- 39 Compte-tours.
- 40 Voyant de préchauffage.
- 41 Boîtier de pré/postchauffage.
- 42 Bougies de préchauffage.

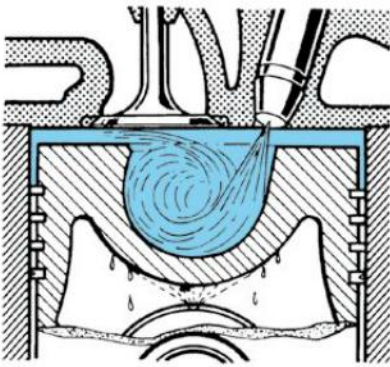


Figure 14.23 Carburant pulvérisé, dosé et réparti.

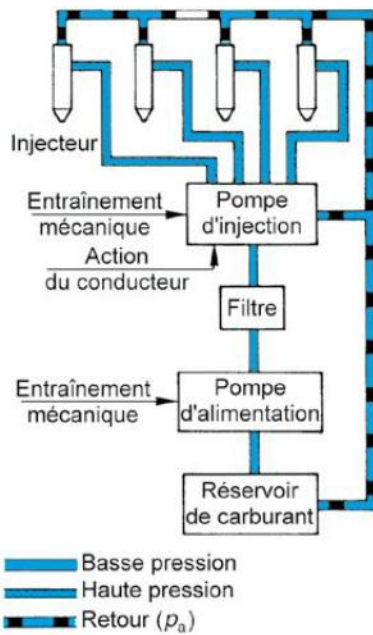


Figure 14.24 Schéma de principe des circuits d'injection classiques.

Principales qualités demandées aux systèmes d'injection :

- » Le carburant doit être parfaitement dosé.
- » Le carburant doit être soumis à une pression adaptée favorisant sa pulvérisation dans des conditions précises : finesse, vitesse de pénétration et forme du jet (figure 14.23).
- » La répartition des microgouttelettes doit être uniforme dans toute la chambre.
- » Le début d'injection doit être déclenché à des moments précis variables, notamment en fonction de la fréquence de rotation du vilebrequin.
- » La durée d'injection doit être précise mais variable en fonction de nombreux paramètres, notamment la charge du moteur.

On peut distinguer :

- » les moteurs à injection indirecte (en voie de disparition),
- » les moteurs à injection directe : classiques (véhicules industriels) ou à rampe commune (*common rail*).

Principe de fonctionnement du moteur à injection indirecte : La pompe d'injection mécanique synchronisée avec le vilebrequin refoule le carburant correctement dosé vers les injecteurs dans l'ordre d'allumage.

L'injection s'effectue dans une chambre de précombustion ménagée en un point chaud de la culasse. Les pressions d'injection se situent aux environs de 130 à 150 bars.

Du fait des pressions de fin de compression peu élevées, le départ à froid nécessite l'action de bougies de préchauffage : résistances électriques débouchant dans la chambre de précombustion.

Analyse structurelle

Le principe de base est le même que celui de l'injection séquentielle sur un moteur essence.

- » Seules des adaptations ont été nécessaires, étant donné les hautes pressions en présence.
- » Des capteurs mesurent les conditions de fonctionnement du moteur.
- » Un calculateur reçoit et traite les informations, puis envoie des ordres de commande :
 - aux actionneurs principaux,
 - aux actionneurs secondaires,
 - aux interfaces avec les autres systèmes.

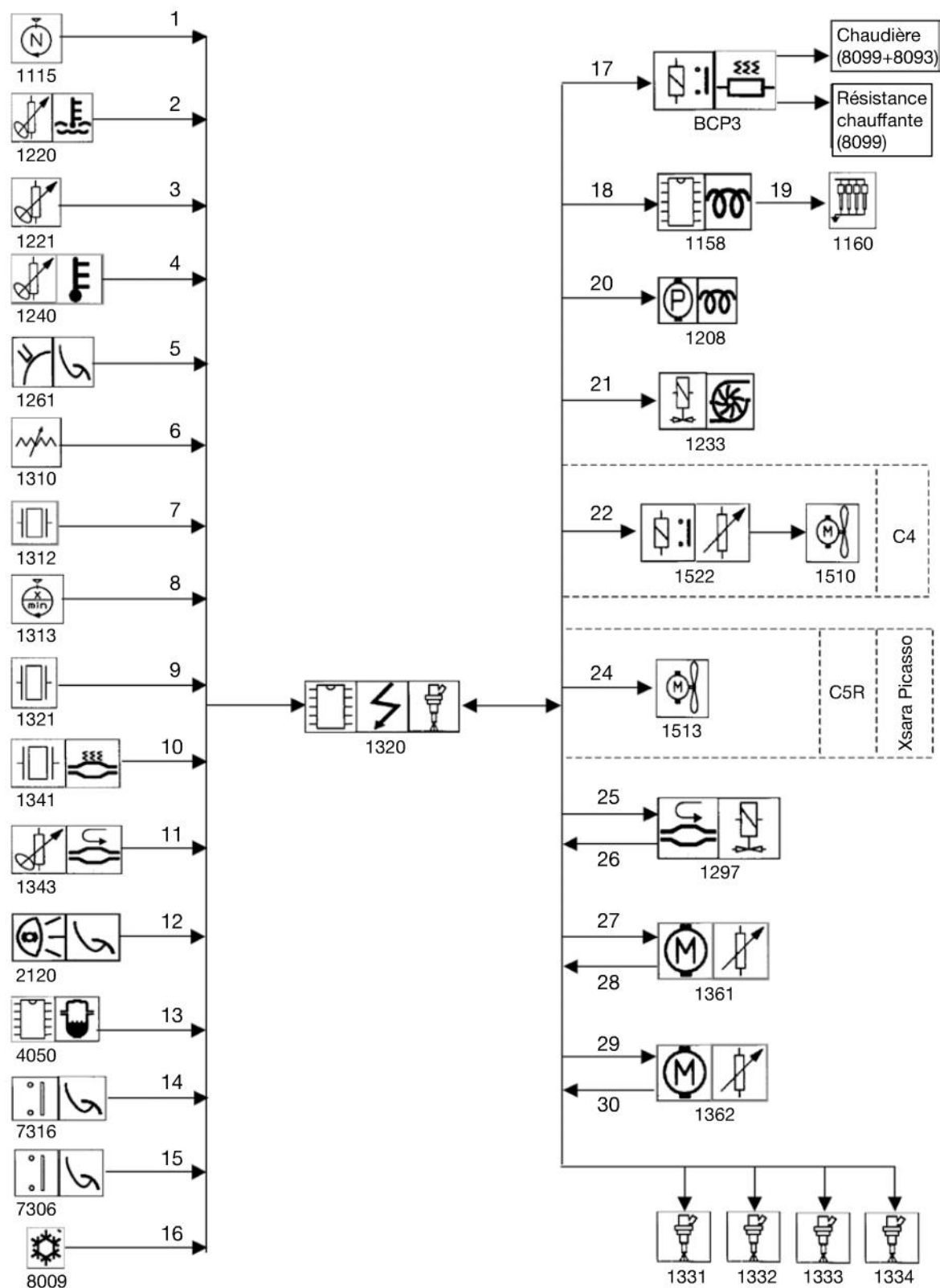


Figure 14.25 Synoptique
entrée/sortie
du calculateur (Document PSA).

N° électrique	Organes	N° électrique	Organes
BCP3	Boîtier de commutation protection 3 relais (chauffage additionnel) (brûleur ou CTP)	1331	Injecteur cylindre n° 1
1115	Capteur référence cylindre	1332	Injecteur cylindre n° 2
1158	Boîtier de commande pré/postchauffage	1333	Injecteur cylindre n° 3
1160	Bougies de préchauffage	1334	Injecteur cylindre n° 4
1208	Pompe injection Diesel (régulateur débit carburant)	1341	Capteur pression différentielle filtre à particules
1220	Sonde de température d'eau moteur	1343	Capteur température gaz d'échappement aval
1221	Thermistance gazole	1361	Papillon réchauffeur air d'admission
1233	Électrovanne de régulation de pression turbocompresseur	1362	Papillon « EGR »
1240	Capteur température air admission	1510	Groupe motoventilateur (relais)
1261	Capteur position pédale accélérateur	1513	Groupe motoventilateur (hacheur)
1297	Électrovanne EGR à commande électrique.	1522	Boîtier électrique de commande GMV bivitresse
1310	Débitmètre air et température air	2120	Contacteur bifonction frein
1312	Capteur pression d'air admission	4050	Sonde présence d'eau dans le gazole
1313	Capteur de régime moteur	7306	Contacteur de sécurité régulateur de vitesse (embrayage)
1320	Calculateur moteur	7316	Contacteur limiteur de vitesse (LVV)
1321	Capteur pression gazole	8009	Capteur pression linéaire du fluide réfrigérant

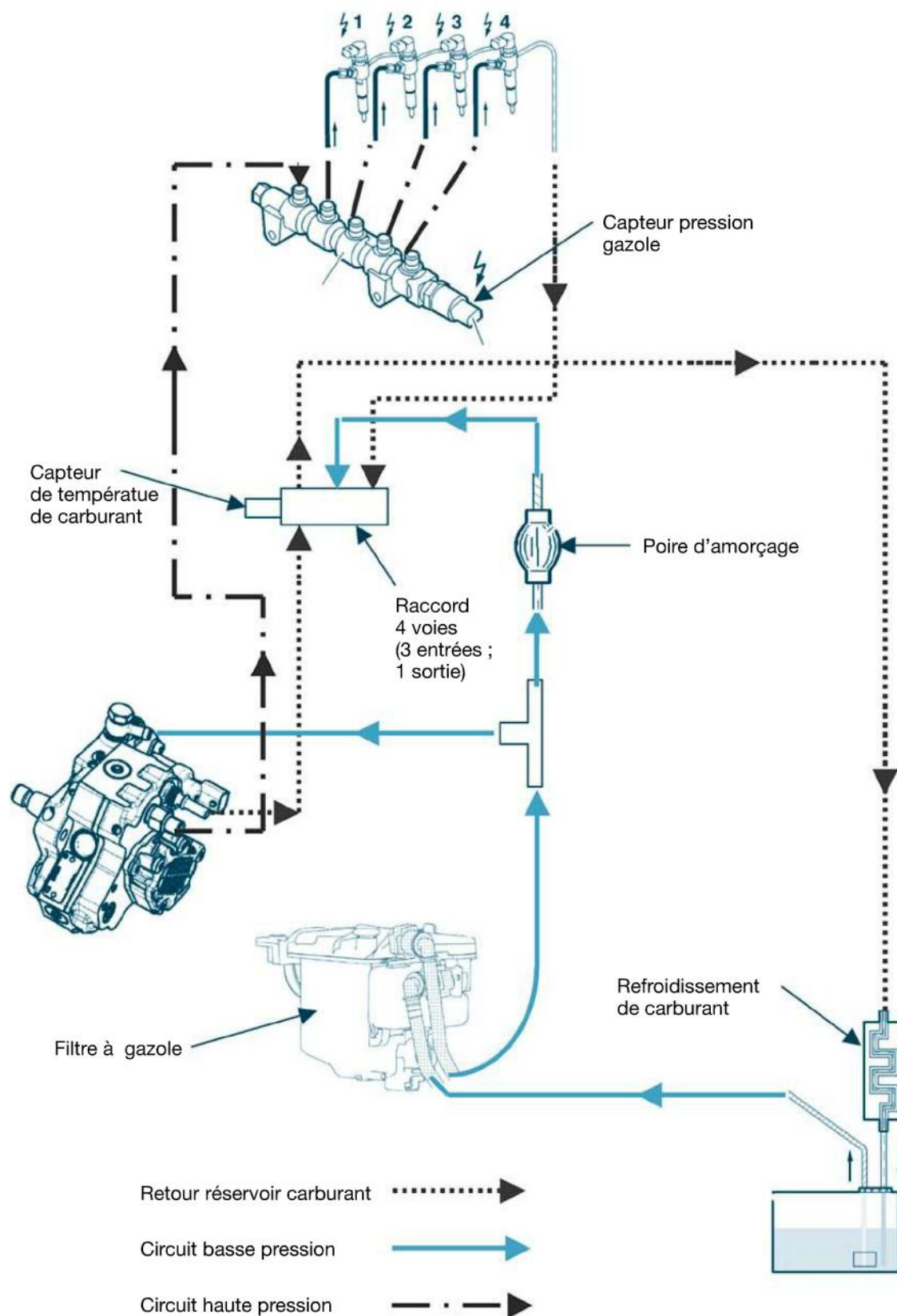


Figure 14.26 Le circuit de carburant.

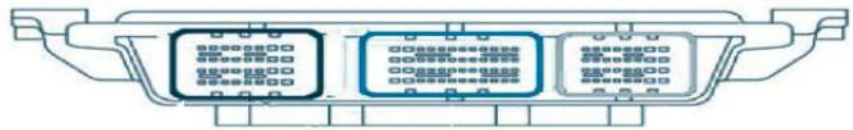
Le calculateur

Le calculateur assure la gestion de l'ensemble du système.

Le calculateur reçoit les signaux électriques des capteurs, les traite et les transforme en ordres ou informations destinées aux :

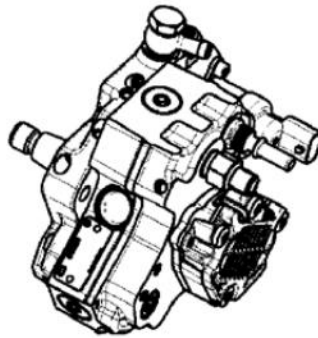
- » actionneurs principaux, régulateur (pression, débit), injecteurs ;
- » actionneurs secondaires (électrovannes de commande vanne et papillon EGR...) ;
- » interfaces avec d'autres systèmes (ABS, ESP, VAN...).

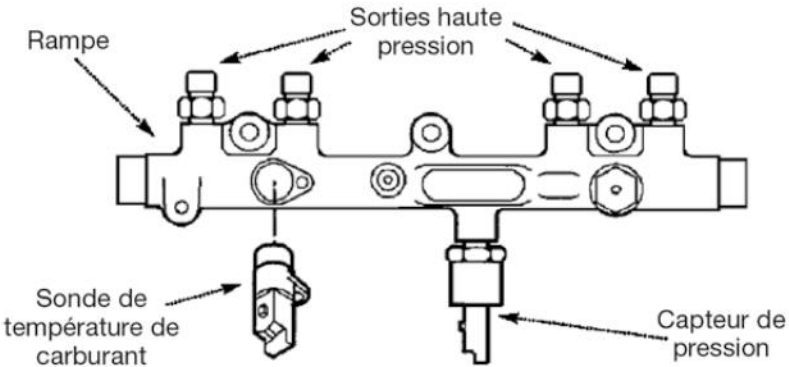
Figure 14.27 *Le calculateur.*

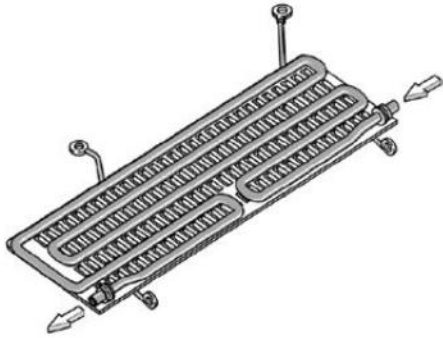
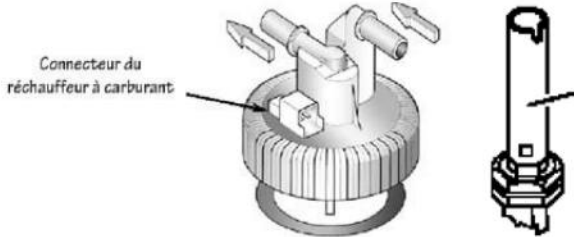


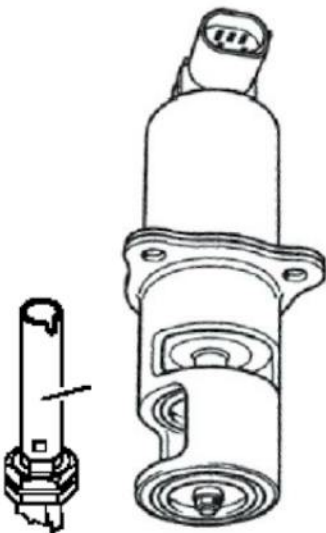
Les principaux capteurs et actionneurs

181

Capteurs et actionneurs	Figure	Fonction
Les injecteurs		Les injecteurs sont de type piézo-électrique. Ils pulvérisent le carburant nécessaire au fonctionnement du moteur. Ils sont commandés électriquement par le calculateur d'injection. Ils comportent 5 trous, permettant ainsi de favoriser le mélange air-carburant.
La pompe haute pression		La pompe haute pression permet d'acheminer le gazole du réservoir à l'aide de la pompe de transfert puis de comprimer la quantité de gazole déterminée par le calculateur moteur par la pompe haute pression.

La rampe commune (Common rail)	 Sorties haute pression Rampe Sonde de température de carburant Capteur de pression	
Régulateur de pression		Le régulateur haute pression carburant permet de réguler la pression de carburant en sortie de pompe haute pression carburant. Le régulateur haute pression carburant comprend deux circuits de contrôle de la pression : le circuit électrique : le calculateur agit directement sur la haute pression commandant l'électro-aimant du régulateur haute pression carburant, le circuit mécanique : permet d'assurer une pression minimum et d'amortir les pulsations.
Actuateur de débit		L'actuateur de débit carburant permet de réguler la pression rail en dosant le débit admis par la pompe haute pression.
Le capteur pression de rampe		Le capteur de pression gazole permet de piloter en boucle fermée la consigne de pression de rampe voulue par le calculateur.

Le capteur température gazole		Il permet au calculateur d'injection en fonction de l'information reçue : d'ajuster le débit carburant, de calculer la densité du carburant. C'est un capteur CTN fixé sur le rail.
Le débitmètre d'air		Le débitmètre informe le calculateur de la quantité d'air entrant dans le moteur et de la température de l'air entrant dans le moteur.
Le capteur de charge		Ce capteur est composé de deux potentiomètres. Il transforme le souhait du conducteur en information « charge » au calculateur.
Le refroidisseur de carburant		La pompe haute pression lamine le carburant provenant de la pompe de transfert : la température du carburant s'élève. Le refroidisseur de carburant refroidi le carburant lors du retour au réservoir.
Le réchauffeur de carburant	 Connecteur du réchauffeur à carburant	Un élément thermostatique est intégré au filtre et permet la dérivation du gazole vers le réchauffeur.

Vanne EGR		Contrôler la quantité de gaz d'échappement recyclé. Le dispositif de recyclage des gaz d'échappement (EGR) permet de diminuer la quantité d'oxydes d'azote (NOx) rejetée par l'échappement. La diminution des oxydes d'azote est effectuée en réinjectant une partie des gaz d'échappement dans les cylindres.
------------------	---	---

Les autres capteurs et actionneurs sont identiques à l'injection essence.

Analyse fonctionnelle

Le carburant est aspiré par une pompe électrique de pré-alimentation ou pompe de gavage immergée dans le réservoir. Elle refoule le carburant sous une faible pression (2 bars environ) vers le filtre à carburant dont la partie régulateur permet de maintenir une pression sensiblement constante.

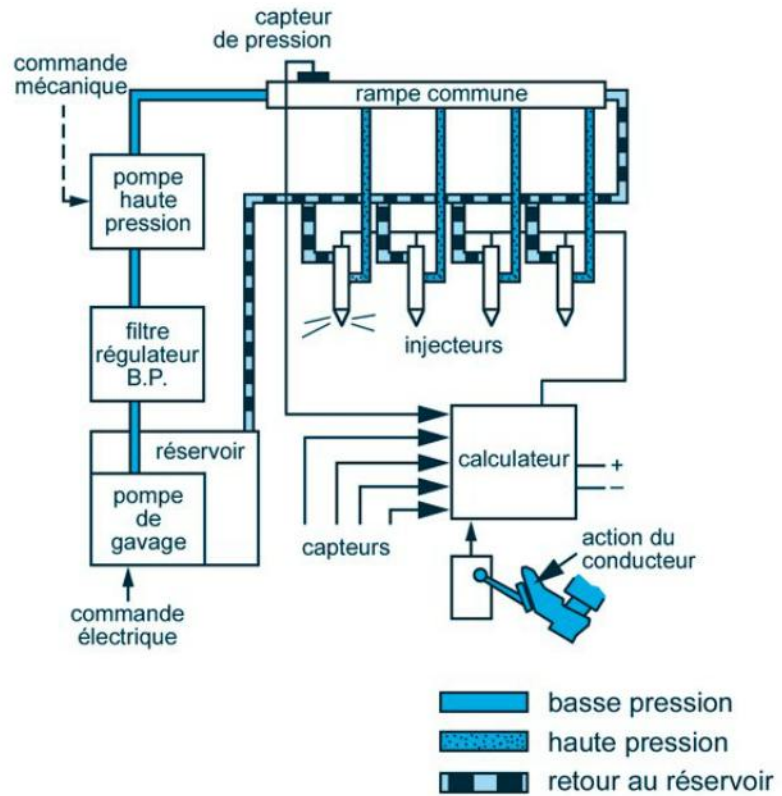
À noter

Si la pompe haute pression possède une pompe de transfert, il n'y a pas de pompe électrique dans le réservoir.

La pompe haute pression à pistons radiaux – dont la synchronisation avec le vilebrequin n'a pas d'incidence sur le point d'injection – refoule le carburant vers la rampe commune et les tuyauteries d'injecteurs. Les valeurs dans la partie haute pression peuvent atteindre 1 500 bars.

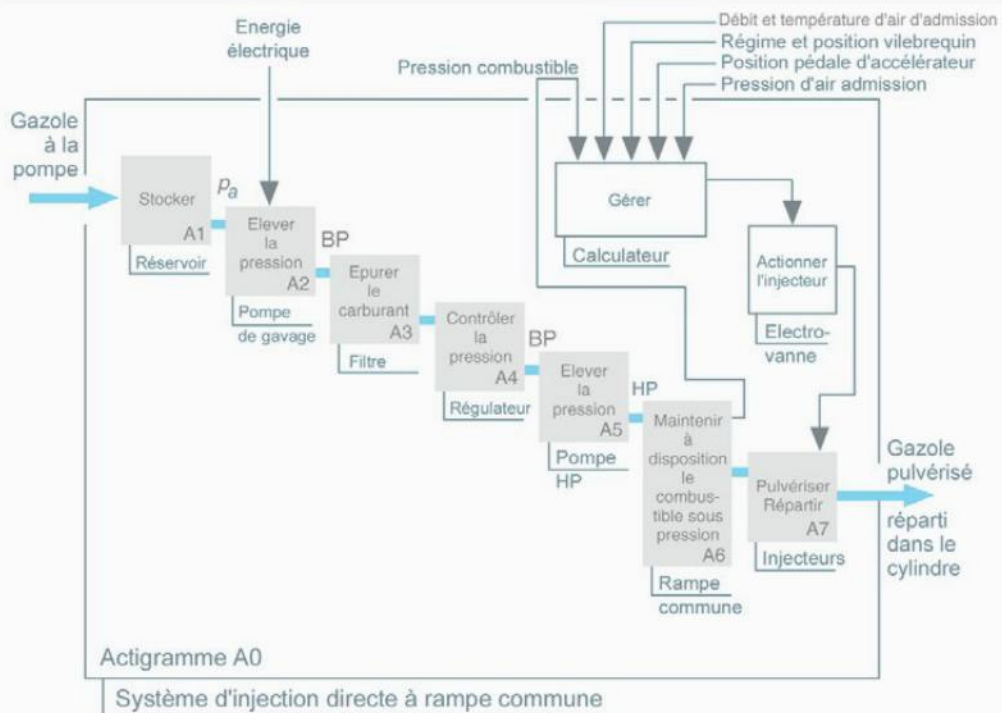
Les injecteurs à commande électromagnétique ou piézo-électrique s'ouvrent et se ferment sous l'impulsion d'un courant électrique géré par le calculateur électronique. Le point d'injection et la durée sont gérés par de nombreux paramètres : régime et position du vilebrequin, débit, pression et température de l'air d'admission, température et pression du combustible, position de la pédale d'accélérateur, etc.

Figure 14.28 Schéma de principe du circuit d'injection directe à rampe commune.



Fonction

Figure 14.29 Analyse systémique des systèmes d'injection directe à rampe commune.



Les avantages de ce système

- Le carburant est disponible en permanence sous haute pression à l'entrée de l'injecteur, donc diminution et régularité du délai d'injection.
- Le moment d'injection est commandé sur les injecteurs qui pulvérisent sous haute pression directement dans la chambre de combustion, d'où précision du point d'injection et diminution du délai d'allumage par une meilleure pulvérisation et un meilleur brassage.



Ces dispositions ont pour conséquence :

- » une augmentation sensible de la puissance et du couple moteur,
- » une diminution de la consommation et de la pollution,
- » un meilleur rapport masse/puissance,
- » un démarrage quasi instantané.

186

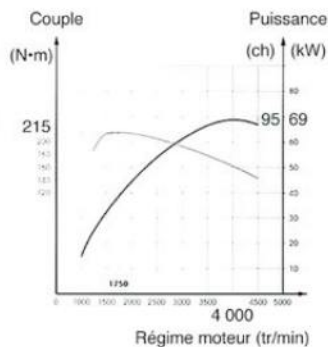


Figure 14.30 Moteur Diesel à rampe commune « haute pression » (Document Citroën, ici, HDi 95 ch).

Principe de fonctionnement de la pompe haute pression

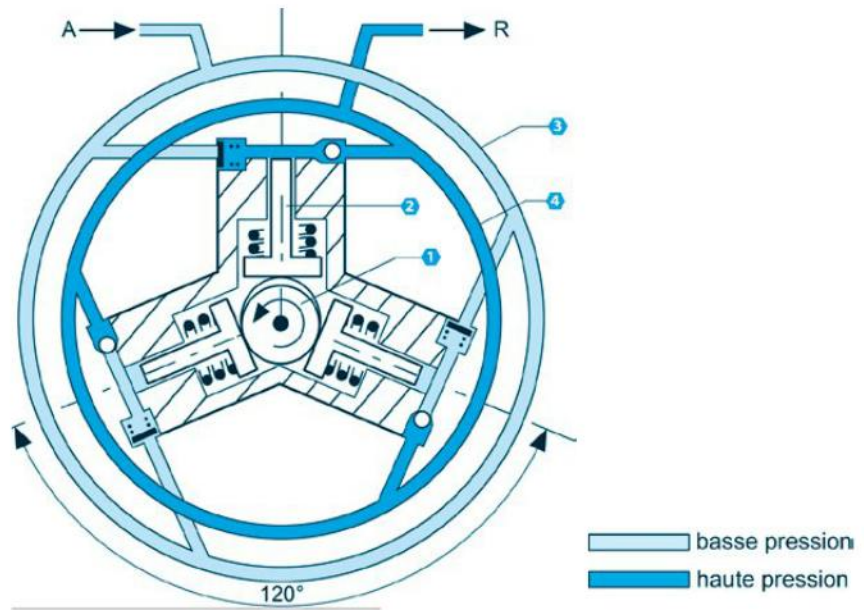
Le carburant arrive au point A sous une pression de transfert. Il provient de la pompe d'alimentation à palette incorporée dans la pompe elle-même. La quantité de carburant admise est dosée par une électrovanne de contrôle volumétrique commandée par le calculateur en fonction des besoins du moteur. La pompe comporte un collecteur d'admission et un collecteur de refoulement circulaires communs aux trois éléments de pompage qui sont disposés radialement et calés à 120 degrés l'un de l'autre. Les pistons sont actionnés successivement en fonction de la rotation de l'excentrique central. Chaque élément de pompage fonctionne selon le principe des pompes aspirantes et refoulantes simples.

- » Le piston descend en créant une baisse de pression, le clapet d'aspiration s'ouvre, celui de refoulement se ferme.
- » Le piston remonte, le clapet d'aspiration se ferme, celui de refoulement s'ouvre. Le carburant est refoulé vers la rampe commune.

La rampe commune comporte un capteur de haute pression. Celui-ci informe le calculateur qui réduit plus ou moins l'arrivée du carburant grâce à l'électrovanne de contrôle volumétrique.

Figure 14.31 Schéma simplifié de la pompe haute pression.

- ① Excentrique.
- ② Piston.
- ③ Canalisation d'admission.
- ④ Canalisation de roulement.
- A. Admission sous pression de transfert.
- R. Refoulement haute pression.

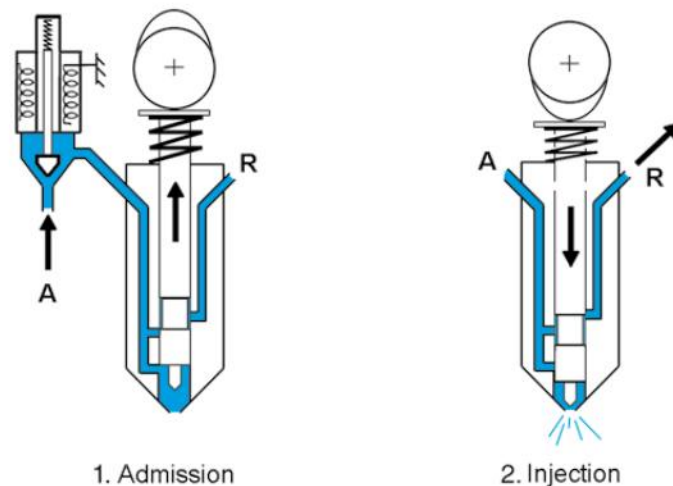


Certains moteurs peuvent être équipés d'injecteurs-pompes.

Chaque élément est fixé sur la culasse, commandé par un arbre à cames et débouche dans la chambre de combustion. L'avantage réside dans l'absence de canalisation, d'où une diminution du délai d'injection.

Figure 14.32 Injecteur-pompe.

- ① Admission : le piston recule, le gazole pénètre dans la chambre de pression.
- ② Injection : le liquide emprisonné est propulsé sous haute pression.



Principales familles d'injecteurs

On peut distinguer :

- » les injecteurs à téton pour moteurs à injection indirecte (figure 14.33),
- » les injecteurs à trou pour moteurs à injection directe (figures 14.34 et 14.35).

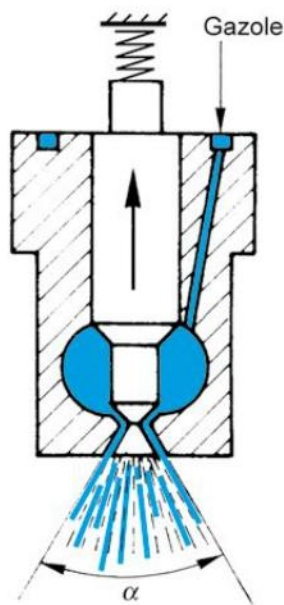


Figure 14.33 Injecteur à téton.
 α = angle de diffusion.

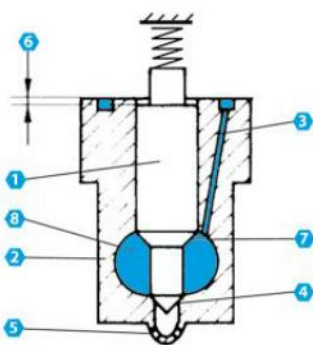


Figure 14.34 Injecteur à trou.

- ① Aiguille.
- ② Corps d'injecteur.
- ③ Canal d'arrivée du combustible.
- ④ Siège d'aiguille ou cône d'étanchéité.
- ⑤ Trous de pulvérisation.
- ⑥ Levée d'aiguille.
- ⑦ Cône de soulèvement de l'aiguille.
- ⑧ Chambre de pression.

Ces injecteurs peuvent être électrocommandés. Leur commande peut être :

- » électromagnétique,
- » piézo-électrique.

