

I.1. Introduction :

Le vilebrequin a une importance dans la conception et le fonctionnement de moteur. Il est lié à la disposition générale de l'automobile et aux paramètres du moteur.

Dans ce chapitre on va faire l'étude bibliographique sur le vilebrequin.

I.2. Description du vilebrequin dans son environnement

Le vilebrequin, ou arbre moteur, est une pièce maîtresse du moteur thermique. Son rôle consiste à transformer, par l'intermédiaire des bielles, les mouvements de translation des pistons en un mouvement de rotation transmis à la boîte de vitesse (Figure I.1). D'un point de vue mécanique, cette pièce subit des sollicitations cycliques fortes.



Figure I.1. Ensemble vilebrequin - bielles – pistons d'un moteur thermique 6 cylindres

I.3-Définition (Le vilebrequin) :

Le vilebrequin est un dispositif mécanique qui permet, par l'intermédiaire d'une bielle, la transformation du mouvement linéaire rectiligne du piston en un mouvement de rotation continu, et inversement. Présent dans la plupart des moteurs à piston il assure la transmission de l'énergie de combustion du carburant dans les cylindres en énergie mécanique disponible sur l'arbre moteur. C'est l'élément principal du système bielle-manivelle [01].

Dans un moteur à pistons, le vilebrequin constitue l'arbre moteur. Il entraîne la transmission primaire, l'alternateur, les pompes, les contre-arbres d'équilibrage, et l'arbre à cames dans le cas du moteur thermique quatre temps.

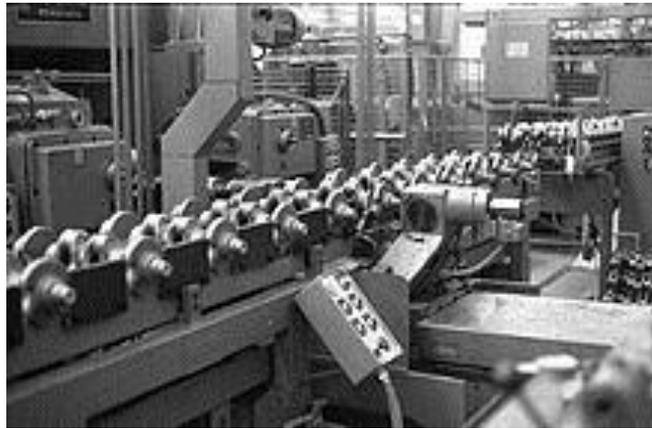


Figure I.2. Usine Volkswagen de fabrication de vilebrequins.

I.4- Les différents types de vilebrequin:

I.4.1- Le vilebrequin assemblé:

Ce type de vilebrequin est peu coûteux car l'usinage des pièces est simple. Il est composé d'un axe faisant office de maneton et de deux masses arbres. Les vilebrequins assemblés sont peu rigides, ils sont donc généralement utilisés pour les moteurs monocylindres de faible cylindrée. C'est le cas par exemple des molyettes, scooters et tronçonneuses.

L'assemblage du vilebrequin est effectué une fois que la bielle monobloc a été introduite sur l'axe servant de maneton. La liaison pivot entre la bielle et l'axe est assurée par une cage à aiguilles.

Les moteurs deux temps possèdent toujours des vilebrequins de ce genre compte tenu du fait qu'il n'est pas possible d'avoir une lubrification de type hydrostatique avec coussinet. Cela s'explique par le fait que le mélange allant à la chambre de combustion passe nécessairement par le vilebrequin. Ainsi, sur les moteurs deux temps, c'est l'huile, ajoutée à l'essence, qui se charge de procurer une certaine lubrification minimale aux roulements ainsi qu'aux pistons/segments.



Figure I.3. Le vilebrequin assemblé.

I.4.2- Le vilebrequin monobloc:

Les vilebrequins multi-cylindre sont monoblocs et requièrent l'utilisation de bielles démontables. Ce type de vilebrequin offre une meilleure rigidité et permet d'y mettre un plus grand nombre de manetons et donc de pistons. Les paliers hydrostatiques sont chers à mettre en œuvre puisqu'ils nécessitent une circulation d'huile sous pression. C'est pourquoi ces vilebrequins sont utilisés pour les moteurs de forte cylindrée. C'est le cas des automobiles, bateaux et engins de chantier.

