

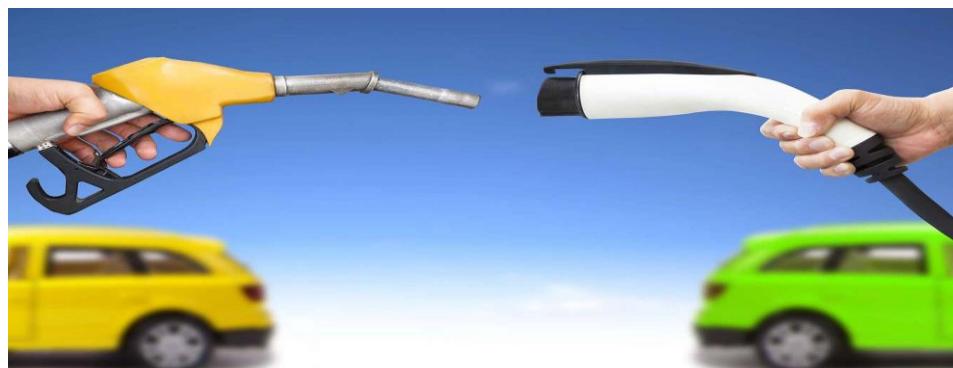
Université Mohamed Première

## Ecole Supérieure De Technologie Oujda

Département Génie Applique

# Filière Mécatronique

# Rapport de sujet Technique : Architecture des moteurs hybrides pour les véhicules automobile



Réalise par :

# Mohamed Amine Aarab

Encadré par :

M.Ziani

Année universitaire : 2019/2020

## **Remerciement :**

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Je saisiss cette occasion pour remercier vivement toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à élaborer ce sujet technique et à m'avoir permis de compléter ma formation théorique durant cette année.

Nos vifs remerciement a destiné à nos professeurs de la branche MCT1, pour leurs efforts considérables à l'ombre de cette pandémie.

En second lieu, nous tenons à remercier notre chef département M.ziani, ce qui nous a suggéré est ce sujet technique contemporain de l'avancement de la technologie automobile et en même temps important pour suivre le rythme de ce progrès technologique des véhicules automobiles Hybrides.

## Table des matières

I.	INTRODUCTION GENERALE .....	11
II.	LES MOTEURS EMPLOYES EN AUTOMOBILE HYBRIDE .....	12
III.	MOTEUR ELECTRIQUE .....	13
A.	Principe de base d'un moteur électrique .....	13
B.	Les pièces d'un moteur électrique .....	14
C.	Magnétisme .....	15
1.	L'aimant .....	15
2.	Electroaimant .....	15
3.	Champ magnétique .....	16
4.	Champ magnétique crée par un courant électrique .....	17
5.	Champ magnétique crée par une bobine .....	17
D.	Déférrente types des moteurs électriques .....	18
1.	Moteur a courant alternative .....	19
2.	Moteur pas à pas .....	34
E.	Alimentation et la distribution et la régulation d'énergie électrique pour les moteurs électrique dans le voiture hybride .....	37
1.	Alimentation .....	37
2.	Distribution d'énergie électrique .....	42
IV.	MOTEUR THERMIQUE .....	45
A.	Moteur thermique .....	45
1.	Fonction globale .....	45
2.	Architecture general .....	46
3.	Description des composants du moteur .....	47
4.	Principe de fonctionnement d'un moteur .....	56
B.	Circuit d'allumage .....	61
1.	Fonction globale du système d'allumage .....	61
2.	Système d'allumage classique .....	61
3.	Fonctionnement du l'ensemble du système .....	62
4.	Transformateur élévateur (bobine) .....	62
5.	L'allumeur .....	65
6.	Les bougies .....	67
C.	La carburation .....	68
1.	Condition à remplir .....	69

2.	Réalisation de carburation .....	69
3.	Dosage du mélange .....	69
4.	Système d'alimentation en essence .....	70
5.	Système d'alimentation en gazole .....	73
6.	Les injecteur .....	73
<b>D.</b>	<b>La distribution moteur .....</b>	<b>77</b>
1.	Généralité .....	77
2.	Rôle de la distribution .....	77
3.	Le principe de fonctionnement .....	77
4.	Les principaux organes de la distribution .....	78
5.	Principe de fonctionnement .....	82
6.	Diagramme de la distribution et le calage variable .....	83
7.	L'emplacement de la distribution .....	84
<b>E.</b>	<b>Circuit de refroidissement.....</b>	<b>85</b>
1.	Remède.....	85
2.	Déférents types de refroidissement.....	85
3.	Composition de circuit de refroidissement.....	86
<b>F.</b>	<b>Circuit de graissage.....</b>	<b>88</b>
1.	Problématique et Fonction globale de circuit de graissage .....	88
2.	Schéma de circuit.....	88
3.	Fonctionnement .....	89
4.	Eléments de traitement d'huile .....	90
<b>G.</b>	<b>Circuit de Démarrage .....</b>	<b>93</b>
1.	Problème de démarrage du moteur thermique.....	93
2.	Condition à remplir par le CIRCUIT DE DEMARRAGE.....	93
3.	Rôle .....	93
4.	Composantes.....	93
5.	Fonctionnement .....	95
<b>H.</b>	<b>Déférentes architecture des moteur thermique.....</b>	<b>97</b>
1.	Moteur en ligne.....	97
2.	Moteur en V.....	98
3.	Moteur VR.....	99
4.	Moteur en W.....	99

V. DIFFÉRENCES PUISSANCES ET RENDEMENT ENTRE LES MOTEURS ÉLECTRIQUES ET LES MOTEURS THERMIQUES.....	102
A.    Puissance.....	102
1.    Puissance de moteur électrique .....	102
2.    Puissance de moteur thermique .....	103
B.    Conclusion entre la puissance et le rendement des moteurs thermique et l'électriques.....	104
VI. TECHNOLOGIE HYBRIDE DANS LES VEHICULE AUTOMOBILE .....	105
A.    Présentation des véhicules hybrides .....	105
1.    Le véhicule électrique et le véhicule thermique conventionnel .....	106
B.    Les Déférentes nivaux de Hybridation de véhicule automobile .....	107
C.    Hybride parallèle et Hybride série .....	108
1.    Montage série .....	108
2.    Montage parallèle .....	109
3.    La combinaison de deux.....	110
D.    Principe de base des moteur dans les véhicule automobile hybride .....	111
1.    Les modes de fonctionnements .....	111
2.    Les modes de fonctionnements à une seul source d'énergie.....	112
3.    Les modes de fonctionnement Hybrides .....	112
E.    Echanges d'énergie mécanique de rotation entre le moteur thermique et le(s) moteur(s) électrique(s) .....	112
1.    Le cas d'alimentation des moteur au même temps.....	112
2.    Le cas d'alimenter le moteur électrique seul.....	112
3.    Le cas d'alimenter le moteur thermique seul .....	112
VII. CONCLUSION .....	113

## Liste des figures :

Figure 1 : Moteur Hybride .....	12
Figure 2 : fonction globale d'un moteur électrique .....	13
Figure 3 : aimant permanent .....	13
Figure 4 : exploitation de force magnetique .....	14
Figure 5 : bobine .....	14
Figure 6 : stator et rotor de moteur électrique .....	15
Figure 7 : l'aimant .....	15
Figure 8 : le noyau de fer doux est inerte car pas de passage de courant .....	16
Figure 9 : le noyau se transforme en aimant car on a un courant électrique traverse le bobinage .....	16
Figure 10 : les lignes de champ .....	17
Figure 11 : champ magnetique cree par un courant electrique .....	17
Figure 12 : champ magnetique cree par la bobine .....	18
Figure 13 : bobinage de noyau de fer doux .....	18
Figure 14 : tension alternative et monophasée et triphasée .....	19
Figure 15 : dephasage des tensions triphasée .....	19
Figure 16 : Machine synchrone .....	20
Figure 17 : rotor a poles lisses .....	21
Figure 18 : rotor a poles saillants .....	21
Figure 19 : transformation de l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique sinusoïdale .....	22
Figure 20 : Alternateur .....	23
Figure 21 : exemple de machine synchrone dans toyota .....	24
Figure 22 : moteur synchrone .....	24
Figure 23 : étape 0 .....	25
Figure 24 : etape 1 .....	25
Figure 25 : etape 2 .....	26
Figure 26 : etape 3 .....	26
Figure 27 : etape 4 .....	27
Figure 28 : champ tournant du rotor .....	27
Figure 29 : couple de moteur en fonction de l'angle $\theta$ .....	28
Figure 30 : moteur asynchrone .....	29
Figure 31 : texemple le moteur synchrone dans tesla .....	30
Figure 32 : rotor moteur asynchrone .....	30
Figure 33 : moteur asynchrone rotor a cage d'écureuil .....	31
Figure 34 : rotor a cage d'écureuil .....	32
Figure 35 : rotor bobiné .....	32
Figure 36 : Bilan des puissances .....	33
Figure 37 : Moteur pas à pas .....	35
Figure 38 : Stator unipolaire A 5 fils .....	35
Figure 39 : Stator unipolaire A 6 fils .....	35
Figure 40 : Stator bipolaire A 4 fils .....	35
Figure 41 : bobinage de stator .....	36

Figure 42 : bobines disposées par paires les une en face des autres .....	37
Figure 43 : borne de recharge .....	38
Figure 44 : les trois bornes de recharge de véhicule .....	39
Figure 45 : batterie .....	40
Figure 46 : cellule de batterie monter en parallèle .....	40
Figure 47 : l'emplacement de la cellule de batterie dans le véhicule AUDI e-tron.....	41
Figure 48 : Montage de batterie utilisé .....	41
Figure 49 : la distribution et la regulation d'energie electrique dans la voiture hybride .....	42
Figure 50 : redressement monophasé .....	42
Figure 51 : filtrage de la tension.....	43
Figure 52 : regulation de la tension .....	43
Figure 53 : Fonctionnement de onduleur .....	43
Figure 54 : fonction globale du moteur thermique .....	45
Figure 55 : piece du moteur a explosion.....	46
Figure 56 : le bloc cylindre .....	48
Figure 57 : chemise cylindre .....	48
Figure 58 : la culasse .....	49
Figure 59 : arbre à cames .....	49
Figure 60 : soupape .....	50
Figure 61 : piston.....	51
Figure 62 : les segments du piston .....	52
Figure 63 : la bielle .....	52
Figure 64 : vilebrequin .....	53
Figure 65 : shéma cinématique Bielle manivelle .....	54
Figure 66 : la distribution du moteur .....	55
Figure 67 : caractéristique Moteur .....	56
Figure 68 : 1éme l'admission .....	57
Figure 69 : 2éme compression .....	57
Figure 70 : 3éme explosion .....	58
Figure 71 : 4éme Echapement .....	58
Figure 72 : cycle mixte theorique de 4 temps .....	59
Figure 73 : Système d'allumage classique .....	61
Figure 74 : alimentation du transformateur par la batterie .....	62
Figure 75 : transfo monophasé .....	63
Figure 76 : culasse .....	63
Figure 77 : Rupteur+ came .....	64
Figure 78 : le circuit d'allumage .....	64
Figure 79 : les cames de l'arbre de l'allumeur .....	65
Figure 80 : l'allumeur.....	65
Figure 81 : Distributeur d'allumeur .....	66
Figure 82 : Bougie d'allumage .....	67
Figure 83 : exemple de circuit du carburation .....	68
Figure 84 : Systeme d'alimentation en essence .....	70
Figure 85 : Pompe .....	71

Figure 86 : Carburateur élémentaire .....	72
Figure 87 : injection direct essence .....	74
Figure 88 : injection direct en diesel .....	74
Figure 89 : injection indirect en essence .....	75
Figure 90 : injection indirect en diesel .....	76
Figure 91 : la distribution moteur .....	77
Figure 92 : fonctionnement des soupapes .....	78
Figure 93 : système de transmission pignon - courroï cranté .....	78
Figure 94 : soupape .....	79
Figure 95 : pussoire .....	79
Figure 96 : la came .....	80
Figure 97 : schéma de la came .....	80
Figure 98 : graphique et le schéma de la came .....	81
Figure 99 : courroie de distribution .....	82
Figure 100 : chaîne de distribution .....	82
Figure 101 : courbe 1 .....	83
Figure 102 : courbe 2 .....	83
Figure 103 : l'emplacement de la distribution du moteur .....	84
Figure 104 : circuit de refroidissement .....	86
Figure 105 : lubrification d'un moteur .....	88
Figure 106 : schéma de circuit de graissage .....	89
Figure 107 : circuit de l'huile .....	90
Figure 108 : pompe à huile à rotor .....	90
Figure 109 : pompe à huile à palette .....	91
Figure 110 : carter .....	91
Figure 111 : filtre à huile .....	92
Figure 112 : dimarreur .....	93
Figure 113 : description de circuit de démarrage du moteur thermique .....	94
Figure 114 : position de démarrage .....	95
Figure 115 : clé de contact relâché .....	96
Figure 116 : moteur en ligne .....	97
Figure 117 : moteur en V .....	98
Figure 118 : moteur en VR .....	99
Figure 119 : Moteur en W .....	100
Figure 120 : Moteur en W a l'intérieur .....	101
Figure 121 : courbe de puissance et de couple de moteur électrique .....	102
Figure 122 : courbe de puissance et de couple de moteur thermique .....	103
Figure 123 : Architecture de voiture Hybride .....	105
Figure 124 : Moteur Hybride .....	106
Figure 125 : principe du véhicule électrique .....	106
Figure 126 : principe du véhicule thermique .....	107
Figure 127 : principe de l'architecture série .....	108
Figure 128 : principe de l'architecture série .....	108
Figure 129 : BMW i3 hybride série .....	109

Figure 130 : Principe de l'architecture parallèle.....	109
Figure 131 : Volkswagen golf 7 GTE hybride.....	110
Figure 132 : moteur hybride A3 e-tron hybride .....	110
Figure 133 : Principe de l'architecture à dérivation de puissance.....	111
Figure 134 : Exemple de montage série-parallèle toyota HSD.....	111



## I. INTRODUCTION GENERALE

Depuis plusieurs années, les fluctuations du prix du pétrole, sa possible raréfaction et les méfaits des gaz néfastes à l'environnement ont déclenché une partie des récentes études sur notre système de transport. Cette prise de conscience collective a entraîné des réglementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules. L'amélioration du rendement du moteur thermique, la réduction des émissions par post-traitement, l'optimisation des stratégies de commande désormais numériques, ont permis d'importants progrès, mais atteignent aujourd'hui leurs limites. Pour répondre au défi d'une réduction encore accrue des consommations et émissions, l'industrie automobile s'est tout d'abord tournée vers les véhicules électriques qui éliminent la combustion à leur bord et ainsi ne produisent plus d'émissions polluantes. Par contre, leur principal handicap réside dans la batterie encore très lourde et très coûteuse. L'intérêt des consommateurs pour ce type de véhicules dépend donc des progrès technologiques qui vont être réalisés dans les années à venir. Aujourd'hui, l'autonomie des véhicules électriques dépend fortement du style de conduite utilisé. Même un conducteur économe ne peut espérer atteindre que 200 km d'autonomie pour une durée de recharge très longue (de 6 à 8 heures). De plus, les véhicules électriques nécessitent l'installation d'infrastructures spécifiques pour la recharge de la batterie aussi bien dans les garages des particuliers que dans des stations publiques pour permettre les longs trajets. C'est pourquoi, de nouvelles technologies sont à l'étude, en particulier les véhicules électriques hybrides. Quelles sont alors les différents moteurs employés en voitures hybride et leurs différentes particularités permettant de résoudre ses besoins? Pour répondre à cette question, nous allons étudier en premier temps les moteurs employé dans les voitures hybrides. En dernière lieu nous expliquant l'architecture et le fonctionnement de véhicule hybride.

## II. LES MOTEURS EMPLOYES EN AUTOMOBILE HYBRIDE



*Figure 1 : Moteur Hybride*

Un véhicule hybride combine un système électrique (un ou plusieurs moteurs électriques et une batterie) avec un moteur à combustion interne (essence ou diesel) pour utiliser les avantages de chaque organe et ainsi, améliorer le rendement de la transmission. La batterie peut être rechargée à bord du véhicule, ce qui évite l'installation coûteuse de nouvelles infrastructures : l'autonomie du véhicule ne dépend alors plus que de la capacité de son réservoir comme dans un véhicule conventionnel. Cependant, ce type de véhicule, disposant de deux sources d'énergie distinctes, pose de nouveaux problèmes de répartition de la puissance demandée aux roues entre les sources disponibles. Mais avant de décrire plus précisément les associations classiques des composants dans un véhicule hybride, revenons rapidement sur les spécificités du véhicule électrique et du véhicule thermique conventionnel.

- Dans les chapitres suivants nous parlerons des différentes architectures des moteurs employés en automobile hybride
- Les moteurs électriques
- Les moteurs thermiques

### III. MOTEUR ELECTRIQUE

#### A. Principe de base d'un moteur électrique

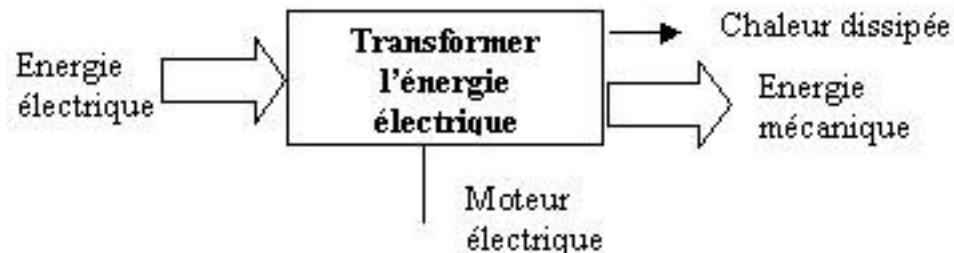


Figure 2 : fonction globale d'un moteur électrique

Le principe d'un moteur électrique, quel que soit sa conception, et les moteurs électriques sont des actionneurs chargés de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation par d'exploiter la force magnétique pour obtenir un mouvement. La force magnétique nous est un peu familière grâce aux aimants qui prouvent repousser ou attirer d'autre aimants.

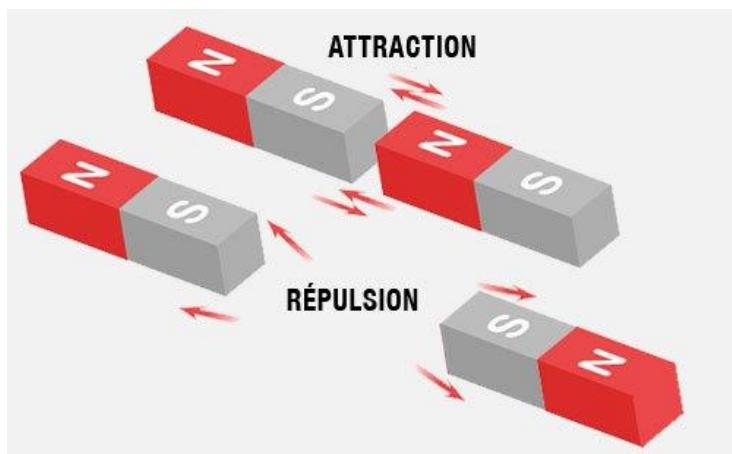
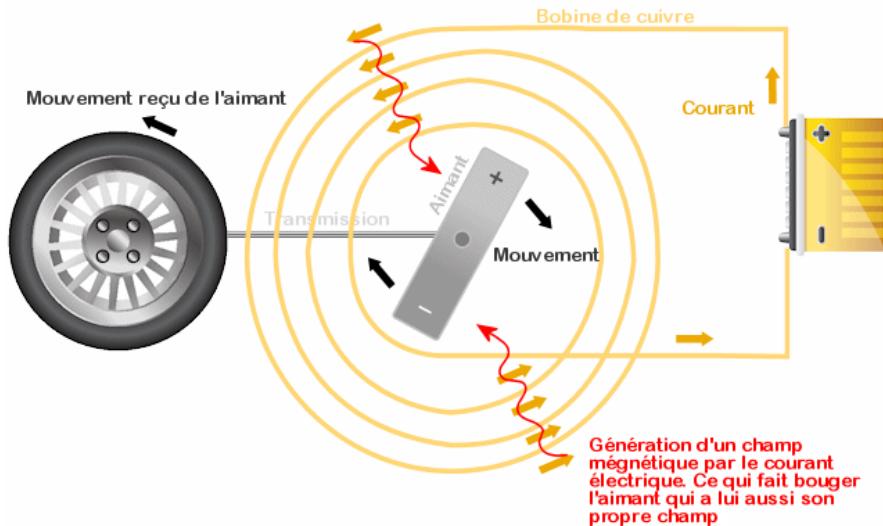


Figure 3 : aimant permanent

Pour cela, on va s'aider de deux éléments principaux : des aimants permanentes et des bobines de cuivre (les fabricants choisissent le cuivre car c'est un matériau parfait pour cet emploi car c'est le plus conducteur qui soit...), ou même que des bobines de cuivre dans certains cas sans aimant permanent.

On va monter le tout sur un axe circulaire pour obtenir un mouvement permanent et linéaire, le but est d'avoir quelque chose qui a un cycle qui se répète à l'infini tant qu'on alimente le moteur.



*Figure 4 : exploitation de force magnétique*

Il faux aussi savoir qu'une bobine traversée par du courant se comporte alors comme un aimant, avec un champ électromagnétique avec deux pôles : nord et sud + et - . le résultat est que si je fais passer du courant dans la bobine, cette dernier va générer un champ magnétique qui va alors influer sur celui de l'aimant, qui va alors bouger .Le principe alors est simple, si j'aliment ma bobine j'obtiens une force de rotation.

Tout moteur électrique son réversible : si on bouge l'aimant manuellement cela génère un courant électrique dans la bobine, on peut stocker cette énergie générée par le moteur dans une batterie (par exemple le alternateur dans les centre de production d'énergie électrique hydroélectricité). Si on injecte du courant dans la bobine, alors l'aimant se met à bouger.



*Figure 5 : bobine*

## B. Les pièces d'un moteur électrique

Dans cette on savoir les pièces d'un moteur électrique

Il y a deux parties importantes dans les moteurs électriques :

Stator : c'est la partie fixe du moteur, qui produit un champ magnétique tournant.

Rotor : c'est la partie mobile du moteur, qui est entraînée par ce champ tournant, produisant de l'énergie mécanique.

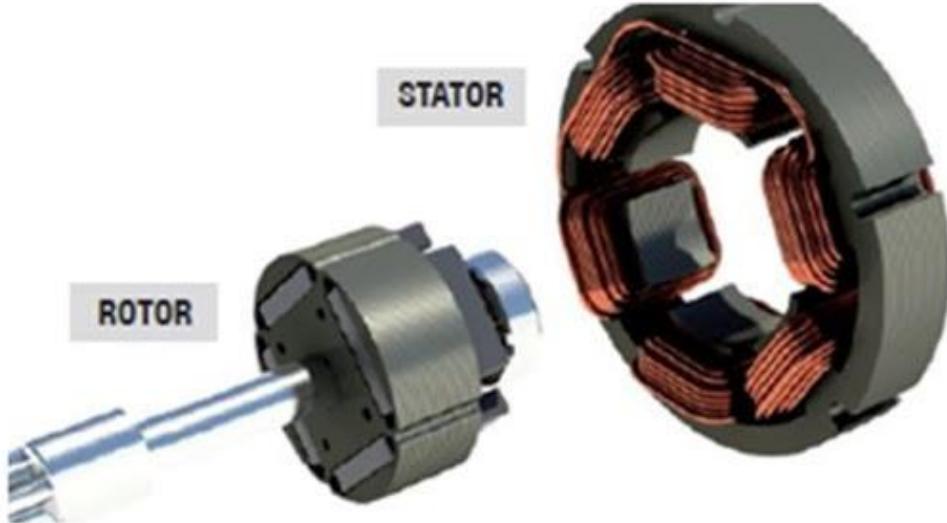


Figure 6 : stator et rotor de moteur électrique

## C. Magnétisme

### 1. L'aimant

Un aimant a la propriété d'attirer des éléments comportant du fer. Il possède deux extrémités : le pôle nord et le pôle sud. Deux pôles identiques se repoussent, deux pôles opposés s'attirent.

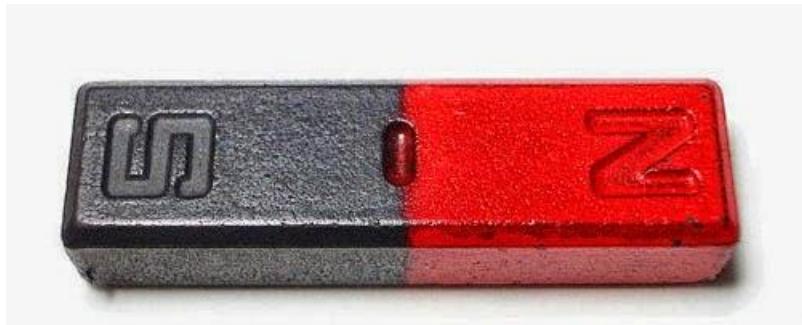


Figure 7 : l'aimant

### 2. Electroaimant

Les électroaimants sont des actionneurs linéaires électriques de faible amplitude de mouvement. Ils sont constitués d'un noyau de fer doux placé à l'intérieur d'un bobinage de fil conducteur. Le noyau se transforme en aimant lorsqu'un courant électrique parcourt le bobinage.

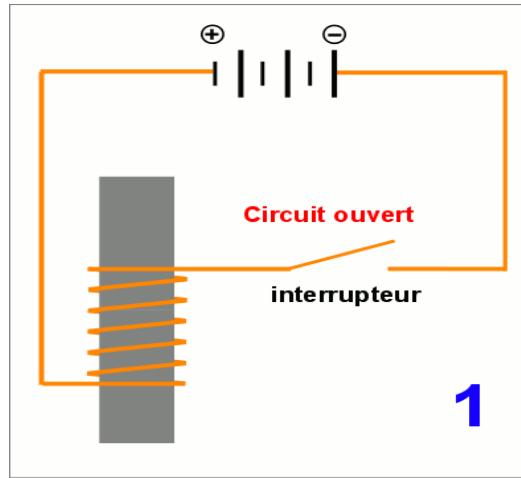


Figure 8 : le noyau de fer doux est inerte car pas de passage de courant

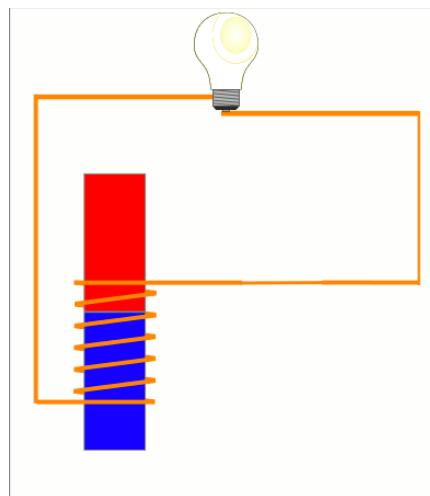


Figure 9 : le noyau se transforme en aimant car on a un courant électrique traverse le bobinage

### 3. Champ magnétique

Le champ magnétique est l'espace sur lequel l'aimant peut agir. Son intensité est maximale au contact de l'aimant et diminue quand on s'en éloigne.

Ce champ magnétique est orienté du nord au sud. Les lignes de champ caractérisent en tout point du champ magnétique sa direction et son sens.

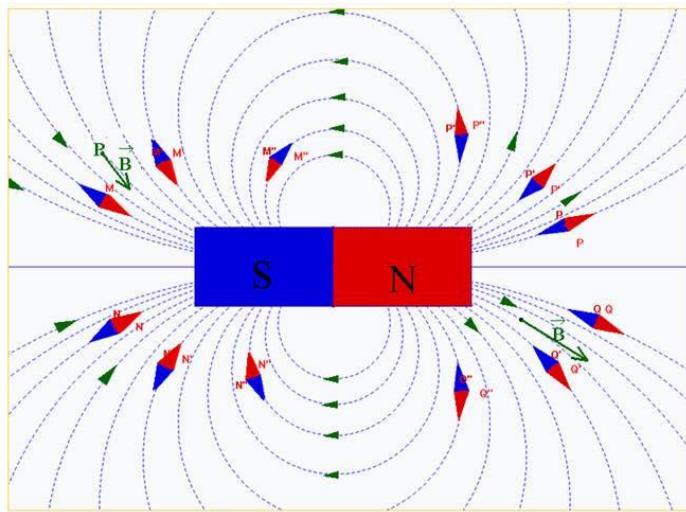


Figure 10 : les lignes de champ

#### 4. Champ magnétique créé par un courant électrique

Un conducteur parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique dans son environnement.

L'orientation des lignes de champ dépend du sens de circulation du courant électrique.