Principe de fonctionnement d'un injecteur (figure 14.34) :

L'injecteur comporte une aiguille ① dont la pointe possède une forme en rapport avec le type de jet souhaité. Cette aiguille est maintenue sur son siège par la poussée d'un ressort taré en fonction de la pression d'injection que l'on veut obtenir. Le carburant venant de la pompe est introduit dans la chambre de pression ⑧. Lorsque la pression du carburant devient supérieure à la force pressante exercée par le ressort, l'aiguille se soulève et l'injection commence. Dès que la pression devient inférieure à la force du ressort, l'injection s'arrête. La pression d'injection est donc fonction du tarage du ressort qui peut être modifié en fonction du type de moteur.

Principe de fonctionnement d'un injecteur piézo-électrique :

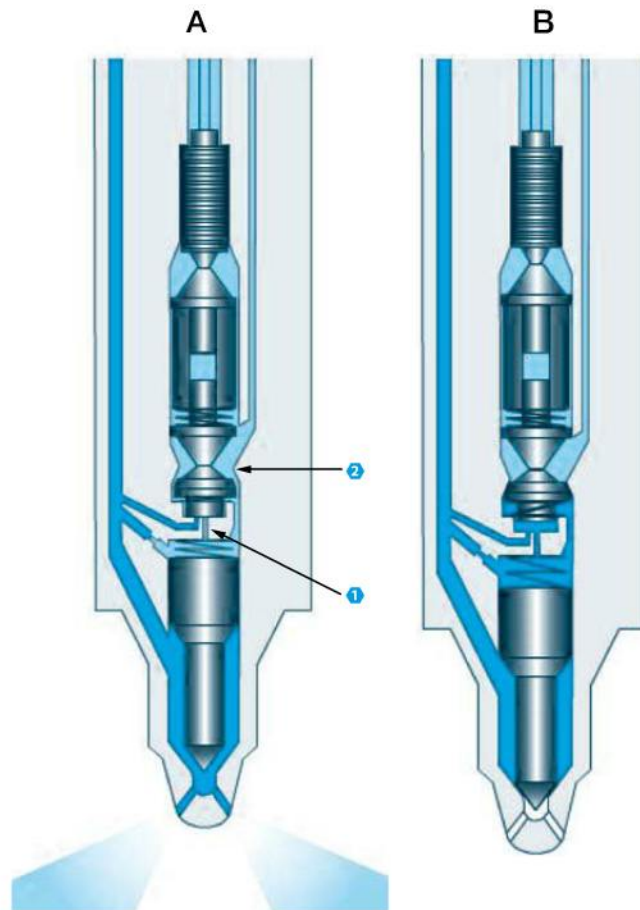
Étapes pour l'ouverture (Figure 14.35a) :

- » Charge de l'actionneur piézo-électrique.
- » Ouverture de la valve champignon par l'actionneur :
 - Fermeture de l'orifice du conduit d'alimentation additionnel wet ouverture de l'orifice de fuite ② (Figure 14.35a) ;
 - La pression au-dessus de l'aiguille chute ;
 - La pression dessous l'aiguille est supérieure : l'aiguille se soulève.

Étapes pour la fermeture (Figure 14.35b) :

- » Décharge de l'actionneur piézo-électrique.
- » Retour de la valve champignon sur son siège :
 - Ouverture de l'orifice du conduit d'alimentation additionnel et fermeture de l'orifice de fuite ;
 - Le carburant remplit la chambre au-dessus de l'aiguille par le conduit additionnel + par l'orifice d'alimentation classique (= + de rapidité à la fermeture) ;
 - La pression dessous l'aiguille est plus faible : l'aiguille se ferme.

Figure 14.35 *Injecteur piezo-électrique.*



189

Principe de fonctionnement du système de pré-postchauffage : Le boîtier de préchauffage commande électriquement les bougies de préchauffage en fonction de la demande du calculateur.

Les temps de pré-postchauffage sont déterminés par le calculateur d'injection en fonction de la température de l'eau moteur.

Fonction

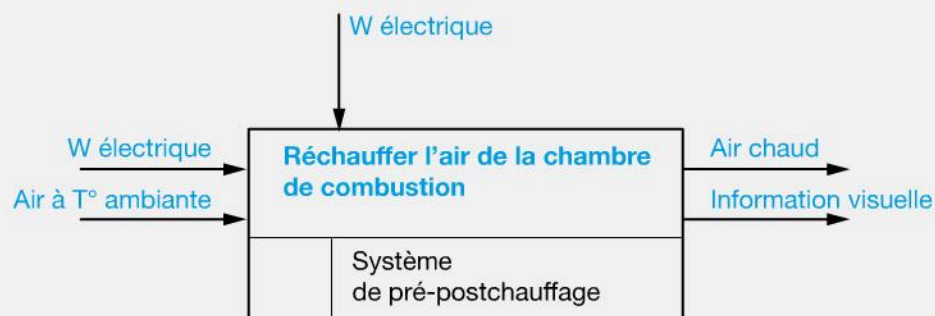
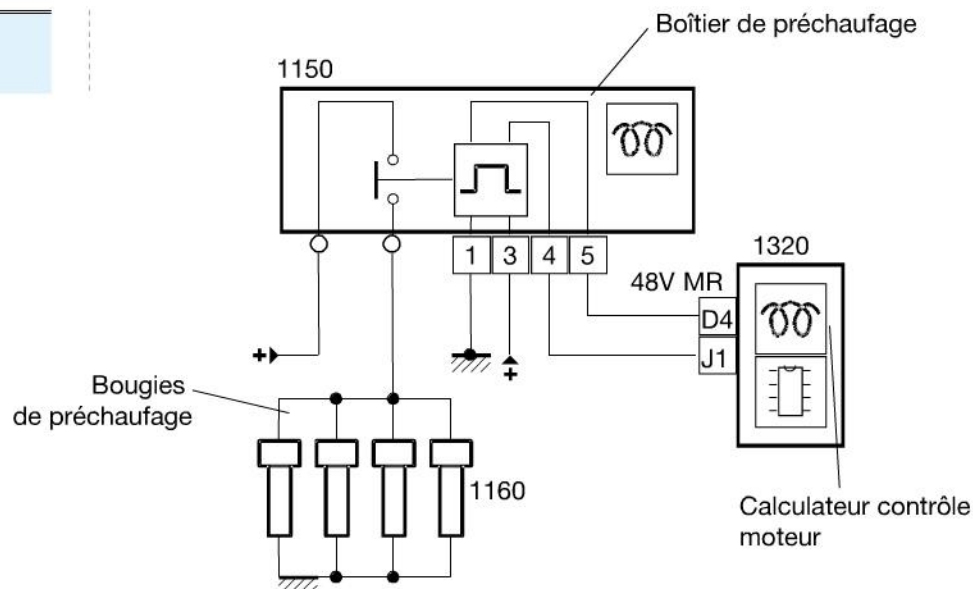


Figure 14.36 Système de pré-postchauffage.



Fonctionnement du préchauffage : Le temps de préchauffage varie en fonction de la température de l'eau moteur. Pendant la phase démarrage, les bougies de préchauffage sont alimentées dans les cas suivants :

- » température de l'eau moteur inférieure à 20 °C,
- » moteur tournant à plus de 70 tr/min pendant 0,2 seconde.

Nota : Après extinction du voyant, si le démarreur n'est pas sollicité, les bougies de préchauffage restent alimentées pendant un maximum de cinq secondes.

Fonctionnement du postchauffage : Le postchauffage permet de prolonger le fonctionnement des bougies de préchauffage après la phase de démarrage.

Le postchauffage permet de diminuer les émissions polluantes dans les premières minutes suivant le démarrage, mais surtout de réduire les fumées bleues à froid et en altitude.

Les bougies de préchauffage assurent le réchauffage de la chambre de combustion. Elles permettent une montée en température rapide de la chambre de combustion.

Le filtre à particules

Le filtre à particules est conçu pour réduire la pollution des véhicules Diesel en filtrant les éléments solides des gaz d'échappement.

Les suies provenant de l'échappement, les cendres issues de l'huile moteur et les particules provenant de l'usure moteur s'accumulent dans le filtre à particules.

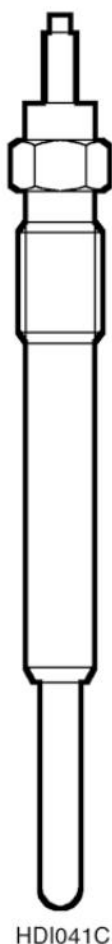


Figure 14.37 Bougie de préchauffage.

À terme le filtre à particules se colmate.

La régénération consiste à brûler périodiquement les particules accumulées dans le filtre à particules (destructions par combustion des différentes suies et particules).

La régénération du filtre à particules peut être :

- » naturelle si la température des gaz d'échappement est suffisante ;
- » provoquée par le calculateur d'injection si la température des gaz d'échappement est insuffisante et que le filtre à particules est encrassé.

Comme une forte augmentation de la température du filtre à particules lors de la régénération peut entraîner une destruction du filtre à particules, on utilise un additif (cérine + solvant) pour abaisser la température de combustion des suies (environ 450 °C au lieu de 550 °C).

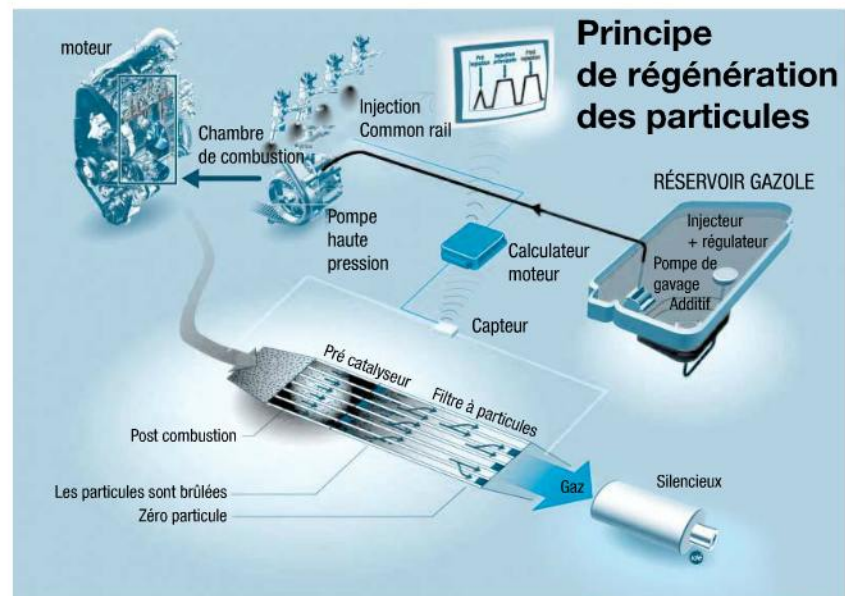
Toutefois, le principe actif (cérine) présent dans l'additif se dépose également dans le filtre à particules et, à terme, le colmate définitivement (environ 120 000 km).

Cette obstruction lente augmente la perte de charge aux bornes du filtre, ce qui doit être pris en compte pour modifier les seuils de déclenchement/arrêt de la régénération.

Afin d'injecter une quantité d'additif proportionnelle au volume de carburant introduit, un système d'additivation a été développé.

Le système d'additivation est géré par le calculateur additif carburant.

Figure 14.38 Régénération des particules.



Le calculateur additif/carburant :

- » détecte une volonté d'un apport de carburant,
- » reçoit l'information de l'apport de carburant,
- » calcule la masse d'additif à injecter proportionnellement à la quantité de gazole ajouté,
- » commande la pompe additif carburant ou l'injecteur additif carburant selon équipement,
- » informe le calculateur moteur de la masse d'additif cumulée,
- » calcule le niveau minimum d'additif dans le réservoir d'additif.

Résumé

Qualités demandées

- » Le carburant doit être parfaitement dosé selon les conditions de fonctionnement.
- » Le carburant doit être soumis à une pression favorisant une bonne pulvérisation et une bonne répartition des microgouttelettes.
- » Le début d'injection doit être précis et variable selon la fréquence de rotation du vilebrequin.
- » La durée d'injection doit être calculée en fonction notamment de la charge du moteur.

Principaux types d'injection Diesel

- » Les moteurs à injection directe dans lesquels l'injecteur débouche directement dans la chambre de combustion. Les pressions d'injection sont très élevées.
- » Les moteurs à injection indirecte dont l'injecteur pulvérise le carburant dans une chambre de précombustion placée dans une partie non refroidie de la culasse. La pression de fin de compression et les pressions d'injection sont plus faibles qu'en injection directe.

Principaux éléments du système d'injection directe haute pression :

- » la pompe de gavage ou de pré-alimentation fournissant une faible pression en entrée de pompe,
- » la pompe d'alimentation souvent incorporée dans la pompe haute pression. Elle fournit une pression moyenne dite « de transfert » à l'entrée de la partie haute pression des pompes,
- » la pompe haute pression à pistons radiaux a un nombre de pistons (en général trois) sans rapport avec le nombre de cylindres du moteur. Elle alimente sous haute pression la rampe commune des moteurs à injection directe *common rail*,
- » les injecteurs sont de types à trou pour les moteurs à injection directe,
- » des bougies de préchauffage.

Fonctionnement du système d'injection directe à rampe commune

Le carburant est aspiré par une pompe électrique dite « de gavage » immergée dans le réservoir. Un filtre régulateur épure le carburant et maintient sa pression à environ 2 bar. La pompe haute pression à pistons radiaux refoule le carburant vers la rampe commune et les tuyauteries d'injecteur (1 500 bar). Les injecteurs à commande électromagnétique ou piézo-électrique s'ouvrent et se ferment sous l'impulsion d'un courant électrique géré par le calculateur. Le calculateur reçoit ses informations de nombreux capteurs.

Testez vos connaissances



1. Dans un moteur à injection indirecte (à pompe rotative), le carburant est injecté :

- a ☐ dans la pipe d'admission
- b ☐ dans une préchambre
- c ☐ dans la chambre

2. En injection directe, les pressions d'injection (par rapport à l'injection indirecte) sont :

- a ☐ plus élevées
- b ☐ moins élevées
- c ☐ les mêmes

3. Dans un moteur à rampe commune (pompe haute pression), la pompe tourne par rapport au vilebrequin :

- a ☐ 2 fois plus vite
- b ☐ 2 fois moins vite
- c ☐ indifféremment

4. Dans un moteur à rampe commune (pompe haute pression), par quel élément les variations d'avance à l'injection sont-elles réalisées ?

- a ☐ la rampe commune
- b ☐ le calculateur
- c ☐ la pompe haute pression

5. Dans les moteurs à rampe commune (common rail), l'injecteur est commandé par :

- a ☐ une électrovanne
- b ☐ une came
- c ☐ le piston de la pompe

193

- 14 - Les systèmes d'injection

Entraînez-vous

1. Recherchez, sur un véhicule équipé du moteur Diesel haute pression à injection directe, les caractéristiques principales : alésage, course, cylindrée, rapport volumétrique, puissance et couple.
2. Recherchez si les moteurs Diesel ont pu, peuvent ou pourront fonctionner avec d'autres carburants que le gazole : dans le passé, dans le présent et dans l'avenir.

14.4 L'injection gaz

Mise en situation

Les véhicules GPL et essence (bicarburation) offrent des avantages importants sur le plan économique (prix au litre et défiscalisation). En outre, le carburant (GPL) est propre (émissions de CO, HC et NOx inférieures aux moteurs essence, pas de plomb et traces infimes de soufre) et avec l'injection électronique GPL, il n'y a pratiquement pas de perte de puissance par rapport à l'injection essence.

Principe de fonctionnement

Le GPL est stocké dans un réservoir à l'état liquide. Transformé en gaz dans le vaporisateur, il est envoyé aux valves d'injection par un boîtier de distribution. L'électronique contrôle la quantité de GPL en agissant sur ce distributeur.

Contraintes spécifiques :

- » les gaz étant compressibles, le dosage précis des carburants gazeux s'en trouve compliqué ;
- » les quantités de gaz à injecter sont en effet liées à la pression régnant au sein de ce gaz ;
- » il faut donc maîtriser parfaitement cette pression ;
- » les développements suivants mettent en lumière les solutions utilisées pour résoudre ces difficultés.

Figure 14.39 Implantation des équipements spécifiques

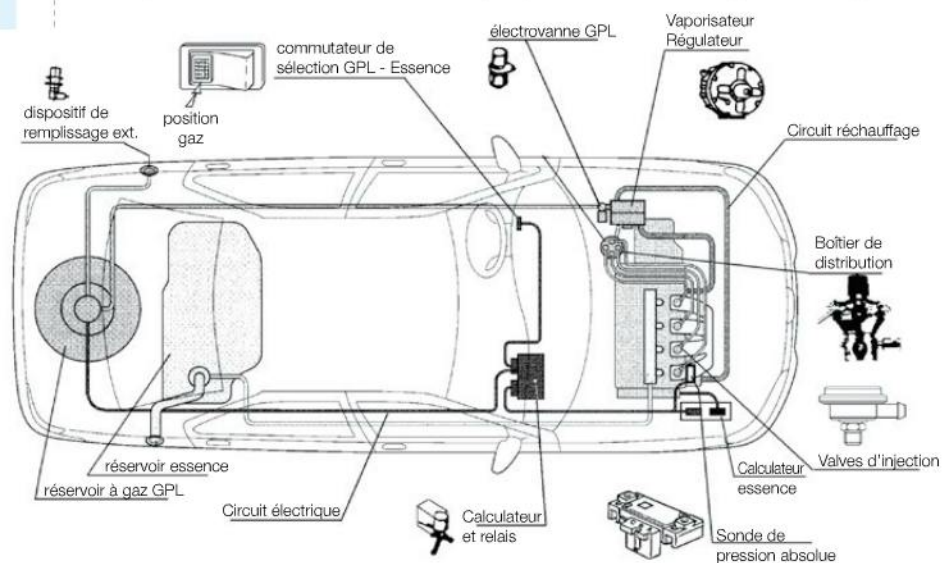
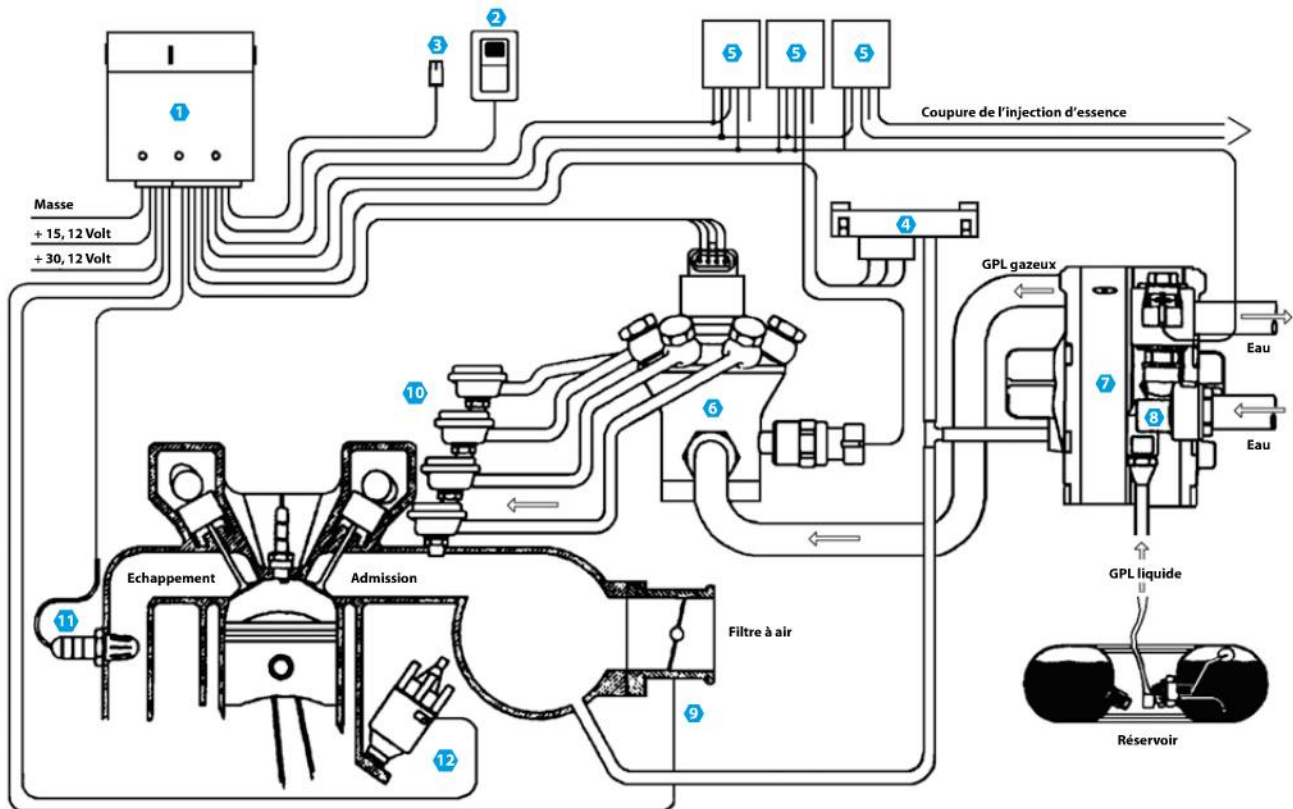


Figure 14.40 Analyse structurelle

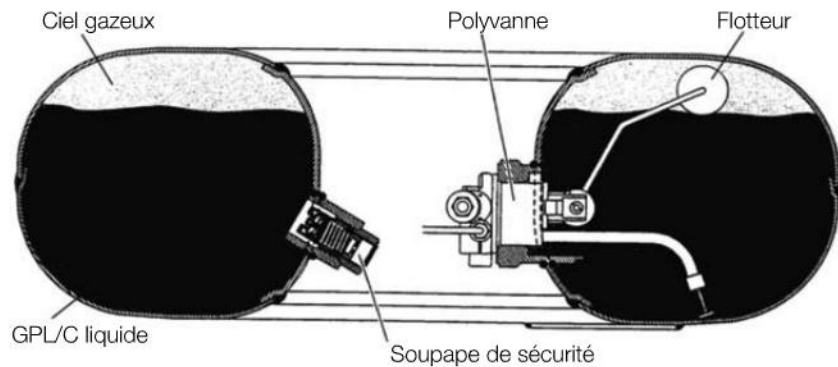
Analyse structurelle



- | | | |
|---|--|----------------------------|
| 1 Calculateur GPL | 6 Boîtier de distribution | 11 Sonde lambda |
| 2 Commutateur de sélection de carburant | 7 Vaporisateur/régulateur de pression | 12 Signal de régime moteur |
| 3 Prise de diagnostic | 8 Electrovanne de fermeture de GPL | |
| 4 Sonde de pression absolue | 9 Indicateur de position du papillon des gaz | |
| 5 Relais | 10 Valves d'injection de GPL | |

» Le réservoir :

Figure 14.41 Structure du réservoir



- il permet le stockage du GPL liquide sous une pression de 7 à 12 bar ;
- il est équipé d'une soupape de sécurité ;
- le remplissage est limité à 85 % grâce à la polyvanne, afin de garder un volume pour la dilatation du gaz.

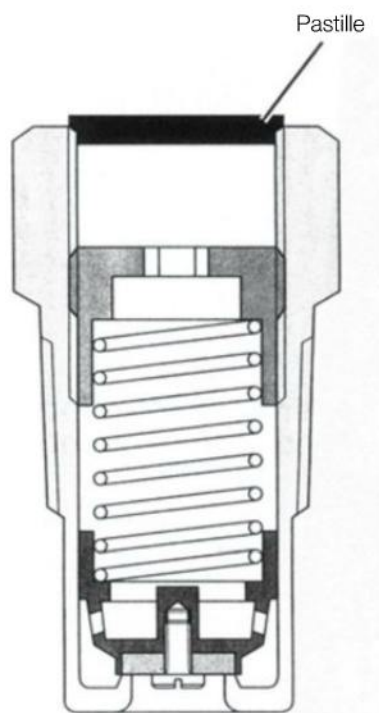


Figure 14.42 Soupape de sécurité



Figure 14.43 Électrovanne de sécurité

- » **La soupape de sécurité** (figure 14.42) : elle a pour rôle d'éviter qu'une pression trop importante ne s'exerce sur les parois internes du réservoir. Elle est tarée à 25 bar. Lorsque la pression atteint la valeur de tarage, le gaz s'échappe dans un boîtier étanche avant d'être ventilé à l'extérieur du véhicule par les tuyaux d'évents. La soupape est munie d'une pastille qui se désolidarise en cas de déclenchement. Dans les conditions normales d'utilisation, cette pression ne peut jamais être atteinte.
- » **L'électrovanne de sécurité** (figure 14.43) : elle est fixée sur le vaporisateur-détendeur. Elle assure deux fonctions principales :
 - couper l'arrivée du gaz liquide par l'obturateur ;
 - retenir les impuretés contenues dans le gaz grâce à un filtre intégré ainsi que par un aimant.

La vanne est fermée lorsque le moteur ne fonctionne pas.

La vanne de fermeture de GPL est une vanne à pilotage électromagnétique. Elle est commandée par le calculateur et autorise l'écoulement du gaz à l'état liquide du réservoir vers le vaporisateur/régulateur. Le calculateur donne cet ordre dès le moment où l'on procède à la commutation au GPL. La vanne de fermeture de gaz est une vanne « négative » ; par conséquent, il convient de toujours prendre en compte le sens de l'écoulement; l'alimentation s'effectue sur la face inférieure (voir flèche en figure 14.44) !

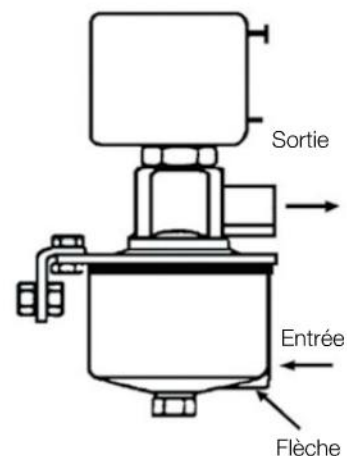


Figure 14.44 Structure de l'électrovanne de sécurité

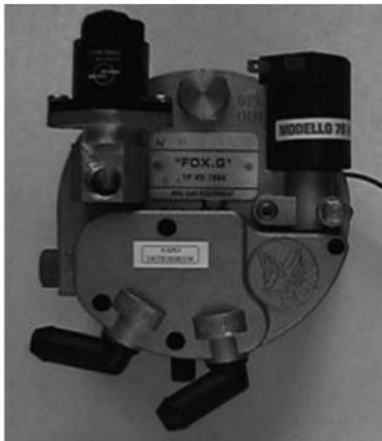


Figure 14.45 Vaporisateur-détendeur

» **Le vaporisateur-détendeur** (figure 14.45 et 14.46) : il permet la vaporisation du GPL liquide et le contrôle de la quantité de gaz aspirée par le moteur. Il est constitué de deux chambres : la chambre de vaporisation et la chambre de détente. Il est aussi équipé d'une électrovanne et d'un moteur pas à pas de contrôle de débit de gaz.

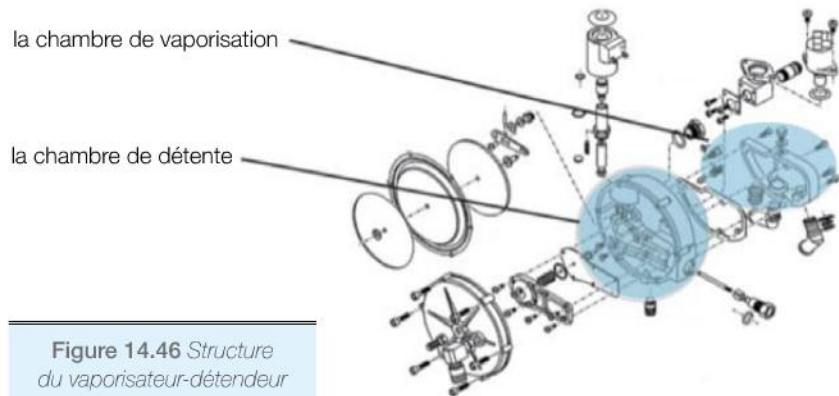


Figure 14.46 Structure du vaporisateur-détendeur

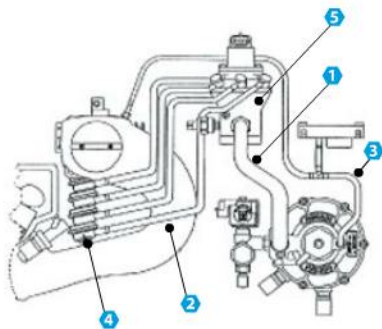


Figure 14.47 Structure du boîtier de distribution

» **Le boîtier de distribution** (figure 14.47) : le GPLc gazeux en provenance (1) du vapo-détendeur-régulateur (asservissement de pression (3)) est dosé et distribué par le boîtier de distribution (5) aux clapets (4) via les canalisations (2).

Le GPL arrive du vaporisateur-régulateur sous forme gazeuse à une pression comprise entre 1,96 et 1,16 bar et entre dans le boîtier de distribution.

» **La valve d'injection** (figure 14.48) : chacun des cylindres du moteur thermique est alimenté (C) en mélange AIR-GPLc par une valve à clapet qui débite soit en continu (la membrane (A) est soumise à l'action de la pression du carburant issu du doseur (B) associée à la pression absolue qui règne dans la tubulure d'admission) soit en séquence (pilotage de type électromagnétique).

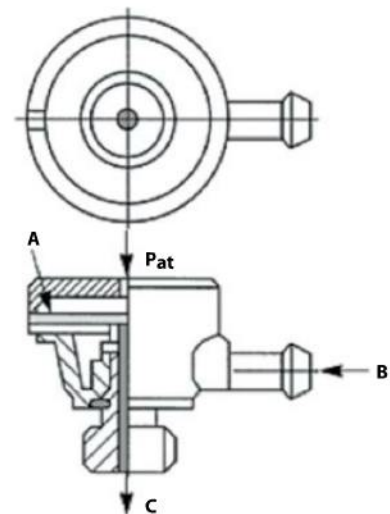
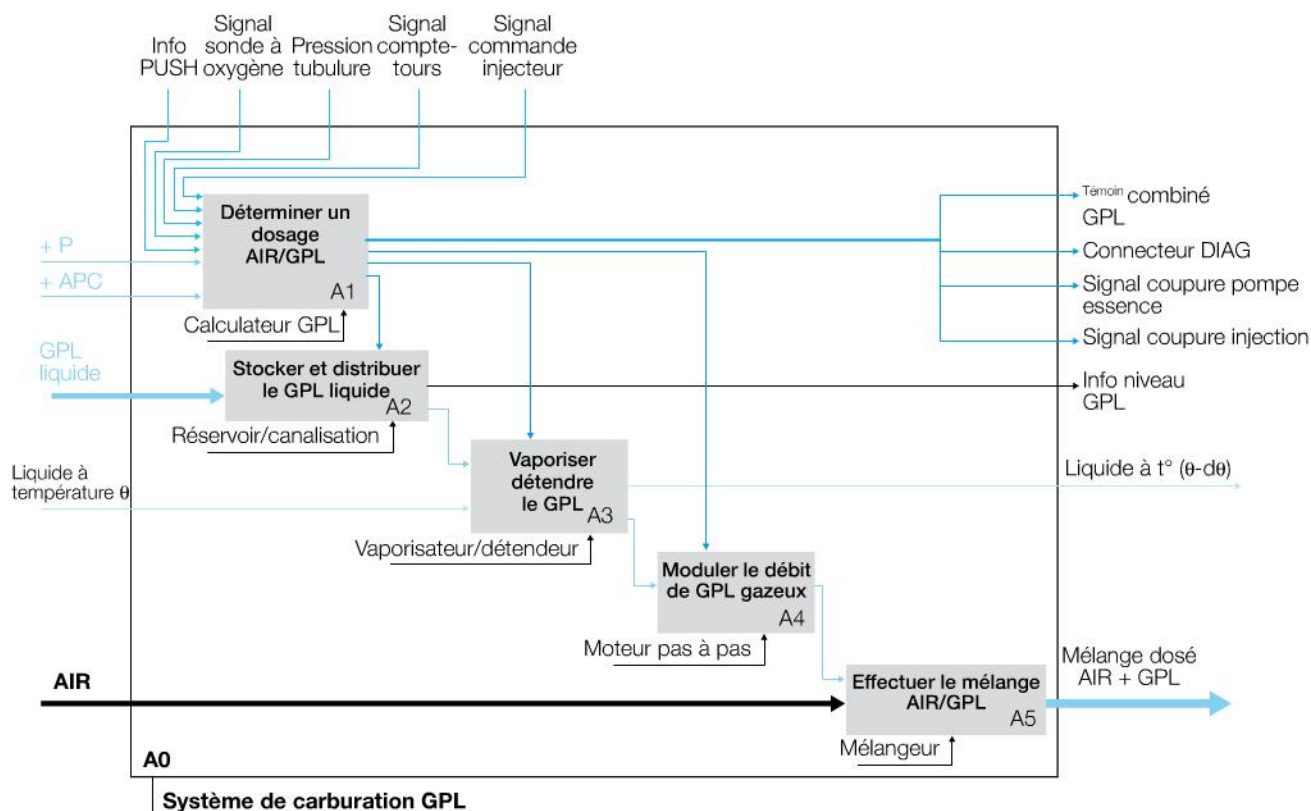


Figure 14.48 Structure de la valve d'injection

Figure 14.49 Analyse fonctionnelle

Analyse fonctionnelle



Principe de la vaporisation

Lorsque la vanne est ouverte, le GPL liquide du réservoir arrive dans le vaporisateur/régulateur de pression où il prend une forme gazeuse. Ce changement d'état s'appelle la vaporisation. La vaporisation s'opère spontanément en faisant chuter la pression du GPL. Cette opération s'effectue dans le premier étage du vaporisateur/régulateur. La température d'ébullition ou d'évaporation du gaz liquide se situe à environ -20°C . Par conséquent, il est nécessaire de réchauffer le premier étage pour éviter des problèmes de givrage.