Un vilebrequin monobloc impose l'utilisation de bielles démontables dont les deux demi-paliers sont vissés autour des manetons. Deux demi-bagues sont insérées dans les parties de la bielle ; leur forme spécifique permet de maintenir la continuité du film d'huile entre la bielle et son maneton.

Il en va de même pour la liaison entre le bâti, communément appelé bloc moteur, et le vilebrequin au niveau des tourillons. L'huile sous pression est amenée à tous les tourillons ; elle est ensuite acheminée aux manetons par l'intermédiaire d'un perçage traversant les masses.



Figure I.4. Le vilebrequin monobloc.

I.5- Composition d'un vilebrequin:

Le vilebrequin se compose de plusieurs tourillons alignés, sur lesquels il tourne. Entre ces paliers se trouvent, excentrés, des manetons, sur lesquels sont montées les bielles. L'excentricité E , distance entre l'axe d'un maneton et l'axe d'un tourillon, définit la course C du piston.

On obtient alors : $C = 2E$. Cette distance détermine en partie la cylindrée du moteur.

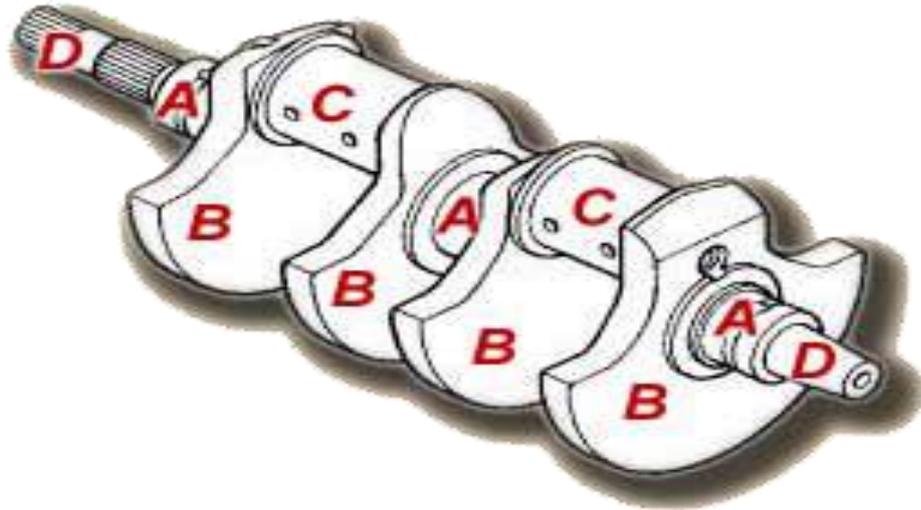


Figure I.5. Composition d'un vilebrequin.

I.5.1- les portées A: Un tourillon est la partie cylindrique mâle d'un arbre réalisée pour assurer un guidage en rotation.

Les tourillons sur les arbres tournants (vilebrequin, arbre à cames) sont très souvent maintenus dans des paliers par l'intermédiaire de coussinet. Dans les vilebrequins, il ne faut pas confondre les tourillons, situés sur l'axe de rotation du vilebrequin, avec les manetons, excentrés, sur lesquels sont articulées les bielles.

I.5.2- Masses d'équilibrages (contre-poids) B : Les manivelles peuvent être munies de masses d'équilibrages appelées contre-poids. Ces masses permettent l'équilibrage dynamique du vilebrequin. Leur but est de réduire les vibrations dues au mouvement alternatif des pistons et à la dissymétrie éventuelle du système de manivelle (moteur 3 et 6 cylindres).

Ces masses ne sont pas toujours présentes. Les moteurs anciens n'ont bien souvent pas de ces contre-poids. Les moteurs à combustion de nos jours en sont généralement pourvus. Ces masses offrent un balancement local. Si nous prenons un moteur quatre cylindres en ligne, avec les masses,

le moteur se retrouve à avoir quatre balancements locaux. Si l'on regarde le moteur en entier, ces balancements locaux ne sont pas nécessaires, ainsi, un moteur dépourvu de ces masses peut ne pas vibrer, mais le vilebrequin ainsi que les coussinets subissent davantage de contraintes [02].