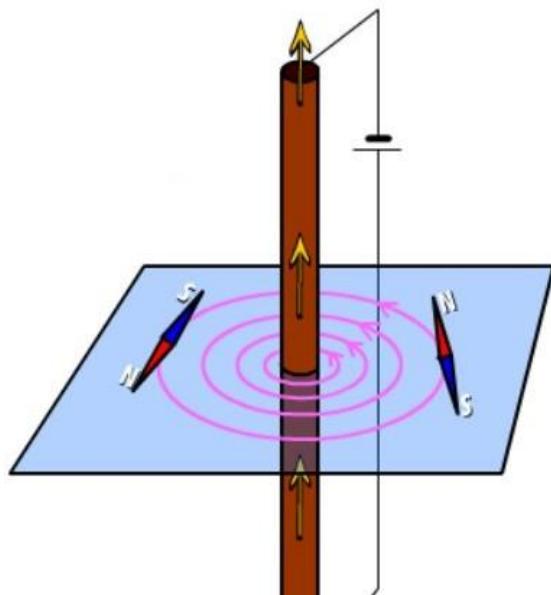


Figure 11 : champ magnétique cree par un courant electrique

#### 5. Champ magnétique créé par une bobine

Une bobine, parcourue par un courant électrique, se comporte comme un aimant avec un pôle à chaque extrémité.

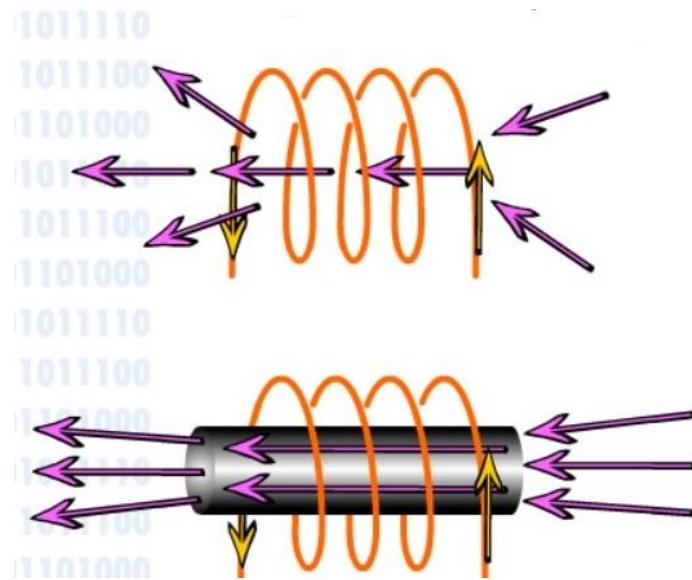


Figure 12 : champ magnétique créé par la bobine

L'intensité du champ magnétique avec la relation de champ magnétique  $B$  est ( $B = \mu \cdot n \cdot I$  avec  $B$  : le champ magnétique circule et  $I$  : le courant électrique circulée dans la bobine et  $n$  : densité linéique de spire et  $\mu$  : perméabilité magnétique de milieu ‘ elle caractérise le comportement magnétique du milieu et la perméabilité magnétique du fer est 1000 fois supérieure à celle de l'aire ’) c'est-à-dire que l'intensité du champ magnétique dépend de la densité linéique de spires, de l'intensité de courant qui les parcourt et de la perméabilité magnétique du milieu.

Un noyau de fer doux placé à l'intérieur de la bobine permet de canaliser le champ magnétique et de concentrer les lignes de champ. On n'utilise pas de noyau en acier car il conserverait le magnétisme en absence de courant.



Figure 13 : bobinage de noyau de fer doux

#### D. Différentes types des moteurs électriques

Voyons maintenant les différents types de moteurs qui existent dans le domaine de l'automobile.

## 1. Moteur à courant alternatif

Le moteur à courant alternatif est alimenté avec une tension alternative de fréquence  $f$  avec  $f = \frac{1}{T}$ , le moteur est alimenté soit en signal électrique monophasé soit en signal triphasé. Les signaux triphasés sinusoïdaux de même fréquence et déphasés l'un par rapport aux autres d'un angle de  $2\pi/3$ .

Avec :  $V_1 = V_{max} * \sin \theta^*(\omega t)$  et  $V_2 = V_{max} * \sin \theta^*(\omega t - \frac{2\pi}{3})$  et  $V_3 = V_{max} * \sin \theta^*(\omega t - \frac{4\pi}{3})$

Avec  $(\omega t - \theta)$  c'est le déphasage entre les trois tensions.

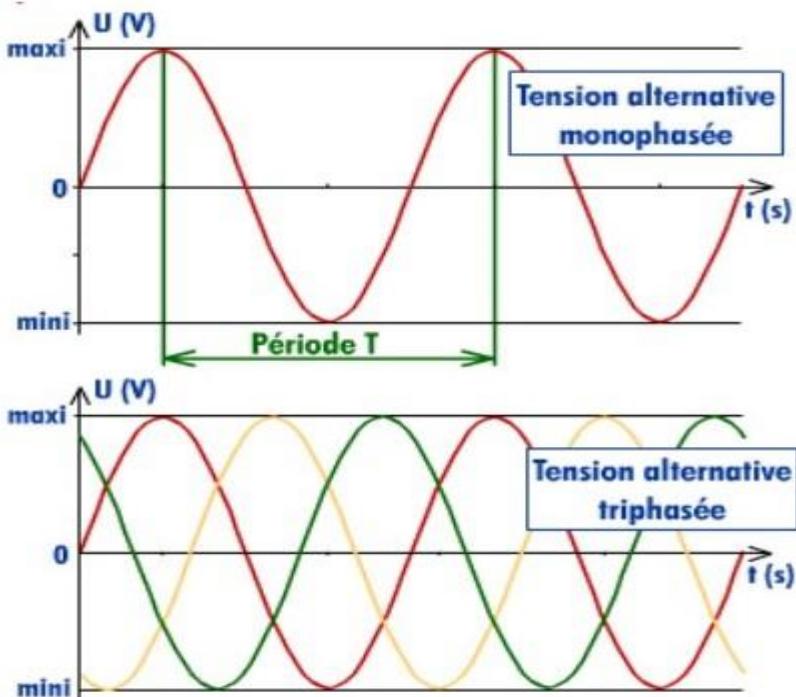


Figure 14 : tension alternative et monophasée et triphasée

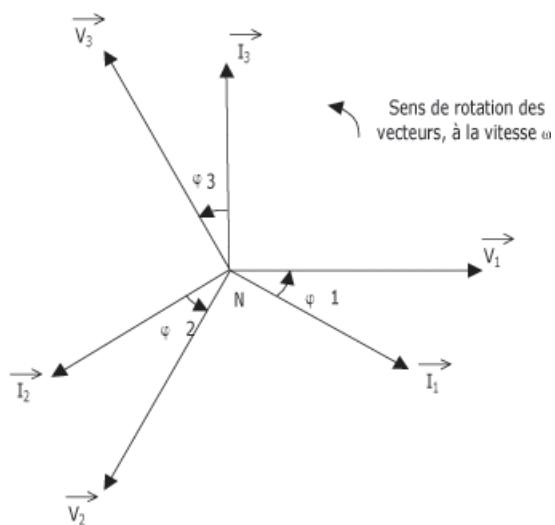


Figure 15 : déphasage des tensions triphasées

### a) Machine synchrone

La machine synchrone est un convertisseur électromécanique réversible. Elle peut fonctionner soit en génératrice soit en moteur. Lorsqu'elle fonctionne en génératrice, la machine synchrone prend le nom alternateur, il permet de transformer l'énergie mécanique de rotation générée par le rotor en énergie électrique.

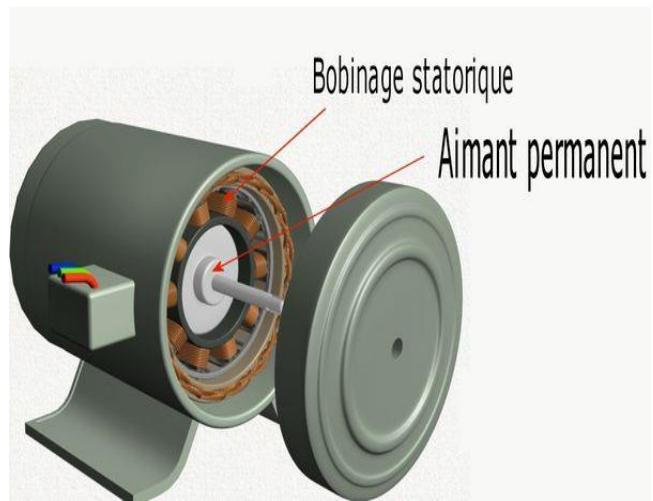


Figure 16 : Machine synchrone

#### (1) Principe de l'alternateur

Un aimant (inducteur) tourne à la fréquence  $n$ , la bobine (induit) est traversée par un flux variable  $\Phi(t)$  d'où la création d'une force électro motrice induite :  $e(t) = -N \frac{d\Phi}{dt}$ .

La fréquence de cette f.e.m. est telle que :  $f = n$ , soit  $\omega = \Omega$ , avec  $f$  est la fréquence et  $\Omega$  la vitesse de rotation du rotor (aimant), et  $\omega$  la pulsation de f.e.m. sinusoïdale induite, avec  $\omega = 2\pi f$  en rad/s.

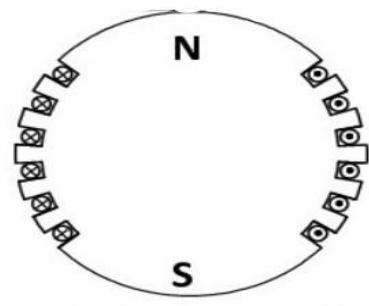
Si l'aimant possède 4 pôles (2 paires de pôles), la bobine sera le siège d'une f.e.m. de fréquence  $f=2n$ , d'une façon générale :  $f = p.n$ .

#### (2) Constitution

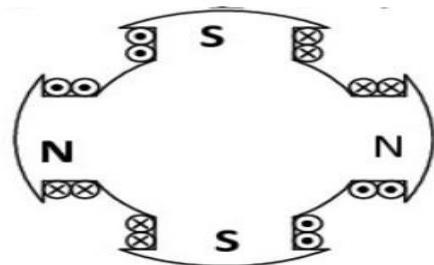
L'alternateur comprend deux parties principales : l'inducteur et l'induit.

L'inducteur : il a pour rôle de créer un champ magnétique tournant à l'aide d'un rotor magnétisant mis en rotation. L'inducteur comporte  $2.p$  pôles ( $p$  : paire de pôles). Il existe 2 types d'inducteur :

rotor à pôles lisses (rotor à pôles lisses  $p = 1$ ), et rotor à pôles saillants (rotor à pôles saillants  $p=2$ ).



*Figure 17 : rotor a poles lisses*



*Figure 18 : rotor a poles saillants*

L'induit : pour l'alternateur triphasé il consiste de trois enroulements (phases) identique et fixes sont décalés dans l'espace, l'un par rapport à l'autre, de  $\frac{2\pi}{3}$ . Les tensions induites sont identiques mais déphasées dans le temps de  $120^\circ$ . Elles forment un système triphasé et équilibre de tension

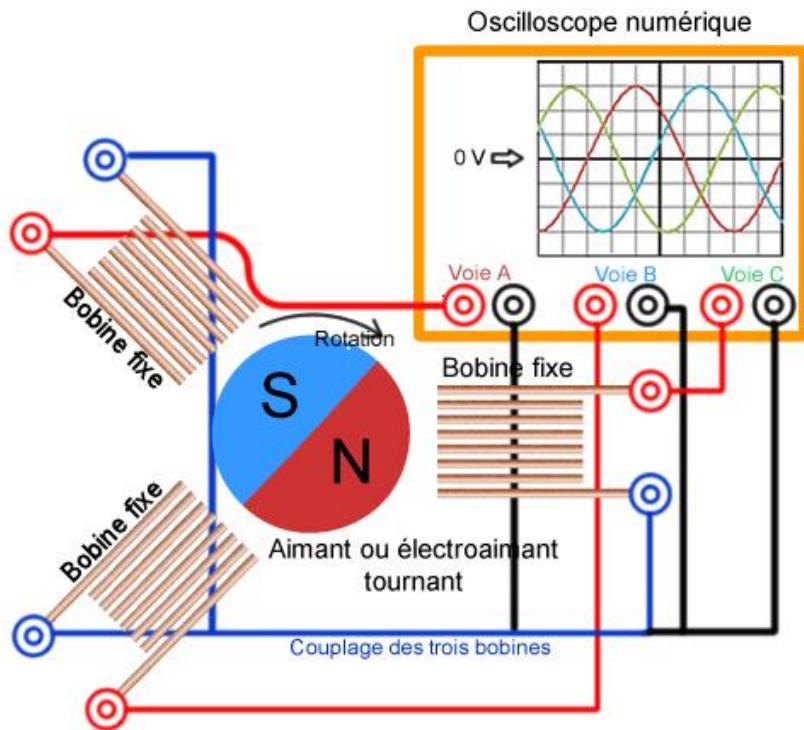


Figure 19 : transformation de l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique sinusoïdale

### (3) Caractéristique de l'alternateur

#### (a) Fréquence des forces électromotrices induites

Les enroulements de l'induit sont soumis à un champ magnétique tournant à la fréquence  $n$  dite fréquence de synchronisme. Il apparaît donc aux bornes des enroulements de l'induit des f.e.m. induites de fréquence  $f$  telles que  $f = p.n$  avec :

$P$  : nombre de pair de pôles,  $n$  : fréquence de rotation du champ tournant,  $f$  : fréquence des f.e.m. induites

#### (b) Valeur efficace de la f.e.m. induite par un enroulement

Chaque enroulement génère une f.e.m. induite  $e = -N \frac{d\phi}{dt}$ , dont la valeur efficace s'exprime :

$E = K.p.n.N.\phi_{max} = k.f.N.\phi_{max}$  avec :  $K$  : coefficient de Kapp qui ne dépend que des caractéristiques technologiques de l'alternateur,  $N$  : nombre de conducteurs actifs par enroulement,  $\phi_{max}$  : flux utile maximal sous un pôle.

#### (c) Excitation des alternateurs

Lorsque l'alternateur est à aimant permanents, il n'a pas besoin d'être excité. Lorsque l'inducteur est constitué d'électro-aimants, ils doivent être traversés par des courants continus fournis par :

- Une source extérieure reliée au rotor par un système de bagues et de balais.
- L'induit lui-même : une partie des courants triphasés fournis par l'induit sont redressés à l'aide d'un point de diodes afin de pouvoir alimenter directement l'inducteur : l'alternateur est alors dit auto excité

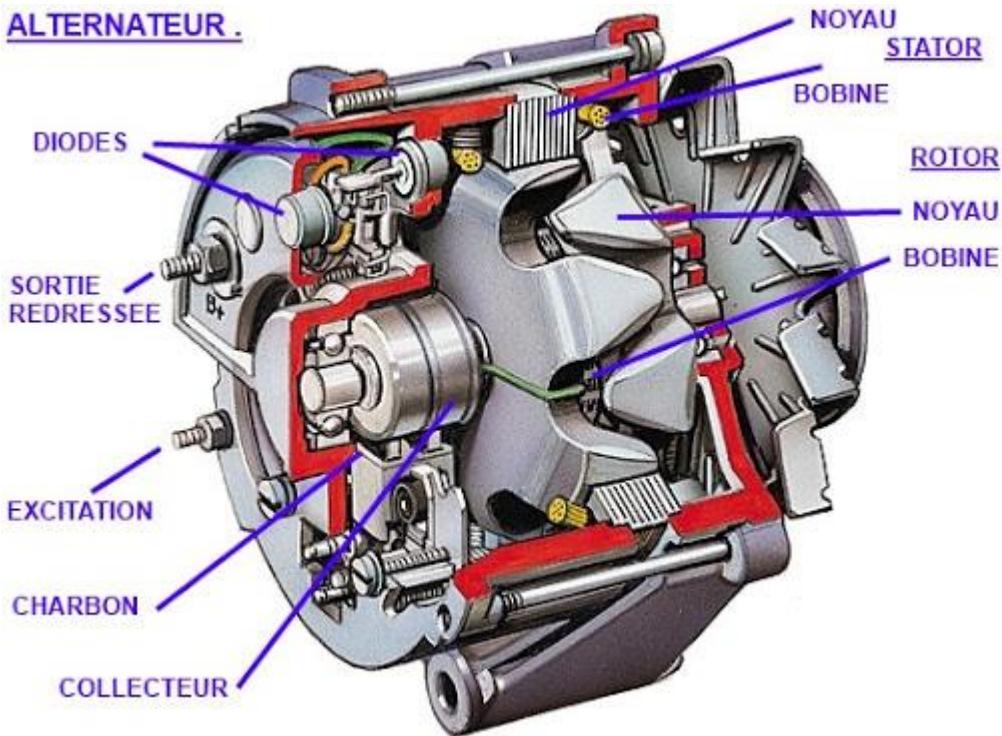


Figure 20 : Alternateur.

(d) Bilan des pertes de puissance

Pertes ne dépendant pas de la charge : appelées pertes constantes : Les perdes mécaniques PM dépendent de la fréquence de rotation, les perdes fer PF dans le fer dépendent de la fréquence et du flux dans le machine. Pour une machine synchrone utilisée à fréquence et tension constantes, elles varient peu entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement à plein charge. On les considère donc comme constantes.

Pertes par effet Joule :

- Dans l'inducteur : la puissance perdue par effet joule est égale à :  $P_{je} = U_e I_e$ 
  - $U_e$  : la tension continue aux bornes de l'inducteur.
  - $I_e$  : l'intensité du courant d'excitation.
- Dans l'induit : la puissance  $P_{js}$  perdue par effet joule est égale à :  $P_{js} = \frac{3}{2} R I^2$

Avec  $R$  la résistance mesurée entre deux bornes de phase de la machine

(e) Rendement

$$\text{Le rendement de l'alternateur est } \eta = \frac{\sqrt{3} U I \cos \varphi}{\sqrt{3} U I \cos \varphi + \sum \text{Pertes}}$$



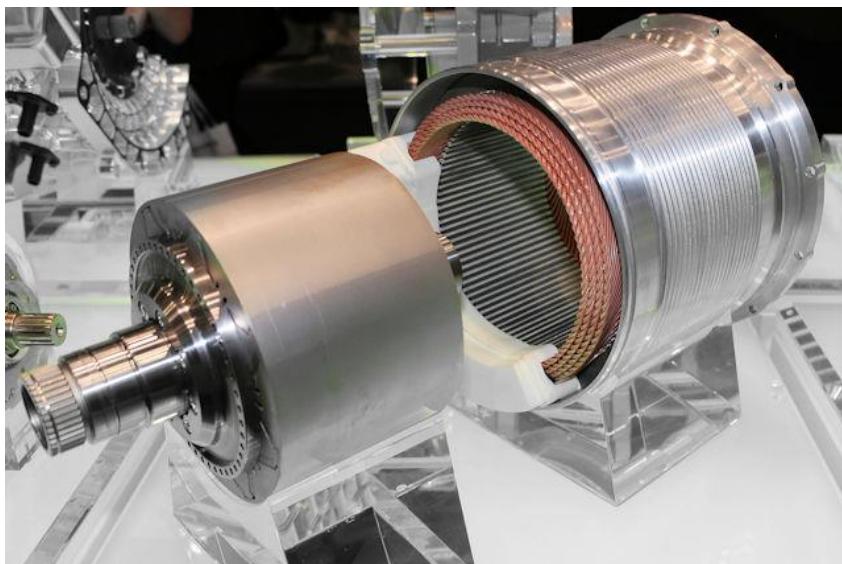
*Figure 21 : exemple de machine synchrone dans toyota*

#### (4) Moteur synchrone. Réversibilité de l'alternateur

##### (a) Présentation

Ce moteur aura une vitesse de rotation physique (rotor qui tourne) synchronisée avec la vitesse circulaire d'alimentation des phases. Les phases permettent de donner des impulsions pour faire tourner le rotor, et ces vitesses d'impulsion permettent de décider de la vitesse de rotation du moteur (qui tournera alors à la vitesse voulue). Quand je fais faire un tour complet à toutes mes phases (en plusieurs impulsions donc), le rotor aura lui aussi fait un tour de manière synchronisée, et donc il est synchrone.

- Expérience : couplons un alternateur triphasé sur un réseau, puis supprimons l'alimentation du moteur.
- Constatation : le groupe continue toujours à tourner, l'alternateur est converti en moteur.
- Déduction : puisque le moteur tourne à la vitesse de synchronisme  $n = f/p$ , on l'appelle moteur synchrone.



*Figure 22 : moteur synchrone*

### (b) Fonctionnement

Le électrique synchrone à aimant permanent fonctionne donc avec des impulsions. Ces impulsions sont obtenues par les bobines placées de part et d'autre du stator. Quand je fais passer du courant dedans, ces dernières se transforment en aimant dont le sens des pôles dépend du sens du courant. Chaque phase pourra donc avoir le + ou le - vers le bas, selon qu'on veuille pousser ou attirer le rotor (selon sa position on activera le + ou le -).

Voici les étapes de fonctionnement du moteur synchrone à aimant permanent, ce sera peut-être plus parlant pour ceux qui ont une intelligence plus orientée vers la géométrie et les formes.

#### (i) Etape 0

Ici tout est coupe, le courant ne passe nulle part.

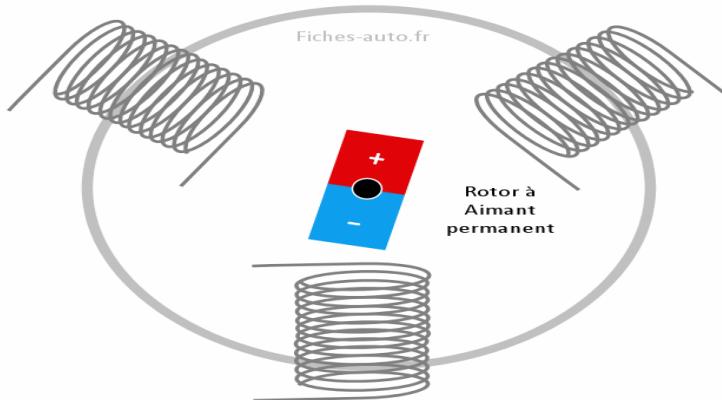


Figure 23 : étape 0

#### (ii) Étape 1

L'entraînement se fait par une succession de commutations des bobines en courant alternatif (fluctuation des polarités +/-) afin de donner des pulsations au rotor qui est sensible à la force magnétique (puisque c'est un aimant permanent).

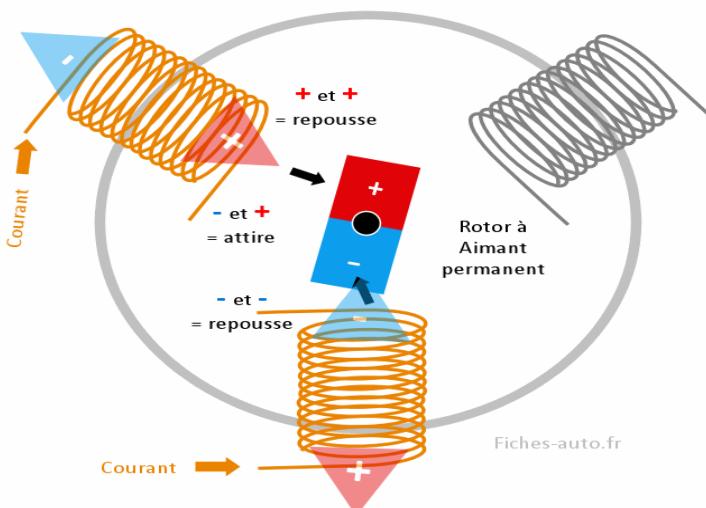


Figure 24 : étape 1

(iii) Étape 2

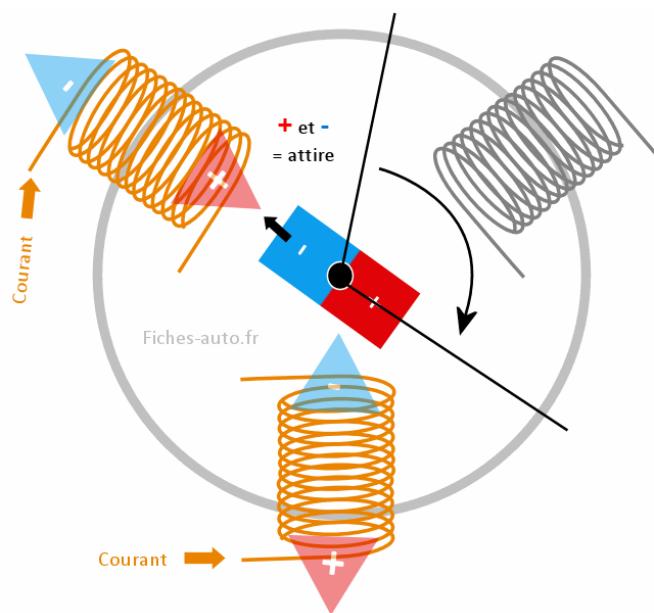


Figure 25 : etape 2

(iv) Étape 3

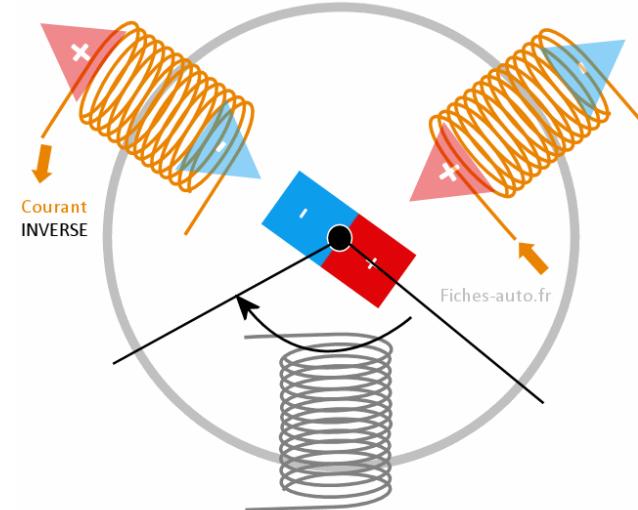


Figure 26 : etape 3

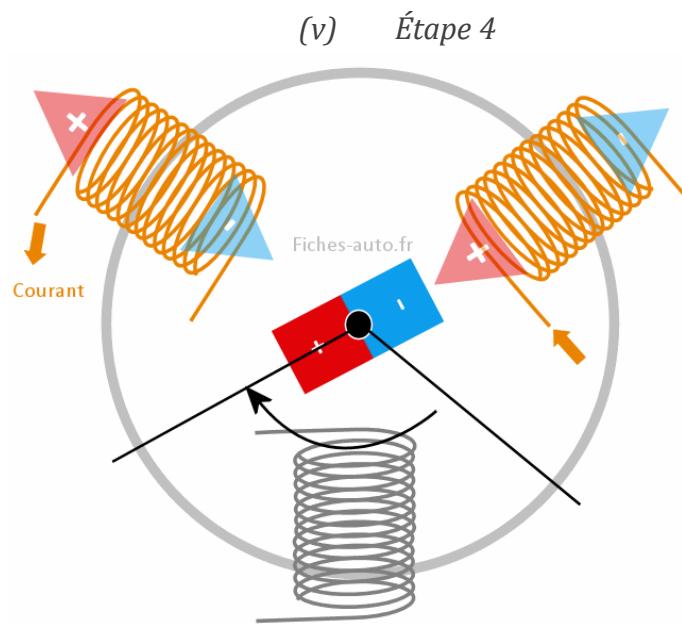


Figure 27 : etape 4

(c) Couple électromagnétique

La rotation du système est assurée par le couple :  $C_{em} = \mu \cdot B \cdot \sin \theta = C_{max} \cdot \sin \theta$ .

Avec  $\mu$  : moment magnétique du rotor et  $B$  : champ magnétique du stator.

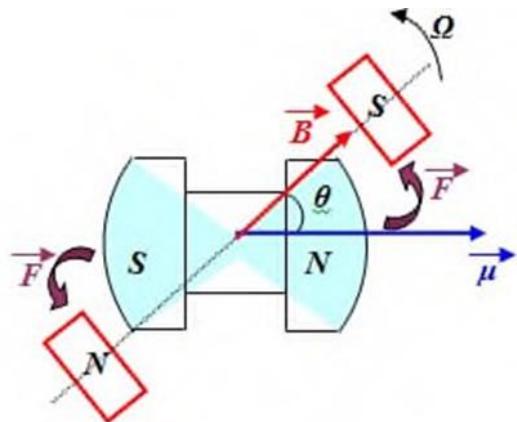


Figure 28 : champ tournant du rotor

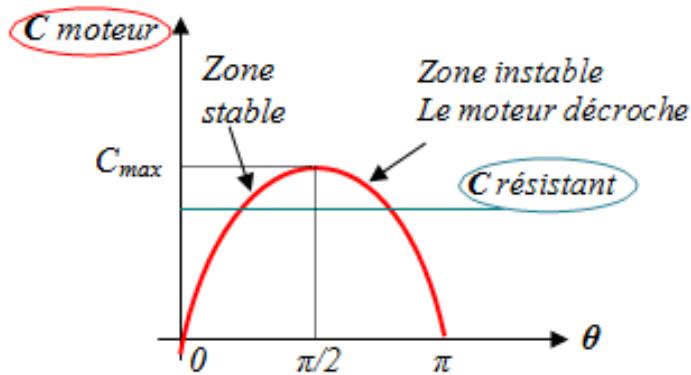


Figure 29 : couple de moteur en fonction de l'angle teta

- Si  $\theta = 0$  on a  $C = 0$  alors le moteur est en arret
- Si  $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$  et si  $C_r$  augmente on a  $\theta$  augmente et  $C_m$  augmente alors moteur en marche (fonctionnement statique stable).
- Si  $\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$  et si  $C_r$  augmente et  $\theta$  augmente et  $C_m$  diminue alors le moteur décroche.