Le premier étage du vaporisateur/régulateur est raccordé au circuit de refroidissement du véhicule afin d'assurer ce réchauffage.

Principe de fonctionnement

Le GPL est un mélange constitué de butane et de propane dans des proportions quasi équivalentes. Il provient soit du raffinage du pétrole brut, soit d'opérations de purification du gaz naturel lors de son extraction. Le GPL est gazeux à température et pression ambiantes mais il est stocké à l'état liquide sous faible pression (environ 10 bar) pour occuper moins de volume.



Figure 14.50 Commutateur essence/GPL

Les véhicules GPL fonctionnent également à l'essence : il s'agit d'une « bicarburant ». Si le GPL est épuisé, le passage à l'essence se fait automatiquement grâce à un calculateur électronique qui gère le système et assure le fonctionnement optimal du moteur. De plus, un commutateur (figure 14.50) situé sur le tableau de bord permet de passer manuellement du réservoir essence au GPL à n'importe quel moment.

Avantages et inconvénients techniques

En raison de son pouvoir calorifique volumique inférieur à celui de l'essence, le GPL est à l'origine d'une surconsommation de l'ordre de 15 à 20 %, toutefois contrebalancée par un coût à la pompe inférieur à tous les autres carburants. L'utilisation du GPL provoque une perte de puissance d'environ 8 % à haut régime. Cependant, l'homogénéité du mélange air-GPL donne une meilleure régularité du couple moteur à bas régime. Le confort de conduite est sensiblement amélioré grâce à la souplesse du moteur et à la diminution du bruit et des vibrations. Contrairement aux carburants classiques, la combustion du GPL est totale, elle ne laisse ainsi aucun dépôt et procure au moteur une longévité accrue et un entretien théoriquement réduit. Cependant, en cas de problèmes techniques, il est nécessaire de faire appel à des prestataires extérieurs, ce qui présente l'inconvénient d'augmenter les coûts d'entretien et d'immobiliser le véhicule pendant plusieurs jours.

Les systèmes antipollution

chapitre 15

15.1 Mise en situation

Le mélange combustible doit être :

- » gazeux ;
- » correctement dosé ;
- » homogène ;
- » bien réparti entre tous les cylindres.

La quantité du carburant par rapport à l'air doit être soigneusement proportionnée.

Le dosage est le rapport entre masse de combustible et masse d'air admises en un temps donné.

La combustion réelle n'étant pas parfaite, il y a production de matières reconnues polluantes, car la combustion ne respecte pas alors l'équation de combustion ($C_7H_{16} + 11 O_2 = 7 CO_2 + 8 H_2O$) (Cf. chapitre 12).

201

- 15 - Les systèmes antipollution

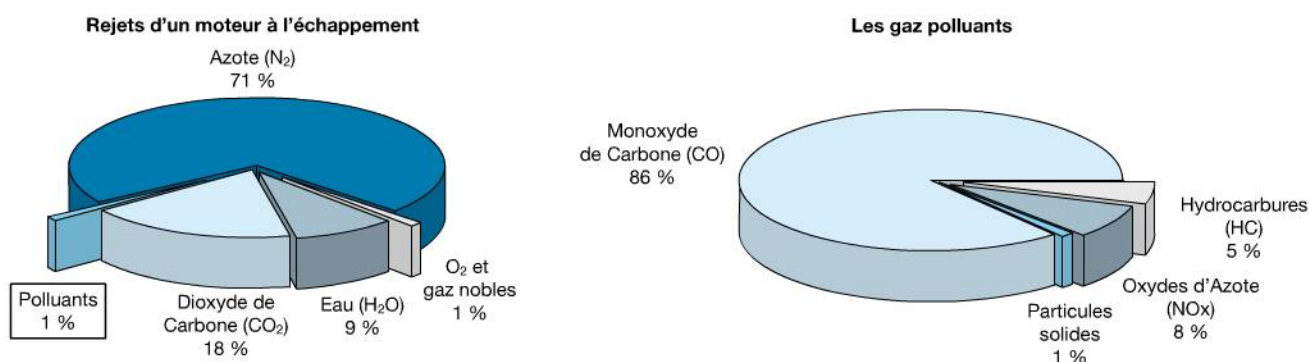


Figure 15.1 Pollution émise par un moteur.

Les principaux polluants

Polluants	Origines	Solutions technologiques pour les réduire
HC Hydrocarbures imbrûlés	– Huiles (fuites, vapeurs). – Essence (vapeurs, fuites). – Combustion riche.	– Réaspirer les vapeurs d'huiles pour les brûler, avoir un moteur en bon état. – Réaspirer les vapeurs d'essence pour les brûler dans la combustion. – Maîtriser le dosage air-essence. – Utiliser un catalyseur.
CO Monoxyde de carbone	– Issus de la combustion en mélange riche.	– Utiliser un catalyseur.
NOx Oxydes d'azote	– Sont produits si la température de combustion est importante (Mélange pauvre ou avance à l'allumage importante).	– Recycler les gaz d'échappement (EGR) pour en rebrûler une certaine proportion (suivant possibilité de la phase de fonctionnement du moteur). – Utiliser un catalyseur.

D'autres polluants viennent compléter la liste :

Le dioxyde de carbone (CO_2), qui est un gaz qui existe normalement dans l'air en petite quantité. Le dioxyde de carbone n'est pas nocif pour les êtres vivants. En revanche, il absorbe et réémet une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre vers le sol. Cet effet de serre produit des dommages sur l'environnement, car il participe au réchauffement de la surface de la Terre.

Incidence sur l'environnement : effet de serre.

Le dioxyde de soufre (SO_2) est incolore, d'odeur suffocante et piquante. Ce gaz est un produit très irritant pour les voies respiratoires.

Incidence sur l'environnement : provoque des pluies acides.

Les particules de carbone et suies : les gaz d'échappement des moteurs essence et Diesel contiennent des particules. Les particules émises par le moteur Diesel (suies) sont en plus grand nombre.

Les particules « Diesel » contiennent :

- » le noyau en carbone de couleur opaque, peu inoffensif pour la santé ;
- » différents hydrocarbures nocifs, cancérigènes et d'odeur désagréable.

Les deux représentations graphiques suivantes montrent les proportions de gaz émis à l'échappement de moteurs essence et Diesel répondant aux normes Euro (2000-2005).

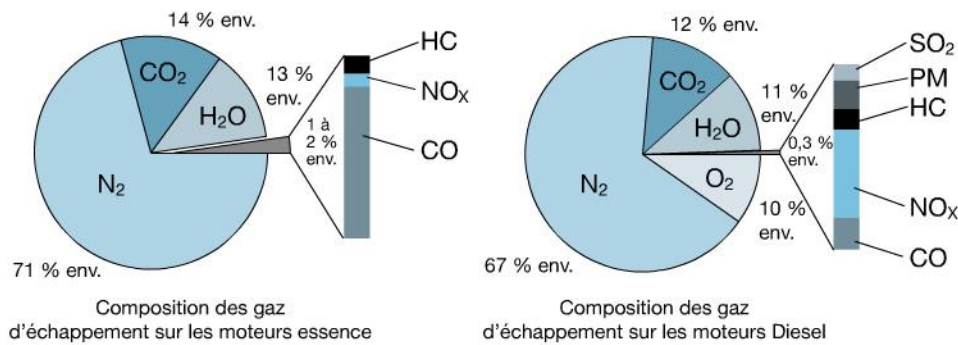


Figure 15.2 proportions de gaz émis à l'échappement.

15.2 Analyse structurale

Pour répondre aux différentes normes antipollution, plusieurs actions sont nécessaires. Plusieurs éléments ou systèmes permettent le recyclage ou le post-traitement des gaz.

203

Le pot catalytique

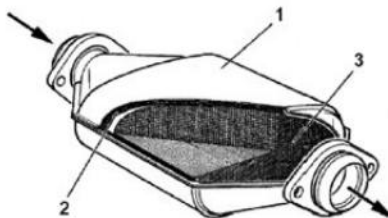


Figure 15.3 Pot catalytique.

Le pot catalytique est destiné à réduire, par catalyse, les gaz polluants imbrûlés à l'échappement :

- » CO : monoxydes de carbone,
- » HC : hydrocarbures,
- » NO_x : oxydes d'azote.

La catalyse est un phénomène qui, par l'intermédiaire d'un catalyseur, favorise des réactions chimiques sans qu'il y ait combustion ou modification de cette dernière.

Traitant les trois principaux polluants, le pot catalytique est du type trifonctionnel ou à trois voies.

Dans le cas des moteurs Diesel, il peut s'agir d'un catalyseur deux voies (CO ou HC).

Constitution du pot catalytique :

- » une enveloppe en acier inoxydable (1),
- » un isolant thermique (2),
- » un monolithe céramique en nid-d'abeilles (3).

Le monolithe est imprégné de métaux précieux tels que :

- » platine,
- » rhodium,
- » palladium.

La température idéale pour une épuration efficace est comprise entre 600 et 800 °C. Cependant une trop forte température, supérieure à 1 000 °C, peut entraîner la destruction du catalyseur.

Cette température est déterminée par la richesse du mélange et l'avance à l'allumage.

Une régulation très précise de la richesse, ainsi que du point d'avance, permet de contrôler la température des gaz d'échappement pour éviter la dégradation du catalyseur.

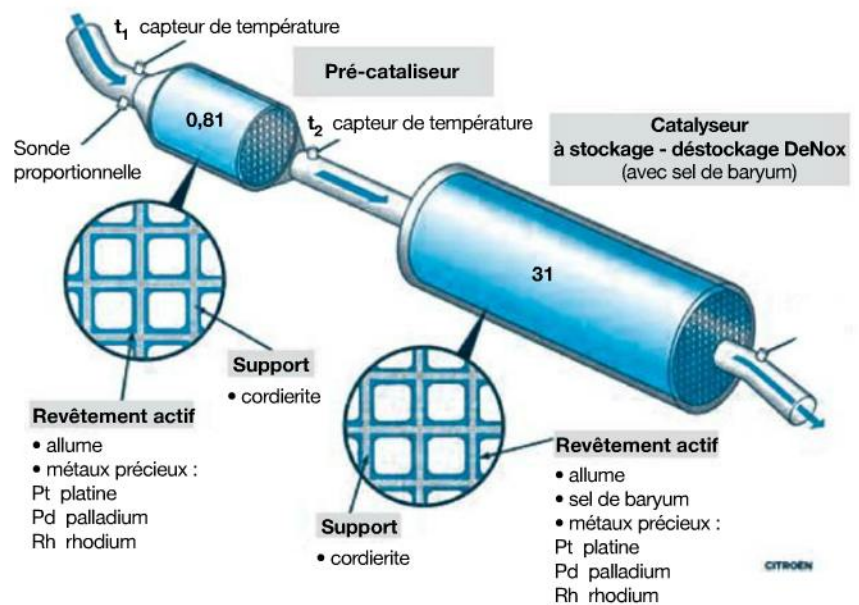


Figure 15.4 Composition d'un pot catalytique.

La sonde à oxygène ou lambda

Cette sonde qui est implantée sur l'échappement à l'entrée du catalyseur (sonde amont) délivre en permanence au calculateur une tension signalant la teneur en oxygène des gaz d'échappement (qualité de la combustion).

Le rôle du calculateur d'injection en fonction de l'information reçue est de :

- » déterminer l'état du pot catalytique (stockage des oxydes d'azote),
- » détecter la fin de déstockage des oxydes d'azote.

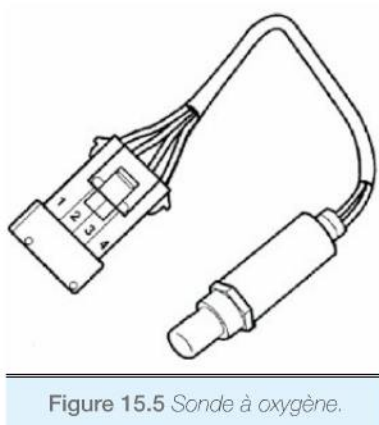


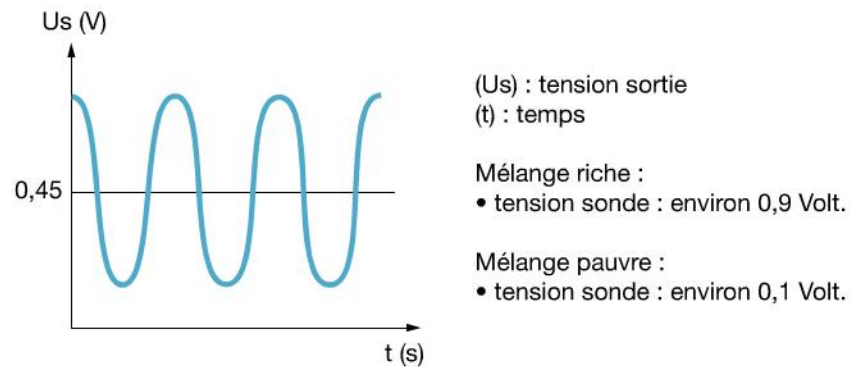
Figure 15.5 Sonde à oxygène.

La sonde à oxygène délivre pratiquement en permanence une information au calculateur sur le dosage air-essence.

Le signal émis est du type « binaire ». L'information dosage « riche » ou « pauvre » se concrétise par des tensions de 0 à 1 V.

Cette tension, analysée par le calculateur, permet de corriger le temps d'injection.

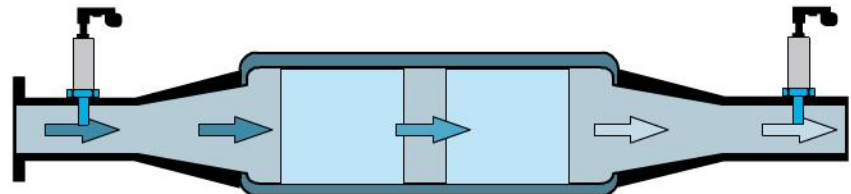
Figure 15.6 Tension de teneur en oxygène.



Le catalyseur se voit doté d'une autre sonde lambda en aval du catalyseur pour répondre à la norme EOBD (*European On-Board Diagnostics*).

Ce dispositif permet d'alerter le conducteur via le voyant EOBD injection et de lui indiquer que le véhicule présente une défectuosité entraînant un risque de pollution.

Figure 15.7 Catalyseur à deux sondes lambda.



Ce qu'il va permettre de contrôler

- » L'efficacité du catalyseur, par une procédure automatique de test.
- » L'état de fonctionnement de la sonde lambda amont (qui sert à la gestion du dosage moteur).

Grâce au capteur de régime moteur, le calculateur d'injection surveille les acyclismes dans le cycle moteur qui pourraient être synonymes de ratés de combustion et donc d'une défectuosité dans la gestion moteur entraînant des polluants.

Si des ratés sont détectés avec risque de pollution, le voyant s'allume.

Si des ratés importants sont détectés qui risqueraient d'entraîner la destruction du pot catalytique le voyant clignote.

Le recyclage des vapeurs d'essence

Ce dispositif empêche le rejet à l'air libre des vapeurs de carburant. Il n'existe donc plus de mise à l'air libre traditionnelle du réservoir.

Le réservoir *canister* :

Le *canister* est un récipient à l'intérieur duquel se trouve un filtre de charbon actif. Le *canister* est placé entre le réservoir et l'électrovanne de purge *canister* (sous caisse).

Les vapeurs de carburant régnant dans le réservoir sont absorbées par le charbon actif.

Cette absorption a pour but d'éviter :

- » la montée en pression du réservoir,
- » la dispersion des vapeurs dans l'atmosphère (grâce à son recyclage par le moteur).

La mise à l'air libre du réservoir est assurée par le *canister*.

L'électrovanne de purge *canister* :

L'électrovanne de purge *canister* est située entre le *canister* et le boîtier papillon. Pilotée par le calculateur, l'électrovanne de purge *canister* permet le recyclage des vapeurs de carburant contenues dans le réservoir *canister*, et ce, en fonction des conditions d'utilisation du moteur.

La commande de l'électrovanne est du type RCO (Rapport Cyclique d'Ouverture).

C'est une électrovanne dite « normalement fermée », ce qui signifie qu'elle est fermée lorsqu'elle n'est pas alimentée.

Le recyclage des gaz d'échappement (EGR)

Pour diminuer la formation des NOx (oxydes d'azote), les moteurs sont équipés d'un circuit de recyclage des gaz d'échappement (EGR : *Exhaust Gaz Recirculation*).

Ce dispositif est géré par le calculateur de contrôle moteur en boucle fermée sur une consigne du débitmètre.



Figure 15.8 Réservoir canister.

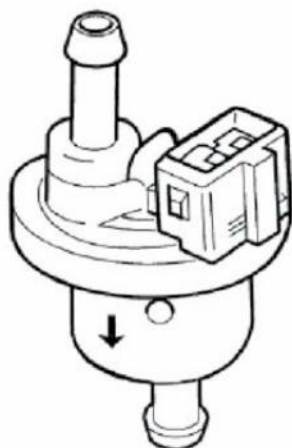


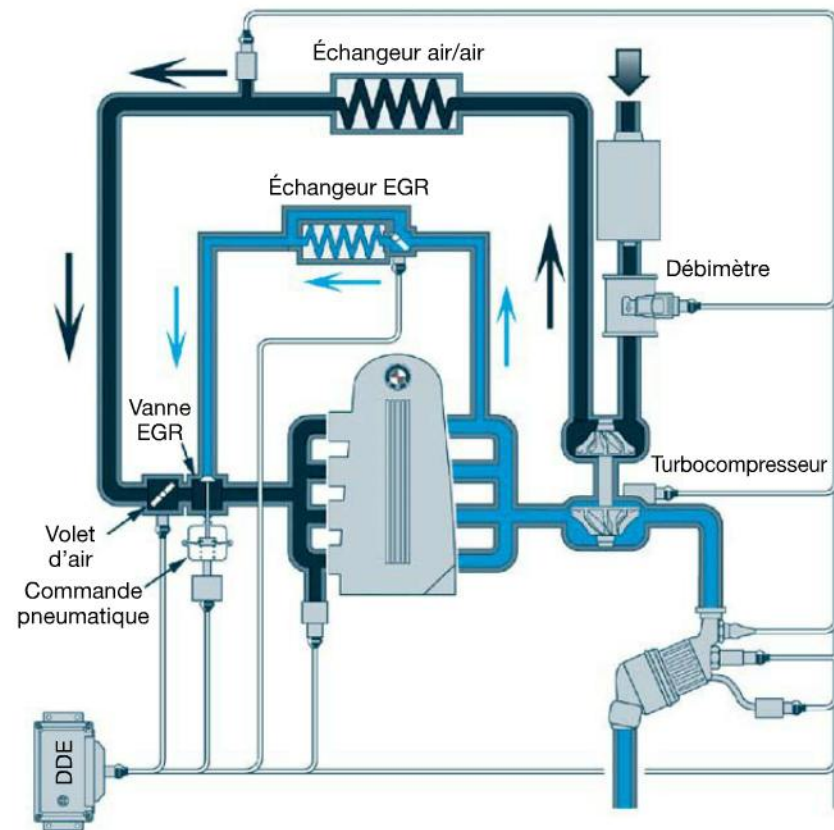
Figure 15.9 Électrovanne de purge canister.

Les gaz d'échappement puisés dans le collecteur d'échappement sont transférés vers le circuit d'admission au travers d'une vanne de recyclage.

La vanne de recyclage est actionnée par une électrovanne pilotée proportionnellement par le calculateur de contrôle moteur.

Ce dernier mesure la quantité d'air frais admis grâce au débitmètre et détermine le taux de recyclage des gaz d'échappement.

Figure 15.10 Recyclage des gaz d'échappement (Document BMW).



La recirculation des gaz d'échappement est obtenue lors du croisement des soupapes, c'est-à-dire au moment où la soupape d'échappement n'est pas encore fermée et la soupape d'admission déjà ouverte.

À ce moment-là, le piston descend et aspire une partie des gaz brûlés.

Le filtre à particules (FAP)

Le filtre à particules est conçu pour réduire la pollution des véhicules Diesel en filtrant les éléments solides des gaz d'échappement. Les suies provenant de l'échappement, les cendres issues de l'huile

moteur et les particules provenant de l'usure moteur s'accumulent dans le filtre à particules.

Le filtre à particules piège les particules de carbone, au passage des gaz d'échappement.

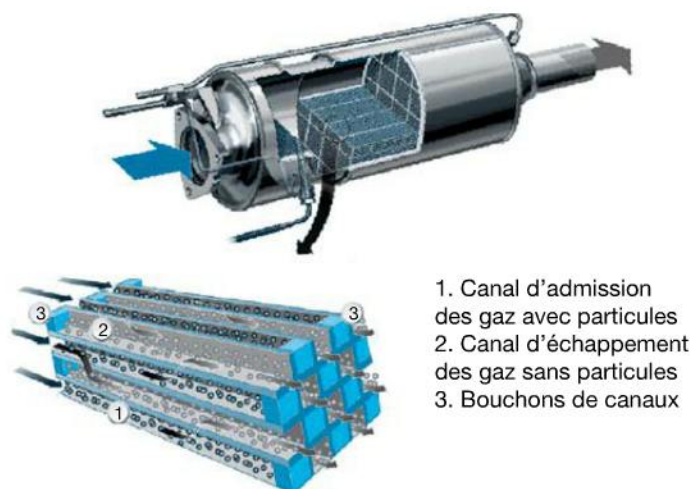
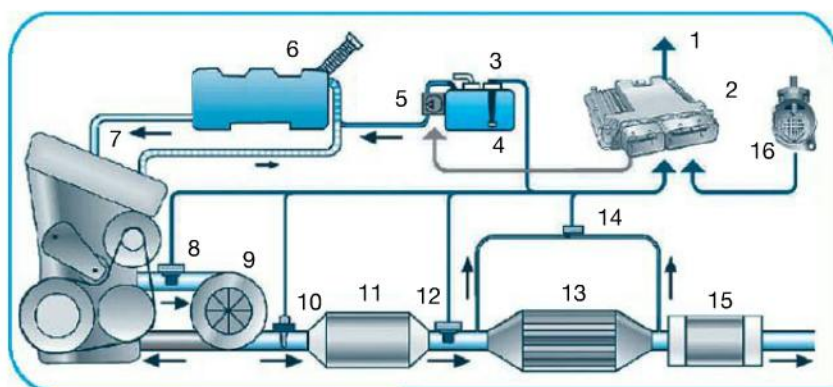


Figure 15.11 Filtre à particules.



- | | |
|--|--|
| 1 Informations vers porte instruments. | 9 Turbocompresseur. |
| 2 Calculateur de gestion du moteur. | 10 Sonde lambda à large bande. |
| 3 Réservoir d'additif. | 11 Catalyseur à oxydation. |
| 4 Capteur de niveau d'additif. | 12 Capteur de température dans le FAP. |
| 5 Pompe d'additif. | 13 Filtre à particules. |
| 6 Réservoir à carburant. | 14 Capteur de pression différentiel. |
| 7 Moteur diesel. | 15 Silencieux. |
| 8 Capteur de température avant turbo. | 16 Débitmètre d'air massique. |

Grâce à la céramique utilisée (carbure de silicium), les gaz d'échappement traversent les parois du filtre à l'exception des particules de suie qui restent stockées à l'intérieur des canaux d'admission. Ces particules seront ensuite brûlées grâce à un processus de régénération géré par le calculateur de gestion moteur.

Lors du roulage, le filtre se charge en particules de suie. La régénération consiste à brûler périodiquement ces particules afin d'éviter le colmatage du filtre.

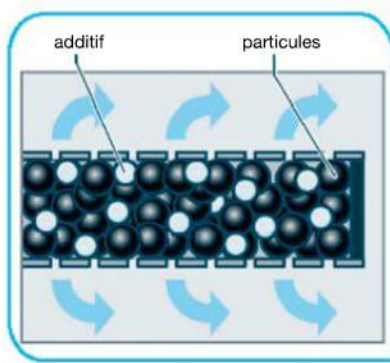


Figure 15.12 Principe d'additivition.

La régénération est soit naturelle – la température à l'entrée du catalyseur est suffisamment élevée pour permettre le brûlage des particules dans le filtre – soit artificielle – la gestion électronique décidera d'intervenir sur des paramètres moteur afin d'obtenir la température idéale au processus de régénération (exemple : postinjection, suppression de l'EGR, gestion de la pression de suralimentation, etc.)

L'additivition consiste à adjoindre au carburant un additif (agent actif contenant du fer), qui a pour mission d'abaisser la température de combustion des particules de suie. Cela va permettre d'effectuer le processus de régénération du filtre même à charge partielle. La quantité d'additif injectée dans le carburant est variable suivant les différentes informations que traite le calculateur de gestion moteur.

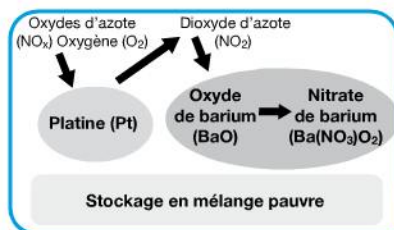


Figure 15.13 Phase de stockage.

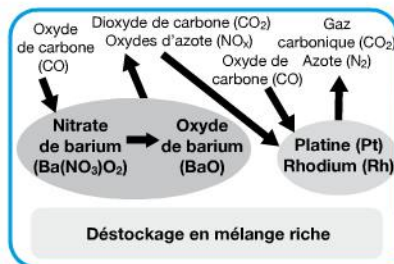


Figure 15.14 Phase de destockage.

Le piège à NOx

Le piège à NOx est identique à un catalyseur trifonctionnel essence, imprégné en plus d'oxyde de Baryum (BaO). L'oxyde de baryum a pour fonction de stocker les NOx (sous forme de nitrates de baryum) lorsque le moteur fonctionne en mode pauvre (rétenseur de NOx).

Un processus de déstockage est cycliquement appliqué sur le piège à NOx en effectuant un basculement de richesse au-delà de 1.

Deux phases pour réduire les NOx

Le stockage : Les oxydes d'azote s'oxydent et sont convertis en dioxyde d'azote par le revêtement de platine, puis réagissent ensuite avec l'oxyde de baryum pour donner du nitrate de baryum.

Le destockage (régénération) : Le déstockage s'effectue dans notre exemple par les molécules de CO, qui se trouvent en abondance dans les gaz d'échappement en mélange riche. Il y a tout d'abord réduction du nitrate de baryum par le CO en oxyde de baryum. Au cours de cette réaction, il y a formation de CO_2 et de NO_x . Le rhodium et le platine permettent la réduction des NO_x en azote (N_2) et l'oxydation du CO en CO_2 .

L'injection d'air à l'échappement (IAE)

Le but est de traiter les polluants le plus rapidement possible et donc d'arriver à la température minimale de fonctionnement du pot catalytique le plus tôt après le démarrage du moteur.

La solution consiste à déclencher une combustion dans le pot catalytique. Elle commence en aval des soupapes d'échappement

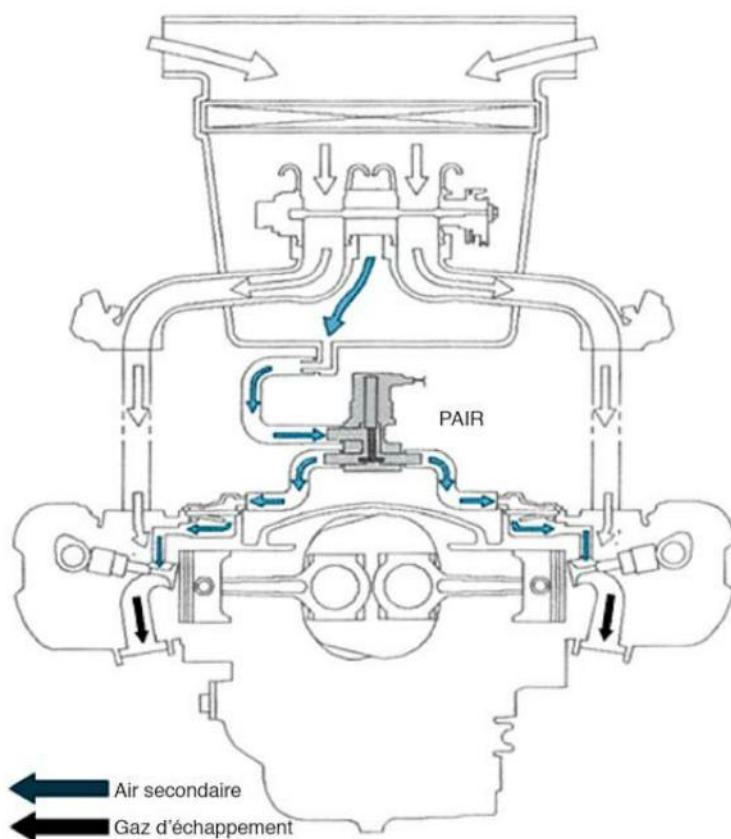
et se prolonge en majeure partie dans le catalyseur, car elle y est favorisée par l'oxydation due aux métaux précieux.

Combustion = Comburant + Carburant

- » Comburant : Insuffler de l'air pur à l'aide d'une pompe électrique.
- » Carburant : Aussi longtemps que la fonction insufflation d'air est active, provoquer un enrichissement très important au niveau de la chaîne de calcul du temps d'injection.

Nota : Cette postcombustion n'endommage pas le catalyseur, car celui-ci n'est pas encore suffisamment chaud lorsqu'elle se déroule.

Figure 15.15 Injection d'air à l'échappement.