I.5.3- les manetons C : Le maneton est la partie cylindrique d'un vilebrequin assurant la liaison pivot avec la bielle grâce à deux demi-coussinets servant à réduire la friction entre le vilebrequin et la bielle. La surface du maneton est usinée au micromètre près puis traitée thermiquement afin d'en augmenter la dureté.

I.5.4- les queues de vilebrequin D: c'est l'extrémité du vilebrequin, elle peut comporter des roues crantées qui entraîneront les autres éléments du moteur [03].

I.5.5- Nombre de paliers : Le vilebrequin est guidé en rotation par deux paliers au moins. En multipliant le nombre de paliers, on diminue les efforts sur le vilebrequin mais on complexifie le carter moteur. Le choix relève d'un compromis entre considérations techniques et économiques. Une diminution du nombre de paliers réduit les coûts de fabrication mais limite les performances (régimes plus faibles et puissance réduite). Autre conséquence, un nombre de paliers réduit augmente la distance entre les portées du vilebrequin. Le moment de flexion exercé par la poussée de la bielle sur la manivelle devient plus important et le vilebrequin en est fragilisé [04].

Beaucoup de moteurs modernes à quatre cylindres sont équipés d'au moins trois paliers, voire cinq. Il en est de même pour les moteurs comportant un grand nombre de cylindres (6,8 ou plus). Cette solution plus coûteuse permet d'atteindre des puissances spécifiques plus élevées et de réduire le poids total du moteur. Des forces d'extension s'exercent également sur les tourillons, notamment lorsque deux manivelles adjacentes sont dans le même plan d'où la nécessité de contrepoids [05].

I.6- Architectures:

I.6.1. Vilebrequin de moteur monocylindre:

MONOCYLINDRE: calage à 360°

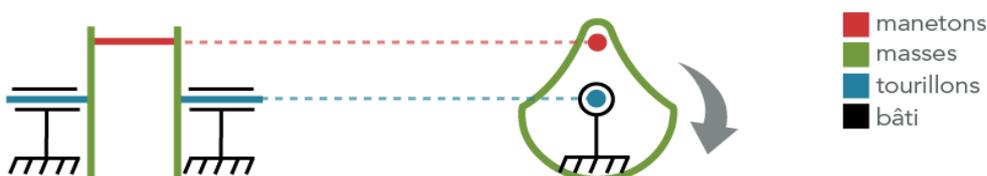


Figure I.6. Vilebrequin de moteur monocylindre.

Le calage est à 360° .

I.6.2. Vilebrequin de moteur bicylindre:

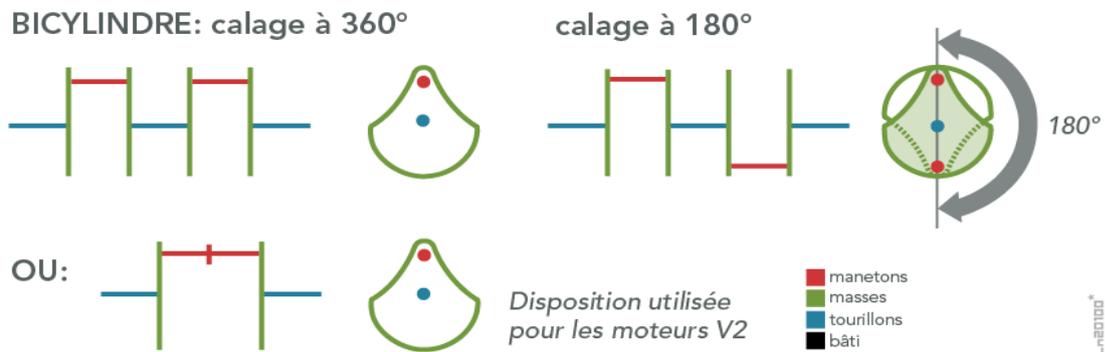


Figure I.7. Vilebrequin de moteur bicylindre.

Sur les moteurs à deux cylindres, les deux manetons peuvent être alignés (calage à 360°) ou en opposition (calage à 180°). La présence d'un tourillon entre les deux manetons n'est pas obligatoire, mais souhaitable dans le cas du calage à 360° . Sur les moteurs à plat (boxer) bicylindre, les deux manetons sont diamétralement opposés (calage à 180°) ; il en va de même pour les quatre cylindres (flat four) et les six cylindres à plat (flat six).