#### (d) Avantages et inconvénients

##### (i) Avantages

Parmi les avantages on notera le fait qu'il n'y a pas besoin d'alimenter le rotor, et donc pas de balais ou autre charbons qui s'usent et induisent une perte de connexion / contact. Le fait que le rotor n'ait pas de courant qui le traverse réduit la chaleur par effet Joule, et donc la longévité du moteur et des roulements alentours qui peuvent se fragiliser. Il arrive aussi à garder facilement une vitesse constante même si on lui appose une charge pour le freiner.

Son rendement est plutôt bon à faible cadence / régime, grâce notamment au fait qu'il est synchrone : vitesse du rotor identique à celle du champ magnétique qu'on fait tourner de manière alternative au niveau du stator. Il atteint près de 93% de rendement, mieux que les asynchrones bloqués à 80% et 88% pour Tesla (beaucoup parlent de 93% comme avec l'aimant permanent) qui est arrivé à trouver une recette quasi magique au niveau du pilotage de l'électronique de puissance qui gère le courant dans le stator. Il n'y a pas ici de glissement induisant une perte, ce qui est le cas sur les moteurs asynchrones dont le rotor est un induit. Tout cela est toutefois à relativiser car si à faible régime le rendement du moteur synchrone est favorable, à haut régime le moteur asynchrone induit aura cependant une consommation d'énergie plus efficiente ...

C'est aussi un moteur facile à mettre au point au niveau de l'électronique, ce qui induit aussi une fiabilité très appréciable (facile à mettre au point au niveau gestion électronique et pas de frottement d'usure mis à part évidemment les roulements d'axe du rotor...).

### *(ii) Inconvénients*

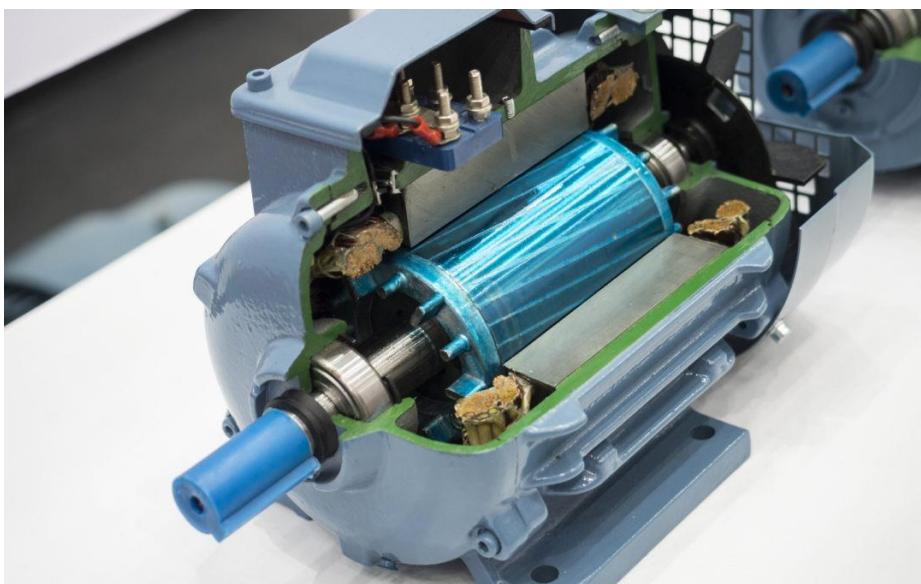
Côté inconvénients il y a le soucis du démarrage, la mise en vitesse à partir de l'immobilité n'est en effet pas possible directement et il faut un dispositif d'appoint pour le lancer (un deuxième petit moteur, un bricolage visant à mettre une cage d'écureuil sur le rotor, pour obtenir le même fonctionnement qu'un moteur asynchrone juste pour le démarrage).

Ce type de moteur est aussi assez coûteux, volumineux et lourd, d'où une efficience moins bonne à haut régime en raison d'une inertie accrue par les lourds aimants (voilà pourquoi Porsche a mis une transmission deux vitesses sur la Taycan). Les terres rares destinées au rotor à aimant permanent participe au coût mais il est aussi une preuve de dépendance face à la Chine qui tient ce marché fermement (les terres rares sont très répandus et particulièrement faciles à extraire sur ce territoire). Et surtout ces terres rares induisent de grosses pollutions comme vous le savez certainement déjà.

Enfin, ce type de moteur induit une vitesse maximale : je ne pourrai pas dépasser la vitesse des champs électromagnétiques tournant qui se passe dans les trois phases (piloté par l'électronique). Ce qui veut dire que si je suis en descente à fond, j'aurai un frein moteur sur cette vitesse maximale (même si on me pousse j'aurai au final un couple de freinage ...). Sur une voiture normale, je peux dépasser cette vitesse en pente (jusqu'à la limite induite par la transmission et le régime maximal du moteur évidemment).

### **b) Moteur asynchrone**

Ce moteur est dit asynchrone car le rotor ne va pas tourner aussi vite que le flux magnétique rotatifs, et donc il y a un décalage entre régime du rotor et régime du flux magnétique circulant dans le stator. Ce décalage s'appelle glissement, car il y a bel et bien un glissement entre la vitesse de rotation du flux magnétique et la vitesse de rotor.



*Figure 30 : moteur asynchrone*

Principalement utilisée par Tesla, cette technologie risque toutefois de se faire de plus en plus rare : la concurrence privilégie le moteur à aimant permanent synchrone et les nouvelles Tesla abandonnent ce procédé pour aller vers le moteur pas à pas à réductance variable.

Les Tesla 4 roues motrices Dual Motor ont pour le moment systématiquement un moteur à réluctance et un autre à induction (sur chaque essieu).



Figure 31 : exemple le moteur synchrone dans tesla

### (1) Principe du moteur asynchrone triphasé

Les 3 enroulements statorique créent donc un champ magnétique tournant, sa vitesse de rotation  $n_s = \frac{f}{p}$  est nommée vitesse de synchronisme. Le rotor est constitué de barres d'aluminium noyées dans un circuit magnétique. Ces barres sont reliées à leur extrémité par deux anneaux conducteurs et constituent une cage d'écureuil. Cette cage est en fait un bobinage à grosse section et très faible résistance. Cette cage est balayée par le champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors traversés par des courants de Foucault induit.

Des courants circulent dans les barres formées par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor.

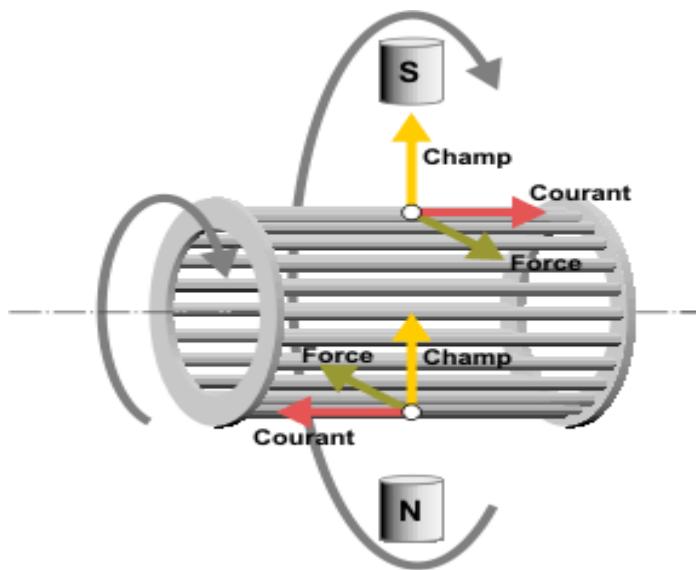
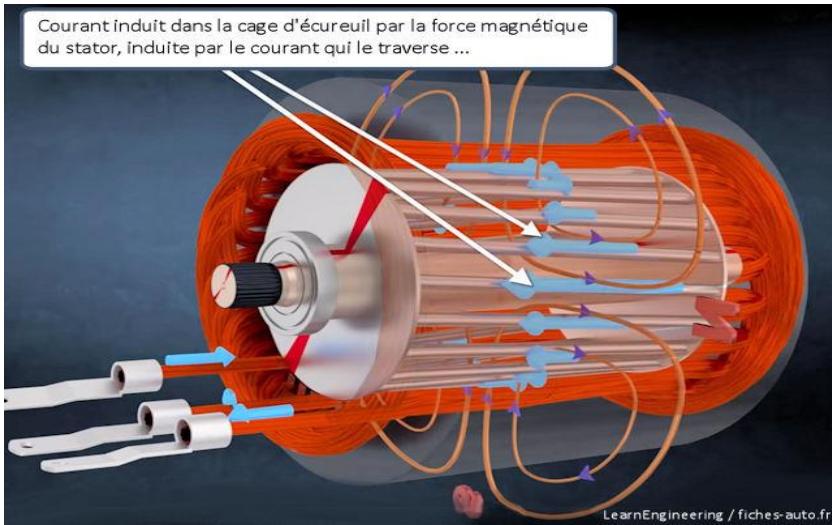


Figure 32 : rotor moteur asynchrone



*Figure 33 : moteur asynchrone rotor à cage d'écureuil*

## (2) Constitution

Les deux principales parties d'un moteur asynchrone triphasé sont :

- Le stator qui produit le champ magnétique tournant.
- Le rotor qui, entraîné par ce champ tournant, produit de l'énergie mécanique.

### (a) Stator (partie fixe du moteur)

Il est identique à celui des machines synchrones, c'est-à-dire constitué de 3 enroulements formé de conducteurs logés dans des encoches.

Ces enroulements sont parcourus par des courants triphasés, d'où la création d'un champ magnétique tournant à la fréquence  $n = \frac{f}{p}$  et à la vitesse  $\Omega = \frac{\omega}{p}$ .

### (b) Rotor (partie mobile du moteur)

Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Il tourne à la vitesse de rotation  $n'$ . Il existe deux possibilités :

(i) Rotor à cage d'écureuil



Figure 34 : rotor à cage d'écureuil

Il porte un ensemble de barres conductrices, très souvent en aluminium, logées dans un empilement de tôles. Les extrémités des barres sont réunies par deux couronnes conductrices.

(ii) Rotor bobiné



Figure 35 : rotor bobiné

Le rotor comporte des encoches dans lesquelles sont loges des conducteurs formant un enroulement triphasé.

Les enroulements sont généralement accessibles par l'intermédiaire de 3 bagues et de 3 balais, permettant ainsi de modifier les caractéristiques de la machine.

### (3) Glissement

Le rotor tourne à la vitesse  $n$  plus petite que la vitesse de synchronisme  $n_s$ . On dit que le rotor ‘glisse’ par rapport au champ magnétique tournant.

Ce glissement  $g$  va dépendre de la charge avec glissement égale :

$$g = \frac{ns - n}{ns} = \frac{\Omega s - \Omega}{\Omega s}.$$

ns : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tours / second).

n : vitesse de rotation de rotor (tr/s).

ng : vitesse de glissement (tr/s) avec  $ng = n - n'$

le rotor voit un champ statorique tournant à la fréquence de glissement  $ng = g \cdot n$ . Soit la fréquence des courants induits :  $fg = g \cdot f = fr$

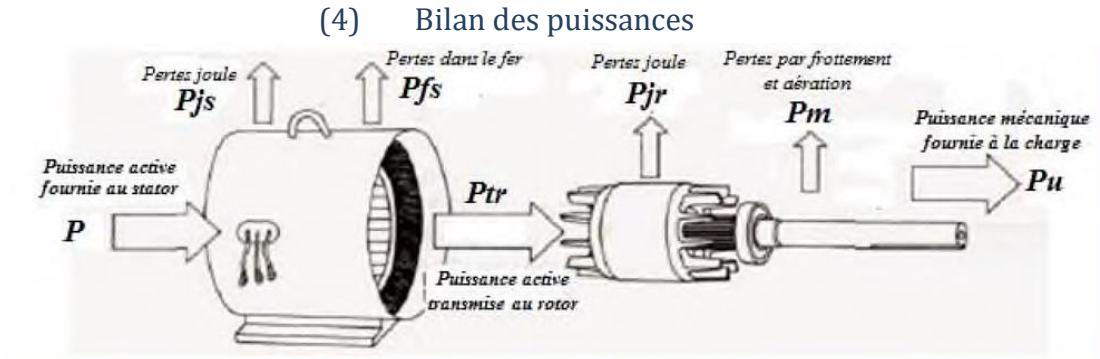


Figure 36 : Bilan des puissances

#### (a) Puissance absorbée et puissance utile

La puissance absorbée est l'énergie électrique entrant dans le stator du moteur est :  $Pa = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$ .

La puissance utile est la puissance mécanique de rotation sortant du rotor avec  $= Cu \cdot \Omega$ , avec Cu c'est le couple utile et  $\Omega$  c'est la vitesse angulaire en rad/s.

Pertes : pertes joules et pertes constantes

#### (b) Puissance transmise au rotor

Cette puissance est transmise au rotor par le couple électromagnétique :

$$P_{tr} = P - P_{fs} - P_{js} = Ce \cdot \Omega s \text{ Avec Ce : le couple électromagnétique en Nm.}$$

$\Omega s$  : vitesse angulaire synchronisme ( $2\pi \cdot ns$ ) en rad/s.

#### (i) Puissance sur le rotor

$$Pr = P_{tr} - p_{jr} = Ce \cdot \Omega$$

Ce : moment du couple en Nm.

$\Omega$  : vitesse angulaire rotor ( $2\pi \cdot n$ ) en rad/s.

### (c) Pertes constantes

Les pertes mécaniques  $P_m$  dépendent de la fréquence de rotation. Dépend de la fréquence et du flux dans la machine. Pour un moteur utilise à fréquence et tension constant, elles varient peu entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement à pleine charge. On les considère donc comme constantes.

### (d) Pertes joule

Les pertes joules sont des pertes dépendant de l'augmentation température dans le stator et le rotor.

#### (i) Pertes Joule Stator

Si  $r$  est la résistance d'une phase du stator :

$$P_{js} = 3.r.I^2.$$

Si  $R$  est la résistance entre phase du stator couple et  $I$  l'intensité en ligne alors :  $P_{js} = \frac{3}{2} R.I^2$

#### (ii) Pertes Joule Rotor

$P_{jr} = g.P_{tr}$ . avec  $P_{tr}$  : puissance transmise au rotor et  $g$  : glissement

## (5) Rendement

Le rendement (énergie motrice sur énergie reçue).

$$\eta = \frac{Pu}{Pa} = \frac{Cu.\Omega}{\sqrt{3}.U.I \cos \varphi} = \frac{P - P_{js} - P_{fs} - P_{jr} - P_m}{Pa}$$

## (6) Caractéristique

### (a) Fonctionnements à vide

### (b) Fonctionnements en charge

## 2. Moteur pas à pas

C'est la toute dernière technologie sortie sur le marché, et c'est bien domestiqué par l'industrie que depuis les années 2010 grâce à l'apparition d'électronique de puissance de plus en plus perfectionnée.

Ce moteur est encore différent de tous les autres.

### a) Description et Principe du moteur pas à pas

Les moteurs pas à pas permettent de convertir directement un signal électrique numérique en un positionnement angulaire de caractère incrémental.

On constate que le système est beaucoup plus simple. A chaque impulsion du signal de commande correspond au niveau du rotor un déplacement angulaire défini appelé ‘pas’.

Un moteur pas à pas est caractérisé par sa résolution ou encore son nombre de pas par tour. Il peut avoir une valeur comprise entre 4 et 400. La vitesse de rotation est fonction de la fréquence des impulsions. On rencontre 3 types de moteur pas à pas qui se différencient par :

- Le stator : unipolaire ou bipolaire

- Le rotor : à aimant permanent, à réluctance variable ou hybride.

### (1) Constitution

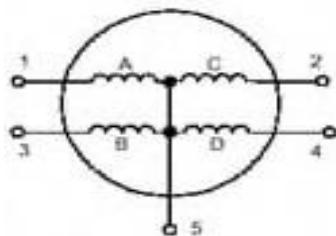
Les moteurs pas à pas sont constitués d'un rotor et d'un stator.



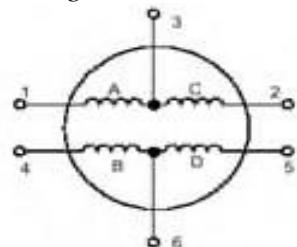
*Figure 37 : Moteur pas à pas*

On rencontre les moteurs pas à pas unipolaire et bipolaire qui se différencient par la structure de leur stator et leur commande.

(a) *Stator unipolaire*

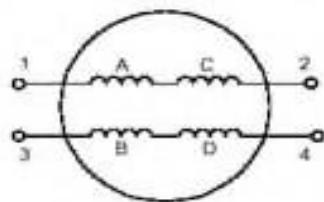


*Figure 38 : Stator unipolaire A 5 fils*



*Figure 39 : Stator unipolaire A 6 fils*

(b) *Stator bipolaire*



*Figure 40 : Stator bipolaire A 4 fils*

### b) Moteur à aimant permanents

Ce moteur est basé sur la règle du flux maximal. Il est constitué par :

- Une partie fixe : c'est le stator, forme d'un circuit magnétique et des bobines (phases) dont le rôle est de créer un flux magnétique à direction multiples.
- Une partie mobile : c'est le rotor, placé dans le flux du stator il se positionne suivant le flux maximum.

### c) Moteur pas à pas à réductance variable

Ces moteurs comportent une denture dont le pas n'est pas le même au stator et au rotor, le rotor n'est pas aimanté.

Le stator est constitué de phases / bobines disposées par paires les une en face des autres. Quand j'active une phase, que je l'alimente, on va alors exciter deux bobines l'une en face de l'autre. On a alors un champ magnétique qui va se former et qui va essayer de former une boucle en tentant de faire un pont / lien entre les deux phases qui sont face à face.

Le rotor est quant à lui constitué de fer doux / carbure de silicium et il n'est pas aimanté du tout.

Le principe de fonctionnement est celui-ci, quand j'alimente une phase (qui a deux pôles de part et d'autre du moteur / rotor), le champ magnétique va vouloir connecter les deux bobines de cette phase. Et comme ce champ magnétique préfère le métal à l'air pour se propager, il va induire un mouvement sur le rotor : il va alors se positionner pour que l'espace entre le stator et le rotor soit le plus petit possible (qu'il y ait le moins d'air possible à traverser). Le rotor va alors se mettre dans cette position, avec donc les dents qui sont le plus rapprochée possible du stator.

C'est pour cela qu'on l'appelle moteur pas à pas, l'avancée / rotation du rotor s'effectue par pas, et chaque pas est réalisé par l'excitation d'une des phases.

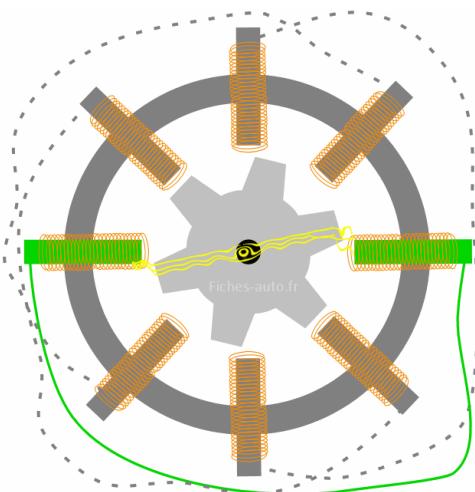


Figure 41 : bobinage de stator

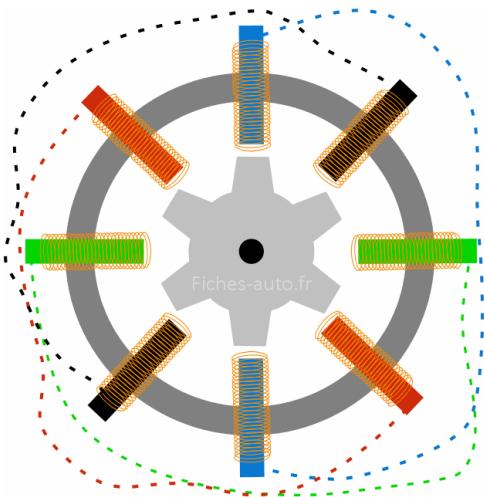


Figure 42 : bobines disposées par paires les une en face des autres

#### d) Avantages et inconvénients

##### (1) Avantages

Ce moteur est plein d'avantage, notamment économique : pas cher à produire il est aussi compacte et léger (parfait pour l'intégration et l'économie d'énergie grâce à la réduction de la masse). Son rendement est désormais très bon grâce à l'emploi de matériaux optimaux pour le rotor mais aussi par l'emploi d'une électronique de puissance programmée aux petits oignons qui permet d'améliorer l'efficience de ce moteur. On parle aujourd'hui d'un rendement jusqu'à 95%, ce qui est le coup meilleur moteur électrique qui soit. Cela est en grande partie du au fait que ce moteur ne chauffe pas beaucoup.

##### (2) Inconvénients

On en arrive donc aux inconvénients, ce moteur est particulièrement difficile à exploiter et les marques qui se lancent dans l'aventure ont intérêt d'avoir des ingénieurs de qualité pour arriver à leur fin. La fabrication est aussi assez compliquée puisque ce moteur nécessite un assemblage de grande précision. Les entrefer doivent en effet être les plus réduits possibles afin d'obtenir un rendement satisfaisant.

## E. Alimentation et la distribution et la régulation d'énergie électrique pour les moteurs électrique dans le voiture hybride

### 1. Alimentation

#### a) Source alternative

##### (1) Générateur électrique (alternateur)

Dans le générateur électrique, l'alternateur va avoir un double rôle. En effet, il sert naturellement de convertisseur d'énergie mécanique fournie par le moteur thermique en énergie électrique fournie à la batterie. Mais il va également être utilisé dans les transitoires pour permettre les changements de régime du moteur thermique. En particulier en phase de démarrage, il va puiser dans la batterie et permettre au moteur thermique d'atteindre son régime de ralenti.

## (2) Bornes de recharge

Les bornes de recharge délivrent l'énergie nécessaire pour recharger le véhicule, le plus souvent sous la forme d'une tension alternative (AC) élevée. Généralement, trois niveaux de puissance différents ont été définis. Ils n'ont pas les fonctions de chargeur qui doivent transformer l'énergie électrique appliquée directement sur la batterie, mais ils ont plutôt une fonction de synchronisation avec le véhicule pour transférer l'énergie du réseau de façon sécuritaire au chargeur qui, lui, est partie intégrante du véhicule.



Figure 43 : borne de recharge

## (3) Les trois niveaux de bornes

La borne de niveau 1 est utilisée dans des applications domestiques. En Amérique du Nord, il faut généralement de 15 à 18 ampères à 120 volts délivrant environ 1,9 kW de puissance. Le véhicule électrique ou hybride rechargeable est livré avec un EVSE (Electric Véhicule Supply Equipment) ou un cordon d'alimentation standard pour le brancher à une prise de courant domestique. La durée moyenne de recharge est de 8 à 12 heures selon l'état de charge de la batterie haut voltage au branchement.

La borne de niveau 2 délivre jusqu'à 20 kW de puissance d'une source de courant alternatif (AC) d'environ 240V jusqu'à 80 ampères. En Amérique du Nord, la norme J1772 a été définie par la SAE (Society of Auto motivé Engineers) pour normaliser le connecteur et le câble de charge utilisés pour ce niveau. Ces câbles sont fixés de façon permanente à la station de niveau 2. Le connecteur est aussi communément appelé un « coupleur ». Les particuliers peuvent faire installer chez eux une telle borne de recharge par un électricien certifié, tandis que les entreprises et les collectivités locales peuvent également fournir les bornes de niveau 2 à leurs employés ou clients à petit frais ou gratuitement si elles le souhaitent. La durée moyenne de recharge est d'environ la moitié de celui du niveau 1, donc à peu près 4 à 6 heures, toujours selon l'état de charge de votre batterie haut voltage au branchement.

Les bornes de niveau 3, nouvellement arrivées aux États-Unis – et bientôt au Canada – sont un tantinet différentes, elles sont de vraies bornes de recharge et ont la particularité de fournir une « charge rapide ». Pour ce faire, la borne (ou chargeur) de niveau 3 doit fournir des courants très élevés, de l'ordre de 400 ampères avec des tensions allant de 200 à 450 volts CC, délivrant une puissance maximale de 90 kW. Pour ces bornes, il existe plusieurs normes dans l'industrie, y compris un coupleur hybride SAE J1772, ce qu'on appelle « le combo » qui est en option pour la Chevrolet Spark électrique 2013. Jusqu'à maintenant, 7 manufacturiers automobiles se sont entendus pour offrir cette option prochainement (Audi, BMW, Daimler, Ford, General Motors, Porsche et Volkswagen).



Figure 44 : les trois bornes de recharge de véhicule

### b) Source continue

#### (1) Les batteries Nickel Métal Hydrure (NiMH)

La seconde source d'énergie disponible à bord du véhicule est la Batterie, l'avènement des cellules de haute puissance (NiMH), qui ont réussi à surmonter les problèmes de poids et de température de fonctionnement, a encouragé plusieurs constructeurs automobiles à introduire des véhicules électriques ou électriques hybrides. Ces batteries NiMH fonctionnent à des températures ambiantes normales, elles ont une énergie plus élevée et une plus grande densité de puissance que les batteries au plomb.

Une batterie à haut voltage (NiMH) se compose d'autant de cellules de 1,2 volt que nécessaire pour atteindre la haute tension requise au fonctionnement du moteur électrique. Dans ses véhicules hybrides, Honda a utilisé 120 cellules (ressemblant à des batteries de type D) qui, lorsque connectées en série, produisent 144 volts. Six cellules ont été soudées ensemble par points, puis recouvertes d'une gaine en plastique orange. À chaque extrémité est attachée une bande de détection de chaleur coincée sous la gaine orange. Ces « bâtons », comme on les appelle, sont ensuite boulonnés dans un boîtier en plastique.

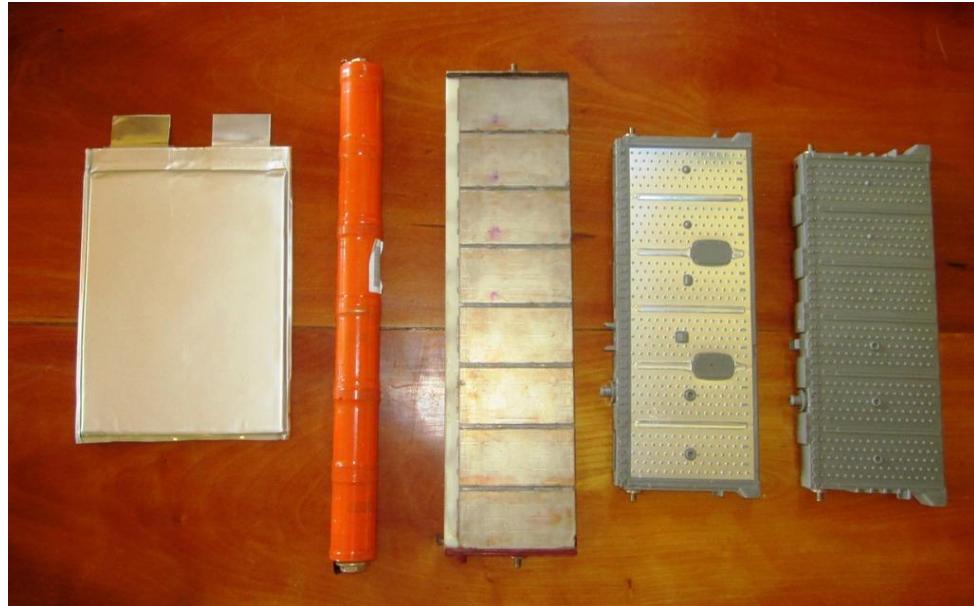


Figure 45 : batterie

## (2) Les batteries au lithium

Récemment, les cellules lithium-ion, qui ont une densité d'énergie encore plus élevée que les cellules NiMH, sont devenues disponibles. Elles fonctionnent également à des températures normales et sont très populaires dans les nouveaux modèles de véhicules.

Ces cellules de haute énergie sont cependant plus vulnérables aux abus. Elles ont besoin du soutien des systèmes de gestion de batterie pour continuellement gérer la température et le niveau de charge et décharge de chacune des cellules, afin de fournir une protection contre la détérioration et veiller à leur durée de vie. Plusieurs types de batterie lithium haut voltage se retrouvent dans des véhicules que je considère encore en phase exploratoire. On retrouve aussi des variantes comme les batteries lithium polymère dans certains hybrides de Kia et Hyundai.



Figure 46 : cellule de batterie monter en parallèle



Figure 47 : l'emplacement de la cellule de batterie dans le véhicule AUDI e-tron

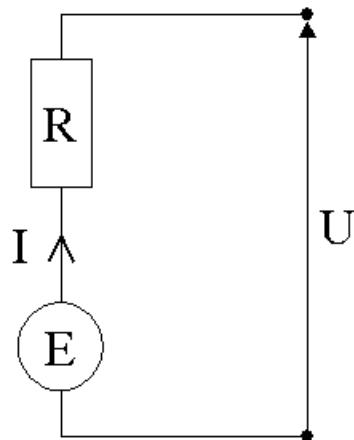


Figure 48 : Montage de batterie utilisé

La batterie est décrite à partir d'un assemblage en série et en parallèle de cellules, modélisées sous forme d'une tension à vide  $E_0$  et d'une résistance interne  $R_0$ . En définitive, le modèle batterie utilisé correspond à celui de la Figure 48d avec  $N_{série}$  cellules en série et  $N_{parallèle}$  branches en parallèle :

$$E = N_{série} * E_0 \quad R = \frac{N_{série}}{N_{parallèle}} * R_0$$

### c) Source mécanique

La production d'énergie électrique par une source mécanique se fait par un générateur de courant comme (alternateur voir la partie de machine synchrone). Pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique se fait par deux types de générateur de tournant : les générateurs à courant alternatif s'appellent alternateurs, et les générateurs à courant continu appellent génératrices à courant continu.

