



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine: Sciences et Techniques.
Filière : Génie Mécanique.
Spécialité: Construction Mécanique.
Réf.:...

Présenté et soutenu par :
RABAH Saddek

Thème

Etude et fonctionnement géométrique d'un arbre à came

Jury:

Mr. Chabah Mohamed Said	Pr	Université de Biskra	Président
Mr. Boulegroun Abdemalek	Dr	Université de Biskra	Rapporteur
Mr. Nine Brahim	Dr	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2020-2021

Remerciement

Je dois d'abord je remercie « Allah », le tout puissant, pour m'avoir donné le courage et la santé pour réaliser ce modeste travail.

*Je tiens à remercier particulièrement Monsieur **Dr. Abdelmalek BOULEGROUN**, mon encadreur, pour avoir accepté de diriger ce travail, l'expression de mon profond et sincère remerciement, pour ses efforts, ses critiques constructives et sa confiance et pour m'avoir ouvert les portes pour ses conseils et encouragements durant cette difficile période de recherche.*

*Je tiens également à remercier les membres du jury **Dr. Brahim NINE** et **Pr. Chabah Mohamed Said** pour l'honneur qu'ils m'ont accordé en acceptant de juger mon travail.*

Enfin, nous remercions également ma famille respectueuse et mes amies, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail sans votre soutien.

Mes sincères remerciements à tous.

Dédicace

Louange à Dieu, et prières et paix sur le bien-aimé, l'élu, sa famille et ceux qui sont morts. Dieu soit loué, qui nous a permis d'apprécier cette étape de notre cheminement académique avec ce mémoire, fruit d'efforts et de réussites, grâce à Lui, dédié à nos honorables parents, que Dieu les préserve et les perpétue comme une lumière pour mon chemin A ma chère mère, qui m'a donné son âge pour achever ce travail, que Dieu prolonge sa vie et la protège de tout mal À mon professeur Abdel Malik Boulgeroun, que Dieu prenne soin de vous et de votre famille dans son ensemble comme vous avez pris soin des élèves des enfants musulmans Au Collège de Technologie, Département de Génie Mécanique, je dédie cet humble travail, en espérant que Dieu Tout-Puissant trouvera l'acceptation et le succès.

Sommaire

Remerciement	I
Dédicace	II
Sommaire.....	III
Liste de figures.....	V
Liste de tableaux	VI
Liste des abreviation	VII
Résumé :	IIX
Introduction générale.....	X

Chapitre I

Généralités sur l'arbre à cames

I.1. Introduction :	12
I.2. Histoire :	12
I.3.Utilisation industrielle :.....	13
I.4.Arbre à cames dans le moteur automobile :.....	13
I.4.1.Description :	13
I.5.Emplacement de l'arbre à cames :	15
I.6. Les différents types d'arbres à cames :.....	16
I.6.1.L'arbre à cames latéral :.....	16
I.6.2.L'arbre à cames en tête :.....	17
I.6.3. Double arbre à cames en tête :.....	18
I.7.Arbre à cames dans les moulins :	19
Coclusion :	20

Chapitre II

Etude et conception l'arbre à came

II.1.Introduction :	23
II.2.Définition :	23
II.3.Principe de fonctionnement :	24
II.4.Implantation des arbres à cames :	24
II.5.La réduction de frottement de l'arbre à cames :.....	27
II.6. Les came :.....	27

II.6.1. Définition :	27
II.6.2. La forme d'une came :	29
II.6.3. Phasage et levée :	29
II.6.4. Mesure de la forme de la came :	31
II.7. Matériaux et procédé de fabrication :	34
Mécanismes à cames	35

Chapitre III

Mécanisme à cames

Introduction :	36
III.1. Classification des cames :	36
III.1.1 Suivant le cycle :	36
III.1.2. Suivant la forme :	37
III.2. Classification des suiveurs	40
III.2.1 À simple contact :	40
III.2.2. À double contact :	40
III.3. Caractéristiques géométriques des cames	43
III.3.1 Calcul des coordonnées polaires de la trajectoire du point de contact suiveur-came :	43
III.3.1.1. Définition des paramètres :	43
III.3.1.2 Méthodes de détermination	45
III.3.1.3. Came disque et suiveur coulissant à galet centré	46
III.3.1.4. Came disque et suiveur coulissant à plateau	48
III.3.1.5. Came rectiligne et suiveur coulissant :	49
III.3.1.6. Came rectiligne et suiveur oscillant	50
Conclusion générale	52
Bibliographie	53

Liste de figures

Chapitre I

Figure I. 1 arbre à cames	14
Figure I. 2 Emplacement de l'arbre à cames	15
Figure I. 3 arbre à cames latéral	16
Figure I. 4 arbre à cames en tête	18
Figure I. 5 Coupe d'une culasse DOHC, montrant les cames au-dessus des soupapes, avec poussoirs interposé	19
Figure I. 6 Schéma foulon	20

Chapitre II

Figure II. 1 arbre à cames	23
Figure II. 2 Fonctionnement du l'arbre à cames	24
Figure II. 3 Types d'arbre à cames	25
Figure II. 4 D'implantation possible	26
Figure II. 5 Arbre à came avec roulements	27
Figure II. 6 Cames une tete	28
Figure II. 7 Forme d'une came	29
Figure II. 8 Diagramme de phasage d'un arbre à cames	30
Figure II. 9 Système d'avance hydraulique de came	31
Figure II. 10 Mesure de la levée d'une soupape	33

Chapitre III

Figure III. 1 Mécanismes à came :définitions	37
Figure III. 2 Classification des cames suivant le cycle	38
Figure III. 3 Les cames cylindriques précédents à génératrices droites	39
Figure III. 4 Classification des suiveurs à simple contact	41
Figure III. 5 Classification des suiveurs à double contact	42
Figure III. 6 Théorème de Kennedy	46
Figure III. 7 Came disque et suiveur coulissant à galet centré : paramètres	47
Figure III. 8 Came disque et suiveur coulissant à galet excentré : paramètres	47
Figure III. 9 Came disque et suiveur coulissant à plateau : paramètres	48
Figure III. 10 Came rectiligne et suiveur coulissant : paramètre	49
Figure III. 11 Came rectiligne et suiveur oscillant : paramètres	51

Liste de tableaux

Tableau III. 1 Définition de paramètres de cames.....	44
--	----

LA LISTE DES ABREVIATION

- A1 : Angle d'ouverture des soupapes d'admission avant le PMH
- A2 : Angle de fermeture des soupapes d'admission après le PMB
- CA : Centre de la came d'admission par rapport au PMH, égale $DA/2 - A1$
- CE : Centre de la came d'échappement par rapport au PMH, égale $DE/2 - E2$
- CCAE : Centre-centre des centres de came admission et échappement, égale $DA/2 + DE/2 - A1 - E2$
- CHAE : Chevauchement des ouvertures des soupapes d'admission et d'échappement, égale $A1 + E2$
- DA : Durée de la came d'admission, égale $A1 + A2 + 180$
- DE : Durée de la came d'échappement, égale $E1 + E2 + 180$
- E1 : Angle d'ouverture des soupapes d'échappement avant le PMB
- E2 : Angle de fermeture des soupapes d'échappement après le PMH
- PMB : Point mort bas
- PMH : Point mort haut