Sur les motos à moteurs bicylindre en ligne, on trouve de plus en plus souvent des moteurs calés à 270° comme sur la Honda NC700, la Triumph Street Twin 900 ou encore les Yamaha XT1200Z et Yamaha TRX850.

I.6.3. Vilebrequin de moteur à trois cylindres en ligne:

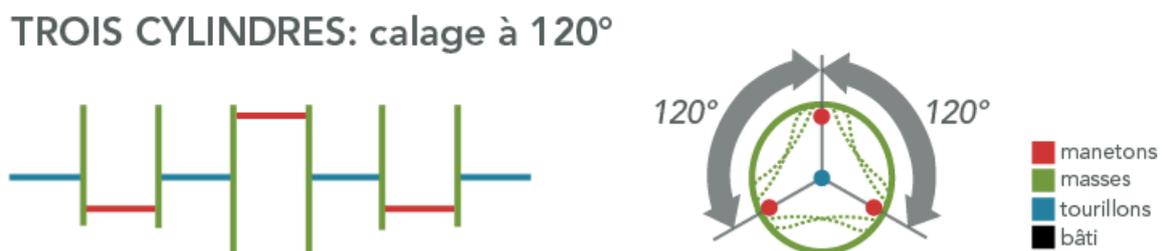


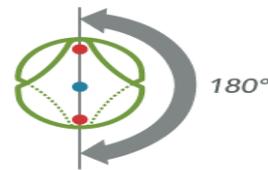
Figure I.8. Vilebrequin de moteur à trois cylindres en ligne.

Sur les moteurs à trois cylindres disposés en ligne, le calage est, habituellement, à 120° . Ce type de vilebrequin est utilisé sur les moteurs de Smart. On a aussi vu un calage à 180° (certains modèles de Laverda 1000).

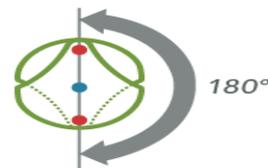
I.6.4. Vilebrequin de moteur à 4 cylindres en ligne:

QUATRE CYLINDRES EN LIGNE: calage à 180°

À 5 tourillons



À 3 tourillons



■ manetons
■ masses
■ tourillons
■ bâti

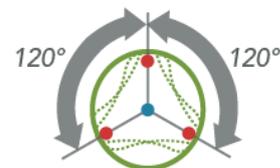
LINEA

Figure I.9. Vilebrequin de moteur à 4 cylindres en ligne.

Sur les moteurs à quatre cylindres, les deux manetons extérieurs sont alignés, et les deux manetons intérieurs sont alignés entre eux, à 180° avec les extérieurs.

I.6.5. Vilebrequin de moteur à 6 cylindres en ligne:

SIX CYLINDRES EN LIGNE: calage à 120°



■ manetons
■ masses
■ tourillons
■ bâti

LINEA

Figure I.10. Vilebrequin de moteur à 6 cylindres en ligne.

Sur les moteurs à 6 cylindres en ligne, le calage est à 120° ; les manetons sont alignés 2 à 2. C'est l'équivalent de deux vilebrequins de trois cylindres en ligne disposés l'un derrière l'autre.

Sur les moteurs en V, il y a, le plus souvent, deux bielles par maneton, soit côte à côte (maneton rallongé), soit entrecroisées avec une bielle "à fourche" et une bielle normale (Harley-Davidson). Il peut aussi y avoir une bielle "maîtresse" articulée sur le maneton, et une bielle "secondaire" articulée sur la bielle maîtresse.

I.6.6. Vilebrequin de moteur à 4 cylindres à calage dit "Cross Plane":

QUATRE CYLINDRES EN LIGNE: calage à 90°

À 3 tourillons



■ manetons
■ masses cyl 1 et 4
■ masses cyl 2 et 3
■ tourillons

Figure I.11. Vilebrequin de moteur à 4 cylindres.

Développé en MotoGP (par Yamaha notamment), ce moteur, aussi appelé moteur "Big Bang" Dans ce moteur il y a un maneton de vilebrequin tous les 90°. Ce décalage permet de supprimer les efforts d'inertie de 2^{ème} ordre engendrés par la rotation du moteur (effort qui augmente avec le carré de la vitesse). Ainsi ce moteur n'engendre pas de vibration parasite à la roue. De par ce décalage, on trouve une combustion irrégulière (270° 450° 540° 720°).