## 2. Distribution d'énergie électrique

Comme nous avons déjà vu que le véhicule est nécessaire de l'alimentation par l'énergie électrique, mais cette énergie est besoins de la conversion et de la régulation pour distribuer à la batterie et les moteurs.

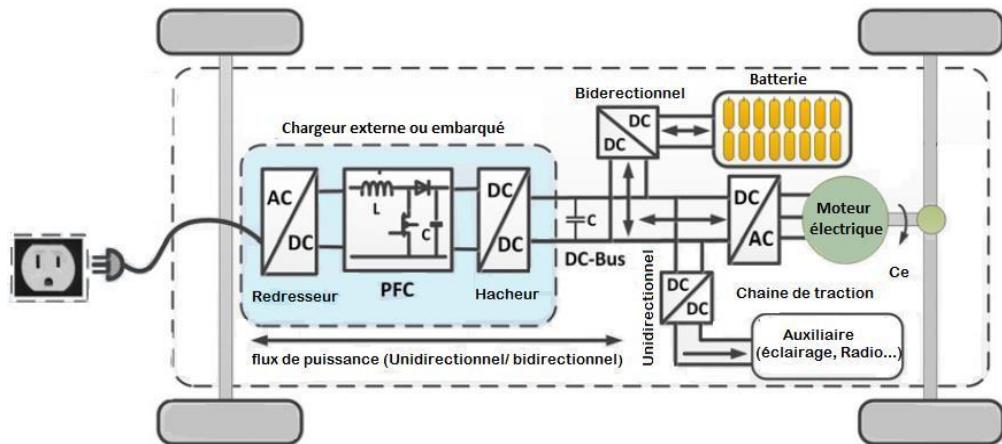


Figure 49 : la distribution et la regulation d'énergie électrique dans la voiture hybride

### a) Conversion d'énergie électrique AC/DC(alternative/continue)

#### (1) Convertisseur AC/DC (redressement)

Le convertisseur AC/DC il permettre de convertir l'énergie entrante par le secteur (les 3 bornes) ou par le génératrice qui permettre de généré une tension alternative pour recharger la batterie.

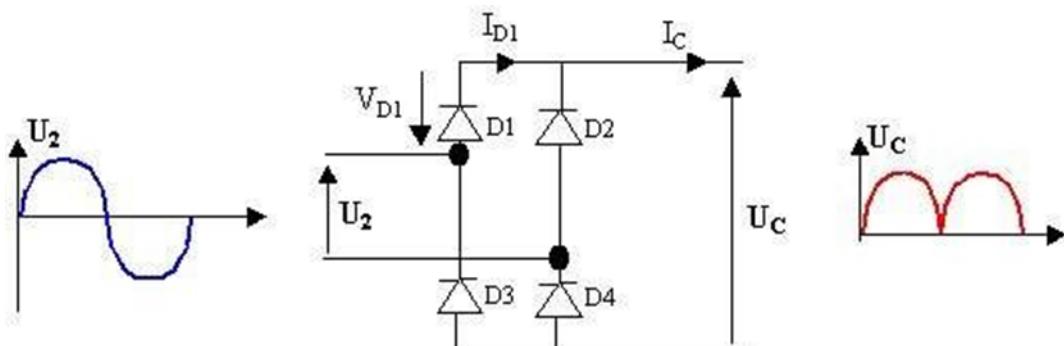


Figure 50 : redressement monophasé

Cette fonction est réalisée par un pont de diode. L'opération consiste à redresser l'alternance négative. On parle de tension continue redressée.

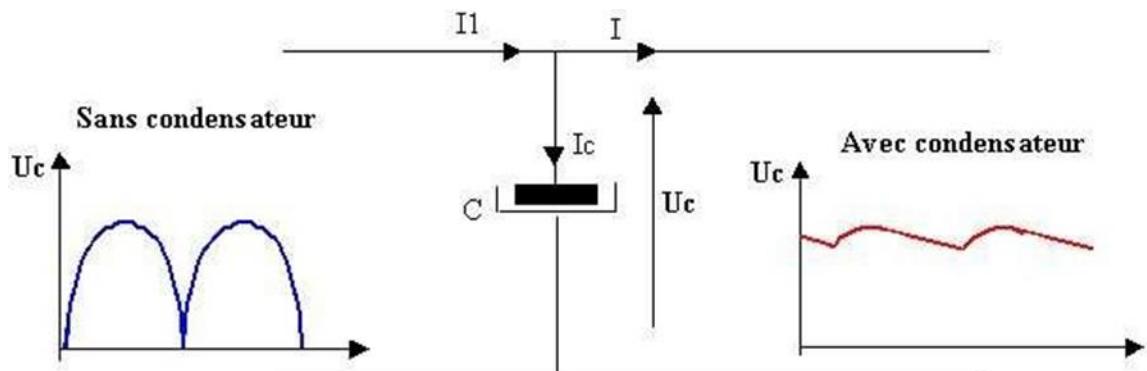


Figure 51 : filtrage de la tension

Après redressement, la tension de sortie aux bornes du pont redresseur est loin d'être continue. Le filtrage a pour but de transformer cette tension redressée en une tension continue légèrement ondulée. L'élément utilisé pour réaliser cette fonction est le condensateur.

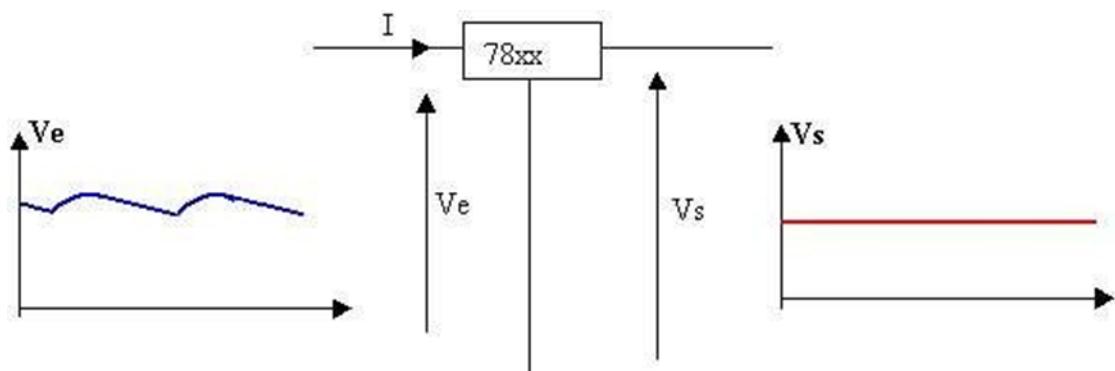


Figure 52 : régulation de la tension

Malgré le filtrage, la tension aux bornes du condensateur n'est pas parfaitement continue, elle présente une légère ondulation. Pour obtenir une tension parfaitement continue, on utilise un régulateur de tension.

### b) Conversion d'énergie électrique DC/AC (continue/alternative)

#### (1) Convertisseur DC/AC (onduleur)

Ce type de conversion est le contraire de du redressement il permettre de convertir l'énergie continue sortant par la batterie vers le(s) moteur(s).

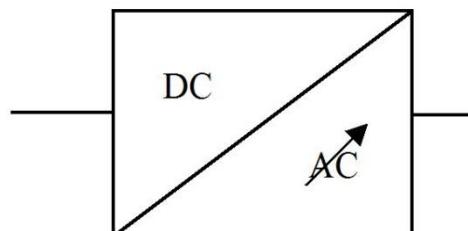


Figure 53 : Fonctionnement de onduleur

## (2) Convertisseur DC/DC (hacheur série)

Ce type il permettre de variée la tension continue (moyen) sortant par la batterie.

## IV. MOTEUR THERMIQUE

### A. Moteur thermique

Inventé au 19 siècle, c'est le moteur qui entraîne la plus parts des véhicules automobile, Autre fois appelle moteur à explosion, il est conçu pour fonctionner avec de l'essence ou du gazole.

#### 1. Fonction globale

Le principe général du moteur thermique est simple, il s'agit d'exploiter l'énergie produite par la combustion d'un mélange comburant/carburant dans une chambre fermée.

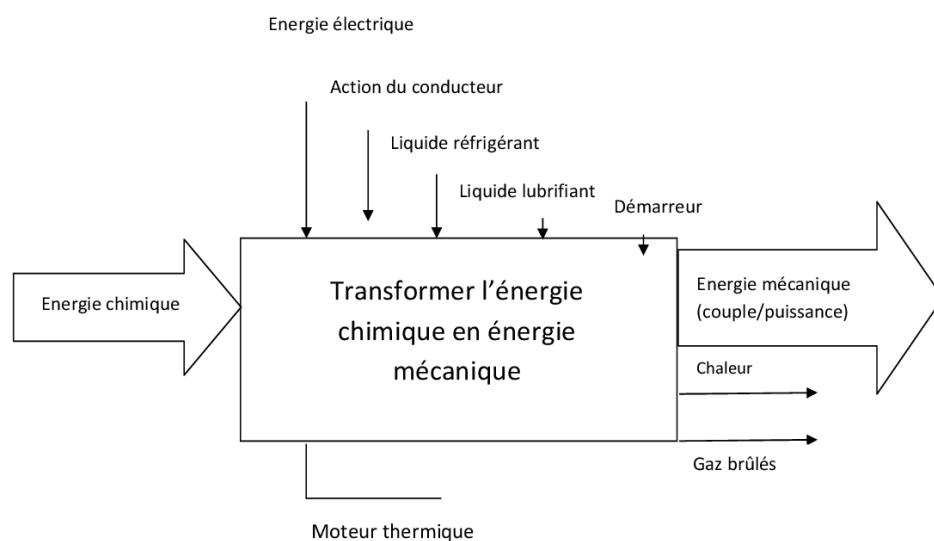


Figure 54 : fonction globale du moteur thermique

Le moteur thermique reçoit de l'essence, combustible du système d'alimentation carburation. Il réalise une énergie grâce à une compression. Cette combustion est déclenchée par le système d'allumage.

Il produit une énergie mécanique disponible au volant moteur. Il rejette des gaz brûlés. Il évacue les calories par son système de refroidissement.

Il reçoit le courant électrique haute tension nécessaire à l'allumage.

Le conducteur a une action sur le démarreur.

Le moteur reçoit du démarreur l'énergie mécanique nécessaire à son lancement. Il reçoit aussi le lubrifiant nécessaire au fonctionnement de son système de graissage.

Le premier problème posé était : convertir l'énergie chimique dans un combustible en énergie calorifique (chaleur), puis convertir cette chaleur en énergie mécanique (travail).

## 2. Architecture general

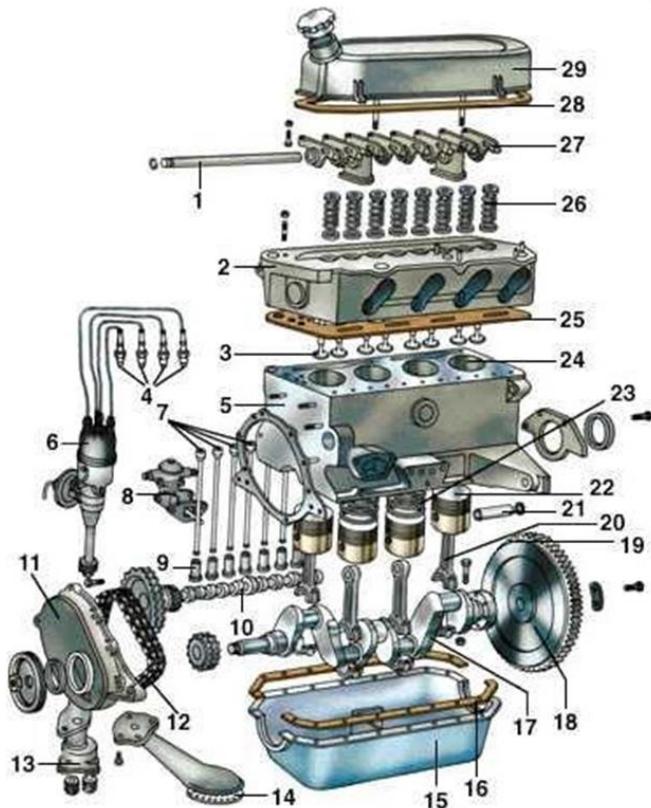


Figure 55 : piece du moteur à explosion

1)Axe des culbuteurs	16) joint de carter
2)Culasse	17) vilebrequin
3)Soupape	18) volant moteur
4)Bougies	19) couronne dentée entraînée par le démarreur
5)Bloc cylindres	20) bielle
6)Allumeur	21) axe de piston
7)Tiges de commande des culbuteurs	22) piston
8)Pompe à essence	23) segments
9)Poussoirs	24) cylindre
10) arbre à cames	25) joint de culasse
11) carter de distribution	26) ressorts de soupapes
12) chaîne de distribution	27) culbuteurs
13) pompe à huile	28) joint de cache culbuteurs
14) crête de pompe à huile	29) cache culbuteurs

Généralement comme tous les moteurs sont constitué de deux partie, partie fixe et partie mobile.

Les parties fixes comprennent principalement :

- Le bloc cylindres
- La culasse qui sert de couvercle hermétique à la partie supérieure des cylindres et supportant l'arbre à cames et les soupapes.

Les parties mobiles comprennent deux parties principales :

- L'attelage mobile qui inclut : le vilebrequin, les bielles, les pistons munis de leurs segments.
- La distribution qui inclut : l'arbre à cames, soupapes et ressorts de rappel, un système de rappel entre le ou les arbres à cames et le vilebrequin constitué d'une ou plusieurs chaînes ou courroies crantées.

### 3. Description des composants du moteur

#### a) *Le bloc cylindre*



Figure 56 : le bloc cylindre

Il supporte le vilebrequin, permet le guidage des pistons, assure avec la culasse l'étanchéité des cylindres et permet le passage des canalisations de graissage et de l'eau. Le bloc cylinders doit :

- Être indéformable et répondre à des dispositions géométriques précises.
- Résister aux pressions, torsions, frottements, variations de température.
- Posséder la masse la moins élevée possible.

**b) Chemise cylindre**



Figure 57 : chemise cylindre

La chemise est une pièce cylindrique emmanchée en force dans le cylindre (ayant un métal plus résistant que le reste du bloc moteur), et dans laquelle coulisse le piston et où se produit la combustion/compression (fortes contraints!).

Souvent en fonte ou en acier, la chemise reçoit différents usinages et traitements visant d'une part à améliorer son état de surface, pour diminuer les frottements, et d'autre part à accroître la dureté, afin d'éviter l'usure.

*c) La Culasse*



*Figure 58 : la culasse*

Le rôle de la culasse est d'assurer 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 de la chaleur, au point le plus chaud situé dans la chambre de combustion.

Elle peut être en fonte GS, mais plus généralement en alliage d'aluminium (AS5U3G).

*d) Arbre à cames*



*Figure 59 : arbre à cames*

Il est chargé de commander la levée des soupapes et pendant une durée bien déterminée. Le mouvement de l'arbre à cames doit être lié de façon invariable à celui du vilebrequin.

La partie excentrée de la came, appelé flanc ou rampe, permet la levée ou la descente de la soupape. La partie cylindrique, zone de repos, correspond à la soupape fermée.

Il y a autant de came que de soupape.

L'arbre à cames peut être en fonte GS ou GLA, ou en acier cémenté ou nitruré.

### e) *La Soupape*



Figure 60 : soupape

Les soupapes permettent le passage d'un maximum de gaz dans un temps très court et doivent assurer une parfaite étanchéité à la fermeture sur le siège de soupape. 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 fabrication des soupapes nécessite donc l'emploi de métaux capables de résister à la déformation à haute température (fluage) et aux chocs répétés, tels les aciers asthéniques, additifs comme le chrome, le nickel, le tungstène.

La portée conique assure l'étanchéité parfaite à la fermeture et un centrage correct évitant la déformation de la tige ou de la queue.



*Figure 61 : piston*

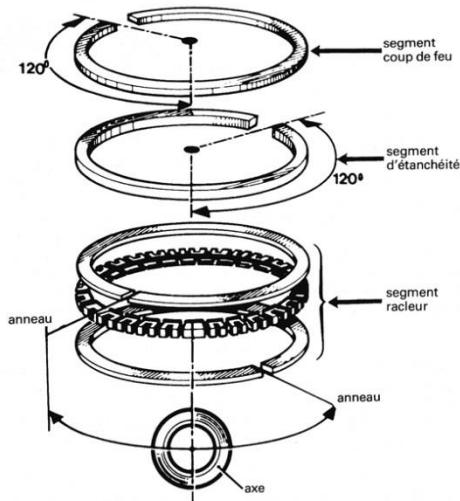
Le rôle du piston est de transmettre par l'intermédiaire de la bielle l'effort résultant de la pression des gaz.

Son refroidissement est assuré par les segments et le contact de la jupe avec le cylindre. Ainsi, une partie de la chaleur est en outre évacuée par l'huile projetée sur son fond.

Le piston est lié à la bielle par un axe en acier.

Le piston est en général en alliage d'aluminium (AS12UN par ex), parfois renforcé par l'adjonction de fibres. Plus rarement, le piston peut être en fonte GS ou en acier forgé.

### *g) Les Segments*



*Figure 62 : les segments du piston*

Le rôle des segments est d'assurer l'étanchéité aux gaz (coté chambre de combustion) et à l'huile (coté carter).

Ils permettent d'évacuer une partie de la chaleur communiquée au piston par les gaz vers le cylindre.

Les segments sont en général au nombre de 3 :

- Le segment de feu situé au sommet du piston.
- Le segment d'étanchéité au milieu.
- Le segment racleur enfin qui assure surtout l'étanchéité à l'huile.

### *h) La Bielle*



*Figure 63 : la bielle*

La bielle est un 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 : la **compression**, la **traction**, la **flexion**.

Elle peut être en fonte GS, en acier forgé ou fritté, et aussi en alliage léger

### i) *Le Vilebrequin*



*Figure 64 : vilebrequin*

Avec la bielle il termine la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement circulaire continu. Les constraints subies par le vilebrequin sont :

- **Torsions** provenant des efforts opposés du couple moteur et du couple résistant.
- **Flexions, compressions, tractions, cisaillements**(Résistance des matériaux).
- Frottements au niveau des portées.
- Vibrations provenant de la masse du vilebrequin lancé à grande vitesse.

j) Bielle Manivelle

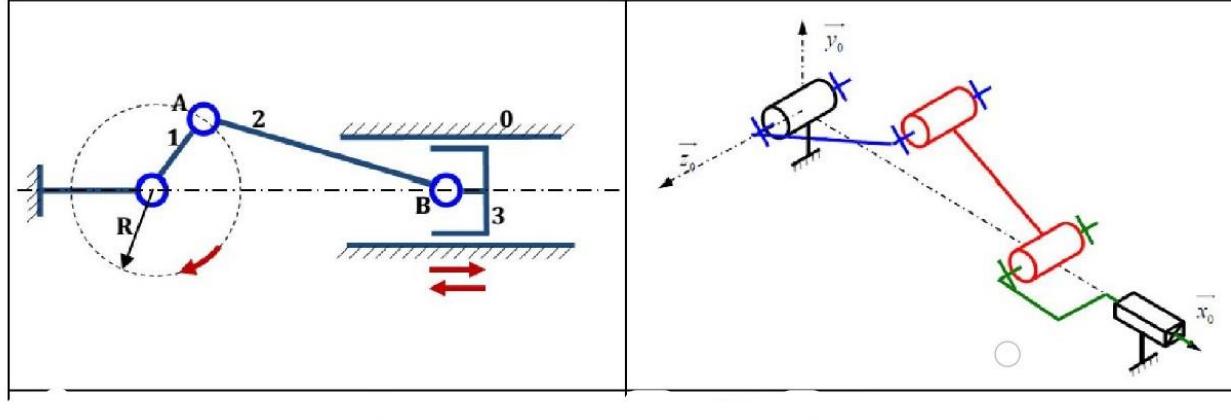


Figure 65 : schéma cinématique Bielle manivelle

-Dans l'axe OX on a une liaison glissière par la bielle.

Dans l'axe OZ on a une liaison pivot par le vilebrequin.

**k) La Distribution**

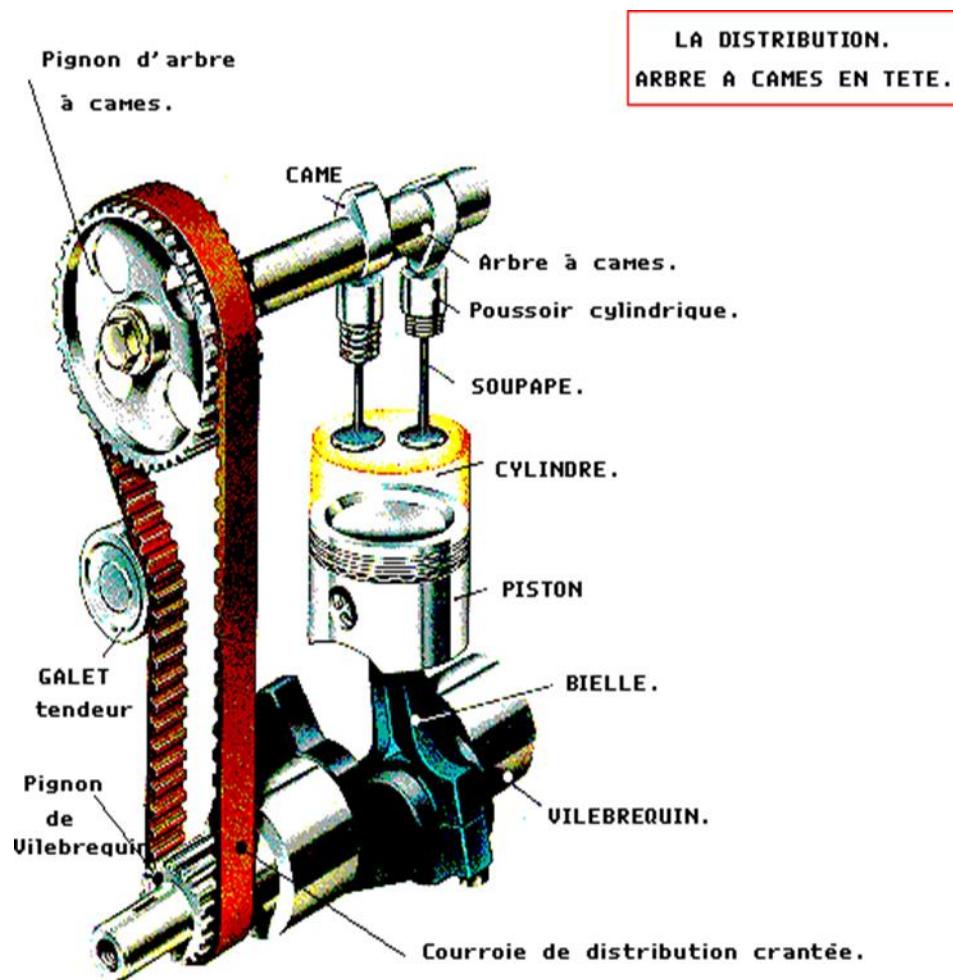


Figure 66 : la distribution du moteur

Le rôle de la distribution est de :

- Permettre l'entrée de gaz frais et d'en permettre l'évacuation après combustion.
- Augmenter le temps d'ouverture de la soupape d'admission afin d'éviter le freinage des gaz.
- Déclencher le point d'allumage.

## 4. Principe de fonctionnement d'un moteur

### a) Caractéristiques

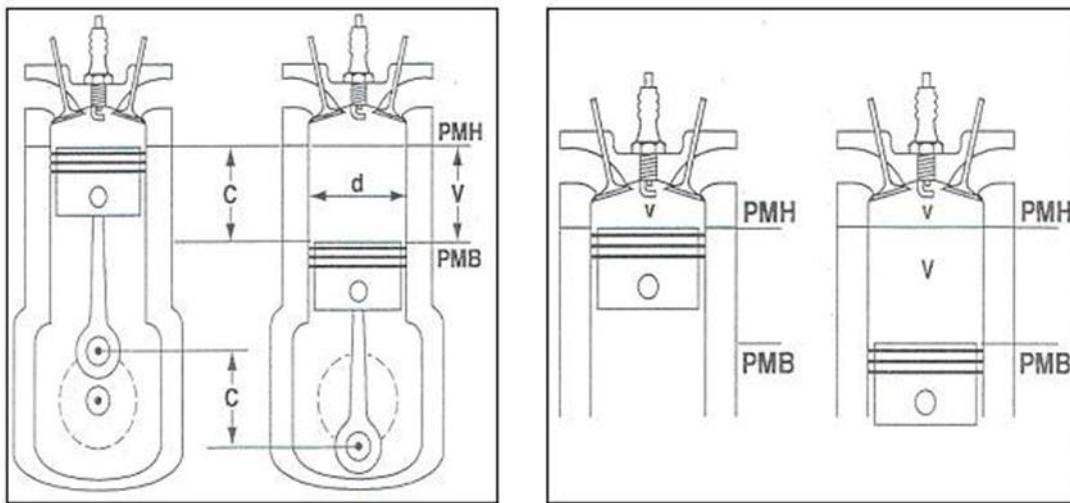


Figure 67 : caractéristique Moteur

L'alésage : l'alésage ‘d’(en centimètre) est le diamètre intérieur du cylindre.

La course : la course ‘C’(en centimètre) est la distance parcourue par le piston entre le sont Point Mort Haut(PMH) et son Point Mort Bas(PMB).

La cylindrée unitaire : La cylindrée unitaire ‘V’ (en centimètre cube), est le volume compris dans un cylindre entre PMH et PMB.  $V = S \cdot C = \pi \cdot R^2 \cdot C = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4}\right) \cdot C$ .

La cylindrée Total : La cylindrée total est ‘Vt’ (en centimètre cube), est égale à la cylindrée unitaire multiple par le nombre de cylindres n.  $Vt = V \cdot n$  .

Le rapport volumique : c'est le rapport entre le volume total dans le cylindre (quand le piston est au PMB) et le volume reste quand le piston en PMH.

### b) Cycle 4 temps

L'accroissement de la pression « P »(en Bar) dû à la combustion crée un effort « F »(en décaN) sur la surface « S » ( $\text{cm}^2$ ) de l'élément mobile de l'enceinte (le piston) tel que  $F = P \cdot S$ . La force « F » peut être convertie en travail mécanique « W » par le déplacement « L » du piston tel que  $= F \cdot L$  .

La détente du gaz dans le cylindre provoque le déplacement du piston. C'est la combustion et la détente des gaz qui produit cette phase motrice (ou temps moteur) et non une « explosion » comme on a improprement qualifié ce processus à son origine.

On remarque que la pression « P » évolue dans l'enceinte selon le déroulement contigu et contradictoire de la combustion et du déplacement du piston (c'est à dire le déroulement de la combustion tend à faire croître la pression, mais la descente du piston fait croître le volume, donc tend à faire chuter la pression).

Avant de bruler la charge, deux temps sont nécessaire :

-un temps pour l'introduction de la charge dans le cylindre (admission)

-un temps pour ramener le piston au début de sa course en comprimant la charge (compression), il faut ensuite initier la combustion (allumage).

Enfin, une fois la combustion-détente achevée, il faut évacuer les gaz brûlés (échappement) avant de recommencer un cycle.

(1) Admission

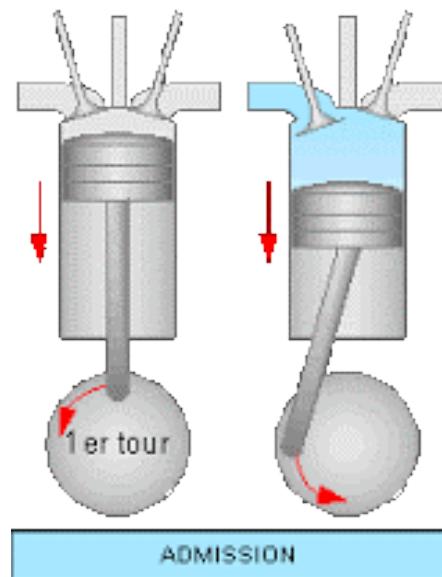


Figure 68 : 1<sup>eme</sup> l'admission

Le piston en descendant crée une baisse de pression favorisant l'aspiration des gaz. Souape d'admission ouverte et d'échappement fermée.

(2) Compression

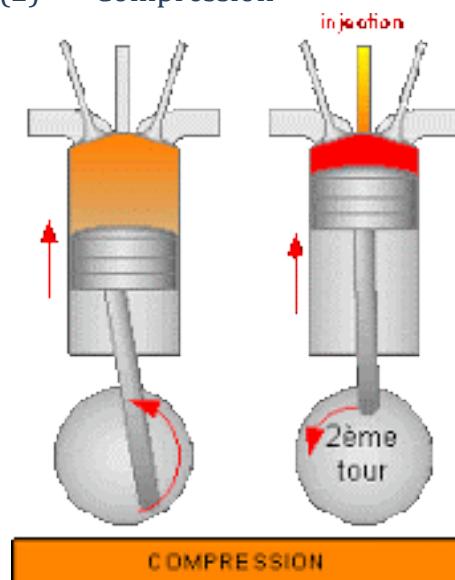


Figure 69 : 2<sup>eme</sup> compression

Le piston comprime les gaz jusqu'à n'occupent plus que la chambre de combustion. Soupape d'admission fermée et d'échappement fermée.