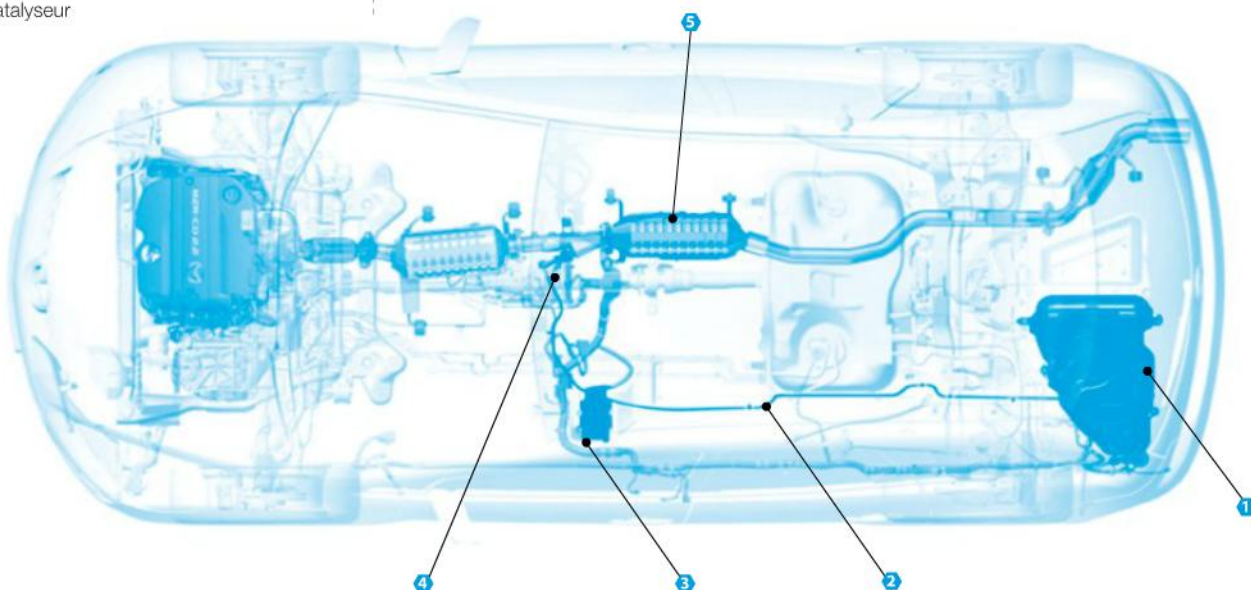


La réduction catalytique sélective SCR

Le système le plus efficace pour traiter les rejets d'oxydes d'azote est la réduction catalytique sélective (SCR, *Selective Catalytic Reduction*). Son taux de traitement peut en effet dépasser les 70 %. L'intérêt du SCR est sa capacité à convertir en continu les NO_x en azote (N) et en eau (H_2O) après plusieurs étapes. Le processus de réduction du SCR est appelé « réduction sélective » car il utilise un agent à base d'ammoniac qui est plus réactif aux molécules d'oxygène contenues dans les NO_x qu'aux autres molécules d'oxygène pourtant présentes en très grande quantité dans le reste des gaz d'échappement.

Figure 15.16 Système SCR

- 1 Réservoir d'urée
- 2 Canalisations
- 3 Calculateur injecteur
- 4 Injecteur fixé sur la ligne d'échappement
- 5 catalyseur

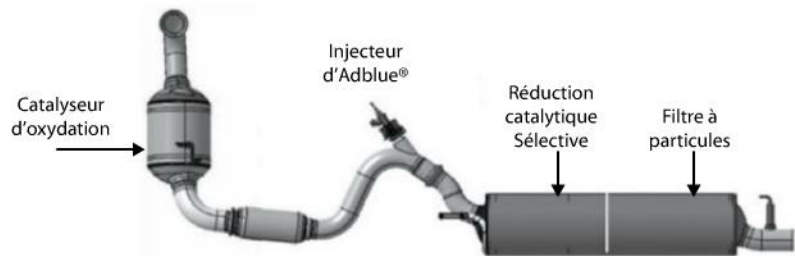


L'élimination des NO_x se fait en injectant une dose calculée avec précision d'AdBlue dans une section de mixage. Ce produit se transforme alors en ammoniacque qui, au niveau de la catalyse, neutralise les oxydes d'azote et produit un mélange sans danger d'eau et d'azote. Un injecteur de conception unique employant une buse automatisée permet d'éviter tout risque de colmatage.

Le dosage en AdBlue fait l'objet d'une régulation contrôlée afin d'éviter les dépôts et les coulées d'ammoniacque. Ce système comporte en outre un catalyseur supplémentaire de nettoyage afin de neutraliser tout excédent d'ammoniacque.

L'injecteur placé à l'entrée du catalyseur (figure 15.17) pulvérise l'urée sous forme de gouttelettes d'un diamètre moyen de 50 à 100 microns. L'homogénéité du mélange est améliorée par un mélangeur doté d'ailettes, traversé par les gaz d'échappement. Le taux de traitement des NO_x est contrôlé par les données d'un second capteur de NO_x en aval du dispositif.

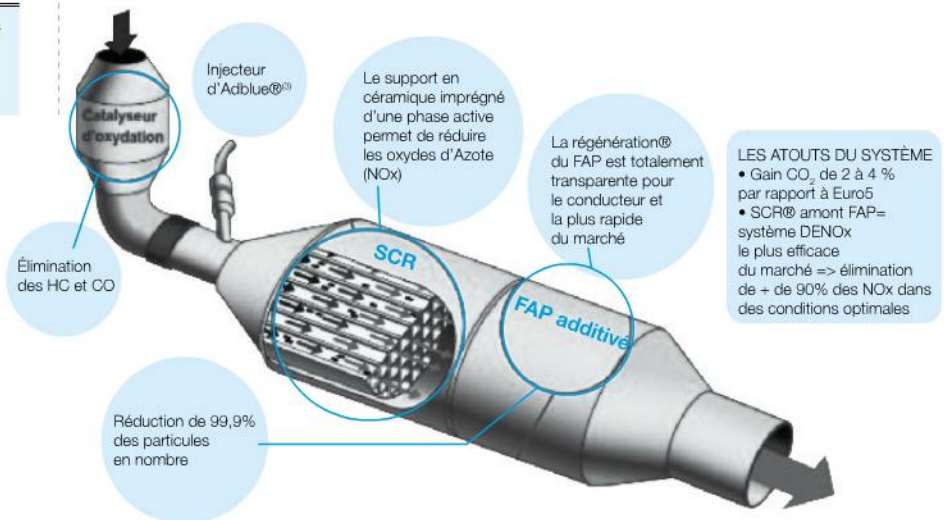
Figure 15.17 Injecteur AdBlue



Le rendement du SCR est influencé par la température de gaz d'échappement. La plage de fonctionnement optimale est entre 250 et 450 °C alors qu'en-dessous, le taux de traitement des NO_x ne peut pour le moment dépasser 50 %.

L'opportunité de positionner le catalyseur SCR en amont du FAP donne aux moteurs la possibilité de traiter un taux plus élevé de NO_x . En conséquence, l'utilisation du SCR permet non seulement de passer la norme Euro 6, mais également de revoir la stratégie de combustion. En effet, la quantité de NO_x augmente avec la température de combustion.

Figure 15.18 Ligne d'échappement
Euro 6 Diesel
(Document PSA Peugeot Citroën)



15.3 Analyse fonctionnelle

Pour les moteurs thermiques, différentes sources de rejets de polluants sont possibles.

Les vapeurs d'essence qui s'évaporent du réservoir sont emprisonnées dans le *canister*. C'est une source de pollution possible si les canalisations sont obstruées.

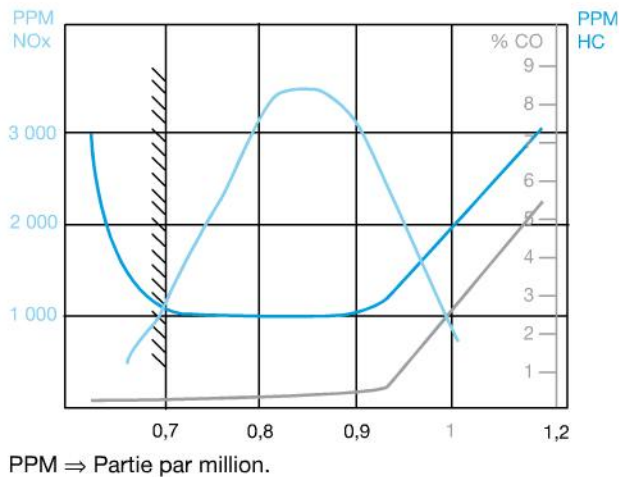


Figure 15.19 Évolution de la teneur en polluant

Les gaz de carter, provenant des fuites à la segmentation, sont réaspirés, brûlés et se retrouvent dans les gaz d'échappement. Ils dépendent de l'état d'usure du moteur et de l'état de l'huile moteur.

La composition des gaz d'échappement dépend :

- » de l'architecture du moteur,
- » de la combustion,
- » de la qualité et de la composition du mélange (richesse, homogénéité, carburant).

Pour réduire les polluants, plusieurs solutions sont possibles :

- » Agir sur la richesse : une richesse voisine de 1 permet de réduire au mieux les polluants. La teneur en polluants est relative au dosage.
- » Agir sur la préparation du mélange :
 - Homogénéité du mélange : injection du carburant dans la veine d'admission juste devant la soupape d'admission ou injection directe dans la chambre de combustion ;
 - Turbulence des gaz d'admission ;
 - Répartition du mélange cylindre par cylindre ;
 - Réchauffage des collecteurs d'admission ;
 - Recirculation des gaz d'échappement : pour diminuer la température de combustion et la formation des NOx.

Les normes

Avant que les émissions de particules ne soient réglementées en Europe, une Peugeot 404 équipée d'un moteur Diesel à préchambre émettait 1 200 mg/km de particules dans les années 60-70. La première limitation est apparue en juillet 1992 avec l'arrivée de la norme Euro 1. La valeur limite était alors de 140 mg/km sur le cycle de mesure NEDC ; elle est ensuite passée à 25 mg/km avec l'Euro 4 et est actuellement à 5 mg/km avec l'Euro 5.

L'Euro 5 a évolué depuis septembre 2009 (évolution Euro 5b) en ajoutant à la mesure massique des émissions de particules une limite en nombre (PN : *Particulate Number*) afin de limiter les rejets de particules fines (PM2.5) et très fines (PM1.0). Les particules fines et ultrafines sont principalement apparues avec l'arrivée de l'injection directe.

Les voitures à moteur essence, seulement si le moteur est à injection directe, se sont également vu imposer une limitation

des émissions de suie en masse et en nombre car l'utilisation de l'injection directe, en forte progression ces dernières années, augmente la formation de fines particules.

Sur le marché nord-américain, la norme Tier 2/Bin 5 impose une limite des émissions de particules à 10 mg/mile sur le cycle FTP 75, soit environ 7 mg/km, sans distinction entre moteur essence et diesel. Les valeurs des futures normes LEV III et Tier 3 sont actuellement en discussion. Elles devraient entrer en application en 2017 avec une limite à 6 mg/mile (3,8 mg/km). L'objectif est d'atteindre 3 mg/mile (1,9 mg/km) en 2022, puis le niveau à peine mesurable de 1 mg/mile en 2025. Une limite des particules en nombre est en discussion mais aucune loi n'est pour le moment planifiée.

À noter : depuis 1995, la Commission européenne impose aux états membres la mise en place d'un suivi du bon maintien dans le temps du niveau de pollution des voitures au travers d'un contrôle technique périodique obligatoire. Si les émissions de particules font partie de ce programme, une mesure sur le cycle NEDC est trop compliquée et coûteuse sur le parc automobile. Le contrôle se limite alors à une mesure de l'opacité des fumées en accélérant à fond le moteur sans charge, du ralenti jusqu'au régime de régulation. Ce processus n'est qu'une mesure partielle des émissions de suie et permet de détecter des défaillances majeures du moteur (ex. : système d'injection ou fuite du circuit d'air).

Limites d'émissions UE pour les véhicules Particuliers – en g/km

Classe	Normes	Années		CO	HC	HCNM	HC+NOx	NOx	Particules
		NT	TT						
Diesel									
	Euro 1	1992		2,720	–		0,970	–	0,140
	Euro 2 – IDI	1996		1,000	–		0,700	–	0,080
	Euro 2 – DI	1999		1,000	–		0,900	–	0,100
	Euro 3	01/2000	01/2001	0,640	–		0,560	0,500	0,050
	Euro 4	01/2005	01/2006	0,500	–		0,300	0,250	0,025
	Euro 5	09/2009	01/2011	0,500	–		0,230	0,180	0,005
	Euro 6	09/2014	09/2015	0,500	–		0,170	0,080	0,005
Essence									
	Euro 1	1992		2,720	–		0,970	–	–
	Euro 2	1996		2,200	–		0,500	–	–
	Euro 3	01/2000	01/2001	2,300	0,200		–	0,150	–
	Euro 4	01/2005	01/2006	1,000	0,100		–	0,080	–
	Euro 5	09/2009	01/2011	1,000	0,100	0,068	–	0,060	0,005a
	Euro 6	09/2014	09/2015	1,000	0,100	0,068	–	0,060	0,005a

NT (nouveau type) : les nouveaux modèles doivent respecter la norme à la date d'entrée en vigueur indiquée

TT (tout type) : tous les véhicules neufs doivent respecter la norme à la date d'entrée en vigueur indiquée

CO monoxyde de carbone ; HC hydrocarbures imbrûlés ; HCNM hydrocarbure non méthanique ; NO_x oxydes d'azote

a : pour moteur à injection directe d'essence mélange pauvre seulement

Note : dès 2000, suppression dans le cycle d'essai des 40 premières secondes de mise en température moteur

Résumé

La combustion réelle n'étant pas parfaite, plusieurs gaz polluants sont rejetés à l'échappement, dont les principaux sont :

- » les hydrocarbures imbrûlés (HC),
- » le monoxyde de carbone (CO),
- » les oxydes d'azote (NO_x).

Il est donc important que le mélange soit le plus homogène possible, correctement dosé et bien réparti entre tous les cylindres.

Plusieurs systèmes existent pour limiter les rejets polluants. Des systèmes de recyclage (le *canister* pour les vapeurs d'essence ou l'EGR pour les gaz d'échappement), mais aussi des systèmes de post-traitement (le pot catalytique, le filtre à particules, le piège à NO_x, l'injection d'air à l'échappement...).

Pour réduire les polluants, on peut agir sur la richesse du mélange ou bien agir sur la préparation du mélange.

Les normes antipollution sont de plus en plus restrictives et évoluent d'année en année.

Testez vos connaissances

215

1. Quels sont les principaux polluants d'une automobile ?

- a ☐ HC/CO₂/CO
- b ☐ HC/CO/NO_x
- c ☐ H₂O/CO/NO_x

2. La sonde lambda signale en permanence au calculateur :

- a ☐ la teneur en monoxyde de carbone dans les gaz d'échappement
- b ☐ la teneur en air dans les gaz d'échappement
- c ☐ la teneur en oxygène dans les gaz d'échappement

3. Le recyclage des gaz d'échappement (EGR) permet de diminuer :

- a ☐ le taux d'oxygène
- b ☐ le taux d'oxyde d'azote
- c ☐ le taux d'hydrocarbures imbrûlés

4. Pour réduire les polluants, on peut agir :

- a ☐ sur la richesse du mélange et l'augmentation de température du pot catalytique jusqu'à 1 200 °C
- b ☐ sur la préparation du mélange avec l'ajout d'une sonde lambda
- c ☐ sur la préparation du mélange et la richesse du mélange

Entraînez-vous

Effectuez une recherche sur d'autres systèmes antipollution de recyclage ou de post-traitement équipant les automobiles.

Partie 5

Le système d'allumage

Principe de l'allumage

chapitre 16

16.1 Mise en situation

La fonction de l'allumage est de produire un apport de chaleur dont l'énergie est suffisante pour déclencher l'inflammation du mélange gazeux en fin de compression (figure 16.1).

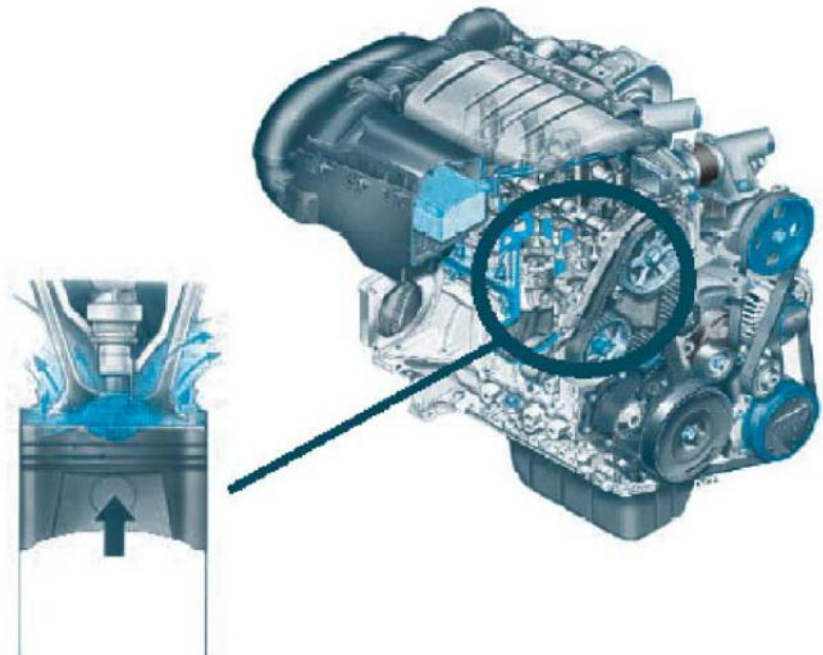


Figure 16.1 Principe de l'allumage.

Cette énergie est produite sous la forme d'un arc électrique. Pour être conducteur d'électricité, l'air doit être ionisé. L'air se trouvant dans la chambre en fin de compression ne peut être ionisé, afin de permettre le passage de l'arc, qu'à condition que le courant ait une haute tension (force électromagnétique [f.é.m.] élevée).

Si nous partons du générateur placé à bord du véhicule, nous pouvons disposer d'un courant de tension $U \approx 12 \text{ V}$. Pour atteindre 10 à 15 kV, il faut multiplier environ par 1 000 la tension de départ. Pour réaliser cette opération, on utilise un transformateur de type particulier appelé « bobine d'induction » ou « bobine d'allumage ».

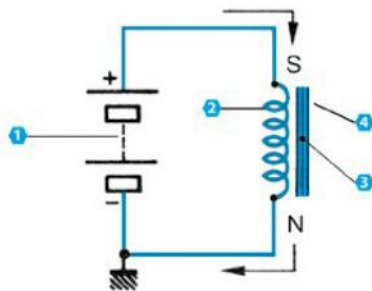


Figure 16.2 Production d'un champ magnétique.

- ❶ Générateur.
- ❷ Solénoïde.
- ❸ Noyau de fer doux.
- ❹ Champ magnétique polarisé par le sens du courant.

Le phénomène utilisé est la création d'un courant induit dans un bobinage par variation de flux magnétique.

Observons la figure 16.2. Si nous plaçons un enroulement électrique ❷ autour d'un noyau de fer doux ❸, nous constatons l'apparition d'un champ magnétique ❹ autour du noyau lorsque l'enroulement est parcouru par un courant électrique et la disparition du magnétisme lorsque le courant est coupé.

Le flux magnétique est l'unité de mesure de la valeur du champ magnétique, il s'exprime en webers et son symbole est Φ (phi). Pour un bobinage donné à tension constante, la valeur du flux magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant. Les variations (Δ) de flux magnétique seront donc exactement proportionnelles aux variations d'intensité du courant :

$$\Delta \Phi \text{ équivalent à } \Delta I$$

Les variations d'intensités pour le bobinage primaire sont réalisées par le calculateur en fonction des paramètres d'entrée (position du PMH, par exemple).

Si l'on enroule autour du noyau un second bobinage isolé du premier, on constate qu'à chaque fois qu'il y a variation de flux magnétique, il y a création d'un courant électrique induit dans le bobinage secondaire.

La f.é.m. du courant secondaire sera d'autant plus grande que :

- » la variation de flux dans le noyau ($\Delta \Phi / \Delta t$) sera importante et rapide ;
- » le rapport entre les nombres de spires des bobinages (N_2/N_1) sera grand.

Pour un circuit donné, la valeur du flux magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant. On utilise donc un bobinage primaire peu résistant.

La loi d'Ohm définit que :

$$I = \frac{U}{R}$$

Ainsi, si R diminue, I augmente.

La f.é.m. disponible au bobinage secondaire peut être de l'ordre de 30 kV.

16.2 Analyse structurelle

Actuellement le système d'allumage le plus utilisé est l'allumage électronique intégral statique (AEI).

- » soit le système avec 2 bobines à double sortie (jumostatique). Les deux bobines à double sortie sont actionnées alternativement par le calculateur (figure 16.11),
- » soit le système avec 1 bobine par cylindre (multibobine), le calculateur actionnant successivement chaque bobine dans l'ordre d'allumage. C'est le système le plus répandu actuellement (intéressant notamment pour les moteurs à trois ou cinq cylindres) (figure 16.12).

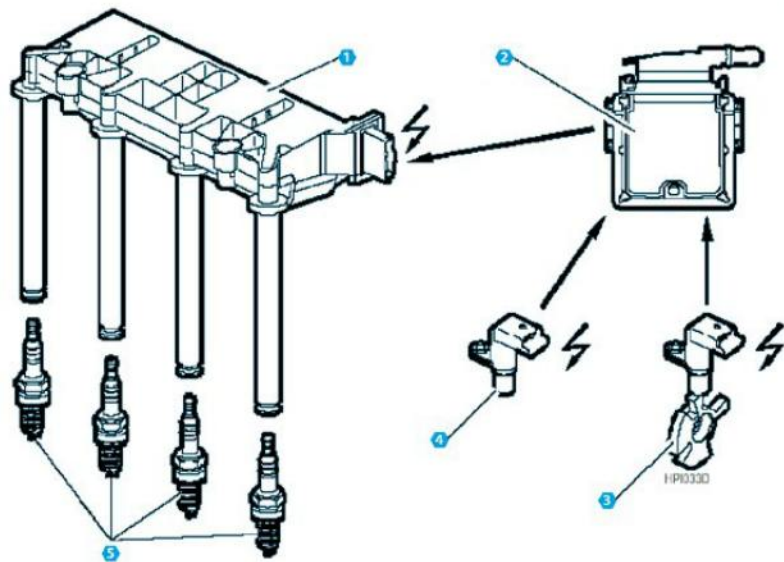


Figure 16.3 Système d'allumage.

- 1 Bobines.
- 2 Calculateur injection allumage.
- 3 Capteur de position arbre à cames.
- 4 Capteur PMH.
- 5 Bougies d'allumage.

Les éléments constitutifs

Le calculateur

Le calculateur numérique (figure 16.4) gère simultanément l'allumage et l'injection. Le calculateur reçoit les informations sous forme de tensions électriques qu'il va comparer avec les tensions de référence. Le calculateur numérique est conçu comme un micro-ordinateur (figures 16.4 et 16.5). Il prend en compte les valeurs chiffrées des signaux reçus des capteurs et trouve un résultat. Selon le programme préétabli, il déclenche l'allumage au moment optimal.



Figure 16.4 Composant d'un calculateur numérique.

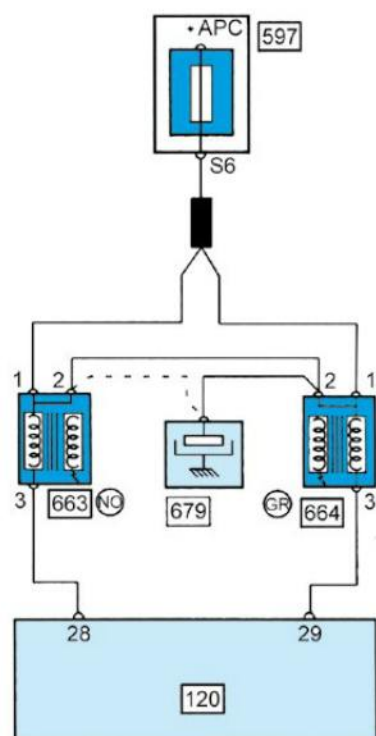


Figure 16.5 Schéma de câblage d'un circuit d'allumage (document Renault).

597 : fusible.
663 et 664 : bobines d'allumage doubles.
679 : condensateur radio.
120 : calculateur allumage/injection.

Le capteur régime-position

Un disque de tôle appelé « cible» est fixé sur le volant moteur (figure 16.6). Le capteur est fixé sur la cloche d'embrayage, et sa position n'est pas modifiable. La cible comporte un certain nombre de dents espacées de façon régulière. Deux dents ont été supprimées pour créer un repérage des points morts hauts. La vitesse de défilement des dents permet au capteur de mesurer la fréquence grâce à ces deux indices :

- » position des points morts hauts,
- » fréquence de rotation.

Le calculateur déterminera de manière instantanée le point d'avance à l'allumage approprié.

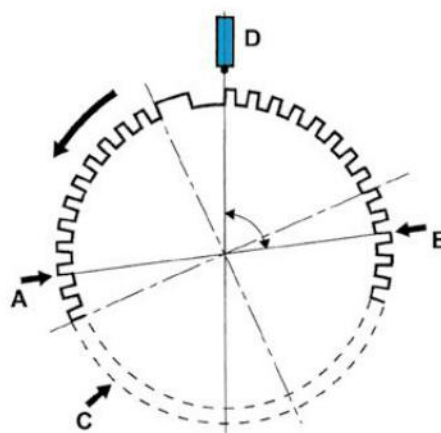


Figure 16.6 Cible (document Renault).

- A. PMH 1 et 4.
- B. PMH 2 et 3.
- C. Cible.
- D. Capteur.

Le capteur cliquetis

Le capteur de cliquetis de type piézoélectrique est monté sur le bloc-moteur. Ce capteur permet de détecter le cliquetis (phénomène vibratoire dû à une inflammation détonante du mélange dans la chambre de combustion). Ce phénomène, répété, peut entraîner la destruction de pièces mécaniques par élévation anormale de la température des parois.

Ce capteur délivre une tension correspondant aux vibrations moteur. Après réception de cette information, le calculateur procède à une diminution de l'avance à l'allumage du ou des cylindres concernés de 2° avec une décrémentation maxi de 12° . La réincrémentation se fera progressivement.

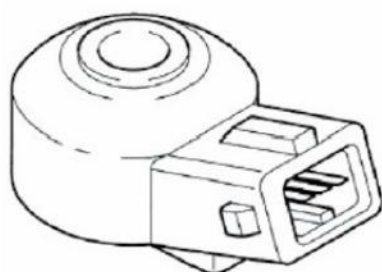


Figure 16.7 Capteur de cliquetis.



Figure 16.8 Capteur d'arbre à cames.



Figure 16.9 Capteur de pression d'admission.

Parallèlement au retrait d'avance, le calculateur applique un enrichissement du mélange air-carburant afin d'éviter une élévation de température trop importante des gaz d'échappement.

Le capteur d'arbre à cames

Le capteur d'arbre à cames fournit la position des arbres à cames. Cela permet de connaître la position du PMH du moteur. Le fonctionnement est analogue à celui du capteur de vilebrequin. Une couronne se trouve aussi sur l'arbre à cames. Le capteur d'arbre à cames est monté directement à côté à l'intérieur de la culasse. En cas de défaillance du capteur d'arbre à cames, le démarrage du moteur devient impossible.

Le capteur de pression d'admission

La connaissance de la pression régnant dans la tubulure d'admission permet de calculer une valeur plus précise de la masse d'air pour chaque cylindre. À partir de cette valeur, on adapte la durée d'ouverture de l'injecteur et par conséquent le débit d'injection.

Les bobines

Lorsque la bobine est parcourue par le courant primaire (interrupteur fermé), il se crée un champ magnétique (figure 16.10).

La coupure brutale du courant primaire (ouverture de l'interrupteur) entraîne la création, dans le bobinage secondaire, d'une tension induite secondaire de 20 à 30 000 V.

La bobine jumostatique est une bobine double qui comporte deux circuits primaires et deux circuits secondaires (Figure 16.11).

Chaque extrémité du bobinage secondaire est reliée à une bougie.

Les cylindres 1 et 4 reçoivent une étincelle simultanément.

Les cylindres 2 et 3 reçoivent une étincelle simultanément.

L'allumage jumostatique est aussi appelé « allumage à étincelle perdue ».

Le système d'allumage statique séquentiel possède une bobine par cylindre (figure 16.12).

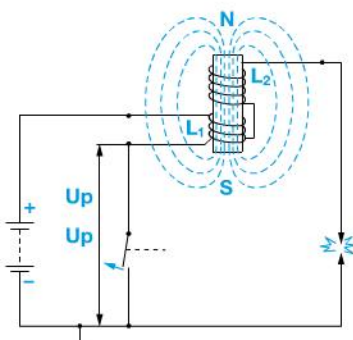


Figure 16.10 Bobine.

Figure 16.11 Bobine Jumostatique.

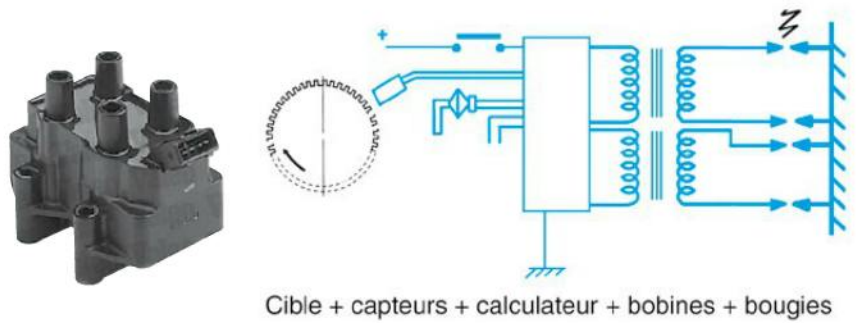
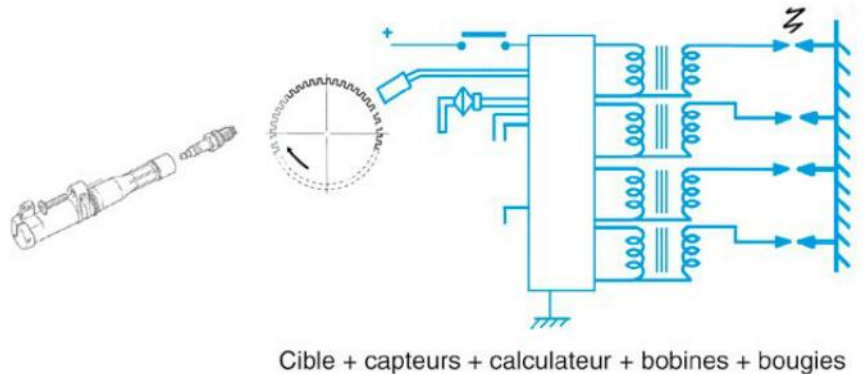


Figure 16.12 Bobine statique.



224

Les bougies

Les principales qualités requises pour les bougies sont :

- » de posséder une résistance en série permettant une tension d'arc élevée,
- » d'être parfaitement isolantes (fuites possibles vers la masse avant les électrodes),
- » d'évacuer rapidement la chaleur vers le circuit de refroidissement afin d'éviter les risques d'auto-allumage ainsi que la fusion des électrodes. La tension d'arc est fonction notamment de l'écartement des électrodes et de leur état (figure 16.13).

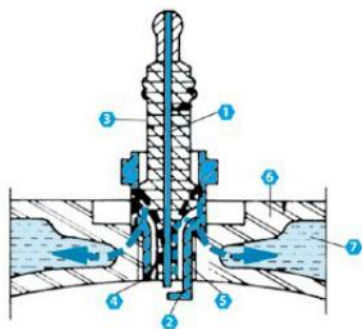


Figure 16.13 Bougie.

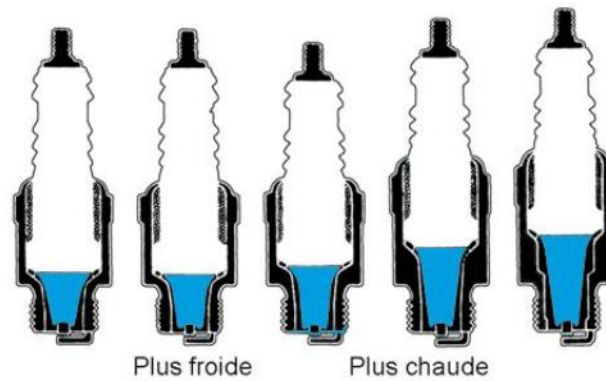
- ① Électrode.
- ② Électrode de masse.
- ③ Isolant.
- ④ Bec.
- ⑤ Culot.
- ⑥ Culasse.
- ⑦ Circuit de refroidissement.
- - - Trajet de la chaleur.