ملخص:

يُعد عامود الكامات أو ما يسمّى بعمود الحدبات من الأجزاء المهمة في المحرك، يستعمل عمود الكامات لفتح وإغلاق الصمامات، وتستعمل كاماة واحدة من العمود لكل صمام موجود في المحرك، حيث يستعمل عمود كامات واحد بالمحرك، ولكن أصبحت المحركات الحديثة تستعمل عمودين أو أكثر من أعمدة الكامات اما الكامات فهي عبارة عن انبعاث محدد في شكل دائري يدور ووظيفة الكاماة هي ضبط التوقيت لتشغيل الأجزاء الميكانيكية عن طريق تحويل الحركة الدورانية إلى حركة خطية وذلك نتيجة الختالف ابعاد انصاف القطر عن المركز بسبب الانبعاث الذي تم مسبقا.

الكلمات المفتاحية:

عمود الكامات ,الصمامات ,هندسية , الحدبات , الخصائص , أليات

Résumé :

L'arbre à cames, ou ce qu'on appelle l'arbre à cames, est l'une des parties importantes du moteur. L'arbre à cames est utilisé pour ouvrir et fermer les soupapes, et un arbre à cames est utilisé pour chaque soupape du moteur. Un arbre à cames est utilisé dans le moteur , mais les moteurs modernes utilisent deux ou plusieurs arbres à cames. Quant aux cames, elles sont une bosse spécifique dans une forme circulaire qui tourne, et la fonction de la came est d'ajuster la synchronisation pour le fonctionnement des pièces mécaniques en convertissant le mouvement de rotation en un mouvement linéaire, en raison de la différence dans les dimensions des rayons du centre en raison de la bosse qui a été précédemment faite.

Mots clefs :

Moteur ; Arbre à cames. Géométriques ; Cames ; Fonctionnement ; Soupapes ; Mécanismes

Introduction générale

Introduction générale

L'arbre à cames a été découvert au Moyen Âge car il était utilisé dans les moulins à eau spécialisés dans le tannage du cuir, où le mouvement de rotation résultant de l'entraînement de la roue à aubes avec de l'eau était converti en un mouvement longitudinal. Les arbres à cames font partie de l'ingénierie depuis des siècles. Les arbres à cames ont été utilisés dans tout, des dispositifs de temps de conduite aux boîtes à musique. Aujourd'hui, l'arbre à cames est un élément essentiel du moteur de la voiture, car il convertit le mouvement longitudinal du moteur en un mouvement de rotation qui fait tourner les roues de la voiture. Alors qu'est-ce que l'arbre à cames, ses types et son importance ? Quelles sont les propriétés géométriques des cames ? Et comment ça marche ? Dans le premier chapitre, nous parlerons de la définition et de l'histoire de l'arbre à cames, des types d'arbres à cames dans un moteur de voiture. Dans le deuxième chapitre, nous parlerons des détails de l'arbre à cames, et de son mécanisme d'action avec quelques dessins et structures dessinées. Nous parlerons également des positions des arbres à cames dans les moteurs et d'un schéma montrant leur rôle important dans le moteur. Dans le troisième chapitre, nous parlerons du mécanisme d'action des cames et de leurs classifications, et nous parlerons à la fin des propriétés géométriques des cames, et de quelques relations et lois arithmétiques accompagnées d'images géométriques.

CHAPTRE I

GENERALITES SUR L'ARBRE A CAMES

I.1. Introduction

L'arbre à cames est entraîné par le vilebrequin du moteur à travers une série d'engrenages appelés engrenages fous et synchronisation engrenages. Les engrenages permettent la rotation de l'arbre à cames correspondre ou être dans le temps avec, la rotation du vilebrequin et permet ainsi à la soupape ouverture, fermeture de soupape et injection de carburant à chronométré pour se produire à des intervalles précis dans le piston Voyage. Pour augmenter la flexibilité dans le calendrier d'ouverture de soupape, fermeture de soupape et injection de carburant, et pour augmenter la puissance ou réduire les coûts, un le moteur peut avoir un ou plusieurs arbres à cames. Typiquement, dans un moteur de type V moyen à grand, chaque banque avoir un ou plusieurs arbres à cames par tête. Dans le plus grand moteur, les soupapes d'admission, les soupapes d'échappement et le carburant les injecteurs peuvent partager un arbre à cames commun ou avoir arbres à cames indépendants. Selon le type et la marque du moteur, l'emplacement de l'arbre à cames ou les arbres varient. Le ou les arbres à cames d'un moteur en ligne sont généralement trouvé soit dans la tête du moteur ou dans le haut du bloc qui descend d'un côté de la banque de cylindres. Lorsque le piston passe sous le niveau des ports, les ports sont "ouverts" et l'air frais ou les gaz d'échappement peuvent entrer ou sortir, selon le type de port. Les ports sont alors "fermé" lorsque le piston repasse au-dessus du niveau des ports. Les vannes sont ouvertes mécaniquement et fermé pour admettre ou évacuer les gaz au besoin. Le les soupapes sont situées dans le moulage de la tête du moteur. Le point auquel la soupape siège contre la tête est appelé le siège de soupape. La plupart des moteurs diesel de taille moyenne les moteurs ont des soupapes d'admission ou des soupapes d'échappement ou soupapes d'admission et d'échappement. [1]

I.2. Histoire

La première trace d'un arbre à cames se trouve dans la construction, par les Grecs, à l'époque hellénistique, au III^e siècle av. J.-C. dans des automates hydrauliques. [2]

On le retrouve aussi dans certains automates d'Héron d'Alexandrie.

L'arbre à cames est utilisé par les Romains pour écraser le minerai d'or et pour fabriquer le tanin utilisé pour traiter les cuirs. Il est attesté dans les mines d'or romaines du Pays de Galles et au nord-est de la péninsule ibérique, ainsi que dans une tannerie de la seconde moitié du III^e siècle (ou du début du IV^e siècle) à Saepinum, en Italie [3]

L'arbre à cames a également été décrit à la fin du XII^e par l'érudit Al-Jazari. Il est alors

principalement utilisé dans les martinets spécialisés dans le battage du fer ou le tannage du cuir (transformation du mouvement rotatif, issu de l'entraînement de la roue à aubes par l'eau, en mouvement alternatif) [4].

I.3.Utilisation industrielle

L'arbre à cames était utilisé dans différentes industries :

- pour la fabrication de la pâte à papier un arbre à cames était utilisé pour produire un mouvement de va-et-vient à une, ou plusieurs, masse. Cet arbre est généralement en bois, avec des cames rapportées, soit en bois, soit métalliques ;
- pour soulever les marteaux des foulons dans les moulins qui traitent le « foulage » de la laine ou des peaux animales (pour les débarrasser des graisses et autres impuretés) ;
- dans l'industrie, un martinet est un ensemble de marteaux pilons actionnés par un arbre à cames.