(3) Combustion détente

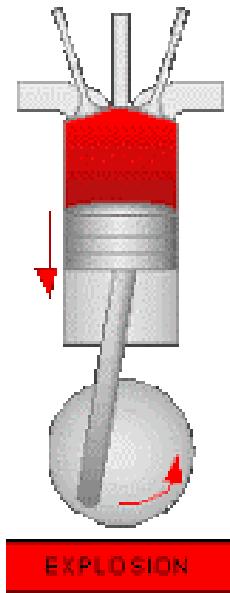


Figure 70 : 3ème explosion

L'étincelle d'une bougie (ou l'injection de gazole comprimé) enflamme le mélange. La chaleur dégagée dilate le gaz qui pousse violement le piston vers le bas. Soupape d'admission fermée et l'échappement fermée.

(4) Echappement

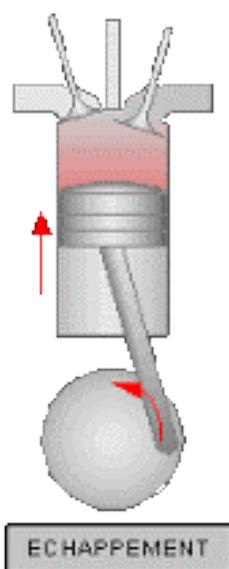


Figure 71 : 4ème Echapement

En remonte, le piston chasse les gaz brûles. Le moteur est à nouveau prêt à effectuer le premier temps. Soupape d'admission fermée et l'échappement ouvert.

### c) Diagramme théorique 4 temps

#### (1) Moteur diesel

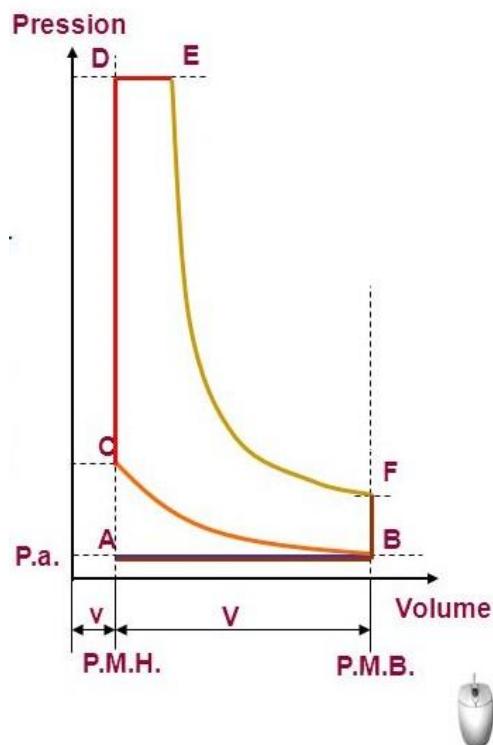


Figure 72 : cycle mixte théorique de 4 temps

A>B Admission: le moteur aspire de l'air.

B>C Compression: Le rapport volumétrique passe de ~9/1 (essence) à ~22/1. La pression en fin de compression

atteint ~40 bar et la température ~700°C (15 bar et 350°C dans un moteur essence).

C>D Combustion à volume constant: La première partie de la combustion se déroule si rapidement que le piston n'a pas le temps de se déplacer.

C : Injection: Le carburant est pulvérisé dans la chambre de combustion. Il s'enflamme au contact de l'aire chauffé par la compression

D>E Combustion à pression constante: La pression appuie sur le piston. L'augmentation de volume est compensée par la dilatation des gaz.

E>F Détente: La combustion a lieu tant que dure l'injection. La dilatation des gaz ne compense pas l'augmentation de volume.

F>B>A: Échappement.

#### (2) Moteur essence

A>B Admission: le moteur aspire de l'air.

B>C Compression: Le rapport volumétrique passe de ~9/1 (essence) à ~22/1. La pression en fin de compression atteint ~40 bar et la température ~700°C (15 bar et 350°C dans un moteur essence).

C>D Combustion à volume constant : La première partie de la combustion se déroule si rapidement que le piston n'a pas le temps de se déplacer.

C : l'allumage par les bougies.

E>F Détente : La combustion a lieu tant que dure l'injection. La dilatation des gaz ne compense pas l'augmentation de volume.

F>B>A : Échappement.

**REMARQUE** : la différence entre le moteur diesel et le moteur essence est :

Le moteur diesel : dans le point C au cycle de compression l'injecteur introduit le gazole dans la chambre de combustion du moteur pour obtenir une chaleur avec l'air comprimé.

Le moteur essence : dans le point C au cycle de compression les bougies permettent de produire un arc électrique.

## B. Circuit d'allumage

### 1. Fonction globale du système d'allumage

Le système d'allumage est un système de production d'arcs électriques qui apporte suffisamment de chaleur pour déclencher l'information du mélange air + essence comprime.

### 2. Système d'allumage classique

Le système d'allumage doit produire un arc électrique dans chaque cylindre en fin de compression pour enflammer le mélange air + essence. Pour obtenir une étincelle à ce moment précis dans chaque cylindre, le système d'allumage utilise l'énergie électrique de la batterie. Il assure 3 fonctions :

- Augmentation la tension de la batterie (12v à 10Kv ou 20Kv).
- Distribution la haut tension dans chaque cylindre.
- Produire un arc électrique.

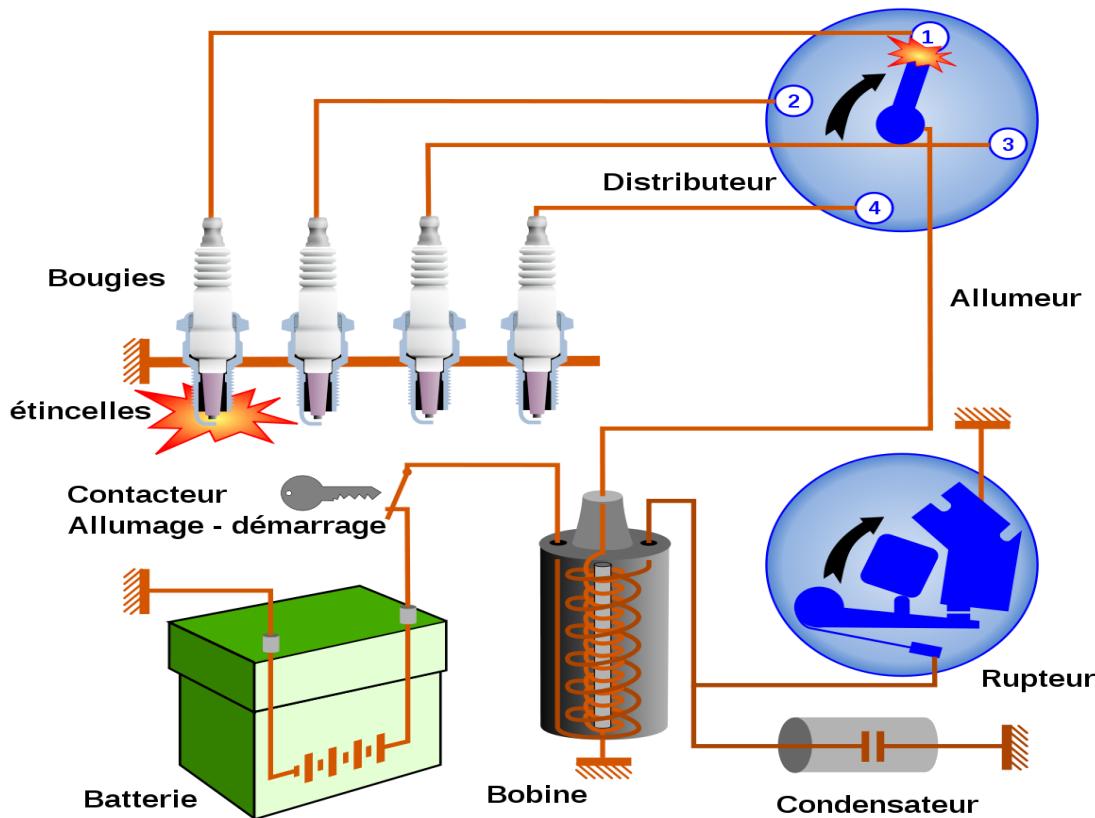


Figure 73 : Système d'allumage classique

Batterie il fournir l'énergie électrique continue 12v, clé contact il établir l'alimentation du système, bobine permettre de transformer la tension d'entre générée par la batterie, allumeur il permettre de distribuer la haut tension, rupteur déclencher la production de HT, condensateur il permettre de réduit la formation d'étincelle au rupteur, et les bougies permettre de produire l'arc électrique pour flammé le mélange dans le chambre d'explosion.

### 3. Fonctionnement du l'ensemble du système

La tension de la batterie 1 passe par la clé de contact 2 pour arriver à la bobine 3.

**Rupteur fermé:** le courant va à la masse par l'enroulement primaire de la bobine. Un champ magnétique est ainsi constitué et l'énergie d'allumage y est emmagasinée.

**Rupteur ouvert:** la haute tension générée alimente le doigt de distribution de l'allumeur qui se positionne face à la connexion de la bougie 7 et produit l'étincelle.

Ensuite le rupteur se referme à nouveau, le cycle recommence, le doigt s'oriente en face de la bougie du cylindre suivant pour produire une nouvelle étincelle.

L'ordre d'allumage pour un moteur à 4 cylindres est généralement 1 - 3 - 4 - 2, pour un moteur à 6 cylindres 1 - 6 - 3 - 5 - 2 - 4 ou 1 - 4 - 2 - 5 - 3 - 6.

### 4. Transformateur élévateur (bobine)

Pour produire un arc électrique à partir de la tension de bord du véhicule (12 V), il faut multiplier la tension de la batterie environ par 1000 (12 000 à 20 000 V). Pour obtenir un tel résultat, on utilise un transformateur de tension: la bobine d'allumage.

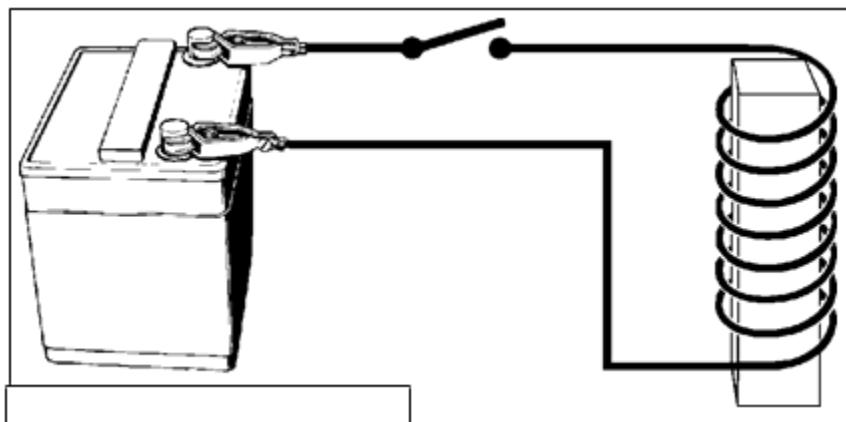


Figure 74 : alimentation du transformateur par la batterie

## a) Fonctionnement de transformateur (bobine)

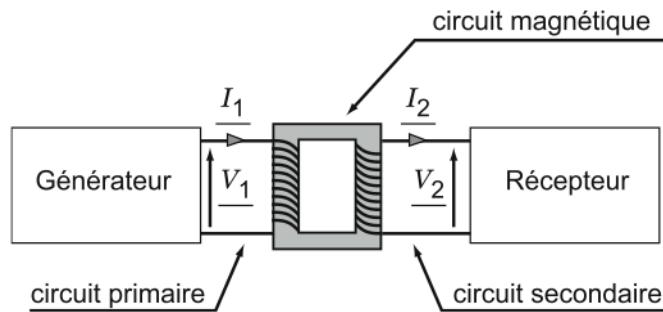


Figure 75 : transfo monophasé

Le transformateur est constitué de deux circuits, primaire et secondaire, le circuit primaire est alimenté par la batterie et se comporte comme un récepteur, il crée un champ et un flux magnétique  $\Phi(t)$  dans le circuit magnétique feuilleté, et le circuit secondaire est soumis à la variation de ce flux, il est le siège d'une f.e.m. induite due à la loi de Lenz ( $e = - N \frac{d\Phi}{dt}$ ) et alimente la charge.

La relation entre les valeurs  $V_1$  et  $V_2$  avec  $V_1$  la tension d'alimentation de transformateur et  $V_2$  la tension de sortie de transformateur est :  $m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$   $m$  c'est le rapport de transformateur. Si  $m > 1$  donc le transformateur il permettre de élevé la tension d'entre, si  $m < 1$  alors le transformateur est abaisseur de tension d'entrée.

## b) Circuit magnétique

Le circuit magnétique canalise le flux magnétique. Il est constitué d'un empilage de tôles. Ces tôles sont :

- Isolées entre elles par oxydation (diminutions des pertes Par courant de Foucault) .
- à cristaux orientés (diminution des pertes par hystérésis) .
- assemblées en alterne pour limiter l'entrefer (réductions des fuites magnétiques).

Voir la partie du (magnétisme)

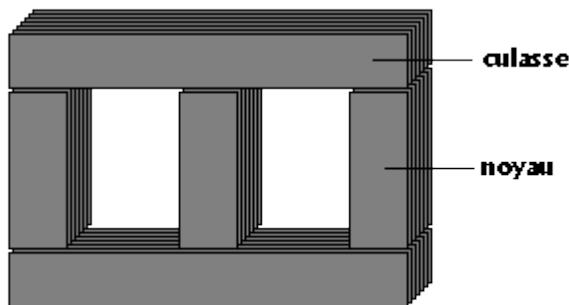


Figure 76 : culasse

### c) La variation du flux magnétique

La variation d'intensité dans le circuit précédent est obtenu à l'aide d'un interrupteur qui ouvre puis ferme le circuit: Rupteur + Cames. On obtient ainsi une variation de flux magnétique.

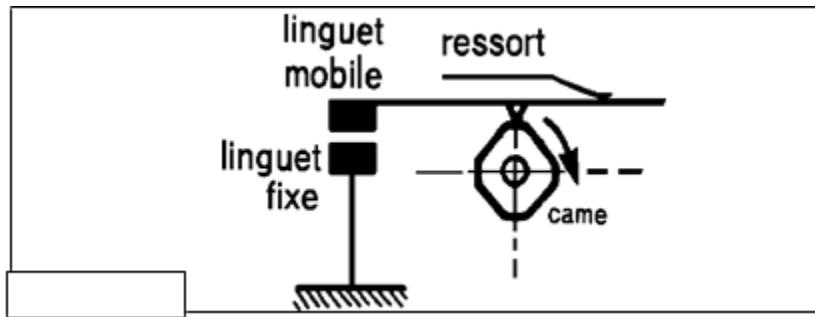


Figure 77 : Rupteur+ came

### d) La création d'un courant électrique

On appellera le circuit que nous venons d'étudier: circuit primaire. On enroule autour du noyau du circuit primaire un second bobinage isolé du premier.

A chaque variation de flux magnétique dans le bobinage primaire, il y a création d'un courant électrique induit dans le bobinage secondaire. Cette force électromotrice sera d'autant plus grande que:

- La variation de flux dans le noyau sera importante et rapide  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .
- Le rapport de transformation  $m$  entre les nombre de spires des bobinages sera grand  $\frac{N_2}{N_1}$ .

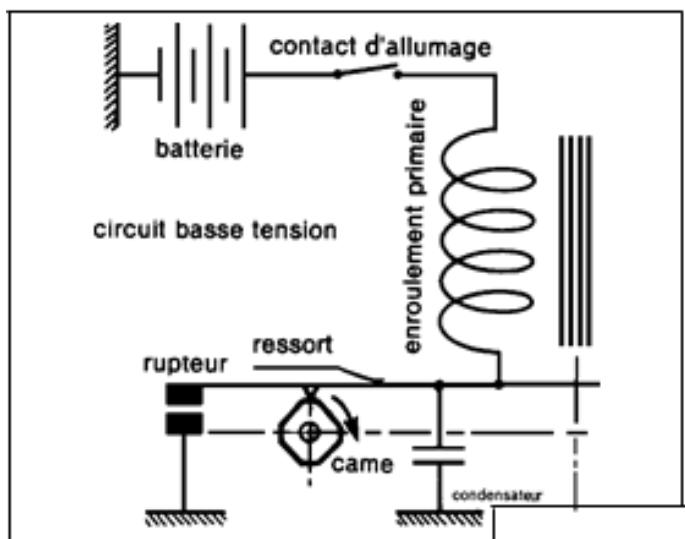


Figure 78 : le circuit d'allumage

## 5. L'allumeur

L'allumeur assure trois fonctions à la fois :

- Il contient le système de rupture du circuit primaire.
- Il distribue la haute tension générée par la bobine aux bougies.
- Il fait varier l'avance à l'allumage en fonction des conditions d'utilisation du moteur.

### a) Le rupteur d'allumage et l'angle de came

Le rupteur est commandé par les cames de l'arbre de l'allumeur. Les cames sont conçus de manière à former des angles d'ouverture et de fermeture du rupteur correspondants à la bobine et au nombre d'étincelles. L'angle de came est l'angle parcouru par la came pendant que les contacts sont fermés.

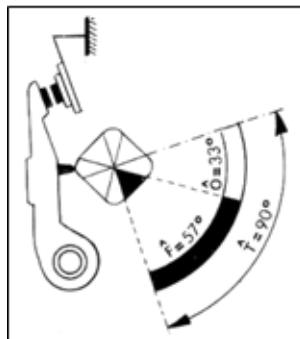


Figure 79 : les cames de l'arbre de l'allumeur

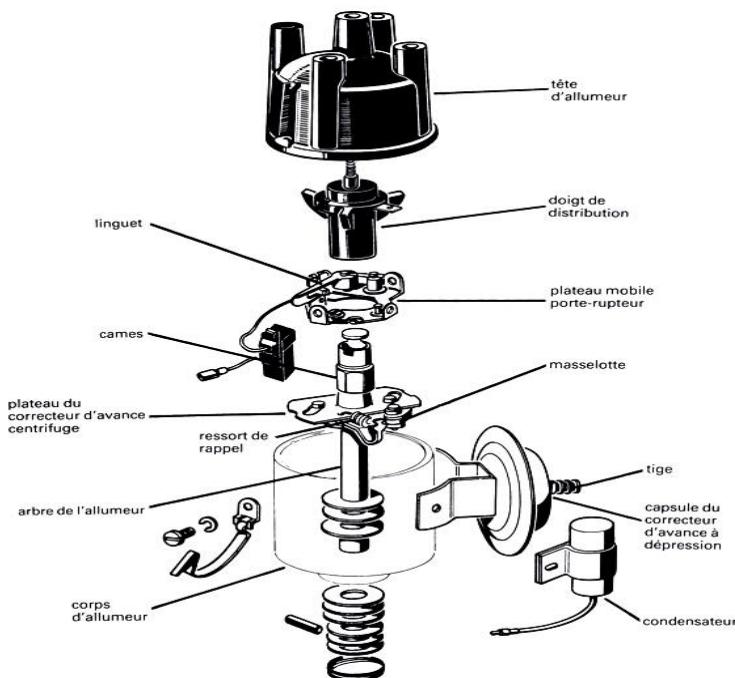


Figure 80 : l'allumeur

### b) La distribution de la haut tension

Le doigt de distribution et l'arbre d'allumeur sont entraînés par le moteur. La haute tension délivrée par la bobine arrive par le plot central de la tête d'allumeur, passe sur le doigt, puis successivement sur chaque contact intérieur de la tête d'allumeur (1 - 3 - 4 - 2). La disposition des fils permet de respecter cet ordre d'allumage.

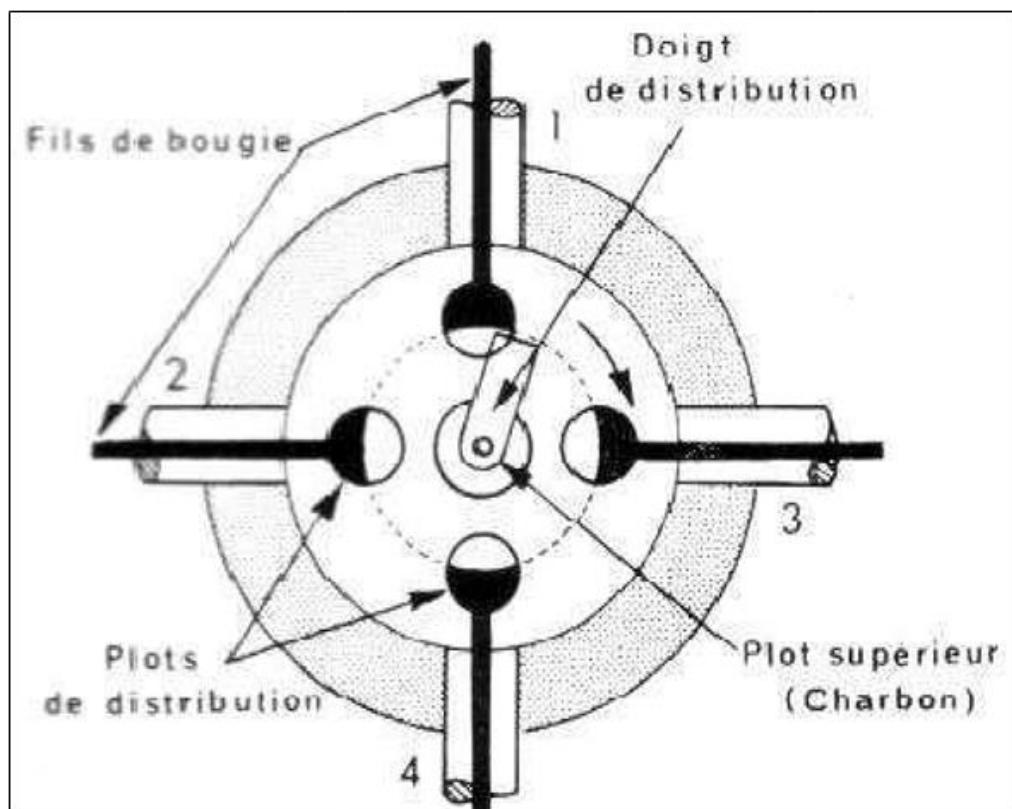


Figure 81 : Distributeur d'allumeur

## 6. Les bougies

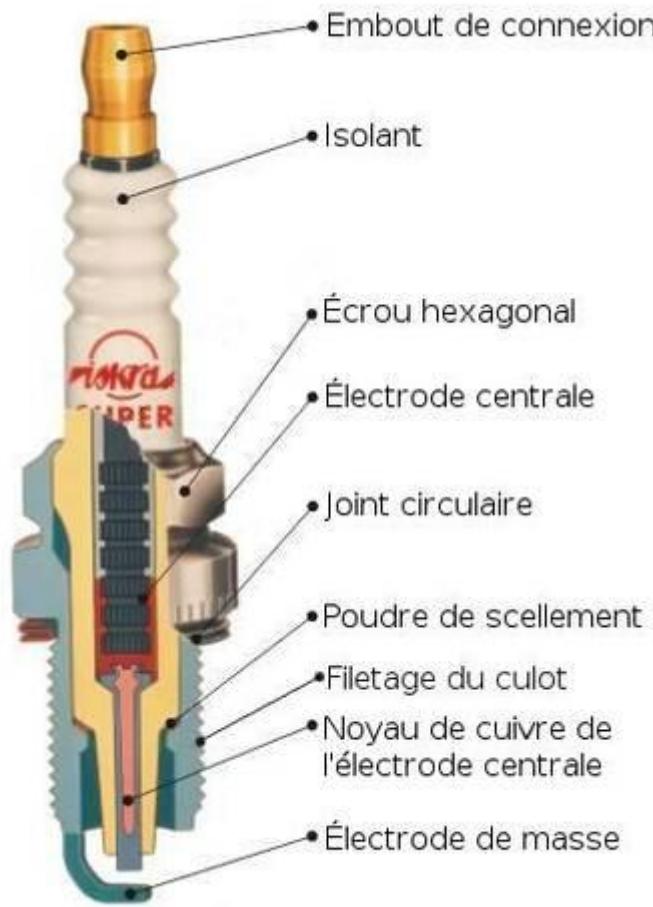


Figure 82 : Bougie d'allumage

### a) Bougie chaud et bougie froid

L'évacuation de la chaleur est réalisée au contact du bec isolant avec le culot. Chaque moteur doit être équipé du type de bougie dont le degré thermique est le plus approprié à son fonctionnement.

## C. La carburation

Dans le cas des vieux moteurs, le carburateur s'occupe de faire le mélange air/carburant avant d'envoyer les gaz vers les cylindres. Cela par le biais du collecteur d'admission.

Sur les moteurs récents, le carburateur est remplacé par des injecteurs, des sortes de petits jets hauts pression qui envoient le carburant dans le collecteur ou directement dans les cylindres. Ce carburant est aspergé à haute pression sous forme de minuscules gouttelettes qui se vaporisent rapidement afin d'être brûlées.

Notez que comme l'air, le carburant passe par un filtre afin de retirer toute particule potentiellement dangereusement pour les chambres de combustion.

Voici le circuit d'une voiture diesel moderne bénéficiant d'une rampe commune située entre la pompe à injection et les injecteurs.

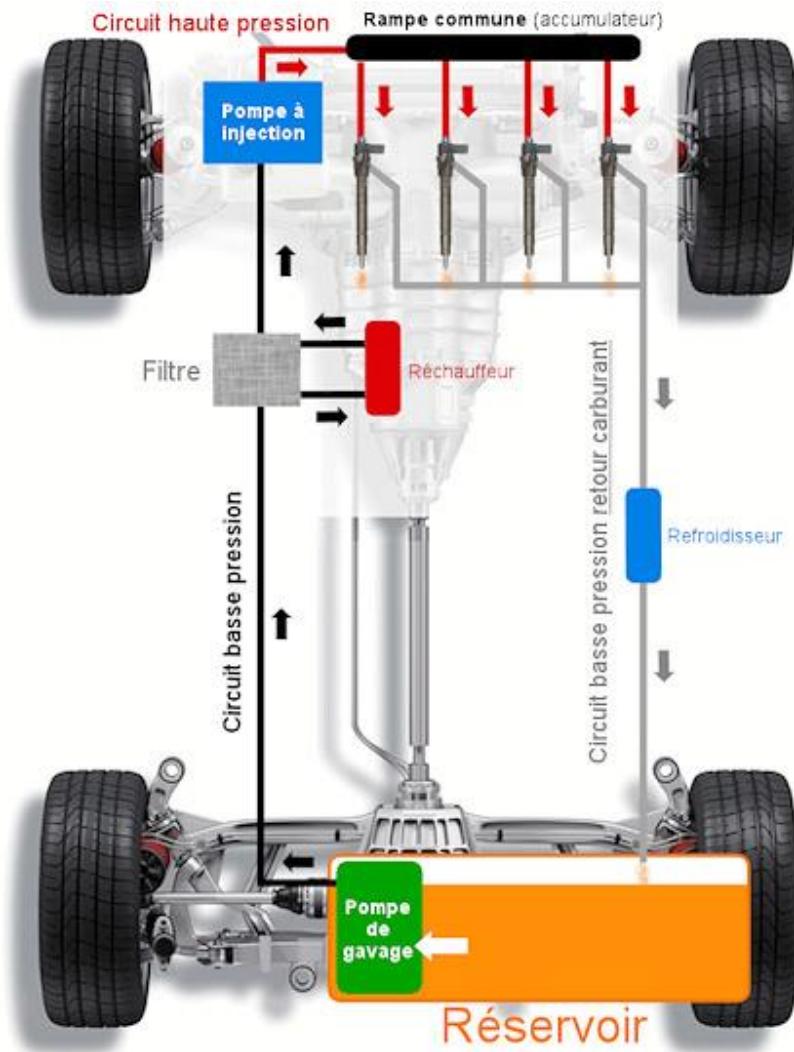


Figure 83 : exemple de circuit du carburation

## **1. Condition à remplir**

Le dosage : proportionner convenablement le combustible et l'air pour obtenir la combustion rapide et complète du mélange.

L'homogénéité : c'est le problème de réaliser le même dosage dans toute la masse.

L'automaticité : c'est le problème d'assurer le dosage convenable à tous les régimes du moteur possible sans intervention extérieure.

L'égalité : C'est le problème de répartir le mélange carburé également entre tous les cylindres du moteur.

## **2. Réalisation de carburation**

La carburation est réalisée presque totalement dans le carburateur où arrivent l'essence envoyée par la pompe d'alimentation et l'air atmosphérique par la dépression que crée la descente du piston lors du temps d'admission.

Le combustible entraîné par le courant d'air se divise en fines gouttelettes, qui sont-elles- mêmes pulvérisées par le choc contre l'air. Ceci favorise la vaporisation du combustible et prépare ainsi la formation d'un mélange homogène.