L'isolation est réalisée grâce à la présence d'un isolateur moulé dans une matière spéciale et exempte de fissure.

L'évacuation des calories est réalisée par le contact plus ou moins direct du bec isolant avec le culot, ce dernier étant vissé dans la culasse en un point où le circuit de refroidissement est proche.

Si le bec isolant est long, la chaleur devra parcourir une plus grande distance avant d'être évacuée. Ce type de bougie est appelé bougie chaude. Inversement, plus le bec isolant est près du culot et plus la bougie est dite froide.

Figure 16.14 Gamme thermique des bougies
(Document SEV Marchal).



Chaque moteur doit être équipé du type de bougie dont le degré thermique est le plus approprié à son fonctionnement (figure 16.14).

L'évacuation des calories est améliorée par l'emploi de bougies sans joint à siège conique.

Remarque

On facilite le passage de l'étincelle en rendant négative l'électrode centrale de la bougie. On réalise cette condition par un sens précis d'enroulement du bobinage secondaire de la bobine par rapport à celui du bobinage primaire (loi du tire-bouchon de Maxwell).

225

Figure 16.15 Anatomie d'une bougie
(Document Bosch).

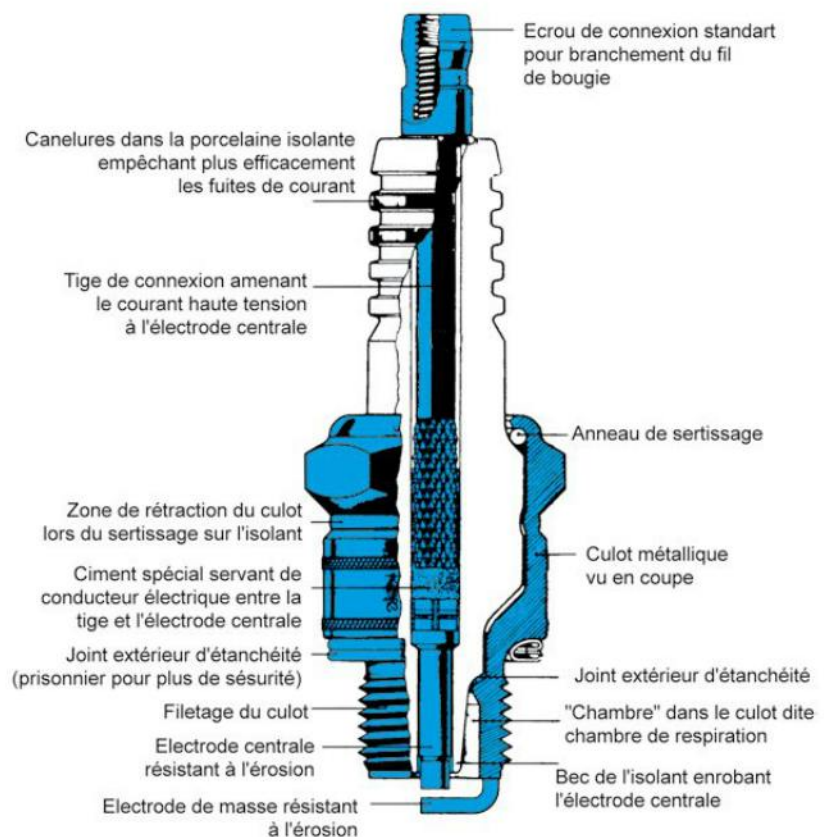
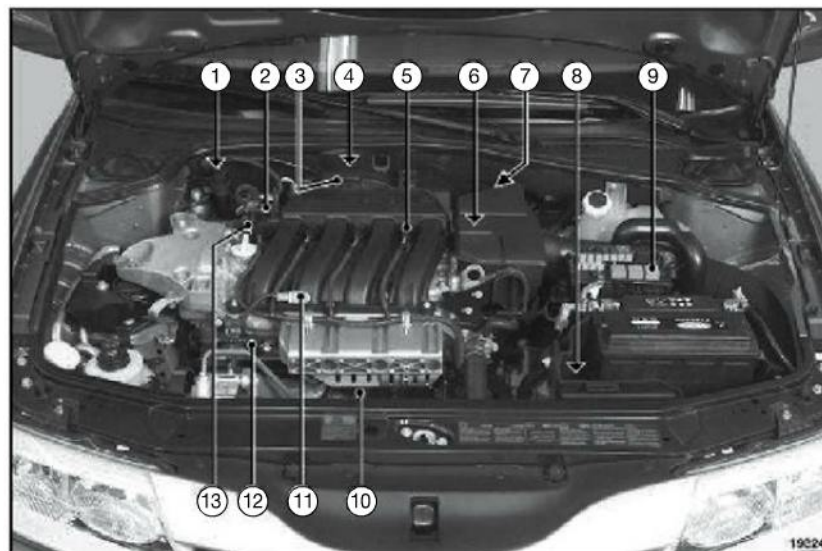


Figure 16.16 Allumage / injection :
Implantation des éléments.

- ❶ Électrovanne de recyclage des vapeurs de carburant.
- ❷ Capteur de pression collecteur.
- ❸ Boîtier papillon.
- ❹ Sonde à oxygène amont.
- ❺ Bobines d'allumage.
- ❻ Capteur de température d'eau.
- ❼ Capteur de régime et position.
- ❽ Calculateur d'injection.
- ❾ Boîtier interconnexion moteur.
- ❿ Capteur de cliquetis.
- ⓫ Capteur de température d'air.
- ⓬ Rampe d'injection.
- ⓭ Électrovanne de déphaseur d'arbre à cames d'admission.



On constate grâce à l'AEI :

- » une plus grande fiabilité, les seuls éléments d'usure étant les bougies ;
- » un point d'avance plus précis car il est indéréglable et est le résultat d'un plus grand nombre de paramètres.

16.3 Analyse fonctionnelle

Principe

Le calculateur reçoit les informations des capteurs en ce qui concerne principalement :

- » la position du vilebrequin par rapport au PMH (A, figure 16.17),
- » la fréquence de rotation,
- » la position du cylindre 1 (donc des 4 cylindres) (B, figure 16.17),
- » la charge du moteur (pression tubulure) (C, figure 16.17),
- » la présence de cliquetis (détonations).

Après traitement de ces informations, il déclenche la bobine d'allumage concernée au point d'allumage approprié.

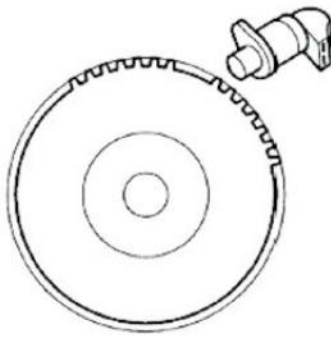
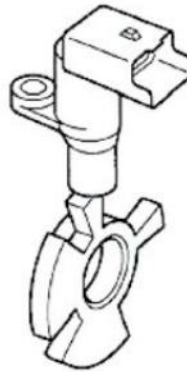
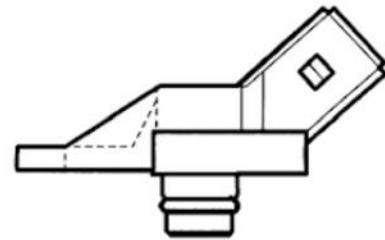
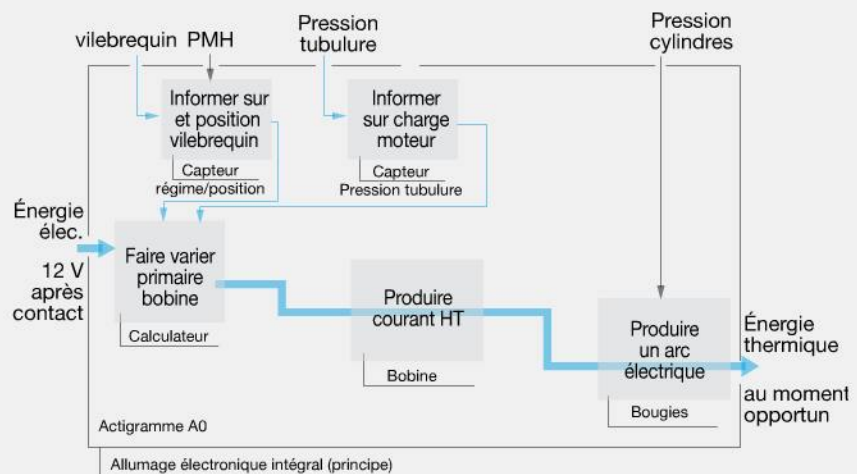
Capteur de position
(A)Capteur référence cylindre
(B)Capteur pression tubulure
(C)

Figure 16.17 Les différents capteurs.

Fonction

Figure 16.18 Analyse descendante des systèmes AEI.



227

- 16 - Principe de l'allumage

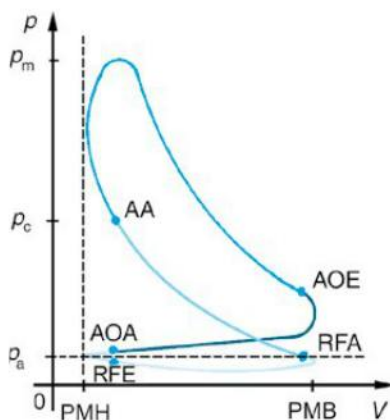


Figure 16.19 Position du point d'avance à l'allumage sur le diagramme réel

La combustion du mélange ne se faisant pas dans un temps nul, nous savons que celle-ci doit être commencée avant le point mort haut (avance à l'allumage). Cela permet de provoquer une montée en pression plus rapide et d'obtenir la poussée maximale sur le piston lorsque la bielle et le bras de manivelle forment un angle de 90° .

On nomme ce réglage « point d'avance initial » (figure 16.19).

Observons sur l'épure circulaire et sur le diagramme (figures 16.20 et 16.21) le cycle moteur dans sa phase explosion-détente.

Nous voyons, en figure 16.21 :

- » en ❶, le déclenchement de l'allumage ou avance initiale,
- » en ❷, le piston passe par le PMH, la combustion est déjà commencée,

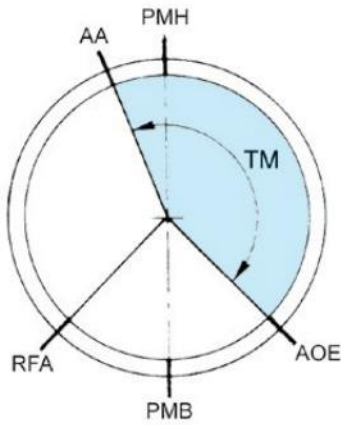


Figure 16.20 Position des points de réglage au 2^e tour du cycle à quatre temps (de l'allumage à l'ouverture de la soupape d'échappement).

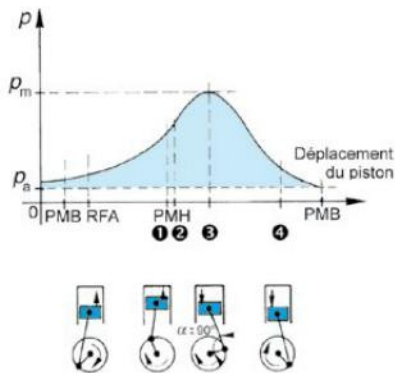


Figure 16.21 Évolution de la pression pendant le temps moteur.

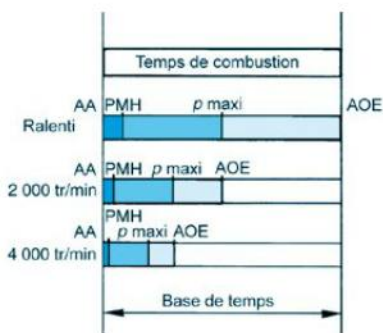


Figure 16.22 Réalisation des phases du temps moteur dans une base de temps.

- » en ③, la pression est maximale lorsque la bielle et le vilebrequin forment un angle droit,
- » en ④, l'ouverture de la soupape d'échappement (AOE).

L'augmentation du régime moteur a pour effet de réduire le temps imparti au déroulement du cycle moteur.

Supposons que la vitesse de combustion soit constante. Comparons le temps mis par le piston pour se déplacer du point AA jusqu'au point AOE (figure 16.22).

Au ralenti, le temps de combustion est identique au temps mis par le piston pour parcourir la distance AA-AOE.

À la vitesse moyenne (exemple : 2 000 tr/min), le temps dont dispose le piston pour parcourir la même distance diminue alors que la vitesse de combustion reste la même.

À haute vitesse (exemple : 4 000 tr/min), le phénomène est encore accentué.

La combustion se trouve donc décalée dans le temps par l'augmentation de vitesse de rotation du moteur.

La pression de poussée ne se fera plus au point prévu (perte d'énergie mécanique). La combustion se poursuivra après l'ouverture de la soupape d'échappement (perte d'énergie thermique).

Nous voyons qu'il est nécessaire d'avancer le point d'allumage proportionnellement à l'augmentation de la vitesse de rotation du moteur, afin de conserver la pression maximale au point prévu (figure 16.24).

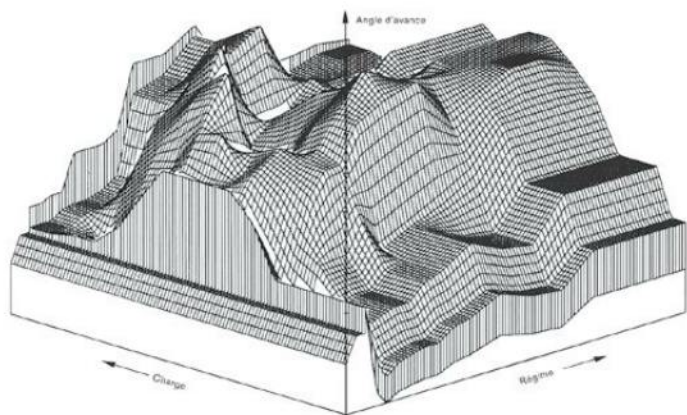


Figure 16.23 Évolution de l'angle d'avance.

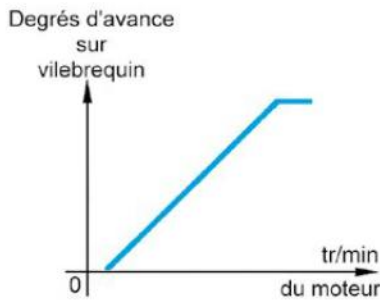


Figure 16.24 Courbe d'avance à l'allumage en fonction de la vitesse de rotation

Ce dispositif doit fonctionner automatiquement.

Dans l'allumage électronique, le calculateur comporte une loi d'avance qui modifie le point d'allumage en fonction de la fréquence de rotation du moteur.

Calcul de l'avance et commande de l'allumage en fonction des paramètres suivants

- » Régime et position moteur (capteur régime moteur).
- » Pression d'admission (capteur pression tubulure d'admission).
- » Détection de cliquetis (capteur de cliquetis).
- » État compresseur de climatisation (information calculateur climatisation ou pressostat).
- » Stabilité du régime moteur au ralenti et hors ralenti.
- » Positionnement cylindre n°1 (capteur référence cylindre).
- » État thermique du moteur (thermistance eau moteur).
- » Vitesse véhicule (capteur vitesse véhicule).
- » Masse d'air absorbée (thermistance air admission, capteur pression tubulure admission et capteur régime moteur).
- » Tension batterie (batterie).
- » Position de l'électrovanne distribution variable (électrovanne distribution variable).

Résumé

Rôle de l'énergie électrique à haute tension

L'allumage des moteurs a pour rôle de produire la quantité d'énergie thermique nécessaire à l'inflammation du mélange comprimé. L'énergie est produite sous la forme d'un arc électrique à haute tension.

Production d'une haute tension

La transformation du courant basse tension en un courant haute tension est réalisée par une bobine d'induction ou bobine d'allumage.

Le phénomène d'élévation de tension est réalisé par :

- » un bobinage primaire comportant peu de spires de forte section de fil,
- » la création d'un courant induit dans le bobinage secondaire à chaque variation de flux.

Le courant induit peut être à haute tension si :

- » la variation de flux se fait dans un temps très court,
- » le rapport du nombre des spires de chaque bobinage est grand,
- » la résistance du bobinage secondaire est importante.

Le remplissage magnétique de la bobine est limité par l'intensité supportable par le bobinage primaire sans échauffement exagéré.

Caractéristiques des bougies d'allumage

Les bougies doivent posséder les caractéristiques suivantes :

- » tension d'arc élevée,
- » isolement parfait même aux très hautes tensions,
- » évacuation rapide des calories excédentaires.

Les bougies d'allumage sont classées selon leur position dans la gamme thermique, en fonction de leur aptitude à évacuer plus ou moins rapidement la chaleur.

Principe de l'allumage électronique intégral (AEI)

L'allumage électronique intégral ne comporte aucune pièce en mouvement.

Un certain nombre de capteurs émettent des signaux électriques reçus par un calculateur électronique.

Après traitement des informations, celui-ci transmet au bobinage primaire de la bobine des variations de courant permettant la production de l'impulsion à haute tension nécessaire à la production de l'arc électrique à la bougie.

Point d'allumage

Il est déterminé par le calculateur en fonction des paramètres moteur :

- » position du vilebrequin,
- » fréquence de rotation,
- » charge du moteur,
- » présence de cliquetis.

Avantages de l'AEI

- » Fiabilité dans le temps : aucune pièce en mouvement.
- » Précision : pas de déréglage possible, point d'allumage tenant compte d'un grand nombre de paramètres.
- » Rationalité : possibilité d'un seul calculateur pour l'allumage et l'injection.

Rôle de l'avance à l'allumage

L'avance à l'allumage permet d'obtenir une pression de poussée des gaz maximale sur le piston lorsque la bielle et la manivelle du vilebrequin forment un angle de 90°.

Avance initiale

On appelle « avance initiale » l'avance de base nécessaire au fonctionnement du moteur au ralenti.

Testez vos connaissances



1. Pour que la poussée soit maximale sur le piston, il faut déclencher l'étincelle :

- a ☐ *au PMH*
- b ☐ *avant le PMH*
- c ☐ *après le PMH*

2. Plus la vitesse du moteur augmente, plus l'avance doit :

- a ☐ *augmenter*
- b ☐ *diminuer*
- c ☐ *rester constante*

3. À vitesse stabilisée, si le conducteur demande la pleine charge (accélérateur brutalement à fond), l'avance doit :

- a ☐ *augmenter*
- b ☐ *diminuer*
- c ☐ *rester constante*

4. Dans l'AEI, quel est l'élément qui crée les variations de champ magnétique dans la (ou les) bobine(s) ?

- a ☐ *le capteur PMH*
- b ☐ *le calculateur*
- c ☐ *les bougies*

5. Comment règle-t-on l'avance initiale sur un AEI ?

- a ☐ *non réglable*
- b ☐ *en modifiant l'écartement des bougies*
- c ☐ *en modifiant l'entrefer du capteur PMH*

231

Entraînez-vous

1. Relevez les caractéristiques de l'allumage électronique sur le moteur de votre choix.
2. Effectuez les schémas et expliquez son fonctionnement.
3. Recherchez dans une revue technique comment on contrôle un capteur de PMH et avec quel matériel.

Partie 6

Les véhicules électriques et hybrides

Le véhicule électrique

chapitre 17

17.1 Mise en situation

Les véhicules électriques sont des véhicules dont l'élément de liaison avec les roues motrices est constitué d'un ou de plusieurs moteurs électriques.

On peut distinguer des véhicules :

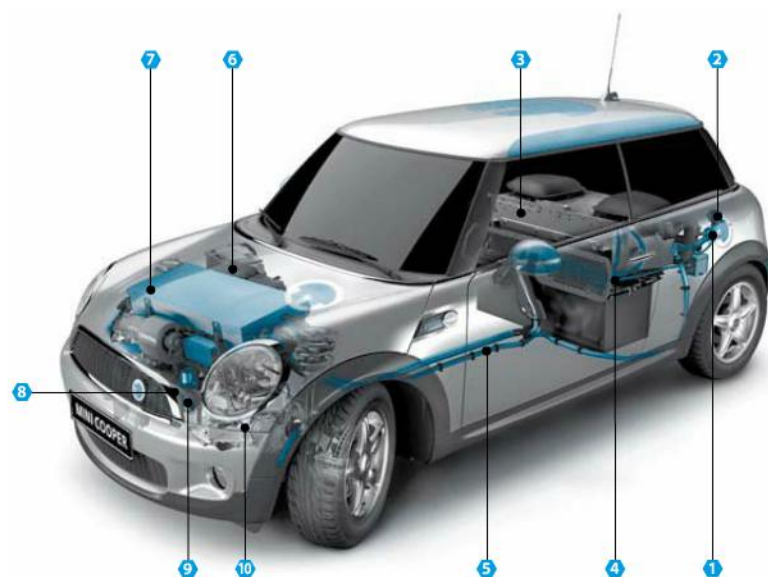
- » tout électriques (figures 17.1) ;
- » hybrides (voir chapitre 18) ;
- » à pile à combustible (figures 17.26 et 17.27).

Les véhicules électriques présentent de nombreux avantages :

- » pas de pollution directe, aucune émission de gaz ni de particules ;

Figure 17.1 Voiture électrique.

- 1 Prise de recharge.
- 2 Arrêt d'urgence.
- 3 Batterie.
- 4 Boîtier de protection.
- 5 Câbles haute tension.
- 6 Centrale de commande.
- 7 Électronique de puissance.
- 8 Moteur électrique.
- 9 Pompe à eau électrique.
- 10 Transmission.



- » silence de fonctionnement ;
- » conduite aisée, avec transmission intégrale, sans embrayage ni boîte de vitesses.

Les principaux inconvénients du tout électrique sont :

- » la masse et le volume des batteries ;
- » la faible autonomie du véhicule sans recharger les batteries (environ 100 km).

Il sera possible de créer des batteries encore plus légères et plus performantes. En attendant ces progrès techniques, certains véhicules électriques sont équipés en parallèle :

- » d'un moteur thermique (véhicule hybride) ;
- » d'une pile à combustible (voir en fin de chapitre).

Ressemblant à première vue au véhicule thermique, le véhicule électrique se distingue néanmoins de ce dernier par son châssis spécifique. Ce châssis intègre une batterie HT (Haute Tension) dont le volume et la masse sont importants. Cela permet une répartition des masses favorisant la stabilité dynamique du véhicule.

Figure 17.2 Composants d'une motorisation électrique (Document Citroën).

- ❶ Moteur.
- ❷ Batterie de traction.
- ❸ Chargeur embarqué.
- ❹ Onduleur.



Ce mode de motorisation nécessite des composants qui n'ont rien de commun avec ceux utilisés en motorisation thermique, comme le montre la figure 17.2.

- » **Batterie HT** : la batterie haute tension est le dispositif de stockage de l'énergie embarquée (on peut la comparer au réservoir de carburant pour un modèle thermique).

- » **Moteur** : le moteur convertit l'énergie électrique en énergie mécanique durant les phases de traction et inversement l'énergie mécanique en énergie électrique lors des phases de freinage (régénération).
- » **Convertisseur onduleur** : le convertisseur est le calculateur de puissance du moteur. Le convertisseur reçoit ainsi les paramètres de multiples capteurs dont les pédales d'accélérateur et de frein puis commande le moteur en traction ou en régénération (freinage).
- » **Batterie 12 V** : les circuits de bord des véhicules électriques et thermiques nécessitent tous deux une alimentation fournie par une batterie 12 V.
- » **Convertisseur DC/DC** : le convertisseur DC/DC permet de recharger la batterie 12 V au moyen de la batterie HT (haute tension) et l'alimentation des consommateurs électriques lors de l'activation du véhicule par la mise du contact.
- » **Chargeur** : le chargeur permet de convertir l'énergie fournie par le réseau de distribution d'électricité (220 ou 380 V ~) en courant continu afin de recharger la batterie HT.

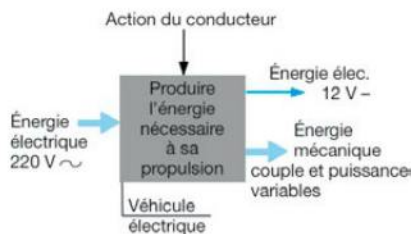


Figure 17.3 Fonction globale (niveau A-O).

Du fait de leur faible autonomie (environ 100 km), ces véhicules sont réservés au trafic urbain, et notamment aux véhicules de service.

Les particuliers disposant d'un véhicule principal peuvent aussi adhérer au modèle électrique en tant que second véhicule.

237

- 17 - Le véhicule électrique

17.2 Analyse structurelle

La batterie de traction

La batterie de traction permet de stocker l'énergie électrique nécessaire pour alimenter le moteur électrique ainsi que le système de climatisation et de chauffage

La batterie de traction est composée 88 cellules regroupées dans 12 modules.

Chaque module de la batterie de traction est surveillé par un calculateur contrôle cellule batterie de traction, qui a pour rôle de :

- » gérer l'équilibrage de la charge et de la décharge des différentes cellules du module de batterie de traction ;

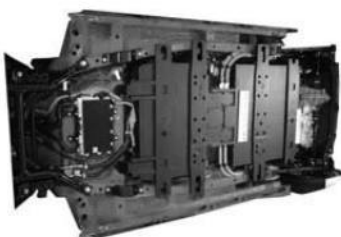


Figure 17.4 La batterie est placée sous le plancher.

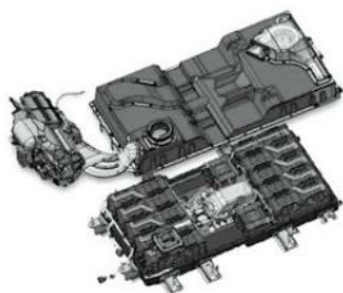


Figure 17.5 Composants de la batterie.

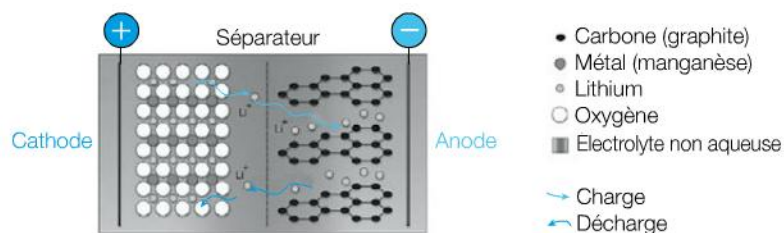


Figure 17.6 Fonctionnement de la batterie.

La batterie lithium-ion fournit un courant lorsque ses ions se déplacent de l'anode vers la cathode. Un mouvement inverse est effectué lors d'une opération de recharge.

» mesurer et transmettre la température et la tension des différentes cellules du module de batterie de traction au calculateur de batterie de traction.

Le moteur électrique

La machine électrique de traction a pour rôle de transformer une énergie électrique en une énergie mécanique en phase de roulage ou d'accélération véhicule.

La machine électrique de traction permet également de transformer l'énergie mécanique (rotation des roues) en énergie électrique, lors des phases de décélération ou de freinage du véhicule.

Le réducteur

Le réducteur se présente comme une boîte à vitesses sans embrayage et n'ayant qu'un seul rapport.

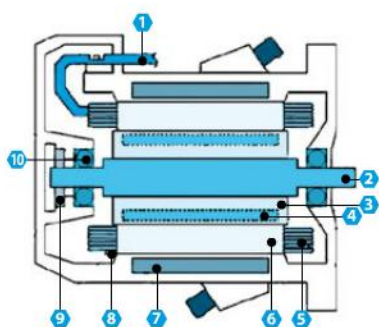


Figure 17.8 Organes du moteur.

- 1 Alimentation électrique.
- 2 Entraînement moteur.
- 3 Rotor.
- 4 Masse polaire.
- 5 Bobinage.
- 6 Stator.
- 7 Liquide de refroidissement.
- 8 Moteur électrique.
- 9 Pompe à eau électrique.
- 10 Roulement.



Figure 17.9 Le réducteur.

Le moteur électrique est donc en prise permanente avec les roues. Une commande par câble reliée à un sélecteur de position reprenant les positions P, R, N et D d'une transmission automatique, permet un blocage mécanique du réducteur. Ce blocage est réalisé lorsque le conducteur place le levier de sélection sur la position P.

Le déplacement du sélecteur vers les autres positions R, N et D n'a aucun effet mécanique sur le réducteur.

Il provoque seulement le mouvement d'un capteur de position (doublé) dont le rôle est d'informer le calculateur VE de la volonté du conducteur.

La marche arrière est obtenue par inversion du sens de rotation du moteur.



Figure 17.10 Calculateur contrôle machine électrique (CCME).

Le calculateur

Le calculateur contrôle machine électrique est utilisé de deux manières :

- » lors de la traction ;
- » lors des phases de freinage/récupération.

Lors de la traction, le calculateur contrôle machine électrique pilote la machine électrique en 330 V alternatif triphasé à partir du courant de la batterie de traction (330 V continu).

Lors de la phase de récupération/freinage, le calculateur contrôle machine électrique pilote la machine électrique et transforme le 330 V alternatif triphasé de la machine électrique en courant de recharge pour la batterie de traction (330 V continu).

17.3 La charge du véhicule

Il existe 3 façons de recharger la batterie de traction :

- » la charge rapide ;
- » la charge normale ;
- » la « récupération » : lors des phases de freinage et décélération.

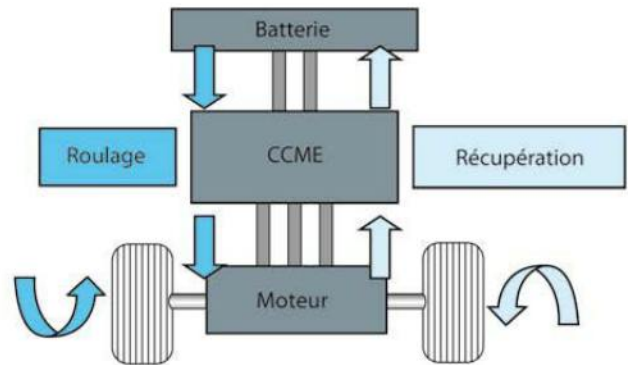


Figure 17.11 Charge rapide, charge normale et « récupération ».

Charge rapide

- » La charge rapide se fait sur des bornes dédiées équipées de prises JARI LV3.
- » Elle permet de charger 80 % de la batterie de traction en 30 minutes.
- » La borne de recharge est directement reliée à la batterie de traction.
- » La borne de recharge est en dialogue permanent avec le véhicule pour fermer les relais de charge rapide et gérer le courant délivré via la température de la batterie de traction.

Deux relais spécifiques internes à la batterie permettent de connecter le chargeur rapide à la batterie de traction. Ces relais sont commandés par le calculateur véhicule électrique après avoir établi le dialogue avec le chargeur rapide. Dès que la batterie atteint les 80 % de charge, ces deux relais ouvrent la liaison batterie de traction – chargeur rapide.



Figure 17.12 Borne de charge rapide.

Charge normale : cordon de charge

Le cordon de charge est équipé d'un pistolet, d'une prise secteur et d'un boîtier électronique. Le cordon doit être branché en premier sur la prise secteur puis sur le véhicule.

Le boîtier permet de :

- » contrôler le niveau de courant disponible sur la prise secteur et en informer le véhicule ;
- » contrôler la conformité de la terre sur la prise secteur ;
- » contrôler le bon verrouillage du pistolet sur le véhicule ;
- » informer l'utilisateur d'un éventuel défaut de la charge.

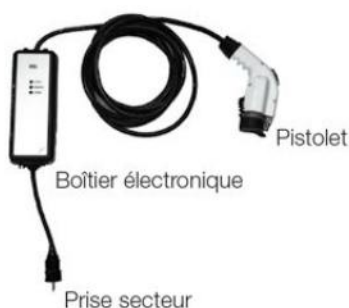


Figure 17.13 Cordon de charge.