Les efforts d'inertie du 1er ordre s'annulent entre cylindres (cylindres 1 et 3 "s'autoannulent" comme le 2 et 4). Ce système génère d'autres vibrations qui sont compensées par un arbre d'équilibrage. Cette irrégularité du couple évite le décrochage en courbe et permet au pilote un meilleur ressenti du moteur.

I.7- Angle de calage des manivelles:

L'angle de calage des manivelles correspond à l'angle que forment entre elles deux manivelles. Les angles de calage peuvent varier selon :

- le cycle du moteur (. deux temps ou . quatre temps);
- le nombre N de cylindres;
- la disposition des cylindres (en ligne ou en V).

Ainsi, un moteur. deux temps en ligne réalise une course motrice. Chaque tour de vilebrequin.

Donc :

- Angle de calage = $\frac{360}{N}$

Pour le moteur à quatre temps en ligne, on a une course motrice pour deux tours de vilebrequin.

Dans ce cas :

- Angle de calage = $\frac{2*360}{N}$

Par ailleurs, dans les moteurs en V, comme chaque manivelle supporte deux bielles, on ne considère qu'une seule rangée de cylindres, soit N/2, et ce rapport modifie les formules.

On obtient alors :

- Angle de calage pour les moteurs à deux temps en V = $\frac{360}{N/2}$
- Angle de calage pour les moteurs ^ quatre temps en $\frac{720}{N/2}$

I.8- Equilibrage :

I.8.1- Principe:

Comme tout élément tournant, un vilebrequin doit être équilibré de façon statique et dynamique. L'équilibrage du vilebrequin est nécessaire pour réduire les vibrations du moteur causées par les forces et moments produits par la pression des gaz dans les cylindres et par les pièces en mouvement alternatif et de rotation, et pour diminuer les charges exercées sur les coussinets de la ligne d'arbre.

Les forces provoquées par les pièces en mouvement liées au vilebrequin sont de deux types : les forces centrifuges et les forces alternatives qui provoquent les vibrations. Il est cependant impossible d'obtenir un équilibrage parfait : on fait donc appel à des contre-arbres d'équilibrage (l'ajout de contrepoids) qui annuleront tout ou partie des vibrations [06].

I.8.2- Forces centrifuges:

L'équilibre statique du vilebrequin est obtenu lorsque le centre de gravité se trouve sur son axe de rotation. Un équilibrage statique parfait n'implique pas nécessairement un bon équilibre dynamique. En effet, le vilebrequin peut donner lieu à un moment de flexion dû aux forces centrifuges d'autant plus grandes que le mouvement de rotation est important [07].

I.8.2.1- Équilibre statique:

Les forces centrifuges, qui s'exercent sur le vilebrequin à deux manivelles d'un moteur quatre temps boxer, sont dans des plans différents et séparés par une distance égale à la distance des axes des cylindres. Étant donné que le moment résultant est le produit de la force centrifuge par cette distance, le vilebrequin est équilibré dynamiquement par un moment égal et opposé par l'ajout de contrepoids [07].

L'équilibrage ne pose pas de problème quand il s'agit de vilebrequins possédant un nombre de manivelles supérieur à deux. La structure fait que les manivelles ont « une disposition angulaire telle que les combustions se produisent à distances égales les unes des autres ». Par conséquent, la disposition des manivelles réalise l'équilibre statique sans l'ajout de contrepoids [07].

I.8.2.2- Équilibre dynamique:

L'équilibre dynamique est obtenu sans adjonction de poids si le vilebrequin, équilibré statiquement au préalable, admet un plan de symétrie perpendiculaire à l'axe de rotation, « par rapport auquel les manivelles sont symétriques en nombre, position et dimensions ». Pour les autres cas, l'équilibrage nécessite des contrepoids. La plupart des vilebrequins équilibrés dynamiquement dans leur ensemble ont également leurs manivelles équilibrées individuellement par des contrepoids. En munissant de contrepoids chacune des manivelles, on réduit ou annule les moments de flexion individuelle qui, en agissant sur les diverses parties du vilebrequin, tendraient à le faire fléchir [07].