## **3. Dosage du mélange**

Pour une essence ordinaire, la composition théorique est la suivante : 1g d'essence pour 20g d'air. On admet en pratique un excès d'air afin que la combustion soit complète malgré le défaut d'homogénéité du mélange 1g d'essence pour 20g d'air ou 1 cm<sup>3</sup> d'essence brûle dans 11 litres d'air. Mélange riche : la quantité d'air admis est insuffisante ou il y a excès d'essence. Le rapport essence/air est supérieur à 1/20. le mélange brûle mal.

Mélange pauvre : il y a excès d'air ou manque d'essence. Le rapport essence/air est inférieur à 1/20. La combustion est mauvaise. La puissance du moteur diminue.

#### 4. Système d'alimentation en essence

Il comprend 3 parties sont : le réservoir, le dispositif d'alimentation et le carburateur.

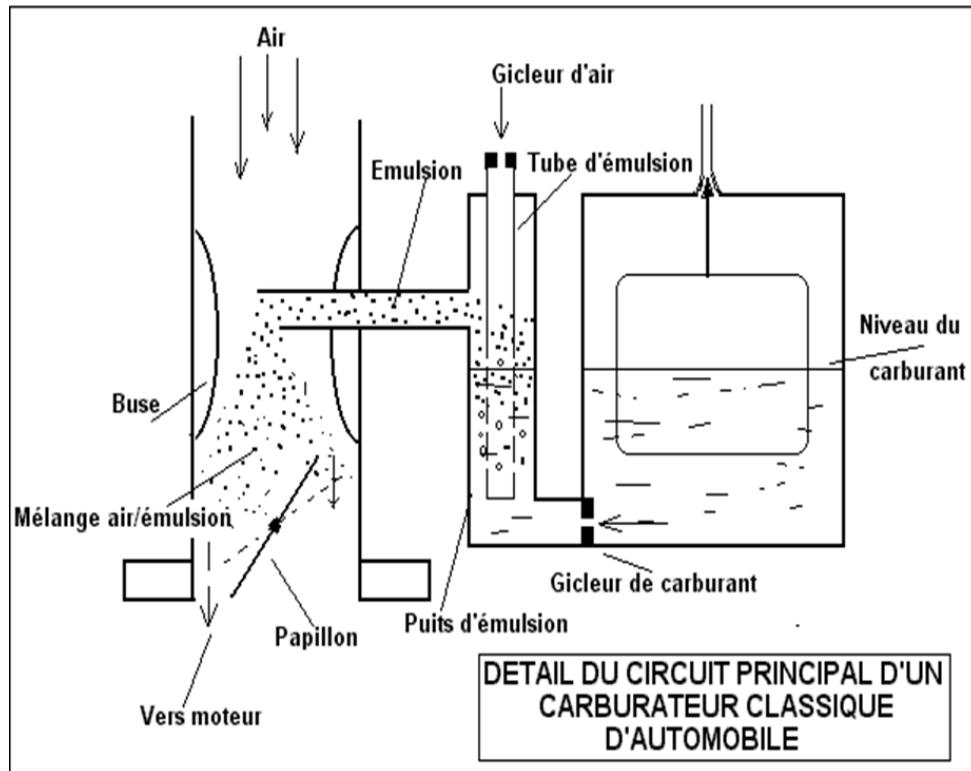


Figure 84 : Système d'alimentation en essence

##### a) Le réservoir

Emmagasine l'essence nécessaire à la marche du véhicule moteur. La capacité du réservoir est fonction de la puissance du moteur, quand le réservoir est placé à un niveau supérieur à celui du carburateur, le système ne nécessite aucune autre dispositif d'essence s'écoule par gravité sous son propre poids. Quand le réservoir est à niveau inférieur à celui du carburateur, il faut utiliser un dispositif d'alimentation pour que l'essence arrive au carburateur.

##### b) La pompe d'alimentation

La pompe à membrane mécanique : elle possède un levier commandé par l'excentrique prévu sur l'arbre à cames, elle aspire l'essence du réservoir et la refoule au carburateur par déformation d'une membrane imperméable au combustible.

La pompe à membrane électrique : la commande de la membrane se fait par le déplacement du noyau d'électro-aimant on peut la mettre n'importe où elle n'est pas influencée par dégagement de la chaleur.



Figure 85 : Pompe

**c) Le carburateur**

(1) Rôle

Les carburateurs ont pour rôle de vaporiser l'essence en la mélangeant à l'air, et l'adaptation de la puissance fournie par le moteur à la puissance qui lui est demandé.

(2) Description d'un carburateur élémentaire

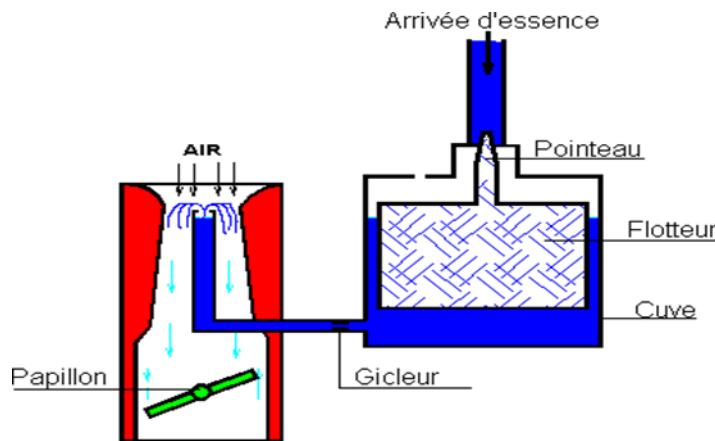


Figure 86 : Carburateur élémentaire

La cuve à niveaux constant :

C'est un réservoir d'alimentation en carburant qui possède un flotteur et un gicleur qui règlent l'arrivée du combustible. La cuve reçoit l'essence du réservoir par simple gravité ou par pompe d'alimentation au moyen d'une tuyauterie.

Le Gicleur : Il porte un orifice calibré, à la sortie duquel le jet d'essence se trouve pulvérisé dans le courant d'air.

La chambre de carburation : Elle comprend le diffuseur, le papillon des gaz commandé par l'accélérateur et la portion de tuyauterie comprise entre le gicleur et la soupape d'admission.

### (3) Fonctionnement

Quand le moteur est à l'arrêt, la pression atmosphérique règne dans la tubulure d'admission et dans la cuve. L'essence s'écoule jusqu'à ce que le pointeau bouche son arrivée et le niveau constant s'établit au gicleur comme dans la cuve.

Lorsque le moteur est en marche, la quantité du mélange admise dans le moteur doit pouvoir être réglée en fonction de la charge et de la vitesse imposée au moteur.

Le dosage de la quantité totale du mélange est réalisé au moyen d'un volet mobile autour d'un axe central. Le papillon vient boucher plus au moins le secteur de passage des gaz.

La vitesse du courant gazeux est inversement proportionnelle à la section de passage, elle est plus élevée dans les parties élargies (par exemple le col du diffuseur).

Dans les sections où le fluide s'écoule rapidement, la pression est plus basse que dans les sections où il se trouve au ralenti.

## 5. Système d'alimentation en gazole

L'équipement d'injection doit introduire le gazole dans chaque cylindre du moteur pour réaliser la combustion. A cet effet, il faudra:

- Une pression d'injection > à la pression de fin de compression
- Une quantité de gazole injectée à un moment précis du cycle dans chaque cylindre
- Résister à la température élevée

Pour réaliser ces fonctions, l'équipement d'injection est constitué de trois sous-systèmes:

- Un circuit d'alimentation
- Une pompe d'injection
- Des injecteurs

On rencontre en général sur les véhicules de tourisme deux types de pompe:

- La pompe en ligne: à plusieurs pistons
- La pompe rotative: un seul piston

L'équipement d'injection des véhicules modernes tend vers des systèmes à injection haute pression (Rampe commune) ou injecteur pompe.

## 6. Les injecteur

L'injecteur introduit le gazole dans la chambre de combustion du moteur. Il est commandé par la pression du gazole engendrée par la course utile du piston de la pompe à injection.

Il existe donc plusieurs modèles d'injecteurs pour équiper les différents types de moteurs. Mais on distingue généralement sur les véhicules de tourisme 2 principaux types d'injecteur.

- Les injecteurs à trous pour les moteurs à injection directe
- Les injecteurs à téton pour les moteurs à préchambre et à chambre de turbulence.

L'ensemble fonctionnel est en fait constitué de 2 éléments: L'injecteur et le porte-injecteur monté dans la culasse. L'injecteur comprend le corps et l'aiguille d'injecteur. Ils sont appariés avec une précision de l'ordre de 2 à 4 micron. Ils ne sont donc pas interchangeables.

### a) Injection Directe (GDI)

Ici c'est donc assez simple, le bout de l'injecteur donne directement dans la chambre de combustion (le cylindre), il va donc pulvériser le carburant directement dans cette chambre au moment voulu, plus ou moins tôt, plus ou moins souvent et avec plus ou moins de carburant.

### (1) Moteur essence

Sur un moteur essence on injecte pendant la durée d'admission d'air, à savoir quand le piston descend vers le bas (vers le PMB : point mort bas).



Figure 87 : injection direct essence

### (2) Moteur diesel

tandis que sur les diesel on injecte que lorsque le piston est tout en haut en phase de compression (PMH).



Figure 88 : injection direct en diesel

### b) Injection Indirect

Dans le cas d'une injection indirecte, le carburant est injecté dans le collecteur d'admission (et non plus directement dans les cylindres), lieu dans lequel comburant et carburant se mélangent de manière optimale. L'essence injectée sous forme de gouttelettes se vaporise alors immédiatement (la chaleur dans le collecteur favorisant d'autant plus cette "évaporation") et brûle de manière optimale une fois arrivé dans la chambre de combustion. Car je rappelle que l'essence s'enflamme sous forme de vapeur et non pas quand elle est liquide contrairement à ce que beaucoup croient ...

#### (1) Moteur essence

Sur une injection indirecte de moteur essence, l'injecteur est placé en amont de la soupape, soit dans la tubulure d'admission. Le mélange est effectué par vaporisation avant de rentrer dans le cylindre.

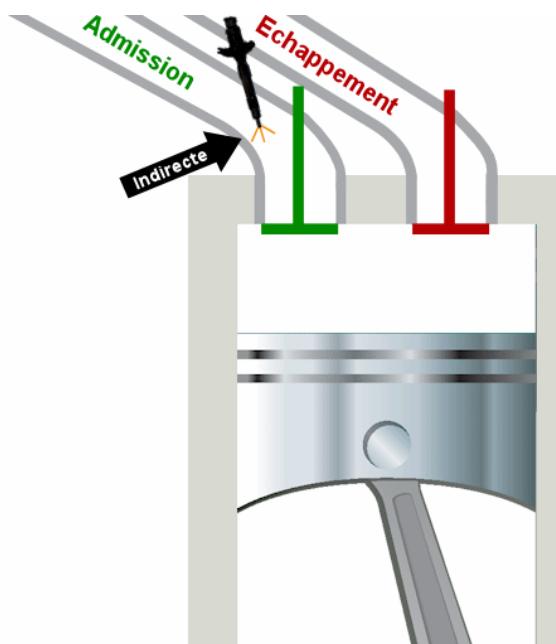


Figure 89 : injection indirect en essence

#### (2) Moteur diesel

Dans le cas d'un diesel, l'injection se fait dans une petite chambre séparée (pré-chambre de combustion) qui donne sur le cylindre, et non pas dans dans le conduit d'admission. En gros, cette méthode permet d'améliorer la combustion du diesel malgré l'emploi d'une injection basse pression. Lors de la compression, l'air admis va être envoyé vers cette préchambre sous pression pour se méler au carburant vaporisé qui va alors commencer à s'enflammer. Les turbulences provoquées par l'aérodynamisme de la préchambre permet d'améliorer la combustion.

Notez que les bougies de préchauffage sont plus utiles dans le cas d'une injection indirecte. En effet, un moteur à injection directe démarrera plus facilement sans elles.

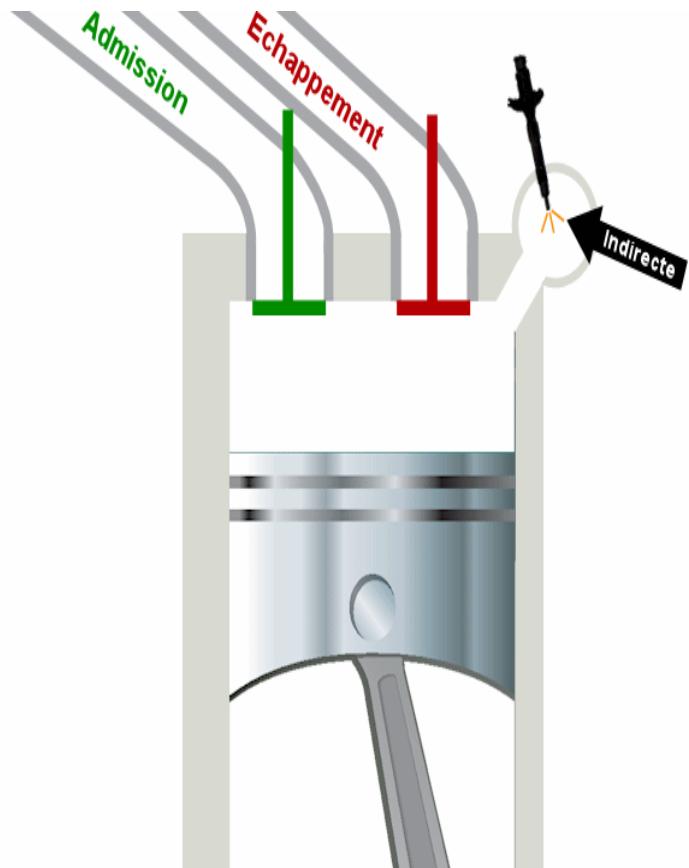


Figure 90 : injection indirect en diesel

## D. La distribution moteur

### 1. Généralité

Un moteur est constitué d'un ou plusieurs cylindres dans lesquels circulent les pistons reliés au vilebrequin par les bielles. Dans ces cylindres, on introduit un mélange gazeux composé d'aire et d'essence vaporisée, dont on désire extraire le maximum d'énergie mécanique utile.

### 2. Rôle de la distribution

La distribution Ella un rôle important est conditionné le bon déroulement du cycle 4 temps du moteur de manière permanente, c'est pour ça la distribution de moteur il permettre de commander l'ouverture et la fermeture des soupapes, et imposer l'instant de l'ouverture, l'amplitude et la durée du mouvement des soupapes. Cela permet la distribution des gaz dans le moteur.

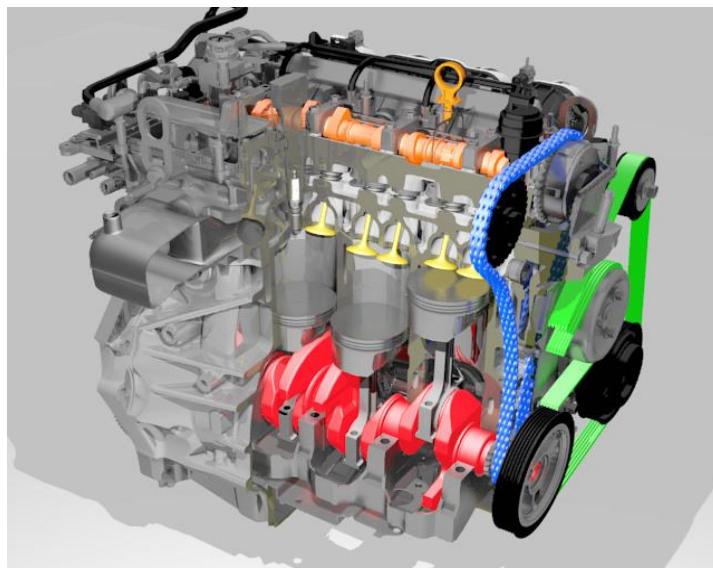


Figure 91 : la distribution moteur

### 3. Le principe de fonctionnement

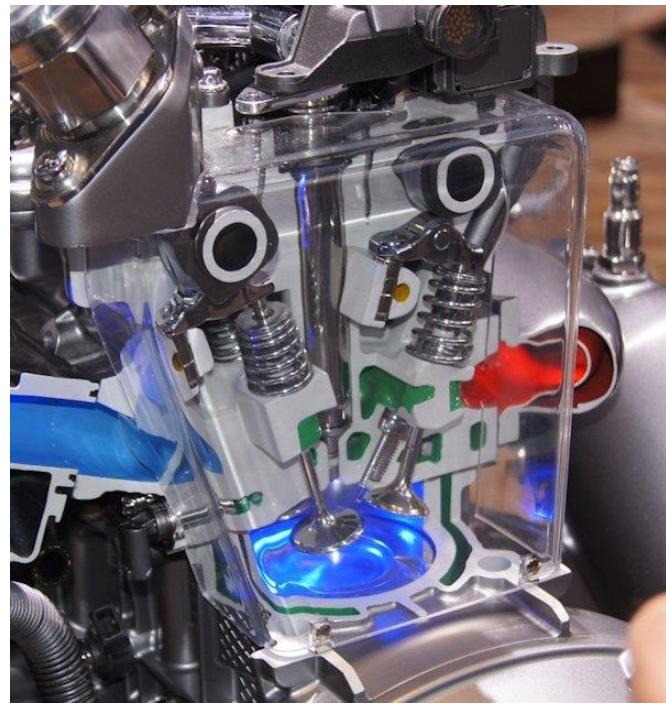
L'ouverture et la fermeture des cylindres sont réalisées par les soupapes.

L'ouverture est possible grâce à des cames, la fermeture est assurée par des ressorts.

La transmission du mouvement de l'arbre à cames aux soupapes est assurée par des poussoirs.

Elle peut comprendre également des tiges de culbuteurs et des culbuteurs.

La synchronisation avec le vilebrequin est réalisée par des pignons reliés entre eux par un système indérégliable (ex. chaîne, courroie...).



*Figure 92 : fonctionnement des soupapes*

#### **4. Les principaux organes de la distribution**

##### **a) Arbre à Came**

L'arbre à came est couple mécaniquement au vilebrequin par système de transmission pignon – courroie cranté.



*Figure 93 : système de transmission pignon - courroie cranté*

### b) Les Soupapes

Comme nous déjà exprimer les soupapes il permettre de l'entrée et la sortie des gaz dans le chambre de combustion.

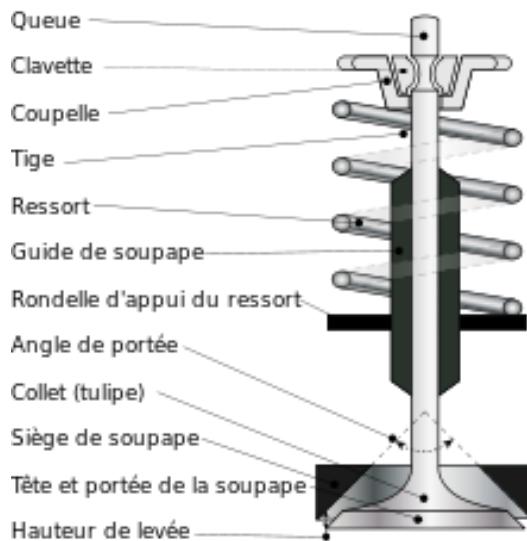


Figure 94 : soupape

Le diamètre de leur tête doit être important. Cette dimension est limitée par la place libre dans la chambre de combustion, le poids de la soupape qui doit rester minimal, et par sa résistance mécanique aux chocs et aux déformations.

### c) Les Poussoirs

Il est nécessaire de disposer un poussoir entre la queue de soupape et la came afin d'obtenir un meilleur contact entre ces deux pièces. On remarque que quand la soupape est fermée il subsiste un petit jeu entre le poussoir en la came (cela provient de l'impossibilité mécanique d'avoir deux contacts parfaitement simultanés: soupape/culasse et soupape/came) ( $\rightarrow$  poussoirs/butées hydrauliques).

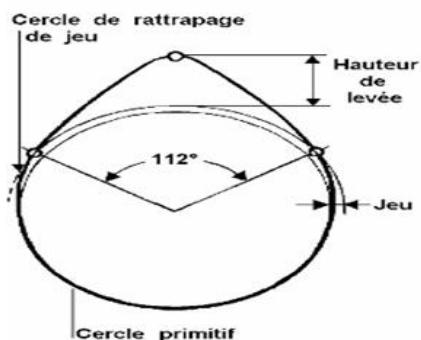


Figure 95 : poussoir

*d) Came*



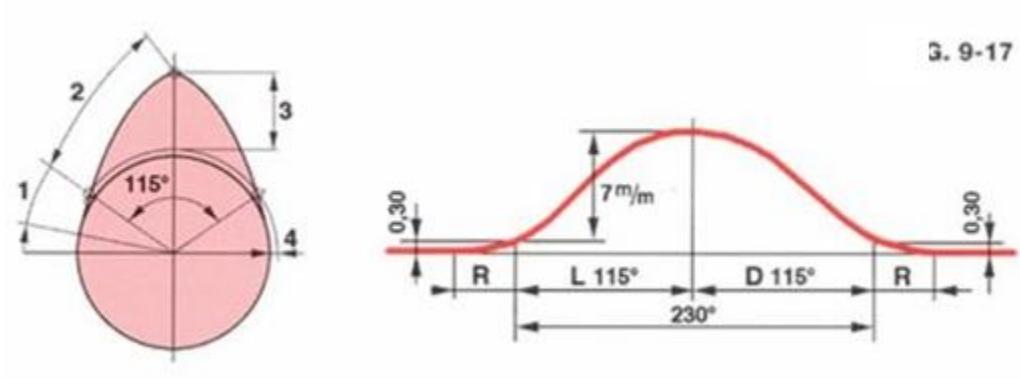
*Figure 96 : la came*



*Figure 97 : schéma de la came*

Les caractéristiques des cames varient en différents points :

- l'angle de levée et de descente.
- la hauteur de levée de came.
- l'angle totale d'action de la came.



*Figure 98 : graphique et le schéma de la came*

Le schéma illustre la levée d'un poussoir ou d'un culbuteur entraîné par la came représentée à gauche en fonction de la position angulaire du vilebrequin.

Le graphique montre une hauteur de levée de 7mm et un jeu de soupapes de 0.30 mm. On a de même un angle d'ouverture de 230° (au vilebrequin) qui correspond à 2 fois l'angle de la came

Or un moteur sera d'autant plus performant, que ses soupapes s'ouvrent vite. On peut ainsi définir le rendement d'une soupape.

## 5. Principe de fonctionnement

### a) Mode d'entraînement

- Un cycle complet est égal à 2 tours.
- Pendant ce cycle, chaque soupape ne doit s'ouvrir qu'une seul fois.
- L'arbre à came tourne deux fois moins vite que le vilebrequin.
- Le pignon de distribution a un diamètre deux fois supérieur a celui du vilebrequin pour assurer le rapport de réduction de  $\frac{1}{2}$  par

### b) Mode d'entraînement courant

#### (1) Courroie

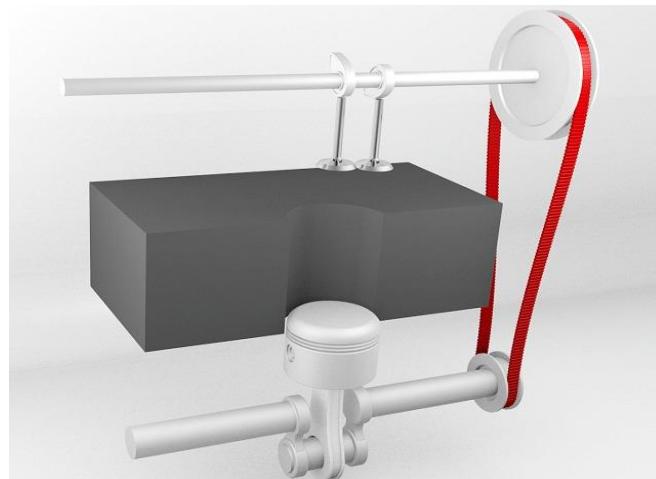


Figure 99 : courroie de distribution

La courroie elle caractérise par sa facilité et coût de conception et la fiabilité et remplacement régulier.

#### (2) Chaîne

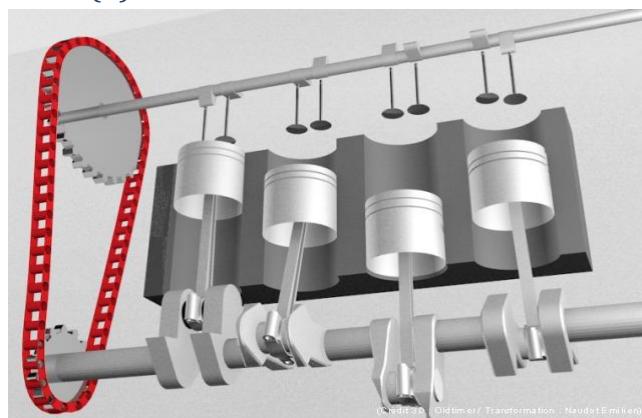


Figure 100 : chaîne de distribution

La courroie elle caractérise par la durée de vie, fiabilité, mais elle nécessite une lubrification.

Courroie : on voit qu'on peut facilement optimiser son passage en fonction de la place disponible, à condition de mettre des tendeurs.

## 6. Diagramme de la distribution et le calage variable

Le calage variable des soupapes joue sur le diagramme de distribution en modifiant l'angle que composent les cames des deux arbres. On joue ainsi sur la durée de la phase de croisement (l'ouverture simultanée des soupapes) et le retard de fermeture à l'admission. Cette durée détermine les caractéristiques du moteur. Pour avoir de la puissance, l'angle est augmenté au maximum, ce qui traduit par un croisement faible. Au contraire, lorsque l'on cherche avoir le plus de couple possible (faible vitesse) on diminuera cette angle, ce qui augmente le moment de croisement. Cette technologie est appellée dans les voitures modernes VVT (Variable Valve Timing).

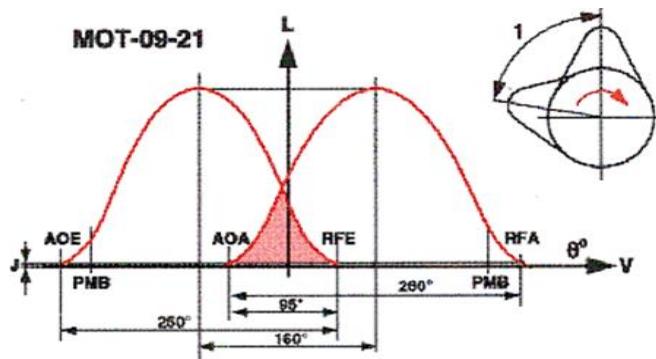


Figure 101 : courbe 1

Si on augmente l'angle de croisement des soupapes, à haut régime on aura une meilleure évacuation des gaz donc un meilleur couple, mais à bas régime les performances sont mauvaises car on a un retour de l'échappement.

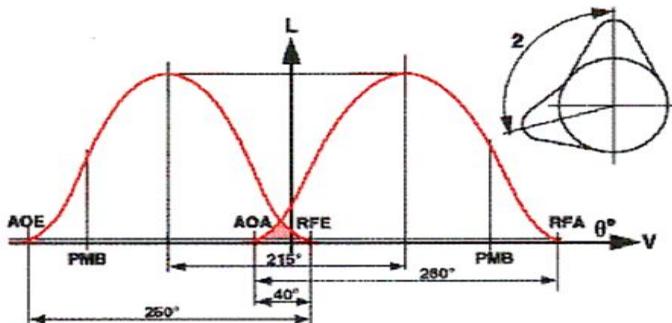
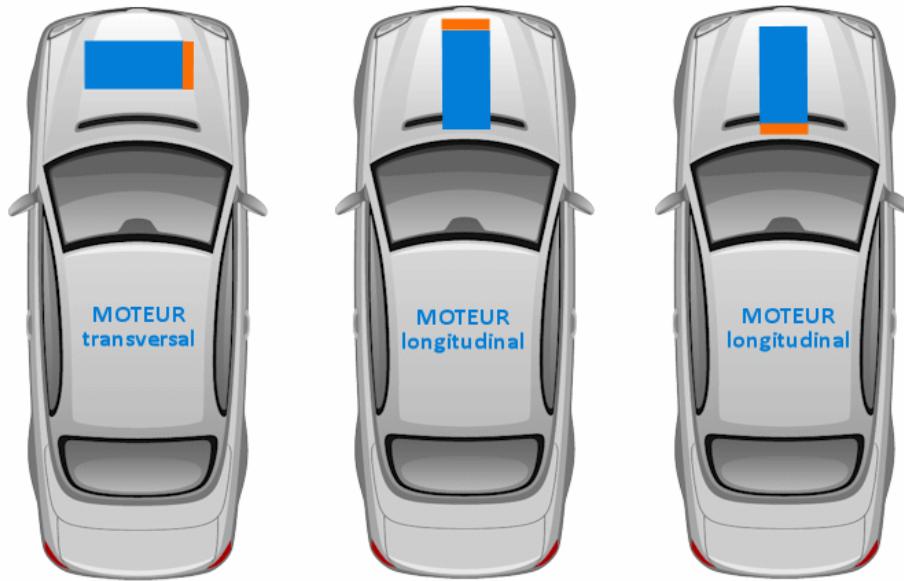


Figure 102 : courbe 2

A l'inverse à la courbe 2, un faible angle donnera de bonnes performances à bas régime, tandis que le couple sera plus limité à haut régime.