Chargeur embarqué convertisseur DC/DC

Le chargeur embarqué convertisseur DC/DC est aussi bien utilisé pendant la recharge que pendant le roulage :

- » la partie chargeur est utilisée uniquement lors de la recharge ;
- » la partie convertisseur DC/DC est utilisée lors de la recharge et lors du roulage du véhicule.

Figure 17.14 Synoptique de charge.



Figure 17.15 Chargeur embarqué.

- ❶ Connecteur 2 × 1 voie – alimentation batterie de traction (plus et masse).
- ❷ Connecteur 1 voie – alimentation batterie de servitude.
- ❸ Connecteur 13 voies – alimentation/signaux chargeur.
- ❹ Connecteur 5 voies – alimentation du secteur (phase/neutre/masse-terre).

Fonctionnement du chargeur embarqué :

- » le chargeur embarqué permet de convertir l'énergie alternative du secteur du domicile en énergie pour recharger la batterie ;
- » le chargeur accepte en entrée des courants compris entre 10 A et 16 A ;
- » le chargeur délivre une tension continue de 330 V et un courant dépendant de celui du secteur ;
- » le chargeur embarqué est opérationnel uniquement à des températures comprises entre -20 °C et 59 °C.

Fonctionnement du convertisseur DC/DC :

- » le convertisseur DC/DC permet de convertir l'énergie de la batterie de traction (330 V DC) en énergie pour recharger la batterie de servitude (14,4 V DC) ;
- » le convertisseur est opérationnel pendant la charge de la batterie de traction et le roulage du véhicule ;
- » lorsque la batterie de traction est chargée, le convertisseur s'éteint et ne charge plus la batterie de servitude, même si le pistolet de charge (normale ou rapide) est connecté au véhicule

Principe de la recharge

Lors d'une décélération ou d'un freinage, les roues du véhicule entraînent la machine électrique de traction. La rotation du moteur permet de créer un courant électrique (récupération) qui est utilisé pour recharger la batterie de traction (cheminement inverse à la traction). Conduire avec beaucoup d'anticipation permet donc de récupérer de l'énergie et d'accroître l'autonomie. La récupération est indiquée au combiné.

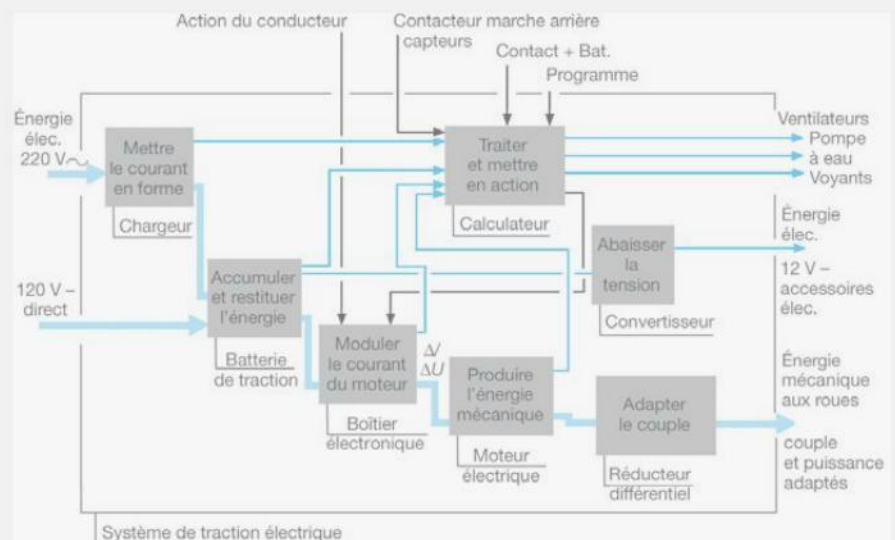
La quantité d'énergie récupérée va dépendre de la vitesse du véhicule : plus le véhicule roule vite au moment du freinage ou de la décélération, plus le moteur sera capable de fournir de l'électricité sans bloquer les roues arrière. L'indicateur de recharge varie donc en fonction de la vitesse de décélération.

La récupération n'utilise qu'une des trois phases du moteur, on a donc un rendement de recharge assez faible. Les deux autres phases sont utilisées pour freiner le véhicule en créant un champ magnétique inverse.

17.4 Analyse fonctionnelle

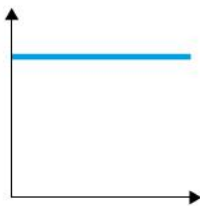
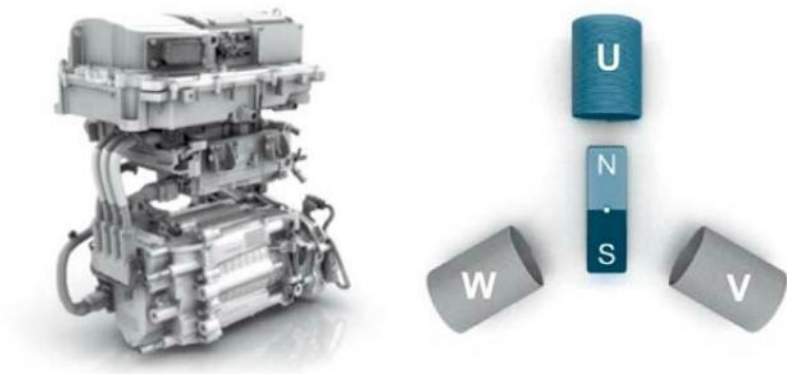
Fonction

Figure 17.16 Analyse descendante du système de traction électrique (niveau A0).



Principe de fonctionnement du moteur alternatif

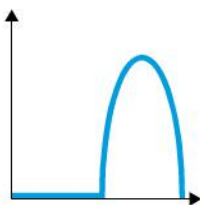
Figure 17.17 Moteur alternatif.



En alimentant la bobine U, celle-ci attire l'aimant. Ensuite, en alimentant la bobine V, l'aimant est attiré par la bobine V puis en alimentant la bobine W, l'aimant est attiré par la bobine W. On crée ainsi une rotation du rotor dans le sens horaire (champ tournant).

Inversion de sens de rotation

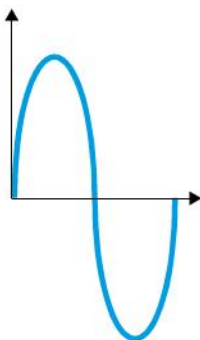
En alimentant les bobines dans l'ordre inverse, on crée une rotation du rotor dans le sens antihoraire (champ tournant).



Les avantages d'une alimentation progressive

Plus de souplesse grâce à une progressivité du champ magnétique.

L'alimentation progressive des bobines permet d'éviter les vibrations de l'induit.



Les avantages d'une alimentation par courant alternatif

Utilisation de la force de répulsion de l'aimant. La combinaison des forces d'attraction et de répulsion de l'aimant permet d'obtenir un moteur plus puissant est plus souple.

Dans les phases de décélération et de freinage, la machine électrique de traction va fournir de l'énergie pour recharger la batterie de traction.

Récupération d'énergie

Figure 17.18 Récupération d'énergie.

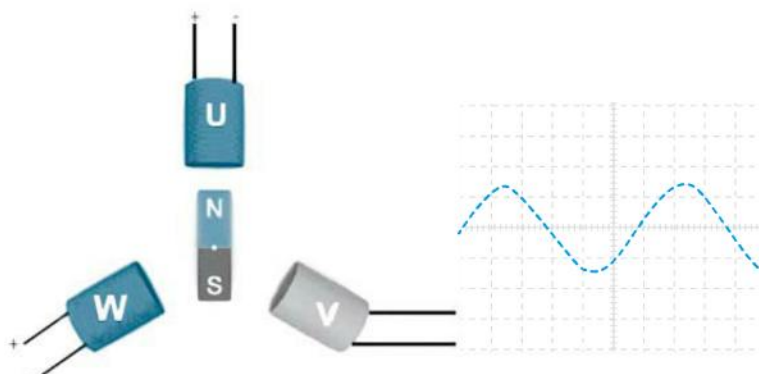


Figure 17.19 Blocage du moteur.

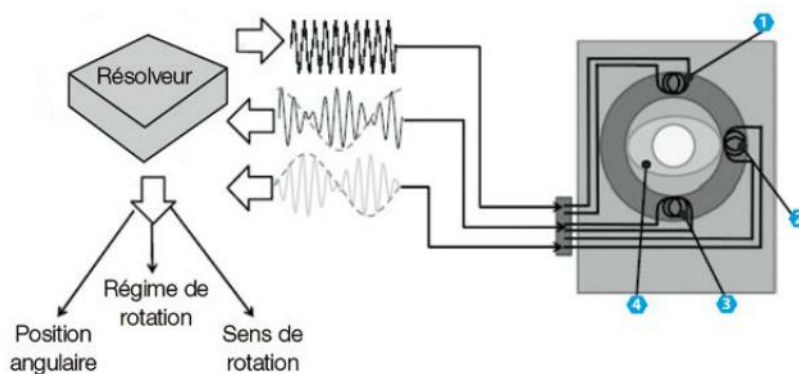
Pour limiter le couple résistant du moteur, nous ne pouvons pas moduler le champ magnétique dans le rotor comme sur un alternateur. Donc, pour limiter le couple et pour le moduler, il faut alimenter deux phases de façon alternative (en fonction de la position du rotor) et on récupère de l'énergie sur une phase. Ensuite, le calculateur de contrôle machine électrique (CCME) se comporte comme le pont de diodes de l'alternateur d'un véhicule thermique, et redresse le courant pour recharger la batterie de traction.

Lorsqu'un élément vient bloquer ou ralentir le rotor, l'alimentation du stator n'est plus synchronisée avec la rotation du rotor, le moteur se bloque et risque de détruire les phases par échauffement.

On installe un capteur de position (résolveur) sur le rotor afin de synchroniser les alimentations du stator avec la position du rotor. D'où le nom de machine électrique de traction synchrone (moteur synchrone).

Figure 17.20 Composition et fonctionnement du résolveur.

- 1 Bobine signal d'excitation.
- 2 Bobine signal sinus.
- 3 Bobine signal cosinus.
- 4 Came.



Principe de fonctionnement

Le calculateur contrôle machine électrique envoie un signal sinusoïdal à la bobine d'excitation. Ce signal est renvoyé par les bobines sinus et cosinus déformé en fonction de la position de la came. Cela permet de déterminer une position angulaire très précise des masses polaires du rotor de machine électrique de traction.

Fonctions du résolveur

- » Déterminer une position angulaire à tous les régimes de rotation (de 0 à régime maximal).
- » Déterminer le sens de rotation de la machine électrique :
 - signal cosinus puis signal sinus = sens horaire,
 - signal sinus puis cosinus = sens antihoraire.
- » Déterminer la vitesse de rotation (nombre de période par seconde = nombre de tours par seconde).

245

Principe du calculateur de contrôle

Figure 17.21 Calculateur de contrôle.



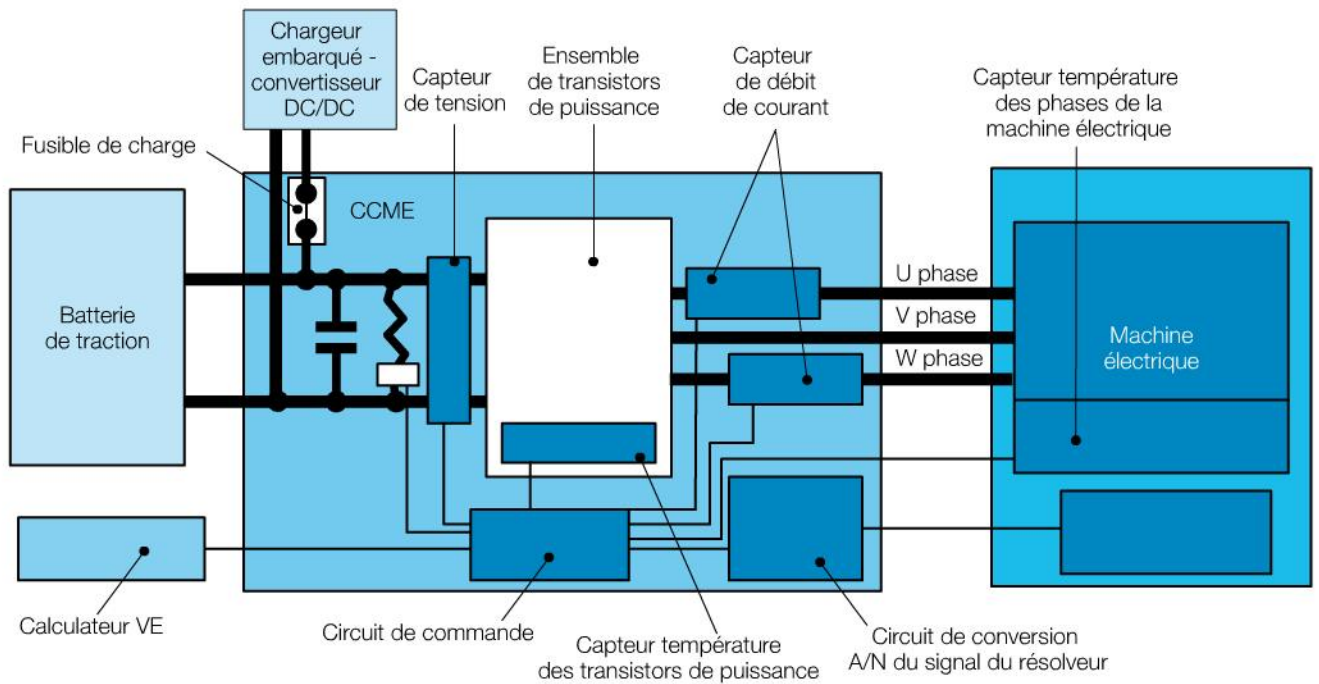
Pour le véhicule électrique, des moteurs du même type que dans l'industrie sont utilisés pour leur coût et leur fiabilité. Or, il est impossible actuellement de stocker autre chose que du courant continu.

Il faut donc convertir ce courant continu en courant alternatif triphasé pour permettre l'alimentation du moteur. C'est le rôle du calculateur contrôle machine électrique (CCME). Sur le système présenté en figure 17.22, le bloc est dit « machine électrique », car il est à la fois moteur et récupérateur d'énergie.

Pour créer un signal alternatif à partir d'un signal continu, le calculateur utilise un hacheur.

Le principe du hacheur est de créer un signal impulsionnel de type PWM avec des transistors (plus rapide qu'un relais ou un interrupteur).

Figure 17.22 Principe du calculateur de contrôle.



246

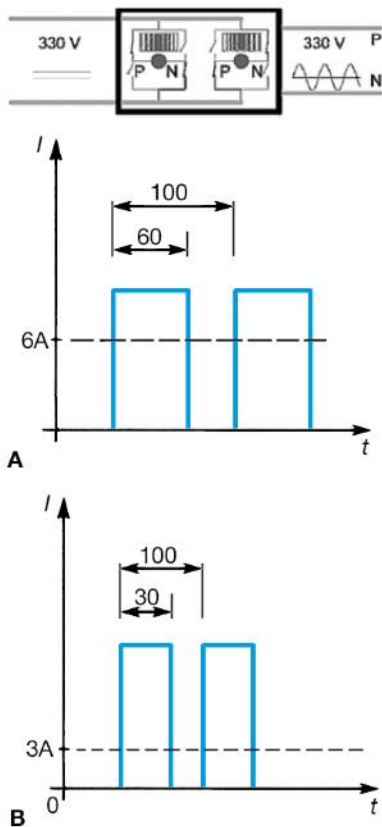


Figure 17.23 Principe du hacheur.

- A. Durée de conduction sur 60 % du cycle.
B. Durée de conduction sur 30 % du cycle.

Exemple

Considérons, par construction dans un circuit fermé comportant un bobinage, que nous obtenons une intensité $I = 10 \text{ A}$.

Si le circuit est alimenté par intermittence, le courant prend une valeur intermédiaire en fonction du pourcentage du temps de fermeture par rapport au cycle.

Pour une durée de conduction de 60 %, le rapport cyclique sera :

$$\frac{10 \text{ A} \cdot 60}{100} = 6 \text{ A}$$

En jouant sur la largeur des impulsions, le calculateur crée un signal moyen par impulsions qui, après traitements, donne un signal sinusoïdal (figure 17.24).

Pour obtenir un signal triphasé (décalé de 120°), il suffit de décaler d'un temps (T) correspondant à 120° le départ de chaque phase (figure 17.25). Le décalage correspond à $360^\circ / 3$ (moteur de type étoile).

Le calculateur contrôle machine électrique gère le pilotage de la machine lors des phases de freinage et de décélération. Il fonctionne de deux manières différentes :

- » en phase de freinage, le calculateur permet la régulation d'un courant dit de frein moteur ;

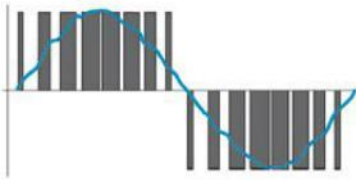


Figure 17.24 Signal sinusoïdal.

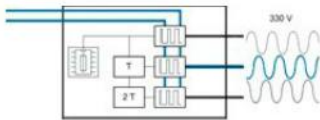


Figure 17.25 Signal triphasé.

» en phase de récupération d'énergie, le calculateur permet de recharger la batterie de traction.

Ces deux phases peuvent être activées de façon indépendante (phase de freinage seule) ou simultanée (les deux phases en même temps).

Phase de freinage

Lors de ces phases, le CCME pilote le moteur afin de créer un couple de décélération (équivalent à un frein moteur).

Ce couple de décélération est créé grâce à un glissement négatif du champ tournant.

Ce type de pilotage consomme une faible quantité d'énergie de la batterie, mais comme la demande en couple est faible, la consommation en courant est elle aussi relativement faible.

Phase de récupération d'énergie

Lors de ces phases, le calculateur contrôle machine électrique récupère de l'énergie électrique du moteur qui est entraîné par l'énergie cinétique du véhicule.

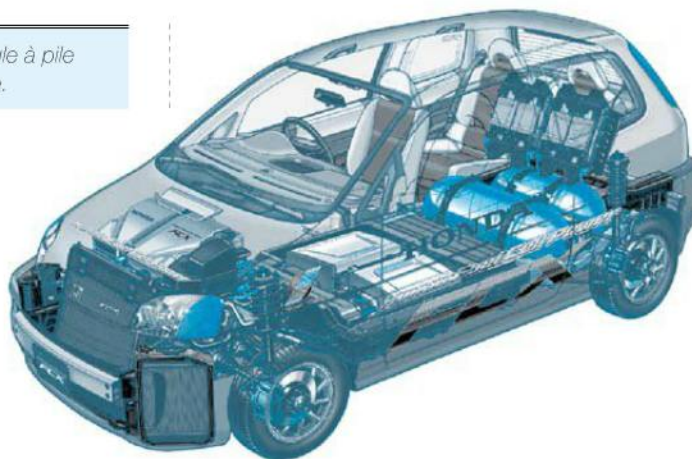
Cette énergie (330 V AC) est ensuite convertie par les transistors du CCME en courant continu de 330 V, courant utilisable pour recharger la batterie de traction.

247

- 17 - Le véhicule électrique

17.5 Le véhicule à pile à combustible

Figure 17.26 Véhicule à pile à combustible.



Dans ce type de véhicule, le moteur thermique est remplacé par une pile à combustible qui présente l'avantage de transformer directement le carburant en énergie électrique.

Avantages de la pile à combustible

- » Il y a suppression du moteur thermique avec son faible rendement (40 %, dans le meilleur des cas).
- » La pile à combustible recharge directement la batterie de puissance qui alimente le (ou les) moteur(s) électrique(s) avec un rendement très élevé (80 % pour la pile et 98 % pour le moteur électrique).

Principe de fonctionnement de la pile à combustible

La pile à combustible fonctionne de la manière suivante : on introduit un hydrocarbure (H_c : essence, gazole, éthanol, méthanol, etc.) dans un réformeur ❶ dont la fonction est de récupérer l'hydrogène (H_2).

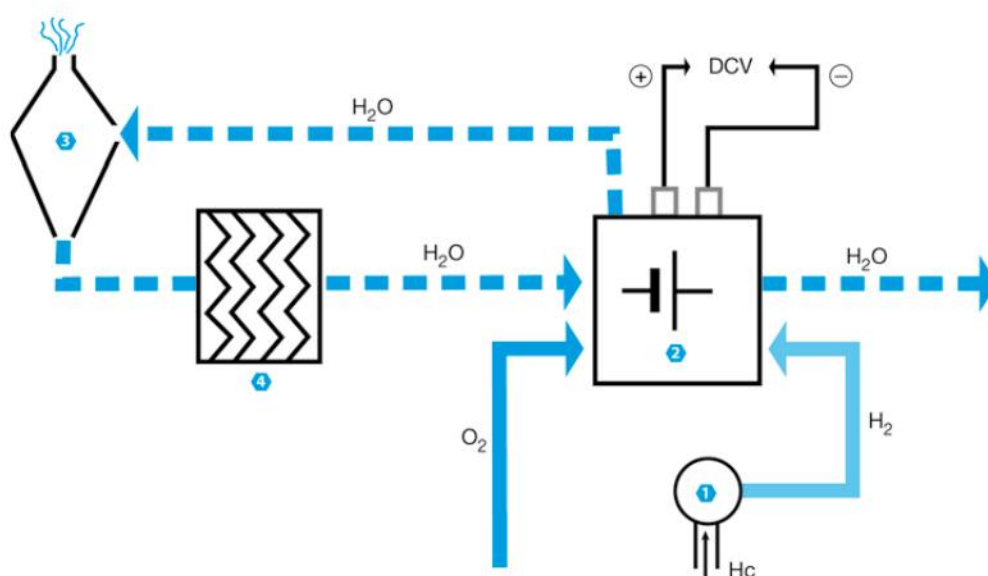
La pile ❷, qui contient un électrolyte à base de polymère, reçoit d'un côté l'hydrogène (H_2) et de l'autre l'oxygène (O_2).

Le phénomène électrolytique produit un courant électrique de forme continue que l'on récupère à ses bornes (anode et cathode).

L'eau (H_2O) rejetée est récupérée, refroidie puis réutilisée pour le refroidissement de la pile.

Figure 17.27 Principe simplifié de la pile combustible.

- ❶ Réformeur.
- ❷ Pile.
- ❸ Condenseur.
- ❹ Échangeur.



Résumé

Le véhicule à moteur électrique

Avantages

Pas de pollution directe, entretien simplifié, conduite aisée.

Constitution

- Un groupe motopropulseur.
- Un boîtier électronique.
- Une batterie de traction à haute tension.

Groupe motopropulsion

- Un moteur électrique à courant continu et excitation séparée.
- Un boîtier réducteur comprenant un réducteur à train épicycloïdal et un différentiel classique.

Boîtier électronique

Il gère :

- » la partie propulseur en modulant le courant induit et inducteur,
- » la recharge des batteries de traction au freinage et leur contrôle,
- » l'ensemble des relais et actionneurs,

en fonction des informations reçues :

- » des différents capteurs,
- » de la position contact mis,
- » de la position de la pédale d'accélérateur.

Batterie de traction

Elle se compose d'un certain nombre de blocs de 6 V eux-mêmes composés de cinq éléments au nickel-cadmium produisant un courant de tension 1,2 V et dont la capacité est fonction du nombre de plaques contenues dans chaque élément.

L'augmentation de tension est obtenue en branchant en série le nombre de blocs nécessaires.

Les batteries comportent un circuit d'évacuation des vapeurs de charge et un circuit de refroidissement par eau.

Leur recharge peut s'effectuer :

- » sur le courant domestique 220 V, grâce au chargeur incorporé dans le véhicule ;
- » en charge rapide grâce à des bornes spéciales délivrant directement le courant continu nécessaire.

Le véhicule à pile à combustible

Avantages

La pile à combustible transforme directement le carburant en énergie électrique avec un rendement élevé.



Testez vos connaissances



1. Dans un véhicule électrique, l'énergie mécanique disponible aux roues est fournie par :

- a ☐ le démarreur
- b ☐ un moteur électrique
- c ☐ un moteur thermique

2. Les batteries de traction ont une tension nominale de :

- a ☐ 12 V
- b ☐ 120 V
- c ☐ 220 V

3. En décélération, la batterie est rechargée par :

- a ☐ le générateur
- b ☐ le moteur électrique
- c ☐ le 220 V

4. Le véhicule tout électrique est rechargé sur secteur sous un courant de :

- a ☐ 12 V
- b ☐ 120 V
- c ☐ 220 V

250

Entraînez-vous

Recherchez le principe de fonctionnement d'une pile à combustible.
Effectuez un schéma fonctionnel et expliquez son fonctionnement.

Le véhicule hybride

Chapitre 18

18.1 Mise en situation

Figure 18.1 Schéma de principe.

- ❶ Moteur électrique.
- ❷ Batterie haute tension.
- ❸ Électronique de puissance.
- ❹ Système « Start and stop ».
- ❺ Boîte de vitesses.
- ❻ Moteur thermique.
- ❼ Train arrière.



251

- 18 - Le véhicule hybride

Les raisons d'être des véhicules hybrides

Les avantages d'une propulsion hybride sont surtout la faible consommation mais aussi le fait que le moteur électrique atténue tous les fonctionnements défavorables du moteur à combustion interne. En outre, les courbes caractéristiques de puissance du ou des moteurs électriques en fonction se complètent mieux car le faible couple du moteur à combustion interne (aux régimes inférieurs) est compensé de manière idéale par le couple élevé du moteur électrique. La suppression du démarreur et de l'alternateur (en fonction de l'hybridation) est également un avantage car la

fonctionnalité de ceux-ci est assurée par le ou les moteurs électriques [alternateur-démarrreur]. De plus, la récupération de l'énergie de freinage a des effets positifs sur l'usure proprement dite des freins (réduction de l'usure des freins).

Les véhicules hybrides commercialisés intègrent un moteur thermique fournissant l'énergie nécessaire au déplacement du véhicule et un ou plusieurs moteurs électriques permettant d'optimiser son fonctionnement.

Il est possible de distinguer trois familles de motorisation pour véhicules hybrides, lesquelles sont classées en fonction de la puissance du moteur électrique utilisé :

- » micro-hybride ;
- » mild-hybride ;
- » full-hybride.

Caractéristiques techniques
des familles hybrides.
(Source : BMW)

Le tableau ci-dessous illustre les caractéristiques propres à ces trois différentes familles :

	Puissance du moteur électrique	Plage de tension	Fonctions possibles	Économie de carburant
Micro-hybride	2 à 3 kW	12 V	– Fonction démarrage / arrêt	inférieur à 10 %
Mild-hybride	10 à 15 kW	42 V à 150 V	– Fonction démarrage / arrêt – Fonction Boost – Récupération d'énergie	inférieur à 20 %
Full-hybride	> 15 kW	> 100 V	– Fonction démarrage / arrêt – Fonction Boost – Récupération d'énergie – Conduite électrique	supérieur à 20 %

(*) La fonction Boost additionne le couple du moteur électrique à celui du moteur thermique durant la phase d'accélération, ce qui permet, tout en gardant un agrément de conduite, la réduction de la puissance du moteur thermique. Cette fonction Boost permet ainsi de réduire, durant le fonctionnement à faible charge, la consommation et les rejets de CO₂ par une utilisation du moteur thermique dans des plages de fonctionnement à meilleur rendement.

Les véhicules micro-hybrides

Les véhicules micro-hybrides représentent la première catégorie de véhicules hybrides. Les véhicules micro-hybrides sont équipés d'une puissance d'accumulateur de 2 à 3 kW et d'une technologie de batterie 12 V. Grâce à la faible puissance et à la faible tension, l'ampleur de la récupération d'énergie est limitée lors des phases de freinage et de décélération. Sur les véhicules micro-hybrides, l'énergie électrique récupérée est appliquée dans le réseau de bord 12 V. Ces systèmes disposent partiellement d'une fonction

démarrage/arrêt dotée d'un démarreur conventionnel ou d'un alternateur-démarreur de vilebrequin. L'inconvénient de la fonction démarrage/arrêt est l'usure importante du vilebrequin occasionnée par des démarrages fréquents qui, afin de loger les paliers sans frictions, est en rotation continue. L'investissement, le surpoids et les frais du véhicule micro-hybride sont relativement limités. Néanmoins, on ne peut s'attendre à une économie d'énergie supérieure à 10 %. Au sens strict de sa définition, le véhicule micro-hybride n'est pas un véhicule hybride car il n'est équipé que d'un type de moteur.

Les véhicules mild-hybrides

Les systèmes conventionnels mild-hybrides fonctionnent avec des tensions de 42 V. Aujourd'hui, les tensions appliquées à ces systèmes dépassent parfois 160 V. La puissance du propulseur électrique est située dans une plage de 10 à 15 kW. En général, des propulseurs électriques sont installés dans les systèmes mild-hybrides, qui, lors de la décélération/du freinage, transforment une partie de l'énergie de mouvement en énergie électrique. En général, les systèmes mild-hybrides disposent d'une fonction démarrage/arrêt, le propulseur électrique servant à faire redémarrer le moteur après que celui-ci a été coupé. Sur les systèmes mild-hybrides, le propulseur électrique est, en partie, également utilisé lors du démarrage et de l'accélération afin d'assister le moteur à combustion interne. Sur certains systèmes mild-hybrides, l'alimentation en carburant du moteur à combustion interne est coupée lorsque le niveau de charge de l'accumulateur d'énergie haut voltage est suffisant et lorsque la conduite est régulière jusqu'à 50 km/h environ. Le véhicule n'est alors plus entraîné que par le propulseur électrique, ce qui permet une économie de carburant.

253

- 18 - Le véhicule hybride

Les véhicules full-hybrides

Les systèmes full-hybrides sont caractérisés par le fait que le démarrage et la conduite peuvent également s'effectuer entièrement sans que le moteur à combustion interne ne tourne. Les systèmes full-hybrides sont équipés d'accumulateurs d'énergie haut voltage dont parfois les tensions dépassent de loin 200 V. C'est pourquoi ces systèmes permettent une propulsion entièrement électrique des véhicules, lors du démarrage, par exemple, et l'utilisation, lors d'une forte accélération, du couple du moteur à combustion interne et du moteur électrique en parallèle.

Agencement des moteurs électriques des véhicules hybrides

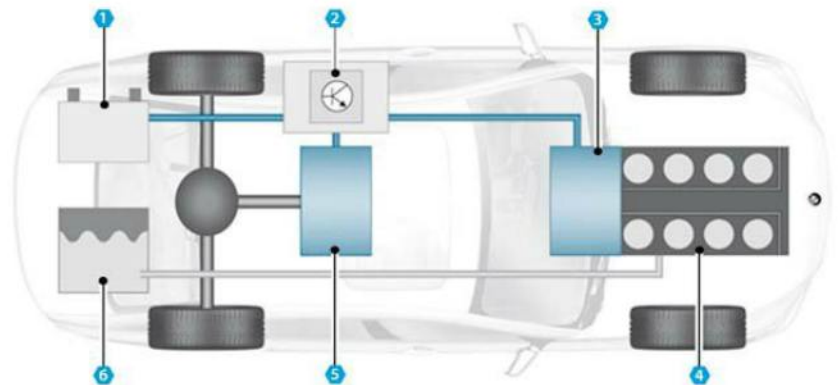
Les véhicules hybrides sont répartis en quatre catégories en ce qui concerne l'agencement des moteurs électriques dont ils sont équipés :

- » les véhicules hybrides séries ;
- » les véhicules parallèles ;
- » les véhicules hybrides série/parallèle ;
- » les véhicules hybrides rechargeables.

Les véhicules hybrides séries

Figure 18.2 Principe du véhicule hybride série.

- 1 Batterie haut voltage.
- 2 Électronique de puissance.
- 3 Alternateur.
- 4 Moteur à combustion interne.
- 5 Moteur électrique.
- 6 Réservoir de carburant.



Les véhicules hybrides séries dotés du concept de la propulsion hybride sont équipés d'un moteur électrique et d'un moteur à combustion interne. Ce qui est particulier, c'est que seul le moteur électrique commande directement les roues motrices.