I.4.Arbre à cames dans le moteur automobile

I.4.1.Description

L'arbre à cames est une pièce mécanique utilisée, principalement, dans des moteurs à pistons à quatre temps pour la commande synchronisée des soupapes. Il se compose d'une tige cylindrique disposant d'autant de cames que de soupapes à commander indépendamment ou par groupe, glissant sur la queue de soupape, ou sur un renvoi mécanique (ex. : le patin d'un culbuteur). Il est placé au niveau du vilebrequin (dans le cas d'un moteur culbuté, décrit Ci-dessous, ou d'un moteur à soupapes latérales), ou sur la culasse (dans le cas d'un moteur dit « à arbre à cames en tête », voir ci-dessous).

La synchronisation de l'arbre à cames avec l'arbre moteur se fait par l'intermédiaire de pignons, d'une chaîne ou d'une courroie crantée. La conception et la physionomie du moteur déterminent la position angulaire de l'arbre à cames. Les dispositions possibles dépendent également de l'architecture du moteur et de ses performances. Ainsi, dans les moteurs quatre temps à combustion interne, le cycle complet de combustion nécessite deux tours de vilebrequin pour un tour de l'arbre à cames. Ce dernier doit par conséquent tourner deux fois moins vite que le vilebrequin moteur.

L'élément suiveur des cames (la pièce en contact avec un des cames de l'arbre) prend, selon les cas, différents noms :

- lorsque cet élément est soumis à un mouvement de translation rectiligne, il est

nommé poussoir, centré ou excentré suivant que son axe rencontre ou non celui de l'arbre à cames ;

- s'il effectue un mouvement oscillant de rotation autour d'un axe, il porte le nom de culbuteur ;
- il peut également s'agir directement des soupapes elles-mêmes.

Comme cité précédemment, l'arbre contrôle l'ouverture des soupapes. La queue de soupape (le dessous) est soumise à un ressort, qui la maintient fermée lorsque la came n'*attaque* pas (directement ou indirectement, par l'intermédiaire du poussoir ou du culbuteur). Lorsque la came *attaque*, la soupape est mécaniquement poussée sur son axe, perpendiculairement à l'axe de rotation de l'arbre à cames. Les ouvertures et fermetures de soupapes se font donc totalement mécaniquement, à un certain rythme dépendant du régime moteur.

Les matériaux utilisés pour la fabrication des arbres à cames doivent être capables de résister à l'usure, compte tenu des frottements importants avec les poussoirs ou les culbuteurs, et ce surtout lors des démarrages à froid lorsque la lubrification n'est pas encore assurée sous pression. On utilise en général, notamment pour les moteurs de grande série, des fontes trempées sur les cames et les portées [5]

Le dessin des cames est très important, car leurs profils déterminent :

- le moment d'ouverture des soupapes ;
- la durée d'ouverture ;
- la physionomie de levée des soupapes (diagramme de distribution).

Le profil des cames est différent pour les soupapes d'admission ou d'échappement, en raison des lois qui régissent leur fonctionnement.

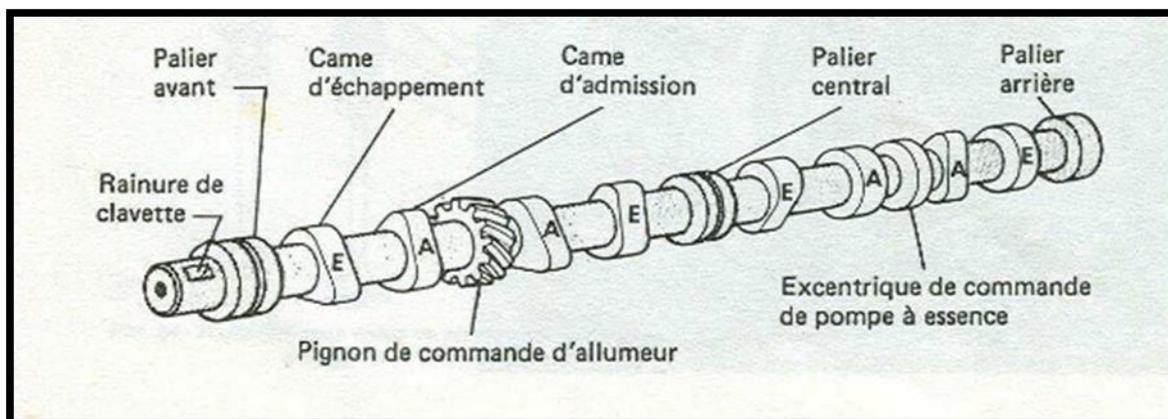


Figure I. 1 arbre à cames [6]

I.5.Emplacement de l'arbre à cames

Quatre solutions sont utilisées [6]

1. L'arbre à cames est appelé latéral lorsqu'il est situé sur le côté du bloc moteur.
2. Il est appelé arbre à cames en tête lorsqu'il est placé sur la culasse à proximité immédiate des soupapes.
3. Double arbre à cames en tête entraînant directement les soupapes grâce à des poussoirs hydrauliques.
4. Arbre à cames en tête avec commande des soupapes par leviers (très peu utilisé).