Le système VVT ou le système de calage variable qui permet de faire varier l'angle du croisement de soupapes en fonction du régime de moteur, permet d'obtenir des performances intéressantes à haut et bas régime.

## 7. L'emplacement de la distribution



*Figure 103 : l'emplacement de la distribution du moteur*

L'emplacement de la distribution dépend avant tout de la structure de votre auto. Une voiture populaire aura un moteur placé transversalement et aura donc sa distribution à l'avant droit du compartiment moteur (si je me place au niveau du conducteur). Sur une voiture de luxe à moteur longitudinal, elle sera soit devant (parfait pour le mécanicien) soit dernière (là c'est très embêtant, il faut tomber le moteur pour la changer ...). Sur Une Golf vous aurez la distribution à droite, sur une Mercedes Classe C elle sera devant et pour une Série 1 elle se situera derrière (c'est probablement pour cela qu'ils ont opté pour une chaîne, il était inconcevable de faire tomber le moteur régulièrement pour changer la courroie).

## **E. Circuit de refroidissement**

### **1. Remède**

Il faut évacuer les calories en excès à l'aide d'un système de refroidissement. Lors de l'inflammation du carburant, la température à l'intérieur du cylindre devient beaucoup plus élevée que le point de fusion de la fonte. Comme la combustion se produit 2 000 fois par minute, voire davantage, le moteur doit être équipé d'un système de refroidissement, afin que le piston ne se dilate pas et ne se soude pas au cylindre.

C'est pourquoi on munit les cylindres de chemises dans lesquelles circule de l'eau, dont l'ullition est stoppée grâce à un radiateur.

### **2. Déférants types de refroidissement**

#### **a) Refroidissement par l'air**

On augmente la surface du bloc moteur et de la culasse en contact avec l'air (exemple: ailettes sur les moteurs de mobylettes). Ce principe est simple et il n'y a pas de risques de gel. De plus, le prix de revient en fabrication est minimum. En contrepartie, on obtient un refroidissement passable du moteur et il devient difficile d'y greffer un chauffage d'habitacle.

Refroidissement par air forcé: On améliore le passage de l'air autour du cylindre et de la culasse par une turbine soufflante (exemple: Porche et 2CV Citroën).

#### **b) Refroidissement par liquide antigel**

La capacité calorifique de l'eau est 6 fois plus élevée que celle de l'air. Les parois à refroidir sont au contact du liquide qui吸absorbe la chaleur et la transporte vers le radiateur.

### 3. Composition de circuit de refroidissement

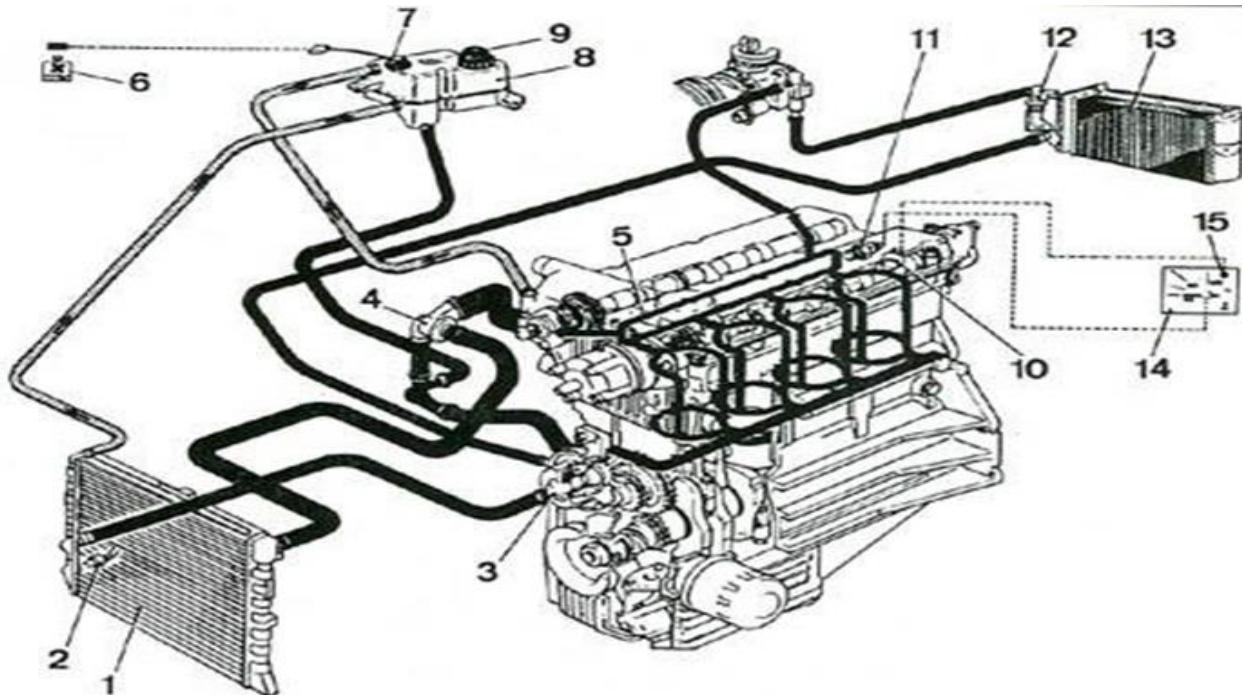


Figure 104 : circuit de refroidissement

- 1) Radiateur
- 2) Sonde de ventilateur électrique
- 3) Pompe à l'eau
- 4) Soupape thermostatique
- 5) Culasse
- 6) Lampe témoin de niveau mini du liquide
- 7) Jauge à liquide
- 8) Réservoir d'expansion
- 9) Bouchon du réservoir d'expansion
- 9) Sonde de température du liquide de refroidissement
- 10) Sonde pour lampe témoin de température maxi du liquide de refroidissement
- 11) Robinet de chauffage
- 12) Radiateur de chauffage
- 13) Indicateur de température du liquide de refroidissement
- 14) Lampe témoin de température du liquide de refroidissement
- 15) de refroidissement

### *a) Le radiateur*

C'est un échangeur air-eau. Le liquide de refroidissement chaud traverse de fines de canalisation autour desquelles l'air circule.

### *b) Le circuit intérieur au moteur*

Le liquide de refroidissement circule dans des alvéoles situées autour des cylindres et dans le culasse. Pour améliorer le dégazage du bloc moteur et de la culasse, aucun noyau de liquide n'est bloqué, il y a toujours un trou à sa partie supérieure. Ces trous de passage du liquide sont calculés pour assurer la circulation de bas en haut sans freinage. À l'arrière du moteur, ils sont plus grands pour faciliter le refroidissement de cette partie (plus chaude).

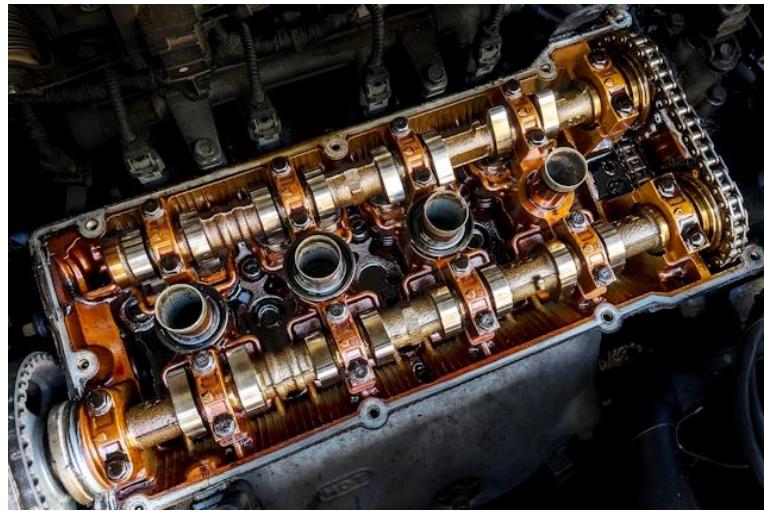
### *c) La pompe à l'eau*

Elle a pour rôle d'accélérer la circulation du liquide de refroidissement dans le circuit.

### *d) Le thermostat*

Son rôle principal est de réguler la température du moteur en obstruant plus ou moins le circuit de refroidissement au niveau de la sortie du moteur, allant vers le radiateur. La température choisie est celle qui facilite la combustion,

## F. Circuit de graissage



*Figure 105 : lubrification d'un moteur*

### 1. Problématique et Fonction globale de circuit de graissage

Un moteur est constitué de tout un tas de pièces métalliques en mouvement. En frottant les unes contre les autres cela génère de la chaleur en raison de la friction engendrée. Pour que les différents mécanismes puissent perdurer dans le temps il faut que ces derniers soient huilés, c'est à dire qu'il y ait une file pellicule de lubrifiant entre les pièces. Voyons donc le principe de la lubrification ainsi que les éléments qui ont besoin d'être huilés. Le circuit de graissage est permettre de fournir de l'huile sous pression aux éléments mobiles du moteur.

### 2. Schéma de circuit

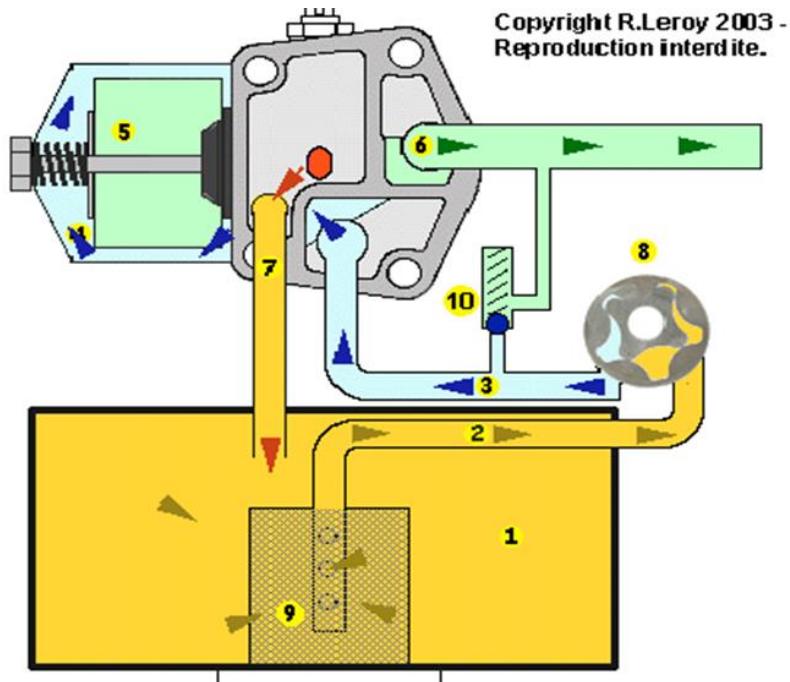
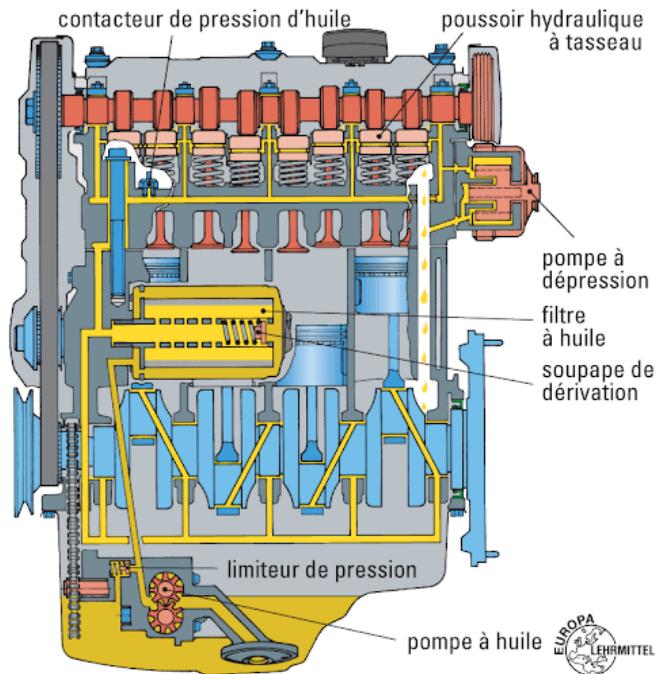


Figure 106 : schéma de circuit de graissage

- |                            |   |
|----------------------------|---|
| 1) Carter                  | 6) Rampe d'huile principale                                   |
| 2) Tube d'aspiration       | 7) Retour de l'huile du clapet de d'échange<br>vers le carter |
| 3) Tubulure vers le filtre | 8) Pompe à huile  |
| 4) Cuve de filtre          | 9) Crêpine d'aspiration                                       |
| 5) Filtre à huile          | 10) Clapet de secrète filtre bouché                           |

### 3. Fonctionnement

L'huile présente dans le carter est aspirée par la pompe à huile (alimentée par le moteur via une courroie), le lubrifiant passe alors par un filtre afin de retenir toute particule qui pourrait s'y trouver. Ensuite, des conduits/cavités dans le haut moteur/cylindres/culasse permettent à l'huile d'être dirigée sous pression vers les endroits qui nécessitent d'être lubrifiées. Ces conduits sont internes à ces pièces et ne peuvent donc pas être vus de l'extérieur.



*Figure 107 : circuit de l'huile*

#### 4. Eléments de traitement d'huile

##### a) Pompe à huile



*Figure 108 : pompe à huile à rotor*

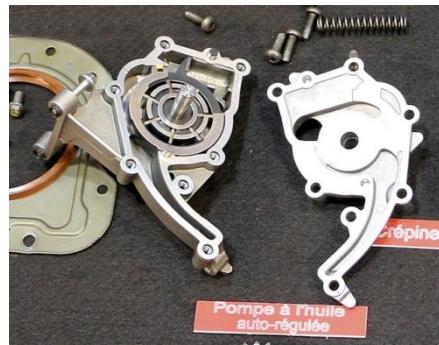


Figure 109 : pompe à huile à palette

La mise en pression est assurée par une pompe constituée de 2 engrenages et située à l'arrière du moteur. La pression obtenue est de l'ordre de 5 à 6 bars, et contrôlée par un clapet de décharge comprenant une bille maintenue en pression par un ressort dont on peut contrôler l'action au moyen d'une vis. La pression exercée par la pompe doit être suffisamment élevée pour assurer la lubrification lorsque le moteur est au ralenti, ce qui implique que la pression sera excessive lorsque le moteur sera à régime élevé.

**b) Carter**



Figure 110 : carter

L'huile est contenue dans le carter en partie basse du moteur. Elle est puisée par une pompe à engrenages qui la distribue vers les parties à lubrifier via un certain nombre d'accessoires qui en régulent et contrôlent, la pression, la température et la pollution en particules métalliques.

*c)*      **Filtre à huile**



*Figure 111 : filtre à huile*

Le filtre à huile il assure la filtration des particules métalliques, les poussières et les déférents déchets qui résultent du fonctionnement du moteur.

## G. Circuit de Démarrage

### 1. Problème de démarrage du moteur thermique

Les moteurs thermiques, pour démarrer demandent à être entraînés à une vitesse de rotation suffisante :

- Moteur essence, 250 tr/min presque 4 tours par seconde.
- Moteur diesel, 350 tr/min presque 6 tours par seconde.

Cette vitesse est nécessaire pour permettre : la vaporisation de l'essence, et une f.e.m d'allumage correcte, et une pression de compression suffisante

### 2. Condition à remplir par le CIRCUIT DE DEMARRAGE

- Fournir un couple supérieur au couple résistant offert par le moteur

Le couple résistant dépend de: Force d'adhérence des pièces en mouvement (moteur et boite).

- Inertie des pièces à mettre en mouvement.
- Action des temps résistants (compression fonction du rapport volumétrique)

### 3. Rôle

Permettre, lorsque le contact est mis de lancer le moteur à combustion interne du véhicule. En effet ce moteur ne peut démarrer seul.

### 4. Composantes

#### a) Le moteur électrique

Doit pouvoir vaincre les résistances aux frottements (viscosité de l'huile), les compressions et l'inertie de l'attelage mobile du moteur du véhicule et lui permettre d'atteindre sa vitesse de lancement. Doit être capable de fournir un couple très importante pour faire tourner le volant moteur.



Figure 112 : dimarreur

### b) RELAIS

C'est un électro-aimant qui assure la commande du lanceur (fonction mécanique) et la mise sous tension du moteur électrique (fonction électrique).

### c) Le lanceur

Il assure ou non la liaison entre le moteur électrique et la couronne du moteur du véhicule.

### d) La fourchette

Elle rend solidaire le solénoïde et le lanceur.

### e) Description

#### - DESCRIPTION

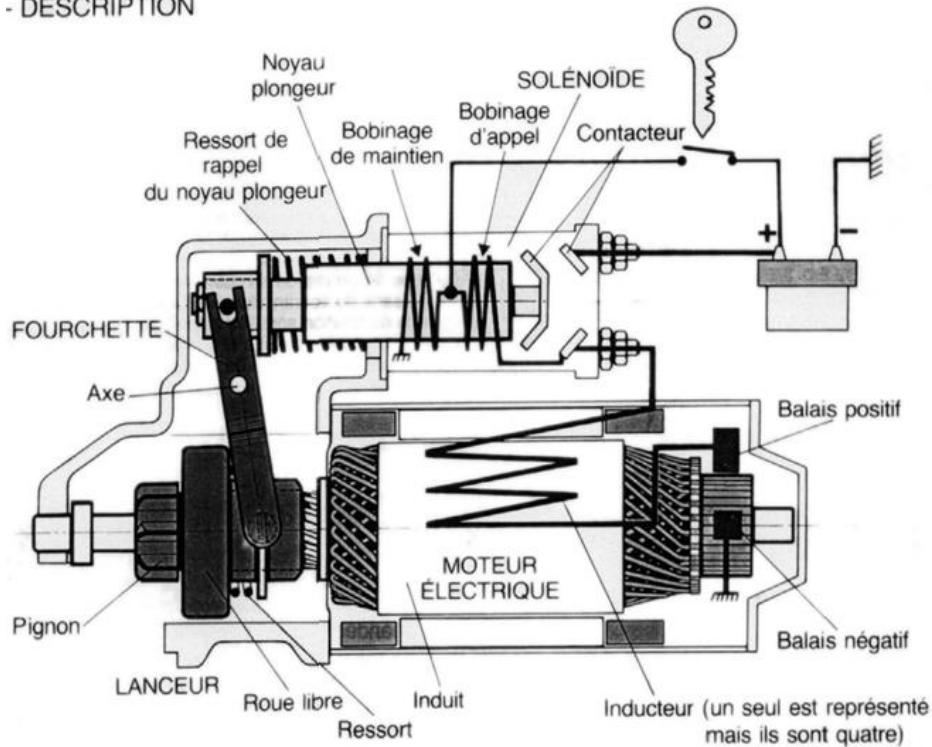


Figure 45: vue d'un démarreur

Figure 113 : description de circuit de démarrage du moteur thermique

## 5. Fonctionnement

### a) Clé de contact en position 'démarrage'

Les 2 bobinages du solénoïde sont alimentés:

L'enroulement d'appel (1) est à la masse à travers les inducteurs, l'induit et le balai de masse.

L'enroulement de maintien (2) est directement à la masse. Le noyau plongeur (3) se déplace vers la droite :

Il entraîne le lanceur (5) grâce à la fourchette (4).

Il ferme l'interrupteur (6) d'alimentation du moteur électrique.

A la fermeture de l'interrupteur (6) le courant de la batterie alimente directement le démarreur

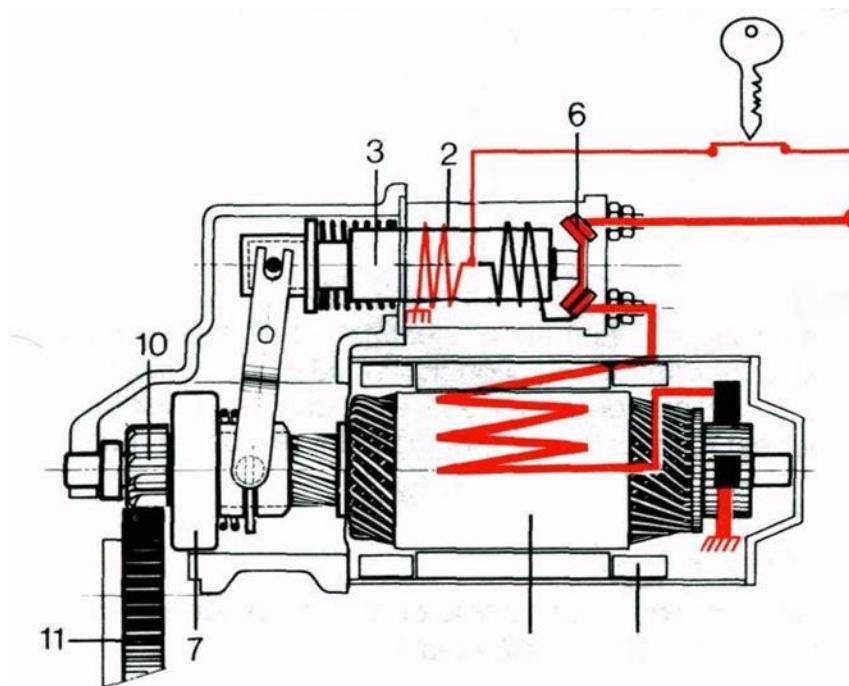


Figure 114 : position de démarrage

### b) Clé de contact relâché

A l'instant où la clé est relâchée, le contact (6) est encore fermé: les bobinages (1) et (2) sont alimentés en série, mais leurs flux sont en opposition et s'annulent. Dès lors le ressort (12) ramène le noyau-plongeur en position de repos, le contact 6 s'ouvre et coupe l'alimentation du moteur; enfin la fourchette ramène également le lanceur en position de repos.

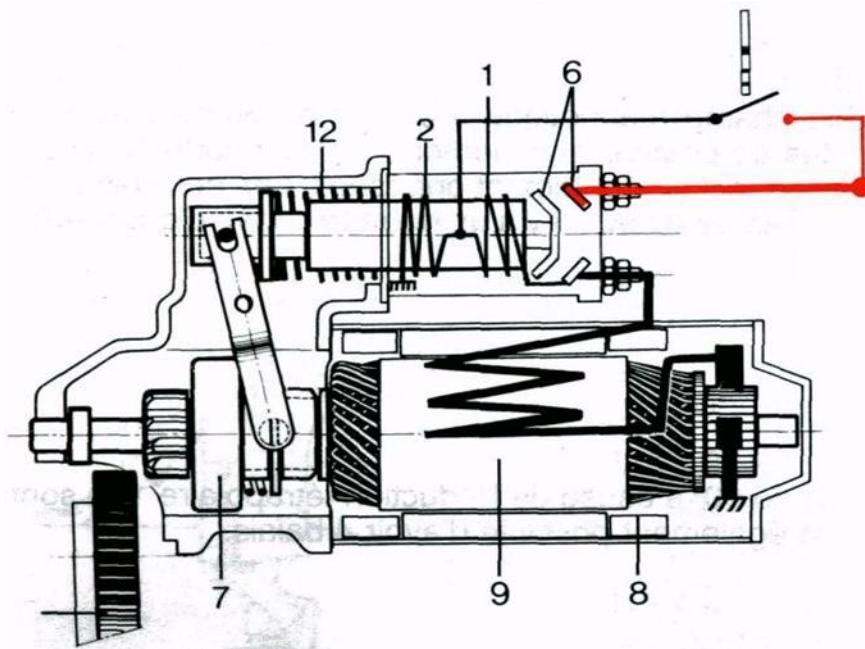


Figure 115 : clé de contact relâché

## H. Déférentes architecture des moteur thermique

Comme vous avez déjà dû en entendre parler, il existe plusieurs "types" de moteurs 4 temps, ou plutôt plusieurs configurations qui influent sur les performances et l'agrément.

### 1. Moteur en ligne

Le moteur en ligne est ce qui se fait le plus dans le monde de l'automobile, et c'est sûrement celui qui équipe votre auto. Les cylindres sont alignés sur un même axe et bougent du bas vers le haut.

Voici ce que l'on peut relever du côté des plus :

Mécanique plus simple donc plus économique à la fabrication (c'est d'ailleurs la structure la plus courante en France).

Consommation généralement plus efficiente (réduite) sur un moteur en ligne

Moins large qu'un moteur en V, mais plus long ... Placé transversalement cela libère un maximum de place pour l'habitabilité

Du côté des inconvénients :

Ce type de moteur prend plus d'espace (en longueur, pas en largeur) sous la capot moteur car les cylindres sont plus "étalés", il faut donc une plus grande surface. Une structure en V permet donc d'empiler les cylindres dans un plus petit volume, ou plutôt dans un volume plus homogène.

Masses internes moins équilibrées que sur un moteur en V. Sur un moteur en ligne il faut généralement un système de contrepoids interne que l'on appelle arbre d'équilibrage. Cependant, il faut préciser que le problème n'existe quasiment plus sur les 6 cylindres en ligne, qui bénéficie alors d'un meilleur équilibrage grâce à la multiplication des masses en mouvement.



Figure 116 : moteur en ligne

## 2. Moteur en V

Le moteur en V a deux lignes côté à côté au lieu d'une seule ligne. Sa forme a donné lieu à son nom : le V.



Figure 117 : moteur en V

Avantages du moteur en V :

L'équilibrage des masses mobiles est meilleure, les vibrations sont donc plus facilement maîtrisables par les ingénieurs.

Centre de gravité assez réduit quand l'ouverture du V est importante (si on arrivait à 180 degrés, le moteur serait alors plat)

Plus court qu'un moteur en ligne.

Les inconvénients :

Plus cher et plus complexe, ce type de moteur revient donc plus cher à l'achat et à l'entretien. Notamment au niveau de la distribution qui doit alors synchroniser deux lignes (sur un moteur en V) au lieu d'une seule.

Consommation qui peut être légèrement supérieure

Quand l'angle du V est réduit cela n'aide pas à réduire le centre de gravité

Plus large qu'un moteur en ligne.

### 3. Moteur VR

Les VR sont des moteurs en V dont l'angle a été réduit pour réduire l'encombrement du moteur. Le meilleur exemple reste celui de la Golf 3 VR6 qui n'avait pas forcément énormément de place sous son capot. Les pistons sont si rapprochés qu'il n'y a pas besoin d'avoir deux culasses (une pour chaque rangée dans le cas des V6). Il a donc pu être placé de manière transversale dans la Golf sachant qu'elle reste une des rares compactes du marché à avoir accueilli un 6 cylindres.



Figure 118 : moteur en VR

### 4. Moteur en W

Les moteurs en W, connus principalement en 12 cylindres (W12) est une sorte de moteur en V doublé. Au final la forme ressemble à un W mais ce n'est pas exactement ça.

En réalité la forme n'est pas exactement un W mais deux V imbriqués les uns dans les autres comme le montre la forme jaune qui suit le parcours des cylindres. C'est finalement un bon moyen de caser un maximum de cylindres en prenant le moins de place possible.

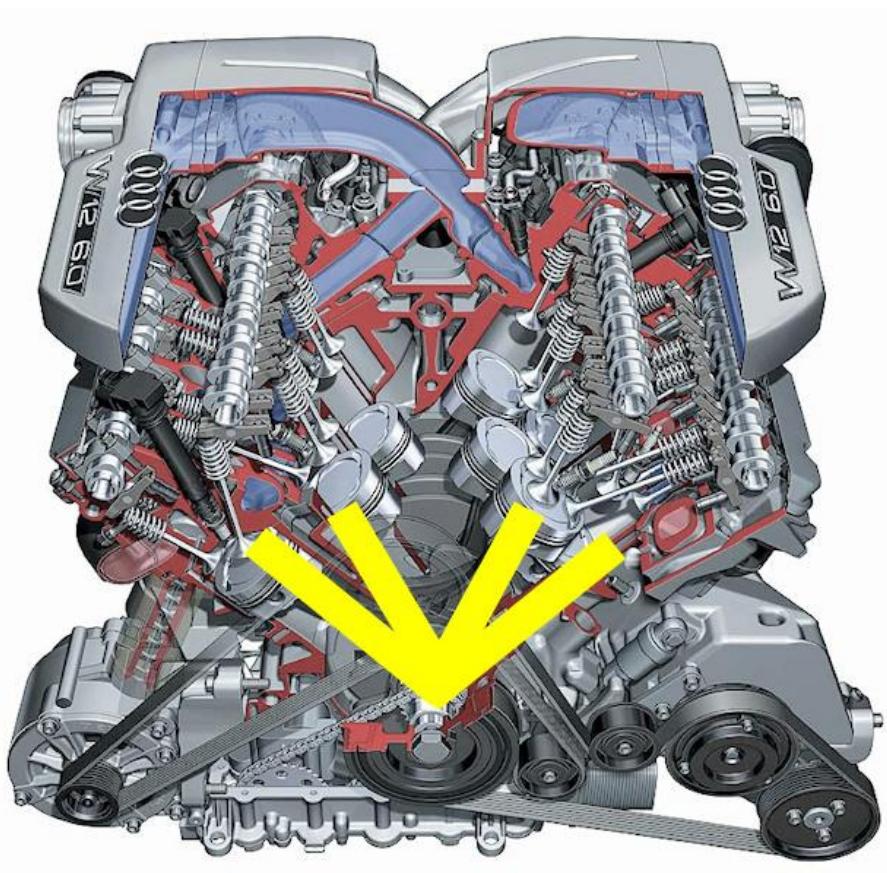
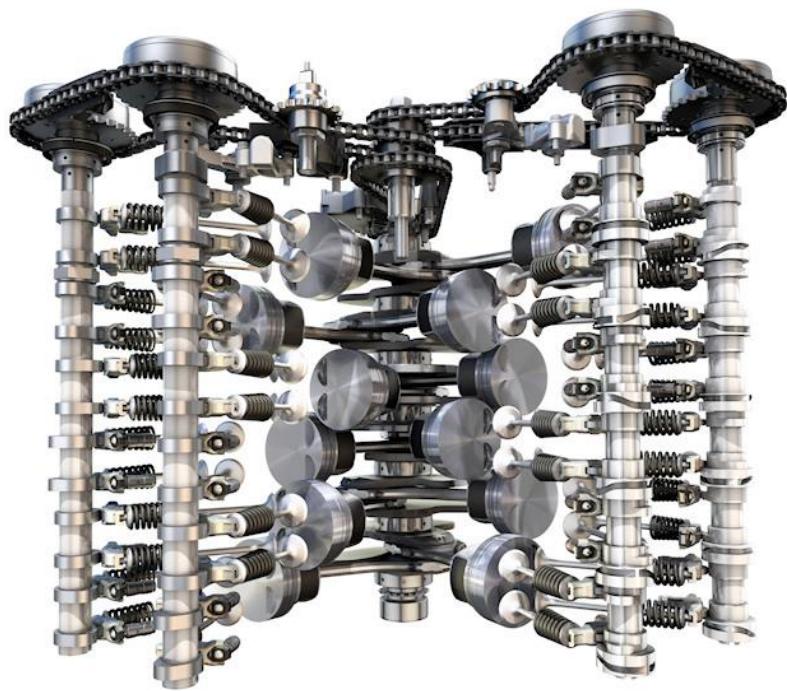


Figure 119 : Moteur en W



*Figure 120 : Moteur en W a l'intérieur*

## V. DIFFÉRENCES PUISSANCES ET RENDEMENT ENTRE LES MOTEURS ÉLECTRIQUES ET LES MOTEURS THERMIQUES

### A. Puissance

En plus d'être très différent au niveau de la transmission, les dispositifs thermiques et électriques n'ont aussi pas du tout la même manière d'envoyer la puissance et le couple.