Les composants sont disposés les uns derrière les autres, c'est pourquoi cette forme de montage est appelée « série ».

Le moteur à combustion interne entraîne un alternateur qui alimente le moteur électrique et un accumulateur électrique en énergie.

Le flux d'énergie électrique est commandé par l'électronique de puissance. La taille de l'alternateur et de l'accumulateur électrique dépend de la stratégie de fonctionnement et de chargement, de l'autonomie et des performances du véhicule.

L'alternateur supplémentaire exige un montage complexe, en revanche, il n'y a pas de boîte de vitesses mécanique.

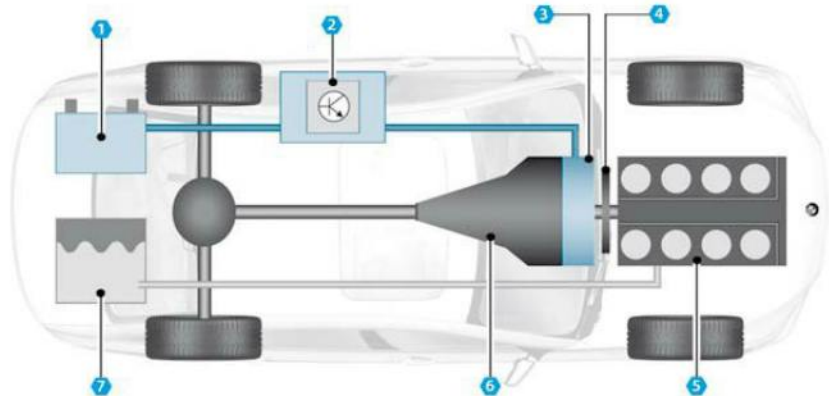
Sur les hybrides séries, les composants peuvent être disposés très librement. Le grand inconvénient des véhicules hybrides séries est la double transformation d'énergie qui entraîne, par conséquent, un rendement plus faible. Le moteur à combustion interne et l'alternateur doivent être conçus par rapport à la puissance

maximale du véhicule. En comparaison avec les véhicules hybrides parallèles, le moteur à combustion interne est plus puissant ; en revanche, il génère, pour cette raison, plus de rejets polluants et présente une consommation de carburant plus élevée.

Les véhicules hybrides parallèles

Figure 18.3 Principe du véhicule hybride parallèle.

- ❶ Batterie haut voltage.
- ❷ Électronique de puissance.
- ❸ Propulseur électrique.
- ❹ Embrayage.
- ❺ Moteur à combustion interne.
- ❻ Réducteur.
- ❼ Réservoir de carburant.

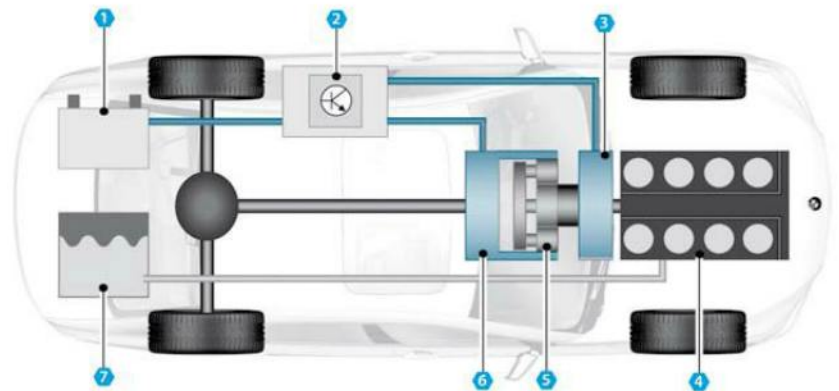


Au contraire des hybrides séries, sur les systèmes hybrides parallèles, le moteur à combustion interne et le moteur électrique sont couplés mécaniquement aux roues motrices. Afin d'entraîner le véhicule, les deux systèmes de propulsion peuvent être utilisés séparément ou simultanément. Comme les puissances sont appliquées en parallèle sur la chaîne cinématique, ce système est nommé système hybride parallèle. Les deux moteurs peuvent être conçus de moindres dimensions et plus légers car les puissances des deux moteurs s'additionnent. Ceci permet de faire des économies, par exemple, de poids et de consommation de carburant et de réduire l'émission de CO_2 . Une autre possibilité lors d'une conception par rapport aux performances du véhicule serait que, pour une puissance identique du moteur à combustion interne, le moteur électrique augmente la puissance. Dans ce cas, une réduction de la consommation de carburant serait même possible. Le moteur électrique peut également faire fonction d'alternateur, c'est pourquoi le terme généralement accepté de « propulseur électrique » est plus adéquat. Lors des phases de décélération ou lors du freinage, le propulseur électrique génère de l'énergie électrique qui, commandée par l'électronique de puissance, est stockée dans la batterie haut voltage en consommant peu de carburant. En comparaison avec les véhicules mild-hybrides, la réalisation des véhicules hybrides parallèles est moins onéreuse.

Les véhicules hybrides séries/parallèles

Figure 18.4 Principe du véhicule hybride série/parallèle.

- ❶ Batterie haut voltage.
- ❷ Électronique de puissance.
- ❸ Propulseur électrique 1.
- ❹ Moteur à combustion interne.
- ❺ Train épicycloïdal.
- ❻ Propulseur électrique 2.
- ❼ Réservoir de carburant.



Étant donné qu'avec cette propulsion hybride, la transmission de la puissance s'effectue en série et en parallèle, ce système est nommé système série-parallèle ou système à répartition de puissance.

Selon l'état, il existe les modes de fonctionnement suivants :

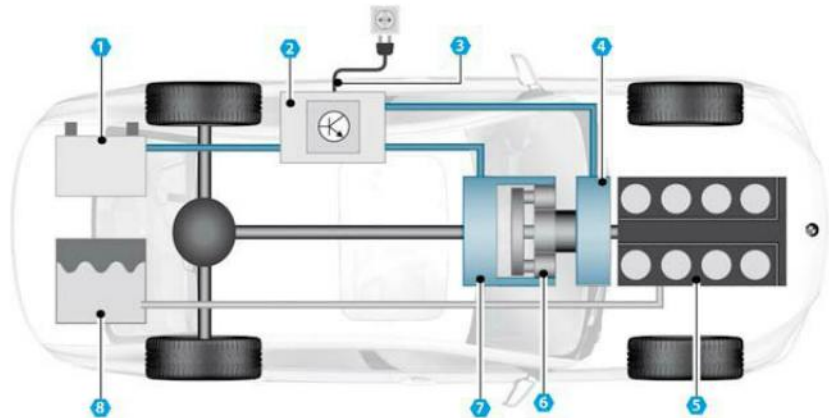
- » le moteur à combustion interne entraîne l'alternateur (propulseur électrique 1) afin de charger l'accumulateur haut voltage ;
- » le moteur à combustion interne entraîne l'alternateur (propulseur électrique 1). Le propulseur électrique 2 est entraîné au moyen de l'énergie créée (hybride série) ;
- » le moteur à combustion interne est relié à l'arbre primaire de la boîte de vitesses tout comme les propulseurs électriques. Les deux moteurs entraînent le véhicule (hybride parallèle).

Avec cette propulsion hybride combinée, le passage d'un mode de fonctionnement à l'autre s'effectue uniquement au moyen d'un embrayage. Les véhicules équipés d'une propulsion hybride à répartition de puissance ne peuvent avoir une conduite entièrement électrique que jusqu'à une certaine vitesse. De plus, le moteur à combustion interne fonctionne quasiment dans sa meilleure plage de fonctionnement grâce à la combinaison ingénieuse des deux moteurs électriques. Les inconvénients des propulsions hybrides à répartition de puissance sont la gestion complexe du moteur et de la transmission et les coûts élevés. Les systèmes hybrides à répartition de puissance sont généralement réalisés en full hybride.

Les véhicules hybrides rechargeables

Figure 18.5 Principe du véhicule hybride série/parallèle.

- ❶ Batterie haut voltage.
- ❷ Électronique de puissance.
- ❸ Connecteur secteur.
- ❹ Propulseur électrique 1.
- ❺ Moteur à combustion interne.
- ❻ Train épicycloïdal.
- ❼ Propulseur électrique 2.
- ❽ Réservoir de carburant.



Les véhicules hybrides rechargeables illustrent le développement de la technologie hybride. Sur les véhicules hybrides rechargeables, la consommation de carburant est encore plus réduite car les accumulateurs d'énergie électrique peuvent être rechargés non seulement par le moteur à combustion interne mais aussi par le réseau d'électricité. Lorsque la capacité de l'accumulateur d'énergie électrique est suffisante, il est possible de parcourir de courts trajets sans émissions et sans bruits en mode entièrement électrique tandis que le moteur à combustion interne est utilisé pour les grands trajets ou lorsque l'accumulateur d'énergie électrique est vide. Sur les véhicules hybrides rechargeables, les accumulateurs d'énergie électrique sont de plus grande dimension afin de pouvoir stocker plus d'énergie électrique provenant du réseau d'électricité et de permettre ainsi une plus grande participation du fonctionnement électrique.

257

- 18 - Le véhicule hybride

18.2 Analyse structurelle

Accumulateur d'énergie haute tension avec coupe-circuit haut voltage

Un véhicule hybride a besoin de pouvoir stocker l'énergie électrique produite par la transformation des énergies cinétiques et potentielles lors des phases de récupération.

Pour un véhicule hybride, une faible quantité de stockage est suffisante ; en effet, il suffit de stocker les énergies cinétiques et



Figure 18.6 Accumulateur d'énergie haute tension.

- ① Accumulateur d'énergie haute tension.
- ② Coupe-circuit haut voltage.
- ③ Câbles haute tension.

potentielles en attendant leur utilisation à l'accélération suivante. Les fluctuations d'énergie sont donc très importantes, pouvant atteindre 100 % de la capacité utile sur des temps très courts (quelques minutes). Ce type de véhicule utilise une batterie de puissance.

Le stockage de l'énergie électrique à bord d'un véhicule reste le problème majeur actuellement. Ce stockage est caractérisé par deux paramètres principaux :

- » la puissance utilisable ($P = U \cdot I$), en kW (kilowatt). Il s'agit du produit de la tension batterie par l'intensité maximale qu'elle peut débiter. La puissance utilisable doit être au moins égale à la puissance de pointe du moteur électrique afin de permettre son alimentation sur toute sa plage de fonctionnement.
- » l'énergie stockée, en kWh (kilowattheure). Cette énergie peut être comparable au volume d'un réservoir de carburant d'un véhicule thermique. C'est l'énergie stockée qui va déterminer l'autonomie d'un véhicule électrique et les possibilités de récupération pour un véhicule hybride.

L'énergie contenue dans un accumulateur électrique est le produit de sa capacité en ampèreheure par sa tension (cette unité d'énergie étant insuffisante pour une utilisation automobile, on lui préfère le kWh soit 1 000 Wh).

$$W = Q \cdot U$$

$$\text{Wattheure} = \text{Ampèreheure} \cdot \text{Volt}$$

$$[\text{Wh}] = [\text{Ah}] \cdot [\text{V}]$$

Dans les concepts de sécurité du constructeur automobile, le coupe-circuit haut voltage joue un rôle important. Il a la même fonction dans tous les concepts, c'est-à-dire celle d'interrompre le circuit électrique entre les différents modules à l'intérieur de l'accumulateur d'énergie haute tension. Dès que le coupe-circuit haut voltage est débranché, le circuit électrique de la batterie et, par conséquent, celui de l'ensemble du système haute tension, est interrompu. Plus aucune tension dangereuse n'est présente aux bornes de l'accumulateur d'énergie haute tension.

Câbles haute tension

Les câbles haute tension relient les composants haute tension entre eux, par exemple l'accumulateur d'énergie haute tension avec l'électronique de puissance ou l'électronique de puissance avec les moteurs électriques.

Les câbles haute tension se remarquent par leur couleur orange.



Figure 18.7 Câbles haute tension.

Les moteurs électriques

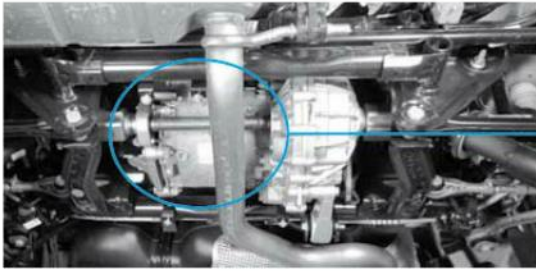
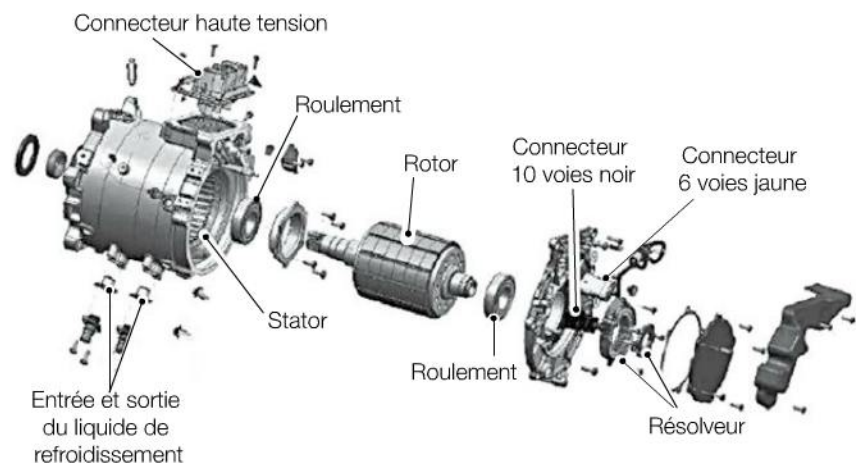


Figure 18.8 Moteur électrique.



Figure 18.9 Schéma structurel d'un moteur électrique.



De manière spécifique, le moteur électrique de traction doit répondre aux critères suivants :

- » il doit pouvoir tourner et freiner dans les deux sens de rotation ;
- » il doit posséder un couple important à bas régime, ainsi qu'un bon rendement.

Pour ces raisons, les constructeurs orientent, en fonction du type de véhicule fabriqué, leurs choix sur :

- » le moteur série ;
- » le moteur à excitation séparée ;
- » le moteur synchrone.

Les propulseurs électriques sont des appareils capables de transformer l'énergie électrique en mouvement mécanique et un mouvement mécanique en énergie électrique. En fonction du type d'énergie, on parle de moteurs électriques (transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique) ou d'alternateurs (transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique). Les propulseurs électriques mettent à profit le fait que les pôles magnétiques de même noms se repoussent et que les pôles magnétiques de noms contraires s'attirent. Au moins un des champs magnétiques est créé par un courant électrique. La répartition des propulseurs électriques s'effectue, d'une part, selon le type de courant comme les propulseurs à courant continu, à courant alternatif ou à courant triphasé mais aussi selon le mode d'action comme les propulseurs synchrones ou asynchrones.

Électronique de puissance

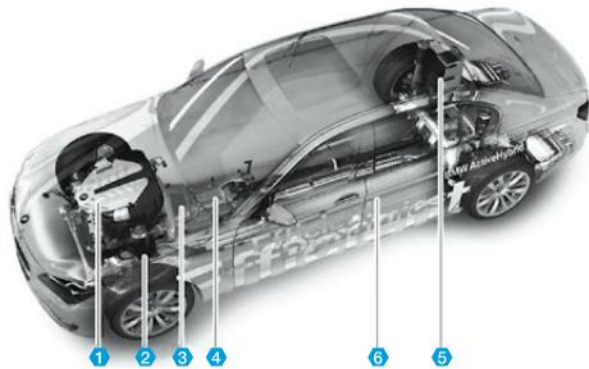


Figure 18.10 Électronique de puissance.

- ❶ Moteur à combustion interne à haut rendement.
- ❷ Moteur électrique/alternateur.
- ❸ Électronique de puissance et de commande.
- ❹ Transmission pour Mild Hybrid.
- ❺ Accumulateur d'énergie haute tension.
- ❻ Câbles haute tension.

Dans la technologie hybride, l'électronique de puissance sert à la transformation des courants. Elle est également désignée par inverseur. Elle transforme le courant triphasé généré par l'alternateur haute tension en courant continu. L'inverseur, comme tous les autres composants haute tension, ne doit en aucun cas être ouvert car des tensions élevées peuvent être présentes à l'intérieur.

L'électronique de puissance est l'un des domaines de l'électronique mais aussi la désignation des

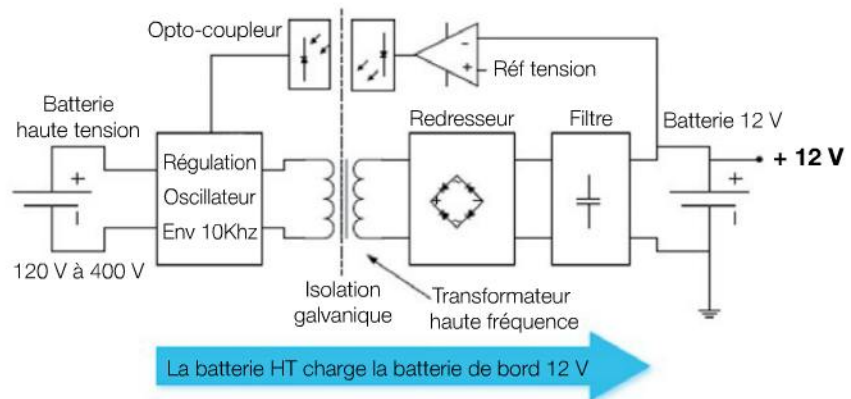
composants électroniques dont la fonction est de commuter, commander et de transformer l'énergie électrique. Les composants et les commutations de l'électronique de puissance sont constitués de diodes et de thyristors au silicium. Ces composants peuvent commuter des tensions et des courants très intenses (jusqu'à 4 500 V et 1 500 A). Des transistors et des triacs au silicium sont également utilisés pour des plages de puissance plus faibles. Les thyristors sont des éléments de commande pour lesquels le moment de commutation peut-être paramétré grâce à la tension de réglage de la grille de contrôle, la gâchette. Deux éléments de thyristors au sein d'un composant qui sont connectés en parallèle mais montés tête bêche, sont appelés triac. La transformation de l'énergie électrique au moyen de transformateurs ou au moyen de groupes de machines rotatives ne fait pas partie de l'électronique de puissance. L'électronique de puissance permet notamment la transformation de l'énergie en rapport avec le type de tension, l'intensité de la tension et du courant ainsi que de la fréquence.

Le convertisseur

Le circuit de bord d'un véhicule électrique ou hybride est identique à celui d'un véhicule thermique et doit être alimenté par une batterie de 12 V. Hormis les véhicules micro-hybrides, tous les autres véhicules hybrides ne peuvent plus être équipés d'un alternateur pour charger la batterie de bord. Cette fonction est alors confiée à un convertisseur DC/DC, qui puise l'énergie électrique dans la batterie haute tension et la transforme pour charger la batterie 12 V, tout en assurant l'isolement électrique entre les deux batteries (isolation galvanique).

Le schéma synoptique de la figure 18.11 montre le principe de fonctionnement de la plupart des convertisseurs utilisés, lesquels sont de type unidirectionnel.

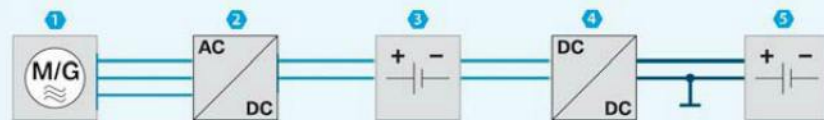
Figure 18.11 Convertisseur DC/DC unidirectionnel.



Exemple de l'application de l'électronique de puissance sur un véhicule mild-hybride

Figure 18.12

- ❶ Propulseur électrique.
- ❷ Convertisseur CC/CA.
- ❸ Batterie haut voltage.
- ❹ Convertisseur CC/CC.
- ❺ Batterie 12 V.



La chaîne cinématique d'un véhicule mild-hybride présente au moins un propulseur électrique d'une puissance d'environ 10 à 15 kW. Une grande partie de l'énergie cinétique du véhicule peut ainsi être stockée dans la batterie haut voltage grâce à la récupération effectuée lors du freinage. Un convertisseur CC/CA transforme le courant triphasé de l'alternateur en tension continue. Le convertisseur CC/CA fonctionne bidirectionnellement, ce qui signifie que la tension continue de la batterie haut voltage est également transformée en courant triphasé au moyen du convertisseur CC/CA afin de faire tourner le propulseur électrique par moteur. Étant donné que sur les véhicules hybrides, le démarreur conventionnel et l'alternateur classique fonctionnent généralement grâce au propulseur électrique, le réseau de bord 12 V doit être alimenté par un convertisseur CC/CC. Ce convertisseur CC/CC fonctionne également bidirectionnellement, ce qui signifie que la batterie haut voltage peut être chargée par le réseau de bord 12 V grâce au convertisseur CC/CC.

18.3 Analyse fonctionnelle

Les différentes phases de fonctionnement

Les états d'un véhicule full-hybride sont présentés ci-dessous. Les états des autres véhicules hybrides peuvent en être déduits.

La fonction démarrage/arrêt

Si le véhicule est arrêté lorsque le moteur à combustion interne a atteint la température de service, devant un feu rouge par exemple, le moteur à combustion interne est coupé. Cela entraîne une réduction de l'émission de CO₂ et de la consommation de carburant. À l'arrêt, la batterie haut voltage alimente également la climatisation, l'éclairage du véhicule, etc. Au cas où le niveau de charge de la batterie haut voltage ne serait pas suffisant, le moteur à combustion interne démarre afin de charger la batterie haut voltage par le propulseur électrique et de mettre une énergie électrique suffisante à la disposition du consommateur. Si le véhicule approche d'un feu, le moteur à combustion interne est déjà coupé (à une certaine vitesse) pendant le freinage, avant l'arrêt du véhicule.

Le démarrage

Au démarrage, le couple élevé du moteur électrique est utilisé à un faible régime du moteur. De l'arrêt, seuls les moteurs électriques entraînent le véhicule et ce, avec l'énergie de la batterie haut voltage. Le moteur à combustion interne reste arrêté (lorsque le moteur a atteint la température de service).

L'accélération

Lors d'une forte accélération, au feu, dans les pentes ou lors de dépassements, une énergie supplémentaire peut être libérée lorsque le niveau de charge de la batterie haut voltage est suffisant, et être mise à disposition par le propulseur électrique en tant qu'énergie d'entraînement. Les puissances combinées du moteur à combustion interne et des moteurs électriques permettent d'obtenir une dynamique de puissance et une forte accélération comme sur les véhicules équipés d'une motorisation plus puissante.

La conduite

Pendant la conduite, le moteur à combustion interne et le propulseur électrique tournent à différents pourcentages selon la vitesse et le niveau de charge de la batterie.

En petite jusqu'à moyenne vitesse, le moteur à combustion interne ne fonctionne pas dans une plage idéale. En revanche, le propulseur électrique assure déjà le plein couple en faible régime du moteur. Lorsque le niveau de charge de la batterie haut voltage est suffisant, l'énergie électrique est libérée afin d'entraîner le véhicule par le moteur électrique. Le moteur à combustion interne est allumé plus souvent uniquement lorsque le niveau de charge de la batterie haut voltage est faible afin de recharger la batterie haut voltage.

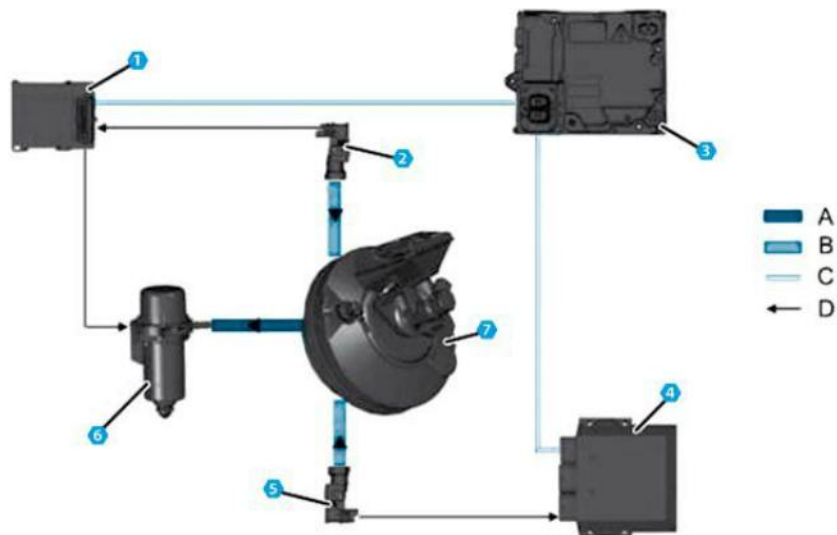
Lors d'une conduite à une vitesse élevée constante, le moteur à combustion interne fonctionne à un rendement idéal. Dans cette plage de puissance, le propulseur électrique nécessiterait trop d'énergie en provenance de la batterie haut voltage. C'est pourquoi la traction est effectuée en grande partie par le moteur à combustion interne. Lorsque le niveau de charge de la batterie haut voltage est faible, une partie de la puissance du moteur à combustion interne est utilisée afin de charger la batterie haut voltage par le propulseur électrique.

263

- 18 - Le véhicule hybride

Figure 18.13

- A. Circuit de dépression de la pompe à vide électrique
- B. Circuit de mesure des capteurs de dépression de freinage
- C. Réseau CAN
- D. Liaison électrique
- 1. Calculateur de contrôle dynamique de stabilité (ESP).
- 2. Capteur de dépression de freinage.
- 3. Calculateur de contrôle hybride.
- 4. Calculateur de contrôle moteur.
- 5. Capteur de dépression de freinage.
- 6. Pompe à vide électrique d'assistance de freinage.
- 7. Amplificateur de freinage.



L'un des avantages essentiels des propulsions hybrides est l'utilisation de l'énergie de mouvement qui se libère dans les descentes ou lors du freinage. C'est ce que l'on appelle la récupération ou le freinage récupératif. Au lieu de transformer l'énergie redondante libérée sur les freins de roue en énergie de

chaleur, celle-ci est transformée en énergie électrique par le propulseur électrique qui fonctionne en alternateur et est stockée dans la batterie haut voltage.

Fonctionnement

L'ESP conserve les mêmes fonctions que sur un véhicule classique. Ses fonctions sont doublées car il gère le couple du moteur thermique ainsi que le couple de la machine électrique de traction (avant et arrière du véhicule).

Sur l'hybride, le calculateur ESP valide les demandes en couple sur la machine électrique de traction demandées par le calculateur de contrôle hybride afin de conserver la trajectoire.

Lors d'un freinage, la machine électrique de traction et l'alternateur réversible rechargent la batterie en appliquant un couple résistant demandé par le calculateur de contrôle hybride et validé par le calculateur ESP.

L'ASR conserve les mêmes caractéristiques que sur le véhicule classique, mais au même titre que l'ESP, la gestion de couple combine les trains avant et arrière. La molette de l'ASR+ a été supprimée pour laisser place à la molette de sélecteur de mode hybride.

Le fonctionnement de l'assistance au démarrage en côte est identique aux véhicules classiques, mais il tient compte du rampage du véhicule induit par la machine électrique de traction (possibilité de l'inhiber).

Principe de fonctionnement du système Stop and Start

Le principe du Stop and Start est de :

- » mettre en veille le moteur thermique (STOP MOTEUR), lorsque le véhicule est en cours d'immobilisation (à l'arrêt, à un stop, à un feu rouge, dans un embouteillage...) ;
- » redémarrer instantanément (REDÉMARRAGE) le moteur thermique (de façon transparente pour l'utilisateur).

Il permet un gain significatif en consommation de carburant. Les rejets de gaz polluant s'en trouvent ainsi réduits. Il apporte un confort acoustique lors de l'arrêt du véhicule à un feu ou à un stop.

Figure 18.14 Principe Stop and Start.

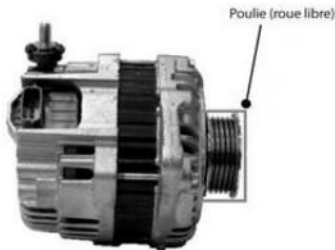


Figure 18.15 Alternateur Stop and Start.



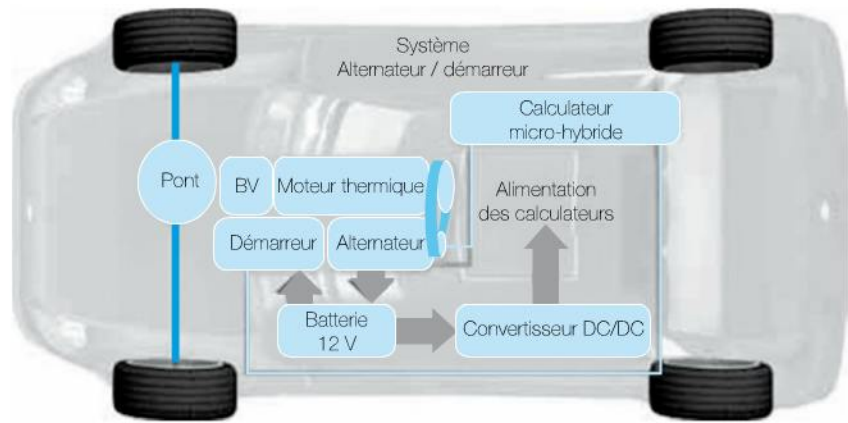
Figure 18.16 Batterie du système Stop and Start.



Figure 18.17 Capteur de batterie.



Figure 18.18 Taille des balais.



Les conditions à remplir pour valider la présence du conducteur et autoriser le démarrage sont :

- » porte conducteur fermée et ceinture conducteur bouclée ;
- » appui sur la pédale de frein détecté ;
- » enfoncement pédale d'accélérateur supérieur à 20 % ;
- » vitesse véhicule supérieur à 6 km/h.

Les différents composants

L'alternateur du système Stop and Start (figure 18.15) :

- » est piloté en fonction des différentes phases de vie et selon les conditions d'annulation du contrôle de charge (charge maximale) ;
- » génère différentes tensions en fonction de la température batterie mesurée.

La batterie du système Stop and Start (figure 18.16) : la batterie montée sur les véhicules équipés du système Stop and Start est renforcée. Ce renforcement permet d'avoir un nombre de cycles beaucoup plus important qu'une batterie classique au plomb.

Le capteur de batterie est relié en filaire avec le calculateur contrôle moteur, il mesure la charge/décharge et la température de la batterie (figure 18.17).

La taille des balais (figure 18.18), le ressort de rappel et l'utilisation d'alliage argent constituent le renforcement du démarreur.

Condition de fonctionnement

Figure 18.19 Fonctionnement du système Stop and Start.



Le moteur ne s'arrête pas :

- » en dessous de 30 s après le premier démarrage du moteur ;
- » tant que la vitesse est inférieure à 5 km/h après une phase de veille moteur ;
- » avec une température extérieure en dessous de 3 °C environ ;
- » tant que la température de l'eau du moteur est faible (environ 50 °C) ;
- » tant que la température de l'eau du moteur est haute (environ 95 °C) ;
- » si le compresseur de climatisation est en action ;
- » si la consommation de courant instantanée est supérieure à 50 A ;
- » si la décharge de la batterie est supérieure à 4,5 Ah ;
- » si la réserve d'assistance du circuit de freinage devient trop faible (pression du mastervac supérieure à 750 mbar) ;
- » si la direction assistée est sollicitée fortement ;
- » si la ceinture du conducteur n'est pas bouclée ;
- » si le capot moteur est ouvert.

Le redémarrage automatique du moteur en phase de Stop s'effectue si :

- » la température de l'eau moteur est inférieure à 50 °C environ ;
- » la température de l'eau du moteur est haute (environ 95 °C) ;
- » le compresseur de climatisation est mis en route ;
- » la consommation de courant instantanée est supérieure à 50 A ;

- » la batterie est déchargée (décharge totale supérieure à 3 Ah) ;
- » la réserve d'assistance du circuit de freinage devient trop faible (pression du mastervac supérieure à 750 mbar) ;
- » la vitesse véhicule est supérieure à 5 km/h ;
- » la direction assistée est fortement sollicitée.