I.8.2- Forces alternatives:

Les manetons subissent également des forces dues aux masses animées d'un mouvement alternatif. Ces forces, causées par les variations de vitesse du piston et de la bielle, se subdivisent en forces alternatives du premier et du deuxième ordre.

Les premiers ordres atteignent leur maximum à chaque fois que le piston se trouve au point mort haut et au point mort bas. Une force du premier ordre peut être équilibrée par la composante suivant l'axe des cylindres d'une force centrifuge produite par une masse égale à celle de la masse alternative et appliquée au vilebrequin en opposition avec le maneton considéré. Il apparaît cependant une force de même amplitude et de même fréquence, normalement à l'axe du cylindre. La moitié de la masse alternative est équilibrée par des contrepoids. Il reste donc, exercée sur l'axe du cylindre, la moitié de la force alternative du premier ordre, tandis que l'autre moitié est transformée en une force perpendiculaire à l'axe du cylindre. Pour les moteurs multi-cylindriques, l'équilibre statique du vilebrequin engendre l'équilibre des forces alternatives du premier ordre. De même, l'équilibre dynamique engendre l'équilibre des moments dus aux forces alternatives du premier ordre [08].

Les deuxièmes ordres varient avec une fréquence double de celle des premières. Il n'existe donc pas par conséquent de possibilité de les réduire au niveau de la fabrication du vilebrequin puisqu'elles varient avec une fréquence double du régime de rotation. Dans les voitures automobiles, les vibrations causées par les forces du deuxième ordre sont absorbées par des dispositifs spéciaux de suspension du moteur [08].

I.9- Fabrication:

En fabrication "grande série", les vilebrequins sont généralement en fonte GS moulée pour les moteurs de faible puissance spécifique (jusqu'à 40 kW/L). Pour les moteurs plus puissants, suralimentés ou turbocompressés (puissance spécifique de 40 à 60 kW/L), les vilebrequins sont en acier forgé. On utilise alors des aciers faiblement ou moyennement alliés, enrichis au nickel-chrome ou au chrome-molybdène-vanadium suivant l'intensité des sollicitations. Le forgeage est réalisé par opérations successives de matriçage à chaud et les formes parfois complexes des contrepoids sont réalisées dans le même processus [09] .

Les portées mécaniques (tourillons et manetons) sont réalisées par tournage (mise en position excentrée du vilebrequin dans le cas du tournage des manetons). Elles sont ensuite rectifiées très précisément pour obtenir un état de surface adéquat (friction sur coussinet). Elles subissent ensuite un traitement thermique superficiel afin d'en augmenter la dureté et de réduire l'usure. Finalement, Les portées sont durcies par cémentation, par trempe superficielle ou par nitruration. La trempe superficielle consiste en un chauffage de la surface par induction électrique ou par la flamme d'un chalumeau puis par un refroidissement rapide à l'eau.

Dans le cas des vilebrequins à paliers hydrostatiques, des conduits percés relient l'orifice d'alimentation avec les tourillons et les manetons afin de permettre la circulation d'huile sous pression. Ces conduits parcourent l'ensemble du vilebrequin et traversent les manivelles.

En final, le vilebrequin subit un équilibrage statique et dynamique par enlèvement de matière. Afin de parfaire l'équilibrage dynamique, celui-ci peut être complété par des perçages peu profonds sur la périphérie des contre-poids [09].

Les vilebrequins de véhicules de compétition peuvent être réalisés par usinage dans la masse, ce qui permet un grand choix de matériaux, en particulier des aciers alliés à très haute performance.

Les premiers vilebrequins pour les véhicules de série étaient dépourvu de contre-poids car trop complexe à réaliser.

I.10- Distribution des temps du moteur:

Le vilebrequin permet la distribution, entre les cylindres, des différents temps (admission, compression, combustion/détente, échappement). Par exemple, dans un moteur à deux cylindres deux temps, le vilebrequin devra être construit de manière à avoir la distribution suivante :

- cylindre 1 :
- temps 1 : admission ou combustion/détente
- temps 2 : compression ou échappement
- cylindre 2 :
- temps 1 : compression ou échappement
- temps 2 : admission ou combustion/détente

Le choix entre admission ou détente et entre compression ou échappement s'effectue par un arbre à cames qui gère l'ouverture et la fermeture des soupapes.