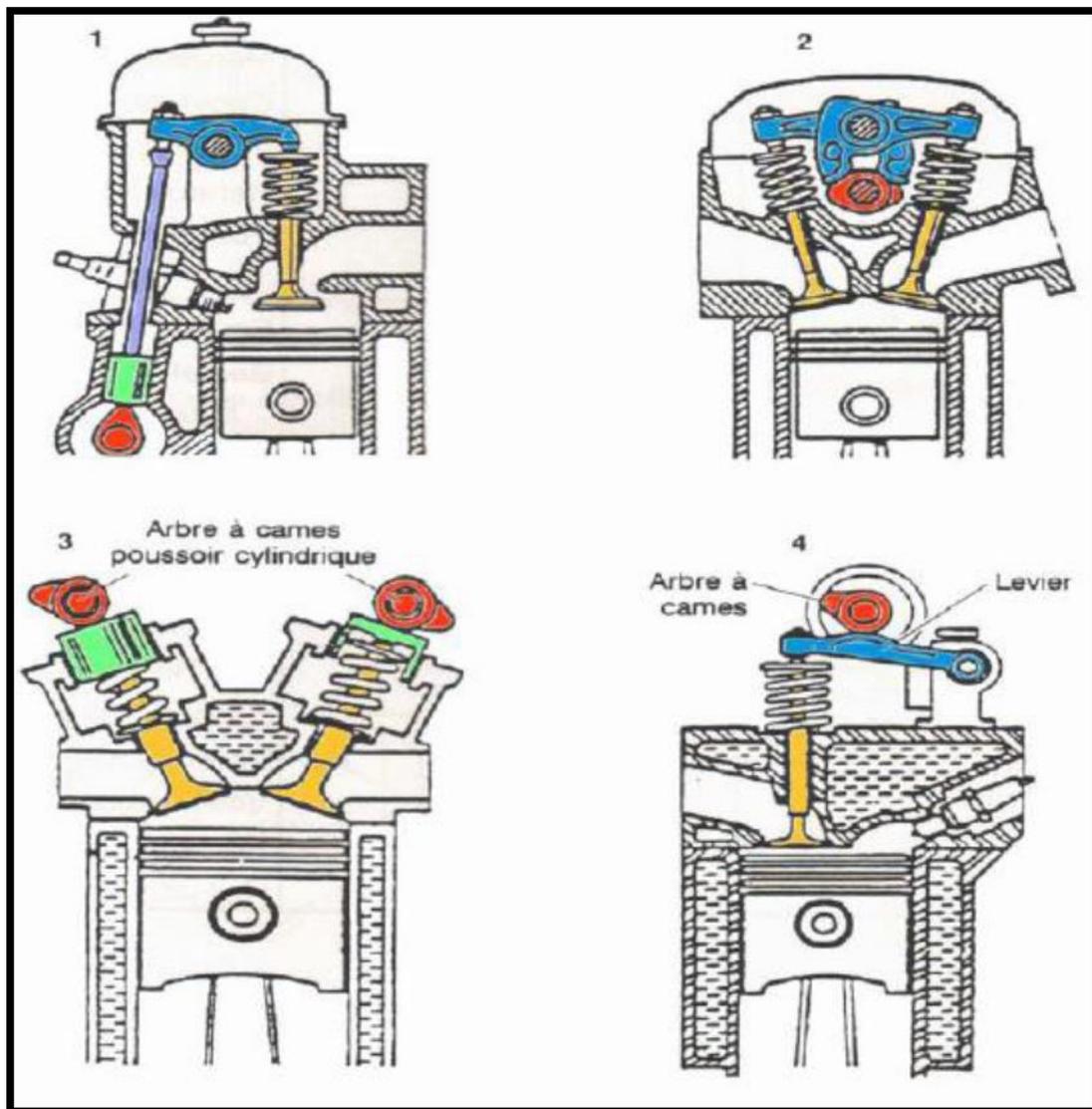


Figure I. 2 Emplacement de l'arbre à cames [6].

I.6. Les différents types d'arbres à cames

Il existe différents types d'arbres à cames, chacun ayant une fonctionnalité différente dépendant des besoins du moteur :

I.6.1. L'arbre à cames latéral

L'arbre à cames latéral est un modèle d'arbre à cames anciennement installé sur certains moteurs, mais qui est très peu utilisé de nos jours. La particularité de cet arbre à cames est qu'il n'active pas directement les soupapes, mais qu'il doit impulser le mouvement du régime moteur à de grandes tiges en acier, nommées "culbuteurs", et situées sur les côtés du moteur.[7]

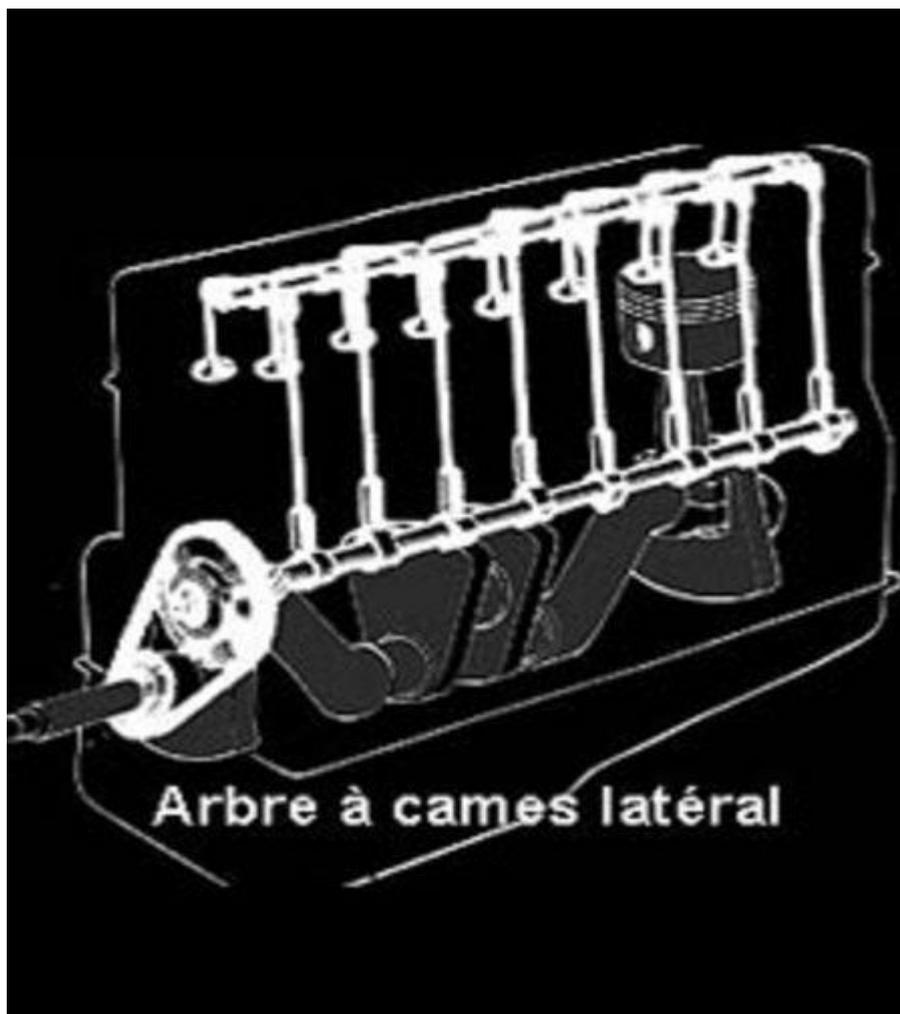


Figure I. 3 arbre à cames latéral [5]

I.6.2.L'arbre à cames en tête

(ACT) ou SOHC (Single over Head camshaft en anglais) est une disposition particulière du ou des arbres à cames au-dessus de la culasse, afin d'améliorer la commande des soupapes par diminution des pièces en mouvement alternatif.

Dans un moteur à soupapes en tête, il est d'usage de transmettre la commande d'ouverture des soupapes par un mouvement rotatif prélevé sur le vilebrequin et transmis à un arbre à cames. En disposant l'arbre à cames en tête, c'est-à-dire en haut du moteur, ces tiges ne sont plus nécessaires, mais la synchronisation de l'arbre se fait par transmission, autorisant un décalage de l'axe de rotation. D'abord adoptée en compétition, cette solution s'est généralisée petit à petit à tous les moteurs de véhicules de tourisme.

Pour éviter l'affolement de soupapes à de hauts régimes (environ 4000 tr/min et plus), il convient de minimiser les pièces soumises à un mouvement alternatif, comme les poussoirs, les tiges de culbuteurs et les culbuteurs eux-mêmes. La suppression de ces pièces éliminant d'autant les jeux mécaniques parasites, la précision de commande des soupapes s'en trouvera améliorée. Pour cela, on place le ou les arbre(s) à cames directement au-dessus des soupapes.