Fonctionnement

Le calculateur du dispositif maintient une tension minimale de 12,2 V afin d'éviter les oscillations d'affichage ou de fonctionnement pour la radio/télématique lors des démarrages effectués par la fonction Stop and Start.

Il existe trois phases de fonctionnement du calculateur du dispositif de maintien de tension centralisé :

- » position OFF ;
- » position ON ou plus accessoires ;
- » démarrage avec la fonction auto stop and go.

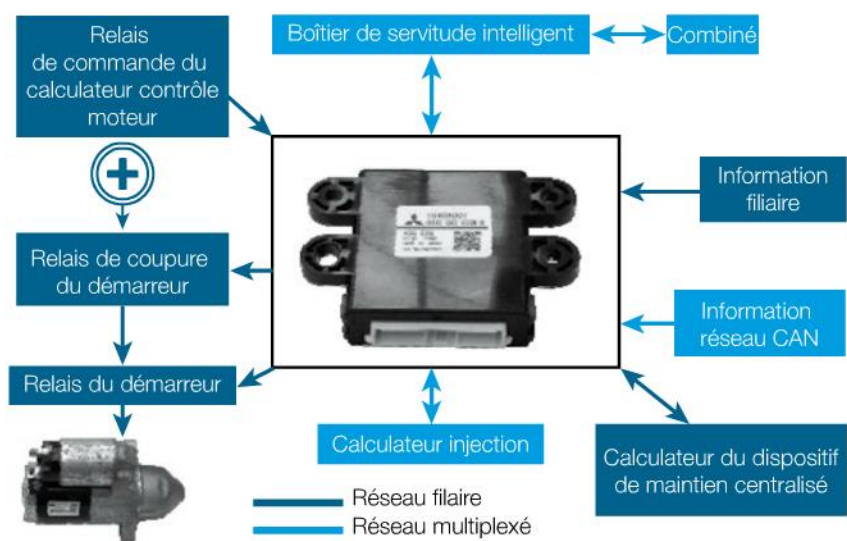
Il transforme l'énergie électrique fournie par la batterie pour assurer une tension de 12,2 V lors du démarrage moteur, ce qui permet d'éviter les claquements d'enceintes ou le redémarrage intempestif de la navigation.

Un survolteur est intégré au calculateur. Cet élément électronique permet d'augmenter la tension. Il relève la tension de la batterie à 12,2 V, lors des démarrages effectués par la fonction Stop and Start.



Figure 18.20 Calculateur.

Figure 18.21 Interactions avec le calculateur Stop and Start.



Le calculateur Stop and Start est alimenté par le relais de commande du calculateur. Il commande les deux relais qui permettent la mise en action du démarreur. Pour gérer la fonction Stop and Start, le calculateur reçoit des informations par le réseau CAN et des informations en filaire.

Il reçoit en information filaire la position :

- » du commutateur de démarrage ;
- » du commutateur de Stop and Start OFF ;
- » du contacteur de position basse de la pédale d'embrayage ;
- » du contacteur de position haute de la pédale d'embrayage ;
- » du contacteur de point mort ;
- » du capteur de pression des freins.

Il reçoit par le réseau multiplexé les informations des éléments suivants :

- » le capteur régime moteur ;
- » le contacteur de capot moteur ;
- » la position d'accélérateur ;
- » la vitesse véhicule ;
- » le contacteur de ceinture de sécurité ;
- » le capteur de température ambiante ;
- » la climatisation.

Le calculateur Stop and Start communique avec le boîtier de servitude intelligent et le calculateur contrôle moteur.

Les informations échangées entre le calculateur Stop and Start et le boîtier de servitude intelligent servent pour l'affichage au combiné des différentes informations concernant le système Stop and Start.

Les informations échangées entre le calculateur Stop and Start et le calculateur contrôle moteur servent pour le démarrage et la coupure du moteur.

Le calculateur du dispositif de maintien de tension centralisé est entièrement géré par le calculateur Stop and Start, le calculateur commande en direct et fait le diagnostic du convertisseur.

Un capteur de pression atmosphérique est intégré au calculateur Stop and Start.

Partie 7

Les principaux documents liés à l'entreprise automobile

L'ordre de réparation

chapitre 19

Avant la réparation, il est conseillé de remplir un ordre de réparation qui décrit la nature des travaux. Ce document doit être établi en 2 exemplaires sur papier en-tête signé par le client et le professionnel.

Il doit indiquer :

- » la date ;
- » l'identité du client ;
- » le type de véhicule et son kilométrage ;
- » la nature exacte des réparations à effectuer ;
- » le coût probable des réparations à effectuer (pièces et main d'œuvre). Ce coût est indicatif et ne constitue pas un engagement de prix ;
- » le délai d'immobilisation du véhicule.

Le client « fait connaissance » avec les conditions générales de réparation et de règlement.

Le client « passe ordre » d'effectuer les réparations citées. Cela a pour conséquence :

- » 1. d'avoir l'assurance de la réparation dans les normes ;
- » 2. l'engagement du règlement de la facture ;
- » 3. la couverture par l'assurance des dégâts sur le véhicule ou des malfaçons.

Il est absolument nécessaire d'ouvrir un OR pour tout véhicule entré dans l'atelier : – client – neuf (préparation) – occasion – démonstration – immobilisé, etc.

Ce document sera utile en cas de litige. Il permettra au client de faire la preuve de ce qui a été demandé. Il pourra être comparé à la facture et mettre en cause éventuellement le garagiste si la prestation effectuée ne correspond pas à celle qui a été demandée.

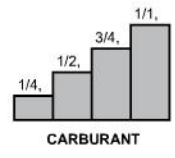
Ce document est exploité par les différents services de l'entreprise :

- » comptabilité : facturation ;
- » rentabilité du SAV : contrôle temps passé/temps constructeur ;
- » gestion des stocks : réapprovisionnement en pièces détachées et fournitures ;
- » gestion clientèle : service commercial.

Bien que l'ordre de réparation ne soit pas obligatoire au regard de la loi, en cas de litige, ce n'est pas à l'automobiliste d'apporter la preuve qu'il n'avait pas demandé les travaux, mais au garagiste de démontrer qu'il avait l'accord du client, d'où la nécessité de l'ordre de réparation.

Si des travaux supplémentaires sont nécessaires, le garage doit contacter le client et lui demander l'autorisation avec un nouvel ordre de réparation ou un avenant signé par le client.

Figure 19.1 Exemple d'ordre de réparation.

ORDRE DE RÉPARATION			
Cachet de l'entreprise	Nom du propriétaire : _____ Adresse : _____ Téléphone : _____ Date de réception du véhicule : _____ Date de livraison du véhicule prévue le : _____		
IDENTIFICATION DU VÉHICULE	Marque Modèle	Type Km au compteur	N° de série Date de mise en circulation
Immatriculation			
INFORMATIONS CLIENT  CARBURANT			
Énoncé des symptômes			
Station-service	LIBELLÉ DES TRAVAUX À RÉALISER		
LAVAGE : ☐ VIDANGE : ♦ Moteur ☐ ♦ Boîte ☐ ♦ Pont ☐ FILTRE : ♦ Huile ☐ ♦ Air ☐ ♦ Carburant ☐ GRAISSAGE : NIVEAUX : LAVAGE : ♦ Extérieur ☐ ♦ Intérieur ☐ ♦ Moteur ☐			
MODIFICATION DE L'ORDRE DE RÉPARATION		OBSERVATIONS	
Notification au client de la modification de l'ordre de réparation par le chef d'entreprise ou son préposé. Le : _____ Acceptation de la modification par le client : _____			
ACCEPTATION DU CLIENT		VISA DU RÉCEPTIONNISTE	
En signant le présent document le client ou la personne qu'il aura accréditée reconnaît avoir pris connaissance des conditions générales SIGNATURE : _____			

Le devis

chapitre 20

Le devis est l'évaluation la plus précise possible du coût d'une réparation. Si les travaux demandés sont importants, il est préférable d'établir un devis. Le devis constitue un engagement de prix. Lorsqu'il est signé, il vaut ordre de réparation.

Il doit comporter :

- » l'identification complète du réparateur ;
- » l'identification complète du véhicule ;
- » la description précise des travaux à effectuer ;
- » le coût et les temps de la main d'œuvre ;
- » la liste des pièces détachées nécessaires ;
- » le montant de la TVA ;
- » les délais de réparation ;
- » la date d'établissement et la durée de validité du devis ;
- » la signature du réparateur et la signature du client.

S'il est agent, ou surtout concessionnaire d'une marque, le garagiste est en général soumis au respect d'une charte de qualité imposée par le label constructeur qu'il représente. Il se doit donc de présenter un devis avant chaque réparation.

Le plus souvent gratuit, le devis est établi régulièrement par les centres auto et à la demande du client, dans les garages indépendants.

Le destinataire du devis peut être :

- » **le client** : le devis permet d'informer le client. Il est généralement établi sans démontage mécanique. Par conséquent, le devis reste approximatif sachant qu'une erreur supérieure à 10 % n'est pas tolérable ;
- » **une compagnie d'assurance ou un cabinet d'expertise** : le devis est établi de manière précise pour permettre à l'assureur

de prendre une décision sur l'opportunité de la réparation :
remise en état ou mise en épave lorsque la réparation dépasse
la valeur vénale du véhicule.

Le devis, une fois accepté par le client, dispense le professionnel de
reprendre dans sa facture l'ensemble des opérations déjà détaillées.

Notes complémentaires

Un devis signé par les deux parties fait office de contrat et les prix
annoncés ne peuvent plus varier. En cas de litige, on peut comparer
le prix du devis à celui de la facture.

Pendant la réparation, des travaux et des pièces supplémentaires
non prévus au devis peuvent s'avérer nécessaires. Dans ce cas, le
réparateur doit d'abord en aviser le client ou l'assureur et obtenir
son accord, de préférence par écrit.

Le non-respect du devis peut entraîner une action pénale de la part
du client.

Remarque

Le devis et l'ordre de réparation ne sont pas obligatoires.

21.1 Le contenu

Après la réparation, le réparateur doit remettre obligatoirement au client une facture TTC (toutes taxes comprises) pour toute somme supérieure à 15,24 €. Cette facture est établie en double exemplaire, l'original étant remis au client.

La facture comporte les mentions suivantes :

- » la date ;
- » les nom et adresse de l'établissement et du client ;
- » le numéro d'immatriculation du véhicule ;
- » le kilométrage au compteur ;
- » le décompte détaillé de chaque prestation, c'est-à-dire le prix des pièces ou la quantité de produits utilisés ;
- » la provenance des pièces neuves ;
- » la somme totale à payer HT et TTC.

Il convient de vérifier à l'aide de l'ordre de réparation que ne soient pas facturés des réparations ou des produits non demandés. Le client est en droit de refuser de les payer.

À noter

La facture peut représenter une preuve fiscale mais pas juridique. La facture doit être claire, lisible, compréhensible et écrite en toutes lettres et chiffres.

21.2 Les obligations du garagiste

Le garagiste est soumis à une obligation de résultat : il est tenu de remettre en état de marche le véhicule qui lui a été confié. Il a l'obligation de restituer une voiture sur laquelle toutes les interventions liées à la sécurité ont été faites.

En cas de contestation de la qualité des travaux effectués ou du montant de la facture, le client doit payer pour récupérer sa voiture. Il doit effectuer le règlement en portant des réserves sur la facture et son double.

Le garagiste doit remettre le véhicule en état de marche à ses frais, mais il doit aussi indemniser le client pour les dépenses occasionnées (location d'un autre véhicule, frais d'expert) par la réparation défectueuse.

Si le véhicule a été volé ou endommagé alors qu'il était au garage, le garagiste est responsable et doit indemniser le client pour le préjudice subi.

Les pièces usagées qui sont retirées du véhicule restent la propriété du consommateur sauf s'il décide de les abandonner. Il peut demander à les récupérer pour examen, afin d'éviter de possibles abus ou s'il a un doute sur l'honnêteté du garagiste. Cependant, s'il s'agit d'une réparation gratuite durant la période de garantie du véhicule ou d'un échange standard, le garagiste conserve les pièces changées. Il est responsable des défauts des pièces utilisées. S'il fait partie d'un réseau de distribution, il doit utiliser les pièces fournies par le constructeur, à charge pour lui de se retourner contre le constructeur si les pièces sont défectueuses.

Si la réparation tarde à être exécutée, le client peut demander des dommages et intérêts au garagiste en raison du préjudice subi (location d'une voiture, frais de transport en commun).

21.3 Les réductions

Les réductions peuvent être de deux types :

- » réductions commerciales :
 - ristourne : fidélité du client ;
 - rabais : exceptionnel pour défaut, retard ou erreur ;
 - remise : systématique pour volume d'achat important.
- » réduction financière :
 - escompte : pour paiement comptant alors qu'un délai est possible.

21.4 Les majorations

279

La TVA (taxe sur la valeur ajoutée) est appliquée sur tous les produits ou services rendus. Cet impôt indirect est reversé à l'État pour qui cela représente une source très importante de revenus.

Le taux de la TVA peut varier en fonction de décisions politiques. Actuellement, la plupart des produits sont taxés à 19,6 %. Certains autres produits (alimentation, culturels...) bénéficient d'un taux réduit de 5,5 %.

Mode de calcul

Pour obtenir le montant de la TVA, il suffit de prendre le prix HT (hors taxe) du produit ou de la prestation et de le multiplier par le montant de tva approprié (19,6 % ou 5,5 % selon les cas). Il faut ensuite rajouter ce montant au prix HT pour avoir le montant TTC (toutes taxes comprises).

Exemple : Pour une réparation d'un coût de 1 000 € HT

Calcul de la TVA : $1\,000 \times 19,6 / 100 = 196 \text{ €}$

Montant TTC : $1\,000 + 196 = 1\,196 \text{ € TTC}$

Remarque

Les factures d'entretien et de réparations doivent être conservées (5 ans) pour contester, si besoin, la qualité du travail du garagiste, par exemple, ou pour démontrer que le véhicule est entaché d'un vice caché (si, par exemple, vous avez fait effectuer des réparations pour la même panne à plusieurs reprises).

Corrigés des tests d'auto-évaluation

Tests des leçons	Réponses
1 • Connaissance de l'automobile (p. 7) :	☐ 1b ☐ 2a ☐ 3b ☐ 4b ☐ 5c
2 • Les sous-ensembles de l'automobile (p. 21) :	☐ 1b ☐ 2c ☐ 3b ☐ 4a ☐ 5c
3 • Le châssis-carrosserie (p. 32) :	☐ 1b ☐ 2b ☐ 3c
4 • Classification des moteurs (p. 41) :	☐ 1c ☐ 2b ☐ 3c
5.1/5.2 • Constitutions des moteurs (p. 55) :	☐ 1a ☐ 2a ☐ 3b ☐ 4b ☐ 5b ☐ 6b
5.3 • Les éléments de la distribution (p. 65) :	☐ 1a ☐ 2c ☐ 3b ☐ 4b
6 • Les caractéristiques des moteurs (p. 73) :	☐ 1b ☐ 2b ☐ 3b ☐ 4a ☐ 5c
7 • Le fonctionnement des moteurs (p. 89) :	☐ 1b ☐ 2b ☐ 3b ☐ 4a ☐ 5a ☐ 6c
8 • La distribution (p. 98) :	☐ 1b ☐ 2a ☐ 3c ☐ 4b
9 • La suralimentation des moteurs thermiques (p. 110) :	☐ 1a ☐ 2b ☐ 3c ☐ 4b
10 • Le circuit de graissage (p. 126) :	☐ 1c ☐ 2a ☐ 3b ☐ 4a ☐ 5b ☐ 6a
11 • Le circuit de refroidissement (p. 137) :	☐ 1c et d ☐ 2b ☐ 3b ☐ 4a ☐ 5c
12 • Les combustibles et la combustion (p. 152) :	☐ 1b ☐ 2c ☐ 3a ☐ 4b ☐ 5c
13 • Le mélange combustible (p. 156) :	☐ 1c ☐ 2c ☐ 3b ☐ 4a et b
14.1 • Les systèmes d'injection (indirecte essence) (p. 168) :	☐ 1b ☐ 2b ☐ 3b ☐ 4c ☐ 5b
14.2 • Les systèmes d'injection (directe essence et diesel) (p. 193) :	☐ 1b ☐ 2a ☐ 3c ☐ 4b ☐ 5a
15 • Les systèmes antipollution (p. 215) :	☐ 1b ☐ 2c ☐ 3b ☐ 4c
16 • Principe de l'allumage (p. 231) :	☐ 1b ☐ 2a ☐ 3b ☐ 4b ☐ 5a
17 • Le véhicule électrique (p. 250) :	☐ 1b ☐ 2b ☐ 3a ☐ 4c

Unités et schématisation

1. Grandeurs et unités du Système international (SI)

Espace, temps

Grandeurs		Unités		Formules	
Nom	Symbole	Nom	Symbole		
Longueur	L ou l	mètre	m	rectangle $S = L \cdot l$ $1 \text{ m}^2 = 1 \text{ m} \cdot \text{m}$	cercle $S = \pi r^2$ $\text{m}^2 = \text{m}^2$
Aire, superficie	S	mètre carré	m^2		
Volume	V	mètre cube	m^3	parallélépipède $V = L \cdot l \cdot h$ $1 \text{ m}^3 = 1 \text{ m} \cdot \text{m} \cdot \text{m}$	cylindre $V = \pi r^2 \cdot h$ $1 \text{ m}^3 = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}$
Temps	t	seconde	s	$v = \frac{L}{t}$	$1 \text{ m/s} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Vitesse	v	mètre par seconde	m/s		
Vitesse de rotation	N ou n	tour par minute	tr/min	$1 \text{ tr/min} = \frac{2\pi}{60} \text{ rad/s}$	
Vitesse angulaire	ω	radian par seconde	rad/s		
Accélération	γ	mètre par seconde	m/s^2	accélération pesanteur : $g = 9,81 \text{ m/s}^2$	
Fréquence	F	hertz	Hz	$\text{Hz} = 1 \text{ période/s}$	

283

Unités et schématisation

Mécanique

Grandeurs		Unités		Formules	
Nom	Symbole	Nom	Symbole		
Force	F	newton	N	$P = M \cdot g$	
Masse	M	kilogramme	kg	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$	
Poids	P	newton	N		
Moment d'une force	$M_0(\vec{F})$	newton-mètre	N · m	$M_0(\vec{F}) = F \cdot l$ $\text{N} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m}$	
Force centrifuge	F_c	newton	N	$F = M \cdot \omega^2 \cdot r$ $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot (\text{rad/s})^2 \cdot \text{m}$	
Énergie, travail (quantité de chaleur)	W	joule	J	$W = F \cdot L$ $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$	$W = 2\pi \cdot N$ $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{tr/min}$
Énergie cinétique	E_c	joule	J	$E = \frac{1}{2} M \cdot v^2$ $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2$	

Mécanique (suite)

Grandeurs		Unités		Formules
Nom	Symbole	Nom	Symbole	
Puissance	P	watt	W	$P = \mathcal{C} \cdot \omega$ $1 \text{ W} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad/s}$
Couple moteur	$\mathcal{C}$	newton-mètre	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\mathcal{C} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{r}$ (r = rayon manivelle) $\text{N} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m}$
Pression	p	pascal	Pa	loi de Pascal $p = \frac{F}{S}$ $1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
Force pressante	F_p	newton	N	$F_p = p \cdot S$ $1 \text{ N} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^2$

Optique

Grandeurs	Unités	
	Nom	Symbole
Flux lumineux	lumen	lm
Luminance	candela par mètre carré	cd/m^2
Éclairement	lux	lx
Exposition lumineuse	lux-seconde	$\text{lx} \cdot \text{s}$

Électricité, magnétisme

Grandeurs		Unités		Formules
Nom	Symbole	Nom	Symbole	
Différence de potentiel Tension Force électro-magnétique	d.d.p U f.é.m.	volt	V	
Intensité	I			loi d'Ohm $U = R \cdot I$
Résistance	R			
Résistivité	ρ	ohm	Ω	$1 \text{ V} = 1 \Omega \cdot \text{A}$
		ohm-mètre	$\Omega \cdot \text{m}$	
Puissance	P	watt	W	$P = U \cdot I$ $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot \text{A}$ soit $R \cdot I^2$
Capacité	C	farad	F	
Flux magnétique	Φ	weber	Wb	à R constant $\Delta \Phi = \Delta I$

2. Principe de l'analyse descendante dite « systémique »

L'analyse systémique ou SADT (*System Analysis Design Technic*) s'effectue par niveaux de décomposition en partant de la globalité du système jusqu'à l'élément ou composant.

❶ Matière d'œuvre à l'entrée (énergie, action, état d'un système) dans son état initial.

❷ Matière d'œuvre (énergie, etc.) modifiée par le système ; notion de valeur ajoutée par le système.

❸ Matière d'œuvre secondaire.

❹ Facteurs déterminants : paramètres permettant la modification (information, énergie, action, configuration du système).

DF : descriptif fonctionnel.

Remarque

On doit retrouver les entrées et sorties quel que soit le niveau.

Exemple

Au niveau A1, DF1 a les mêmes entrées et sorties que DF0-1 au niveau A0.

Ces normes de schématisation sont données à titre d'exemple dans la mesure où leur révision est effectuée à un rythme assez rapide et qu'elles ne sont pas respectées uniformément dans tous les bureaux d'études européens.

Niveau A-0

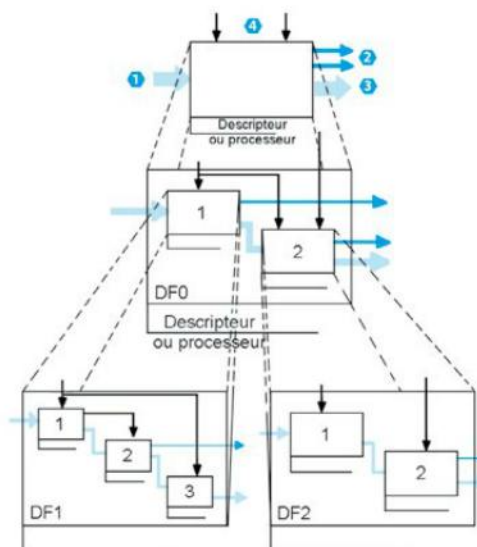
- Frontière d'étude
- Fonction d'usage
- Fonction globale

Niveau A0

- Décomposition en sous-ensembles fonctionnels

Niveau A1

- Décomposition des sous-ensembles
- Interactions des éléments



Actionneur principal 181
 — secondaire 181
 actuateur de débit 182
 admission 37, 78, 81
 AEI (allumage électronique intégral statique) 221
 aérodynamique 25-26
 affolement des soupapes 62
 airbag 29
 alésage 67
 allumage 9, 12, 219
 — électronique intégral statique (AEI) 221
 amortisseur de pulsation 171
 AOA 91
 AOE 91
 arbre à cames 57-58, 93
 — à attaque directe 61
 — en tête 57
 — latéral 57, 61
 arc électrique 219
 auto-allumage 150, 224
 auto-inflammation 36, 149-150
 automobile 3
 avance à l'allumage 227, 229
 — (AA) 82
 avance à l'ouverture de l'admission (AOA) 82
 — de l'échappement (AOE) 82
 axe de piston 47

Balance des soupapes 93
 BaO (oxyde de Baryum) 209
 batterie 237
 Beau de Rochas 37
 bielle 49
 bilan thermique d'un moteur 107

biocarburant 144
 bloc-moteur 44
 bobine 223
 — d'allumage 219
 — jumostatique 223
 bougie 224
 — chaude 224
 — froide 224
 — préchauffage 189-190

Calculateur 160, 181, 221, 263
 came 93
 canister 160, 206
 capteur cliquetis 163, 222, 229
 — de charge 183
 — pression absolue (tubulure) 163
 — pression de rampe 182
 — pression tubulure d'admission 229
 — référence cylindre 163, 229
 — régime et position moteur 163
 — régime moteur 229
 — régime-position 222
 — température air 162
 — température eau moteur 162
 — température gazole 183
 — vitesse véhicule 163, 229
 caractéristique dimensionnelle d'une automobile 24
 carburant 141, 210
 carrosserie 24
 carter d'huile 116
 catalyseur 202
 ceinture de sécurité avec prétensionneurs 29
 cérine 191

charge 9, 14
 châssis-carrosserie 23
 circuit d'alimentation 160
 — de graissage 113
 — de refroidissement 127
 — primaire 223
 — secondaire 223
 cliquetis 226
 coefficient de frottement 115
 CO₂ (dioxyde de carbone) 202
 colonne de direction est rétractable 30
 comburant 210
 combustible 141
 combustion 12, 148, 157, 201
 CO (monoxyde de carbone) 144, 202-203
 compresseur 100
 — centrifuge 100
 — volumétrique 100, 103
 compression 37, 78, 81
 consommation spécifique 71
 couler une bielle 50
 couple moteur 67-68
 — spécifique 71
 courant primaire 223
 courroie crantée 57
 course 67
 cracking 142
 croisement des soupapes 93
 culasse 45
 CUNA 71
 cycle à quatre temps 75
 — d'un moteur Diesel 76
 — d'un moteur essence 76
 cylindrée 67

Débit 100
débitmètre 207
— d'air 183
début d'injection 177
délai d'inflammation 79
démarrage 9
démarreur 14
déphaseur d'arbre à cames 96
dérive 26
détente 78
détonation 150
devis 275
diagramme réel 82
— théorique 78-79
DIN 71
dioxyde de carbone (CO₂) 202
— de soufre (SO₂) 202
direction 9
distribution 57
— variable 94
dosage 11, 153
— parfait 154
durée d'injection 177

Échangeur 100, 102
échappement 37, 78, 81
effet de serre 202
EGR (recyclage des gaz d'échappement) 202, 206
électrique (véhicule) 233
électrode 224
électromagnétique 188
électronique de puissance 260
embrayage 15
EMHV 146
empattement 24
énergie calorifique 141
— cinétique 5, 29
— potentielle 5
— thermique 127
EOBD (European On-Board Diagnostics) 205
épuration circulaire 91
équation chimique 149, 153
ESP (calculateur de contrôle dynamique de stabilité) 263
ETBE 145
éthanol 145
éthylotest antidémarrage 28

Facture 277
FAP (filtre à particules) 207
filtre à carburant 160
— à particules 190
— à particules (FAP) 207
— de charbon actif 206
filtre à huile 117
flambage 49
flexion 50
fluidité 122
flux magnétique 220
force 47
— électromagnétique 219
freinage 9
fréquence de rotation 12
frottement 114

Gazeux 201
GPL 194
graissage hydrodynamique 120
— onctueux 120

HC (hydrocarbure) 203
HC (hydrocarbure imbrûlé) 144, 202
historique XIII
homogène 154, 157, 201
homogénéité 153
— du mélange 213
huile 121-122
— Low SAPS 121
— végétale brute (HVB) 147
— végétale pure (HVP) 146
hybride 36, 40, 235
hybride (véhicule)
— hybride 251
hydrocarbure 141
hydrogène 248

IAE (injection d'air à l'échappement) 209
indicateur de niveau 132
indice de cétane 144
— d'octane 143
inertie 108
inflammation 37, 78
— détente 81
injecteur 164, 181, 188
— à téton 187
— à trou 187

— piézo-électrique 188
injection 9
— d'air à l'échappement (IAE) 209
— Diesel 9, 175
— directe 177
— directe Diesel 38
— directe essence 37, 169
— gaz 194
— indirecte 177
— indirecte Diesel 38
— indirecte essence 37, 157
— multipoint 158
intercooler 102

Jeu fonctionnel 60
jumostatique 221

Lacet 27
loi de Pascal 62
— d'Ohm 220
longeron 23
longueur hors tout 24
Low SAPS 121
lubrifiant 121

Manocontact de pression d'huile 118
mélange combustible 153
mode homogène 172
— pas à pas 163
— stratifié 172
moment du couple moteur 69
monoxyde de carbone (CO) 202-203
mort bas (PMB) 67
mort haut (PMH) 52, 67
moteur à combustion 36
— 3 cylindres 83
— à combustion interne 36
— à course longue 68
— à deux temps 37
— à explosion 36
— à quatre temps 37
— carré 68
— électrique 35, 238
— en ligne 58
— en V 58
— hybride 251
— rotatif 37
— super-carré 68

- thermique 35
- multibobine 221
- multigrade 122

Norme API 123

- ACEA 123
- Euro V 213
- NOx (oxyde d'azote) 202-203

Onctuosité 122

- ordre de fonctionnement 52
- ordre de réparation 271
- oxyde d'azote (NOx) 202
 - d'azote (NOx) 203
 - de Baryum (BaO) 209

Palladium 204

- papillon motorisé 162
- particule 202
- piège à NOx 209
- piézo-électrique 170, 188
- pile à combustible 235
- piston 12, 47
- platine 204
- plomb 143
- PMB (point mort bas) 67
- PMH (point mort haut) 52, 67
- point d'avance à l'allumage 222
 - d'avance initial 227
 - d'injection 186
- pompe à carburant 160
 - à eau 129-130
 - à huile 113, 117, 119
 - d'injection mécanique 177
 - haute pression 181, 186
- portance 26
- portée conique 60
- postchauffage 190
- pot catalytique 203
- potentiomètre papillon 163
- poussoir 57, 62
 - hydraulique 63
- pouvoir calorifique 148
- préchauffage 190
- pré-postchauffage 189
- pression collecteur admission 162
 - de suralimentation 101
- puissance 69
 - fiscale 67, 71

- maximale 67
- spécifique 71
- pulvérisation 177

Radiateur 128

- rampe + 160
 - commune (Common rail) 182
 - d'injection 171
- rapport cyclique d'ouverture (RCO) 206
 - de démultiplication 15
 - volumétrique 67-68
- RCO (rapport cyclique d'ouverture) 206
- réchauffeur de carburant 183
- recyclage des gaz d'échappement (EGR) 206
 - des vapeurs d'essence 206
- refroidisseur de carburant 183
- régénération 191, 209
- régime moteur 162
- réglage du jeu 61
- régulateur de pression 160, 171, 182
- régulation électronique 101
 - mécanique 101
- rendement 106-107
 - du cycle 107
 - du moteur 108
- réservoir de réaspiration des vapeurs d'essence 160
 - à l'avancement 26
 - au roulement 26
- ressort 62
 - de soupapes 57
- retard à la fermeture de l'admission (RFA) 82
 - de l'échappement (RFE) 82
- RFA 91
- RFE 91
- rhodium 204
- roulis 26

SAE 70

- sécurité active 28
 - passive 28-29
- segment 48
 - de feu 48
 - intermédiaire 48
 - racleur 48
- SO₂ (dioxyde de soufre) 202

- sonde à oxygène amont 164
 - aval 164
 - ou lambda 204
- sonde de température 132
- soupape 57, 60
- stabilité 122
- stratifié 169
- suie 190, 207
- suralimentation 99
- suspension 9
- système antipollution 201
 - d'additivation 191
 - de refroidissement par eau 134
 - de transmission 15

Tableau de fonctionnement d'un moteur à quatre cylindres à quatre temps 53

- tangage 27
- taux de remplissage 82, 99
- temps d'ouverture de l'injecteur 162
- thermistance eau moteur 229
- thermostat 131
- torsion 50
- traînée 26
- transmission 9
- travail 47, 69
- traverse 23
- tubulure d'admission 12
- turbo à géométrie variable 105
- turbocompresseur 100, 104
- TVA 279

Valve Schrader 170-171

- vanne EGR 184
- vaporisation 153-154
- vase d'expansion 130
- véhicule
 - à pile à combustible 247
 - électrique 233, 235
 - hybride 251
- ventilateur 133
- vilebrequin 50, 86
- viscosité 122
- vitesse d'inflammation 143, 149
- voie 24
- volant moteur 53

Wastegate 100