#### 1. Puissance de moteur électrique

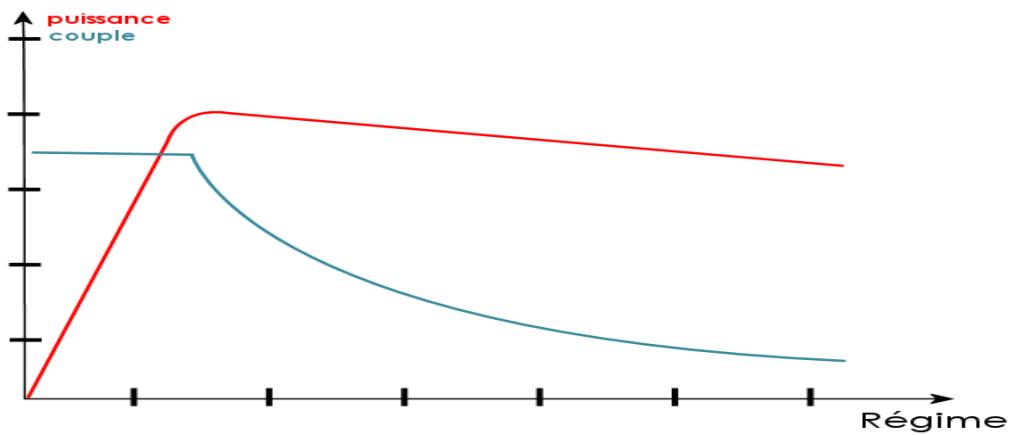


Figure 121 : courbe de puissance et de couple de moteur électrique

Un moteur électrique a beaucoup plus d'allonge car il peut grimper à des régimes très élevés en gardant tout le long un couple et une puissance très importants. Sa courbe de couple démarre donc tout en haut et ne fait que descendre. La courbe de puissance grimpe très vite et chute ensuite tranquillement plus on monte en pointe.

## 2. Puissance de moteur thermique

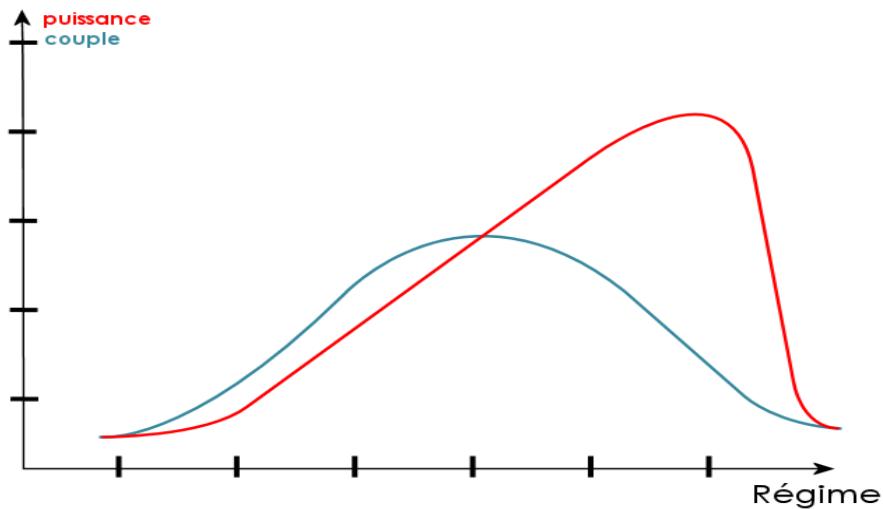


Figure 122 : courbe de puissance et de couple de moteur thermique

Un moteur thermique a une courbe très différente, avec un couple et une puissance maximale développés sur une petite partie de la plage de régime. Et c'est pour cela qu'on aura une boîte de vitesses, afin d'exploiter ce pic de puissance / couple sur toute la phase d'ascension de la vitesse. Les vitesses de rotation (régime maxi) sont limitées par le fait qu'on a affaire ici à des pièces métalliques en mouvement assez lourdes, et vouloir aller trop haut en fréquence moteur met en péril les pièces qui peuvent alors finir par se tordre (d'autant plus que la vitesse accroît la friction et donc la chaleur, ce qui peut rendre les pièces plus "molles" en "fondant" légèrement). On a donc un rupteur sur essence (allumage qui limite) et une fréquence d'injections limite sur les diesels.

## **B. Conclusion entre la puissance et le rendement des moteurs thermique et l'électriques**

Grosso-modo, un moteur thermique a un régime maximal à moins de 8000 tours par minutes tandis qu'un moteur électrique peut aisément atteindre les 16 000 tours tout en ayant un couple et une puissance de bon niveau sur toute cette plage. Le moteur thermique a quant à lui une puissance et un couple élevés que sur une petite plage du régime moteur. Dernière différence, si on va au bout des courbes de l'électrique on remarque qu'elles finissent par plonger d'un coup. Cette limite est liée à la fréquence du courant alternatif couplée au nombre de pôles dans le moteur électrique. Ce qui veut dire que quand on arrive à la vitesse maximale, on ne peut la dépasser puisque le moteur crée une résistance. Si on dépasse cette vitesse on aura alors comme un puissant frein moteur qui vous gênera.

Contrairement à un moteur à combustion thermique dont le rendement mécanique est de 35 % (essence) à 40 % (diesel), le reste étant dissipé sous forme de chaleur, le rendement d'un moteur électrique atteint les 90 %. À l'utilisation, les seules pertes sont liées aux frottements.

## VI. TECHNOLOGIE HYBRIDE DANS LES VEHICULE AUTOMOBILE

### A. Présentation des véhicules hybrides

Comme nous avons déjà vue que les véhicule automobile hybride est constitué de deux source d'énergie mécanique, un ou plusieurs moteurs électrique et un moteur thermique (essence ou diésel) .

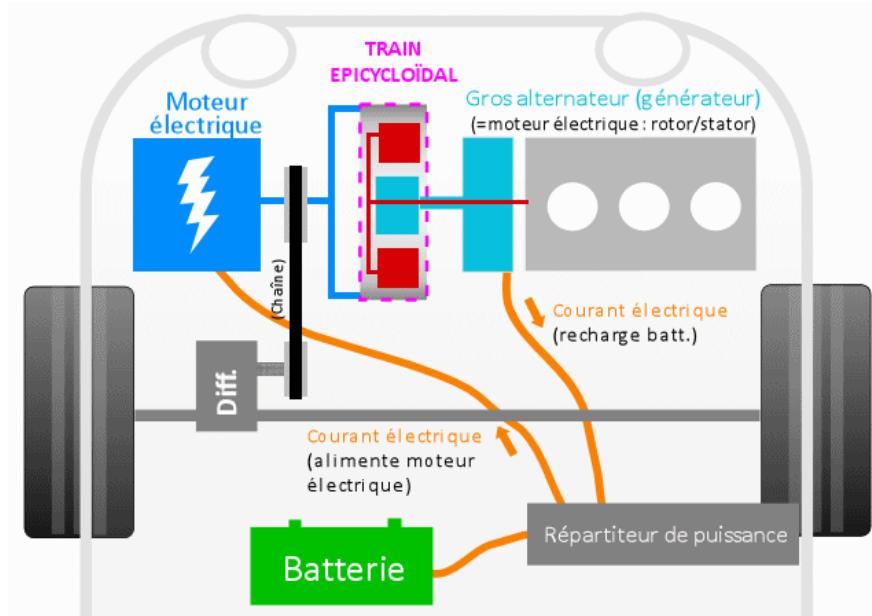


Figure 123 : Architecture de voiture Hybride

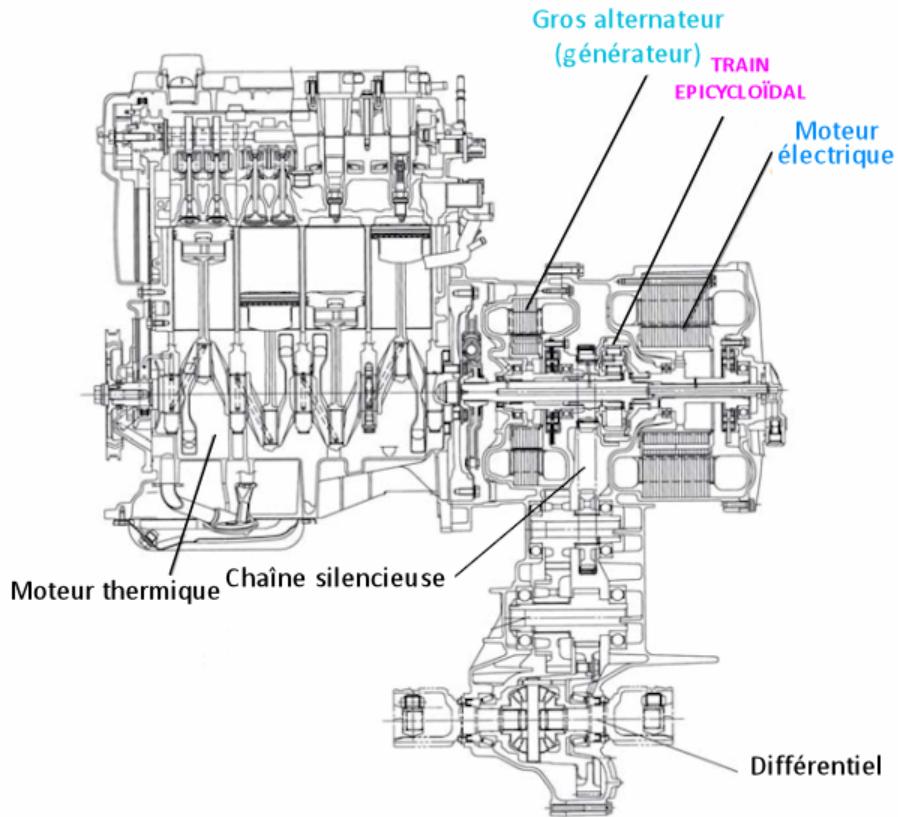


Figure 124 : Moteur Hybride

## 1. Le véhicule électrique et le véhicule thermique conventionnel

### a) Véhicule électrique

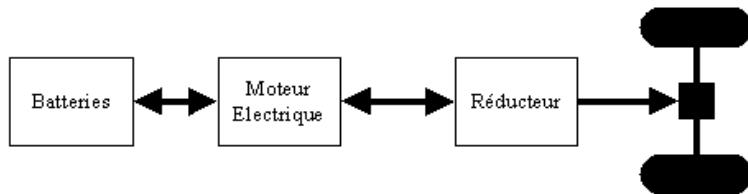


Figure 125 : principe du véhicule électrique

Dans un véhicule électrique tel que celui de la Figure 112, l'énergie de traction est stockée dans un accumulateur ou batterie et est transformée en mouvement par le moteur électrique. En comparaison avec le moteur à combustion interne, cette structure dispose de nombreux avantages : faible bruit, aucune émission polluante, faible coût énergétique... Par contre, les batteries représentent le point faible du dispositif : faible stockage d'énergie vis-à-vis d'un réservoir de carburant, coût élevé, poids important et durée de vie limitée.

### b) Véhicule thermique

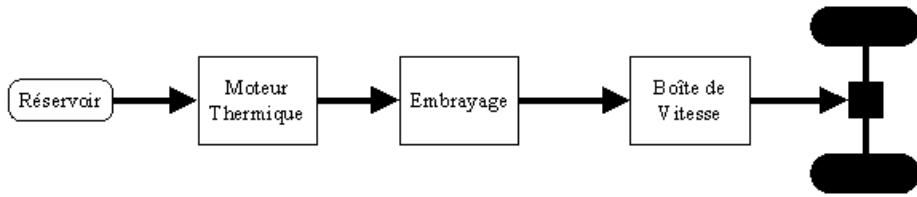


Figure 126 : principe du véhicule thermique

Le véhicule conventionnel est schématiquement composé des trois éléments suivants (Figure 112) : le réservoir, le moteur thermique et la transmission. La transmission a pour objectif de fournir aux roues motrices les forces de propulsion. Pour cela, l'embrayage permet à la fois le démarrage du véhicule et l'interruption du transfert de force entre le moteur et les roues lors du passage des vitesses. Cette boîte de vitesse est nécessaire pour adapter le couple du moteur au besoin de puissance aux roues. Dans ces conditions, la consommation du moteur thermique, dépendant du couple et du régime fournis, ne peut être optimisée qu'à partir du choix de la longueur des rapports de la boîte de vitesse.

## B. Les Déférantes nivaux de Hybridation de véhicule automobile

Avant de voir les différentes manières de rendre une voiture hybride, voyons d'abord le vocabulaire décrivant les différentes hybridations possibles :

Full – Hybride : littéralement "hybride complet" : électrique ayant au moins 30% de la puissance totale. Le moteur électrique (il peut y en avoir plusieurs) est capable d'assurer la propulsion en totale autonomie sur plusieurs kilomètres.

Plung – in hydride : Full Hybride rechargeable. Les batteries peuvent se raccorder directement au réseau électrique. Ce système devient systématique car le nombre de batteries se multiplient pour accroître l'autonomie en 100% électrique, il faut donc pouvoir les recharger autrement qu'en roulant uniquement.

Mild hybrid : dans ce cas, la voiture ne pourra pas rouler en tout électrique, même sur de petites distances. Le thermique sera donc toujours allumé. On peut donner l'exemple de la Honda Insight ou même de l'hybridation par Renault (Hybrid Assist) malgré que ces deux là n'emploie pas la même technologie.

Micro hybrid : l'hybridation se trouve réduite au seul système de mise en veille du moteur thermique et à un redémarrage (Stop and Start avec Alterno-démarreur). Ce système est désormais poussé plus loin avec l'utilisation de moteurs électriques plus puissants (ils ne servent

plus à redémarrer le moteur mais ils l'aident aussi en charge, on peut donc encore citer l'Hybrid Assist d Renault ou encore celui de la Swift 3 hybride)

## C. Hybride parallèle et Hybride série

### 1. Montage série

L'hybride série est composé d'une propulsion intégralement électrique assurée par un ou plusieurs moteurs. En ville, la batterie permet de rouler en mode purement électrique sur des trajets courts. Sur route, un moteur thermique entraîne un alternateur pour assurer la recharge de la batterie et l'alimentation de la motorisation électrique. La batterie stocke l'énergie issue de la conversion du carburant en énergie électrique, quand la puissance demandée aux roues est inférieure à la puissance fournie par le générateur électrique (association moteur thermique – alternateur) et fournit de la puissance dans le cas contraire. Ces transferts d'énergie (Figure 114 et Figure 115) ont pour but d'améliorer le rendement du générateur électrique.

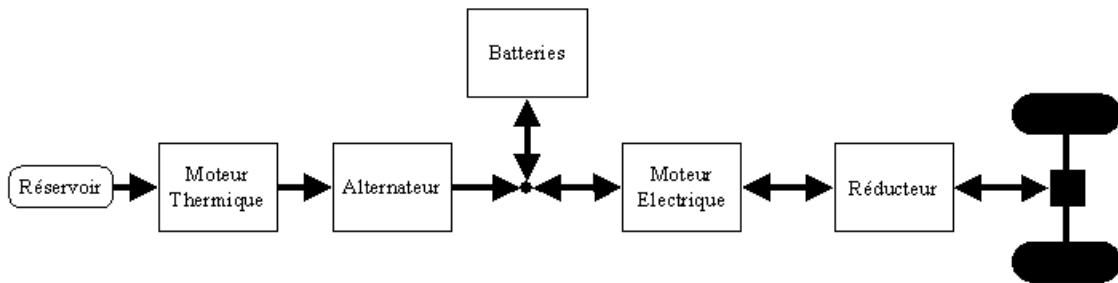


Figure 127 : principe de l'architecture série

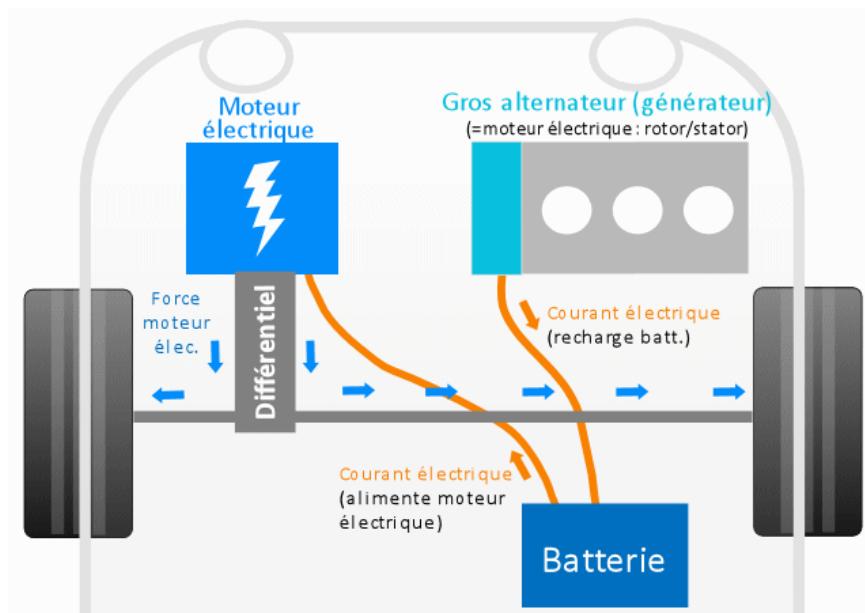


Figure 128 : principe de l'architecture série

Dans cette architecture, le moteur thermique n'est pas lié directement aux roues, ce qui constitue son principal avantage. En effet, pour fournir une certaine puissance aux roues, il existe maintenant deux degrés de liberté pour optimiser la consommation du moteur. D'une part, il est possible de choisir la part de la puissance qui sera fournie par le moteur thermique et celle qui sera issue de la batterie. D'autre part, il est possible de définir la répartition entre couple et régime de la puissance obtenue à l'aide du moteur thermique<sup>1</sup>. Par contre, l'énergie provenant du réservoir passe à travers le moteur thermique et deux machines électriques avant d'atteindre les roues. La succession des conversions énergétiques implique un rendement total relativement faible. Dans cette architecture, les performances du véhicule vont être fixées par les composants électriques (la batterie et les deux machines électriques) et non par la dynamique du moteur thermique.

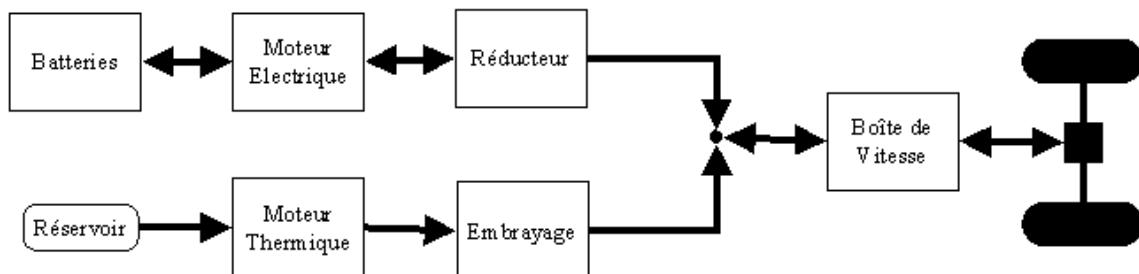


*Figure 129 : BMW i3 hybride série*

Le moteur seul n'a aucun lien avec la transmission et donc les roues, il ne fait presque pas partie de la mécanique tellement il est mis de côté. Ici on peut citer les BMW i3 ou encore la Chevrolet Volt / Opel Ampera (jumelles).

## 2. Montage parallèle

Dans cette configuration les deux moteurs peuvent faire tourner les roues (Figure 117), soit le thermique seul, soit l'électrique seul (sur les Full hybrides) soit les deux en même temps. Le cumul des puissances dépendra de certaines de variables (voir plus bas : cumul des puissances). Notez aussi que certains montages peuvent un peu varier, mais la logique reste similaire : électrique et thermique ont une prise sur les roues via la boîte de vitesse.



*Figure 130 : Principe de l'architecture parallèle*

Cette architecture permet de limiter le nombre de composants supplémentaires à installer. En contrepartie, le système est complexe mécaniquement puisque plusieurs composants sont liés aux roues. Le système perd également un degré de liberté puisque le régime du moteur thermique est imposé par la vitesse du véhicule. Plus précisément, pour fournir une certaine puissance aux roues, il est seulement possible de choisir la répartition du couple entre le moteur thermique et la batterie<sup>2</sup>. Le moteur thermique est donc susceptible de fonctionner sur une plus large bande de vitesse. On peut citer comme exemple les hybrides allemands comme les systèmes e-Tron / GTE. Ce système se répand de plus en plus et devrait devenir majoritaire.



Figure 131 : Volkswagen golf 7 GTE hybride

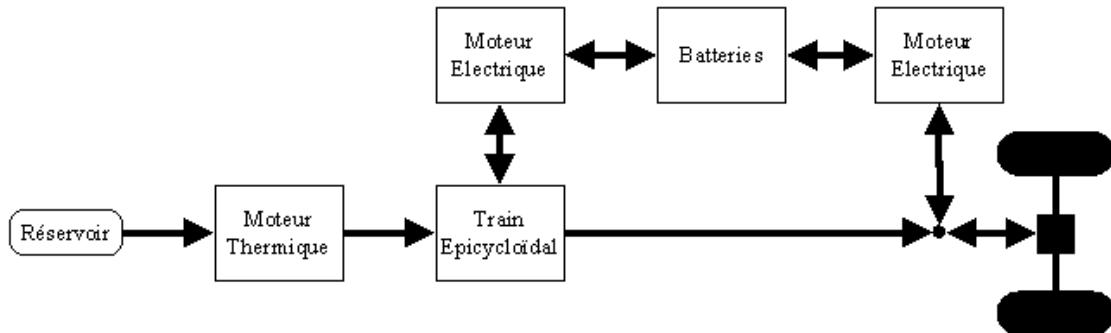


Figure 132 : moteur hybride A3 e-tron hybride

### 3. La combinaison de deux

D'autres architectures combinant les motorisations thermiques et électriques peuvent aussi être envisagées pour associer sur un même véhicule les fonctionnements en hybride série et en hybride parallèle, par exemple en utilisant un train épicycloïdal (Figure 120). En multipliant les flux d'énergie possibles, ces architectures offrent un plus grand potentiel de gain en

consommation. Par contre, elles multiplient également le nombre de composants et complexifient leurs liens.



*Figure 133 : Principe de l'architecture à dérivation de puissance.*

Cette description des véhicules hybrides à partir de l'étude de l'organisation des organes permet également de définir des modes de fonctionnement. Selon ce nouveau critère, il est possible de distinguer deux grandes catégories : le fonctionnement nécessitant une seule source d'énergie et le fonctionnement dit hybride, utilisant simultanément les deux sources.



*Figure 134 : Exemple de montage série-parallèle toyota HSD*

## D. Principe de base des moteur dans les véhicule automobile hybride

### 1. Les modes de fonctionnements

Un véhicule hybride dispose d'au moins deux sources d'énergie dont l'une est une source réversible. Il est donc susceptible de disposer de plusieurs modes de fonctionnement utilisant une seule source d'énergie ou les deux simultanément. De plus, comme dans le cas du véhicule électrique, le véhicule hybride dispose de la faculté de récupérer dans sa batterie une partie de l'énergie de décélération.

## **2. Les modes de fonctionnements à une seul source d'énergie**

Le véhicule hybride, utilisant uniquement sa batterie pour assurer sa traction, se comporte comme un véhicule électrique. On parle alors de traction électrique ou mode ZEV (Véhicule qui ne produit aucune émission polluante (le véhicule électrique par exemple). puisqu'il ne se produit aucune émission polluante. Le moteur thermique peut également, dans certaines conditions, assurer seul la traction du véhicule, ce qui constitue le second mode à une seule source d'énergie.

### **3. Les modes de fonctionnement Hybrides**

Dans un véhicule hybride, les deux sources d'énergie peuvent également fonctionner simultanément. Le moteur thermique peut assurer à la fois la traction du véhicule et la recharge de la batterie lorsqu'il fournit plus de puissance que celle demandée aux roues. On parle alors du mode recharge. Dans le cas de fortes demandes (accélérations), pour augmenter les performances du véhicule, il est également possible de solliciter les deux sources d'énergie pour fournir la puissance motrice. C'est le phénomène dit de boost électrique.

## **E. Echanges d'énergie mécanique de rotation entre le moteur thermique et le(s) moteur(s) électrique(s)**

Pour les véhicules hybrides, les lois de gestion de l'énergie consistent à déterminer la répartition de la puissance demandée par le conducteur entre les différentes sources d'énergie, de manière à optimiser le fonctionnement de la chaîne de traction.

### **1. Le cas d'alimentation des moteur au même temps**

Lorsque vous besoins d'un grand couple ou d'une vitesse maximal et tu peux sur le pédale d'accélération au niveau maximale (pleine accélération) dans une vitesse  $80 < V < V_{max}$ , le moteur électrique et le moteur thermique tournant maximum puissance fournie par les moteurs.

### **2. Le cas d'alimenter le moteur électrique seul**

Dans le conduite normale  $0 < V < 60$ , et dans le départ - l'arête le moteur électrique tourne seul, et la consommation de carburant nulle.

### **3. Le cas d'alimenter le moteur thermique seul**

Dans le cas décélération le moteur électrique ou l'alternateur recharge la batterie par la transformation d'énergie mécanique de rotation fournie par les roues ou par le moteur thermique en énergie électrique, et dans le cas de freinage.

## VII. CONCLUSION

Cette étude de a pour objectif principale d'analyse et étudier théoriquement l'architecture des moteurs employés en automobile Hybride, parce qu'il est très important pour suivre le rythme de ce progrès technologique des véhicules automobiles Hybrides.

Nous conclurons que la motorisation Hybride c'est l'association d'un moteur thermique essence ou diésel à un moteur électrique triphasé pour l'augmentation de la puissance mécanique sortant, ou plusieurs moteurs électriques. Il existe plusieurs niveaux d'hybridation full – Hybrid, plug in - hybrid, mild – hybride et le micro hybride. On peut aussi distinguer trois types de voiture hybride : la voiture Hybride en parallèle ce mode de fonctionnement allie l'énergie thermique et l'énergie électriques pour déployer une puissance maximale lors d'accélération. Quand à elle, la voiture hybride série, ne sollicite que le moteur thermique est totalement inactif ainsi aucun dioxyde de carbone est émis. Enfin la voiture hybride en parallèle et en série la combinaison de deux utilise l'énergie des deux moteurs, sans cette association l'automobiliste devrait charger son véhicule en électricité. Dans tous les moteurs électriques sont composés d'un stator (la partie fixe du moteur) et d'un rotor (la partie mobile du moteur) alors que le moteur thermique contient 4 phases qui le distinguent. Bien que ses deux moteurs soient différents, combinés ensemble il donne plus de puissance à la voiture et permettant de mieux respecter l'environnement. La voiture hybride admet des avantages mais aussi des inconvénients néanmoins les avantages sont plus imposants que ces derniers. La voiture hybride n'a donc pas de compromis côté écologique vue que très peu de CO<sub>2</sub>, gaz dangereux contribuant à l'effet de serre est émis de plus d'un point de vue économique bien que le prix de la voiture reste élevé la consommation en carburant n'est pas conséquente.