Les moteurs à arbre à cames en tête atteignent leur couple et leur puissance maximale à des régimes-moteurs supérieurs à ceux des moteurs à soupape en tête avec culbuteurs. Pour maximiser le rendement, les constructeurs automobiles doivent donc les jumeler à des transmissions ayant un nombre élevé de rapports. [8]



Figure I. 4 arbre à cames en tête [8]

I.6.3. Double arbre à cames en tête

Au début des années 1970, afin de permettre un bon centrage de la bougie dans la culasse, ainsi qu'un réglage aisé des lois de distribution, on a placé un arbre à cames pour les soupapes d'admission, et un autre pour l'échappement. L'espace entre les arbres permet de placer la bougie au centre de la chambre de combustion.

Le **double arbre à cames en tête** (DOHC = Double overhead camshaft en anglais) est une variante de l'arbre à cames en tête, où les rangées de soupapes d'admission et d'échappement sont chacune actionnées par un arbre. Cette technique permet de supprimer presque toutes les pièces intermédiaires entre l'arbre à cames et la soupape, sans avoir besoin, pour autant, d'aligner toutes les soupapes. Le moteur peut, ainsi, tourner plus vite et produit moins de frottements et moins de bruits mécaniques dus aux jeux.

La notion de double arbre ne se conçoit que pour chaque rangée de cylindres. Par exemple, un moteur en V qui n'aurait qu'un arbre à cames par rangée de cylindres est considéré comme

simple arbre, bien qu'il ait deux arbres à cames en tout. Parfois, certains moteurs à plusieurs rangées de cylindres sont dits « QOHC » ou quadruple arbre à cames en tête. Cela désigne en fait un moteur où chaque rangée de cylindre dispose d'un double arbre à cames en tête. Ainsi, les termes « V6 DOHC » ou « V6 QOHC » désignent strictement la même chose. Le double arbre à cames est souvent associé aux distributions utilisant quatre soupapes par cylindre, mais ce n'est pas une obligation.

On trouve des moteurs doubles arbres dès 1912 chez Peugeot [9]

Grâce à Ernest Henry et chez Fiat. Le double arbre à cames en tête a commencé à se généraliser dans les années 1960 en automobile. En moto, la généralisation sur les véhicules de tourisme a été le fait des constructeurs japonais.

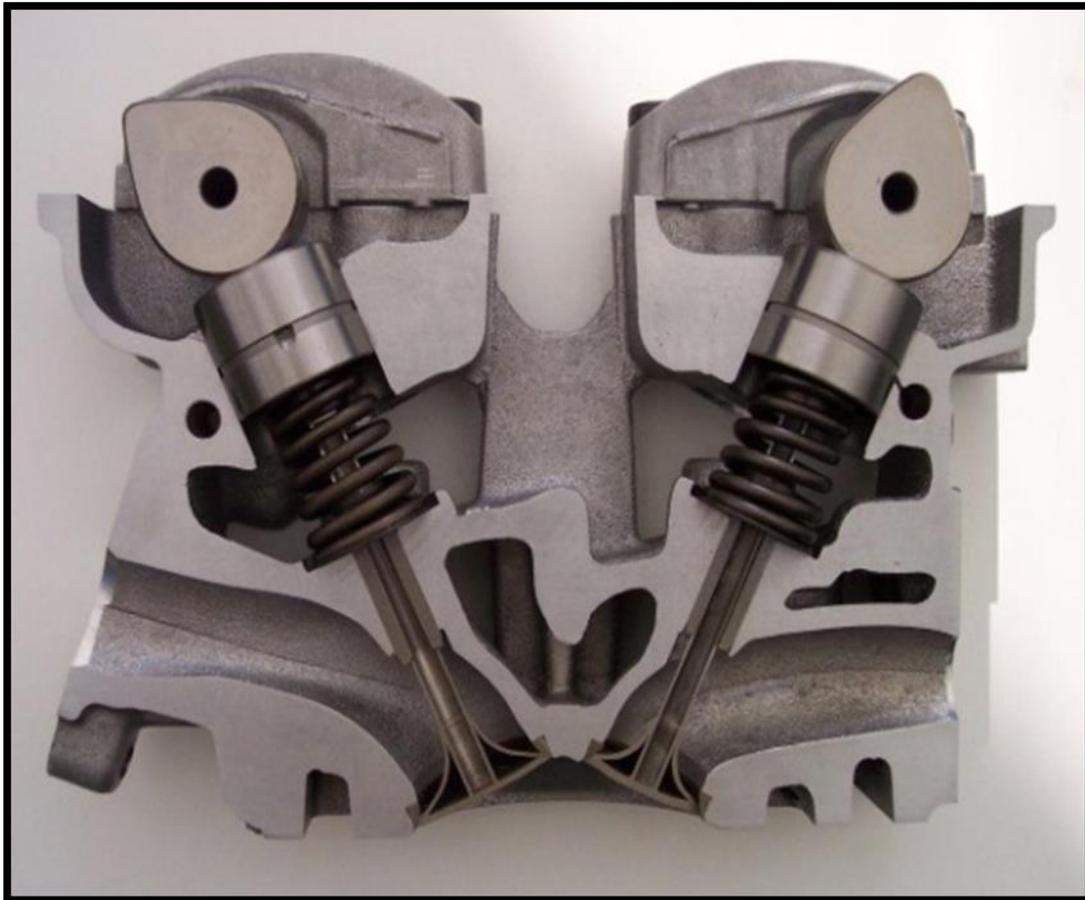


Figure I. 5 Coupe d'une culasse DOHC, montrant les cames au-dessus des soupapes, avec poussoirs interposé [8]

I.7. Arbre à cames dans les moulins

Les moulins fonctionnant à la force hydraulique (moulins à eau) entraînent :

- Une meule pour les moulins à grain
- un arbre à cames qui donne un mouvement de va-et-vient à une masse. Cet arbre est généralement en bois, avec des cames rapportées, soit en bois, soit métalliques.

Dans l'industrie, un martinet est un ensemble de marteaux pilons actionnés par l'énergie hydraulique que fait tourner un arbre à cames, C'est aussi les cames qui soulèvent les marteaux des foulons dans les moulins qui traitent le « foulage » de la laine ou des peaux animales (pour les débarrasser des graisses et autres impuretés).

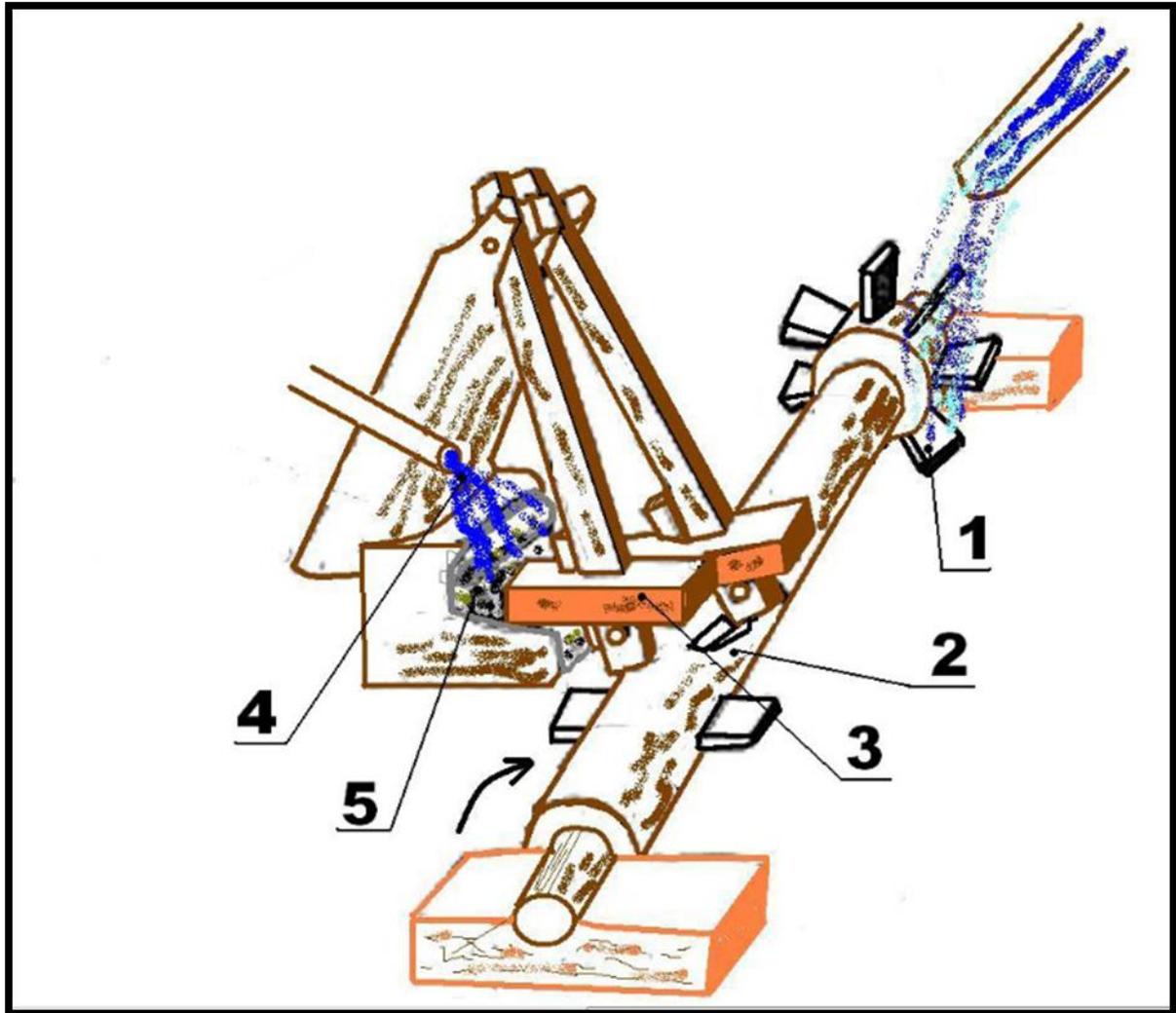


Figure I. 6 Schéma foulon [8]

: 1-roue à aubes, 2-arbres à cames,
3-maillots, 4-eau alcaline, 5-tissu à fouler

Conclusion

Enfin, nous concluons que l'arbre à cames est un dispositif découvert dès le Moyen Âge.

Aujourd'hui, l'arbre à cames est un élément essentiel du moteur. On l'appelle aussi "arbre de distribution" car il contrôle l'ouverture des soupapes

Nous avons également abordé dans ce chapitre la position de l'arbre à cames.

L'arbre à cames a trois types : L'arbre à cames latéral, L'arbre à cames en tête, Double arbre à cames en tête.

Chapitre II

**Etude et conception
l'arbre à came**

II.1.Introduction

Un arbre à cames est un arbre cylindrique rotatif utilisé pour réguler l'injection de carburant vaporisé dans un moteur à combustion interne. Ceux-ci sont parfois confondus avec le vilebrequin du moteur, où le mouvement alternatif des pistons est converti en énergie de rotation. Au lieu de cela, les arbres à cames sont responsables des injections de carburant minutées avec précision requises par les moteurs à combustion interne. Les arbres à cames ont plusieurs cames sur eux, qui sont utilisées pour ouvrir les soupapes par contact direct ou par poussoirs. Un arbre à cames est directement couplé au vilebrequin, de sorte que les ouvertures de valeur sont synchronisées en conséquence. Un arbre à cames de moteur peut être fabriqué à partir de nombreux types de matériaux différents. Les matériaux utilisés dans l'arbre à cames dépendent de la qualité et du type de moteur fabriqué. Pour la plupart des automobiles produites en série, de la fonte réfrigérée est utilisée. Non seulement elle est bon marché, mais la fonte pour enfants est également extrêmement durable et fiable. En effet, le traitement à froid augmente la résistance et la dureté de tout métal soumis au processus. [10]

II.2.Définition

L'arbre à cames, appelé également « arbre de distribution », commande l'ouverture des soupapes, en transformant le mouvement rotatif issu du moteur en mouvement longitudinal actionnant les soupapes. Il s'agit d'un arbre, entraîné par des pignons, une chaîne ou une courroie crantée [11].



Figure II. 1 arbre à came [1]

II.3.Principe de fonctionnement

Le mouvement est transmis du vilebrequin jusqu'à l'arbre à cames par l'intermédiaire de la courroie de distribution à partir du pignon de vilebrequin puis le mouvement de rotation est transformé en mouvement de translation à travers l'arbre à cames qui fait actionner les soupapes.

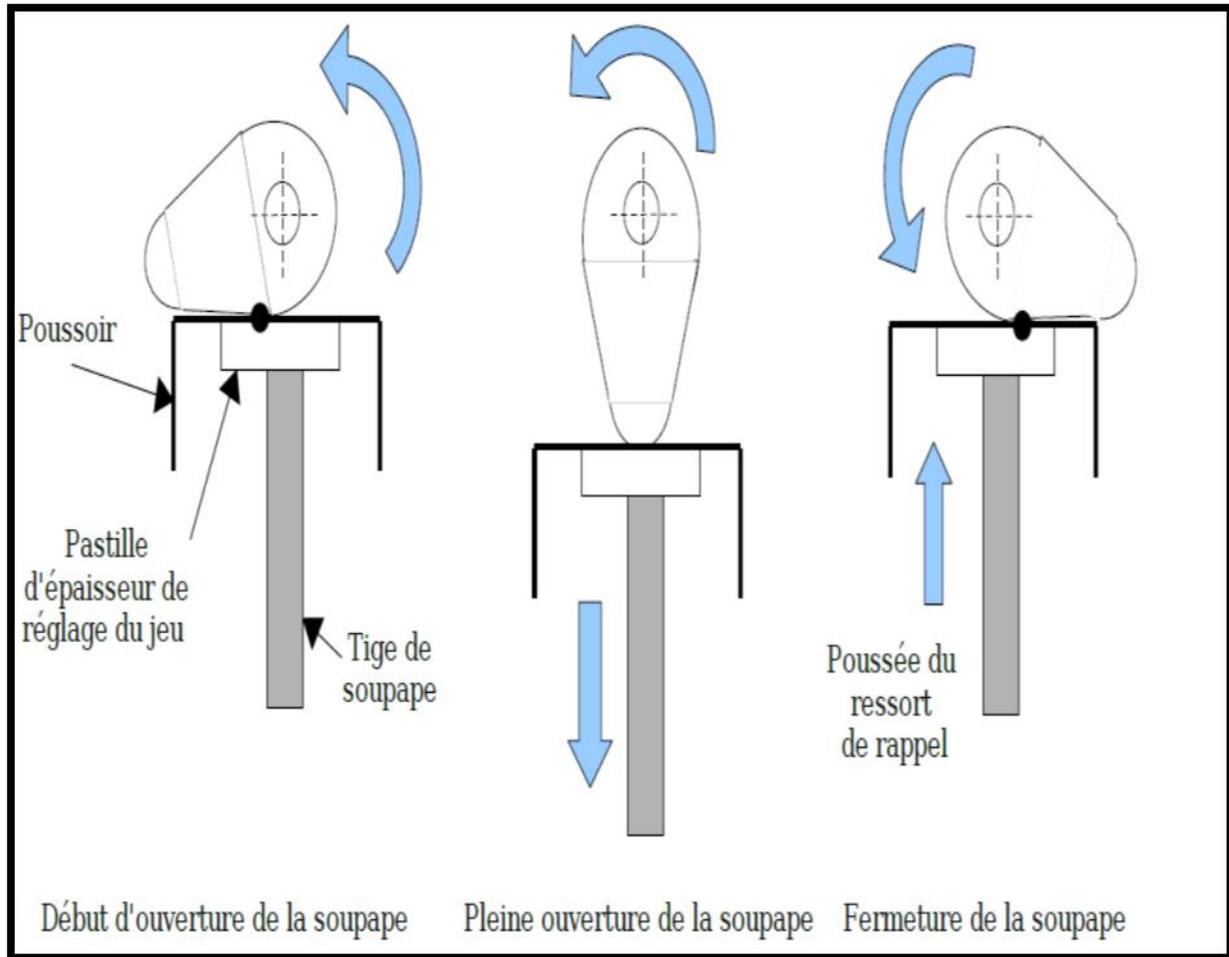


Figure II. 2 Fonctionnement du l'arbre à cames. [12]

II.4.Implantation des arbres à cames

Selon la disposition des cylindres et celle des soupapes on peut trouver des moteurs ayant un ou deux, voire plus pour les moteur en V, arbres à cames en tête. Les arbres à cames en tête permettent une attaque plus directe sur les soupapes. Le nombre de pièces en mouvement, les jeux et les usures sont ainsi diminués.

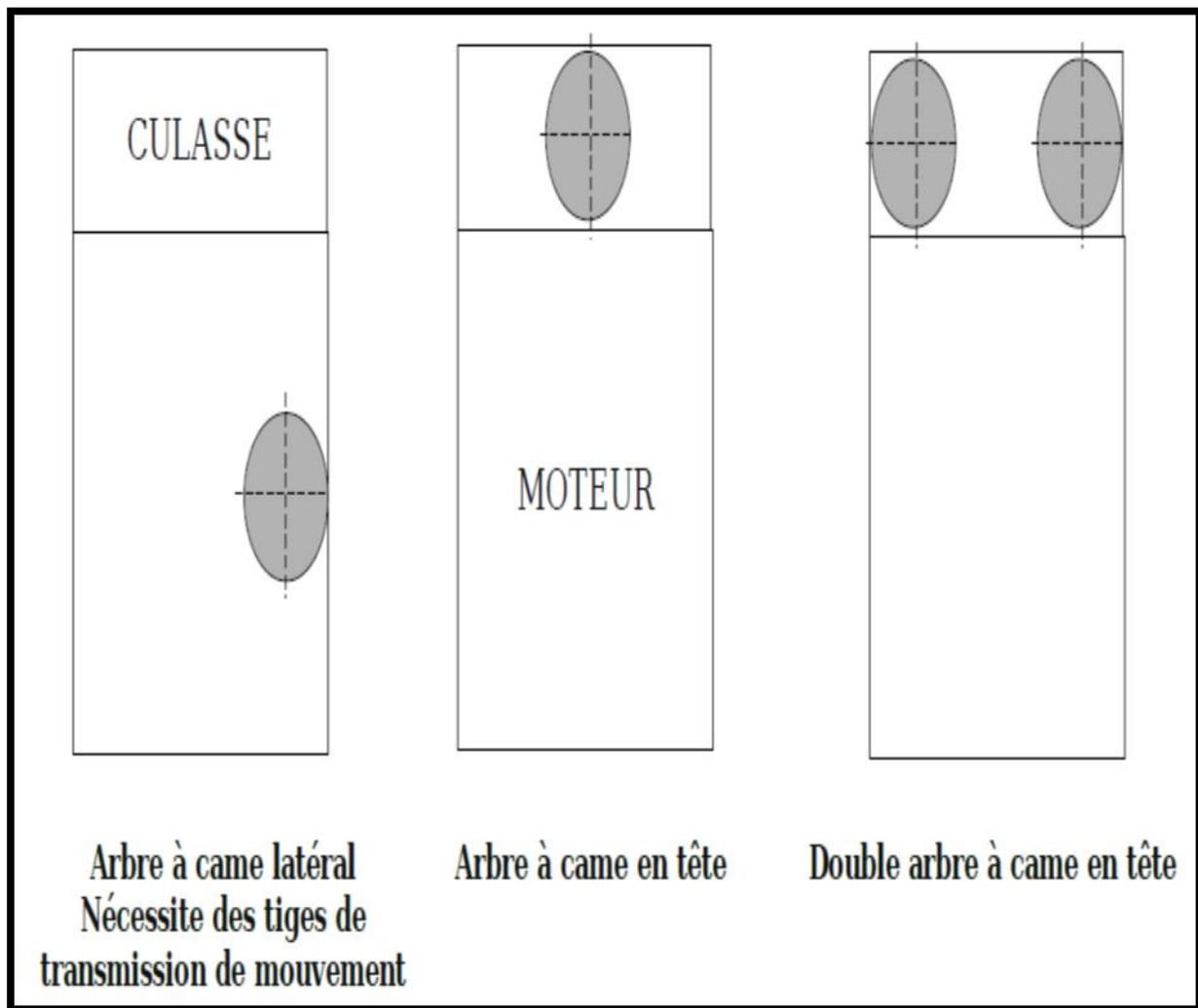


Figure II. 3 Types d'arbre à cames. [12]

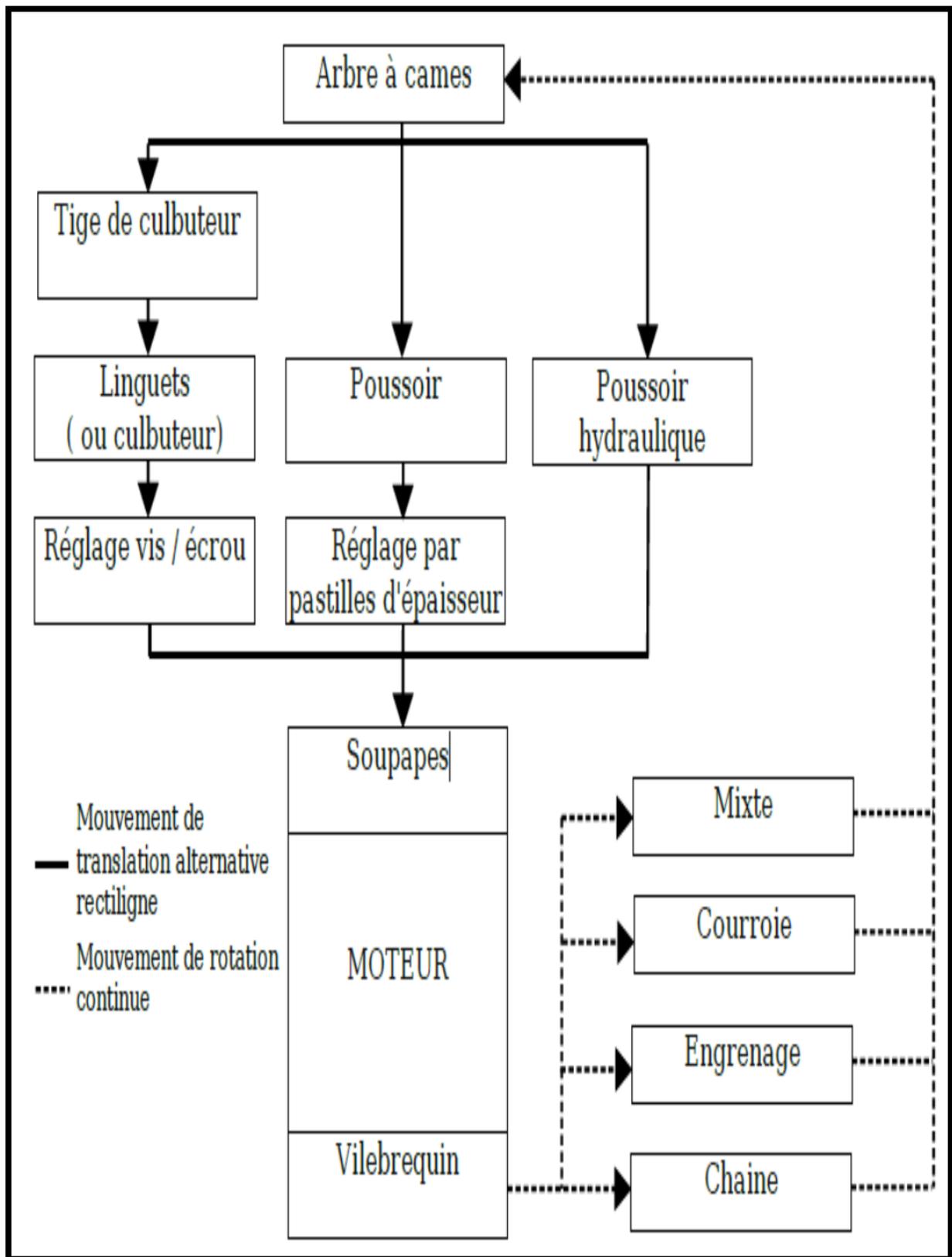


Figure II. 4 D'implantation possible. [12]

II.5. La réduction de frottement de l'arbre à cames

L'arbre à cames étant une pièce en rotation par rapport à la culasse, il est nécessaire de prévoir un dispositif réduisant les frictions. [12]

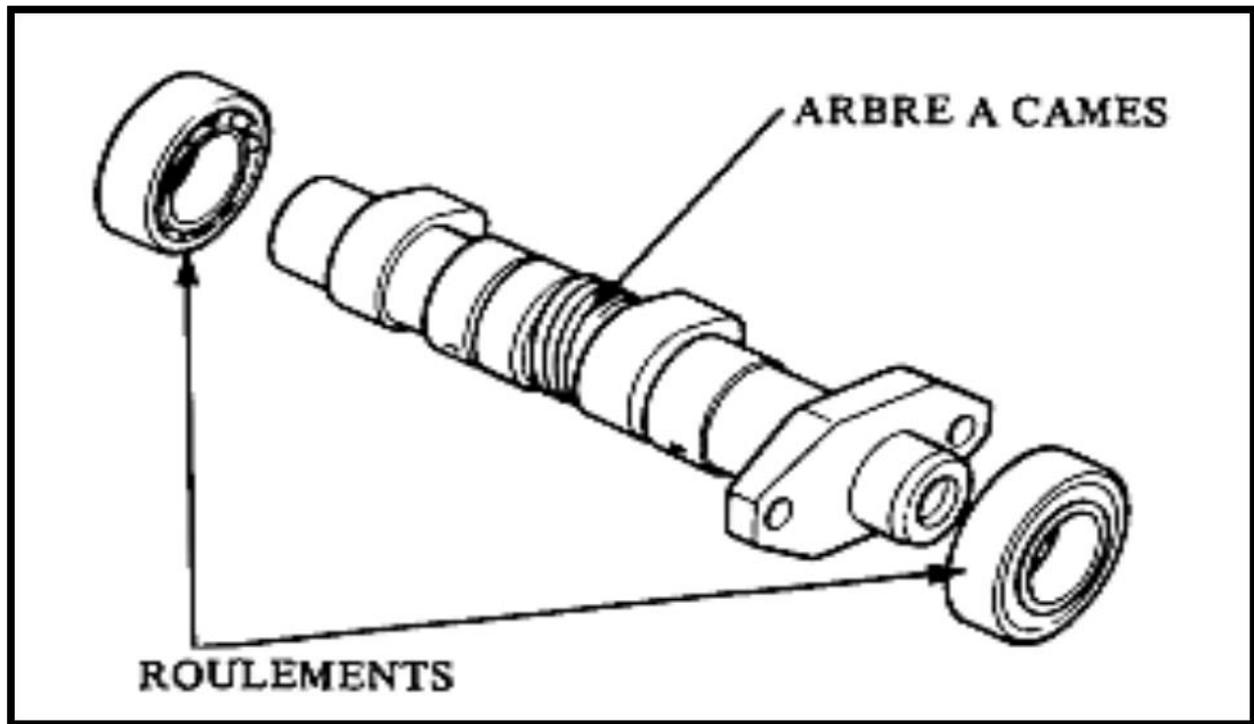


Figure II. 5 Arbre à came avec roulements. [12]

II.6. Les cames

II.6.1. Définition

Les cames sont les parties de l'arbre venant commander l'ouverture des soupapes. Leur forme est très importante dans le rendement du moteur. [12]

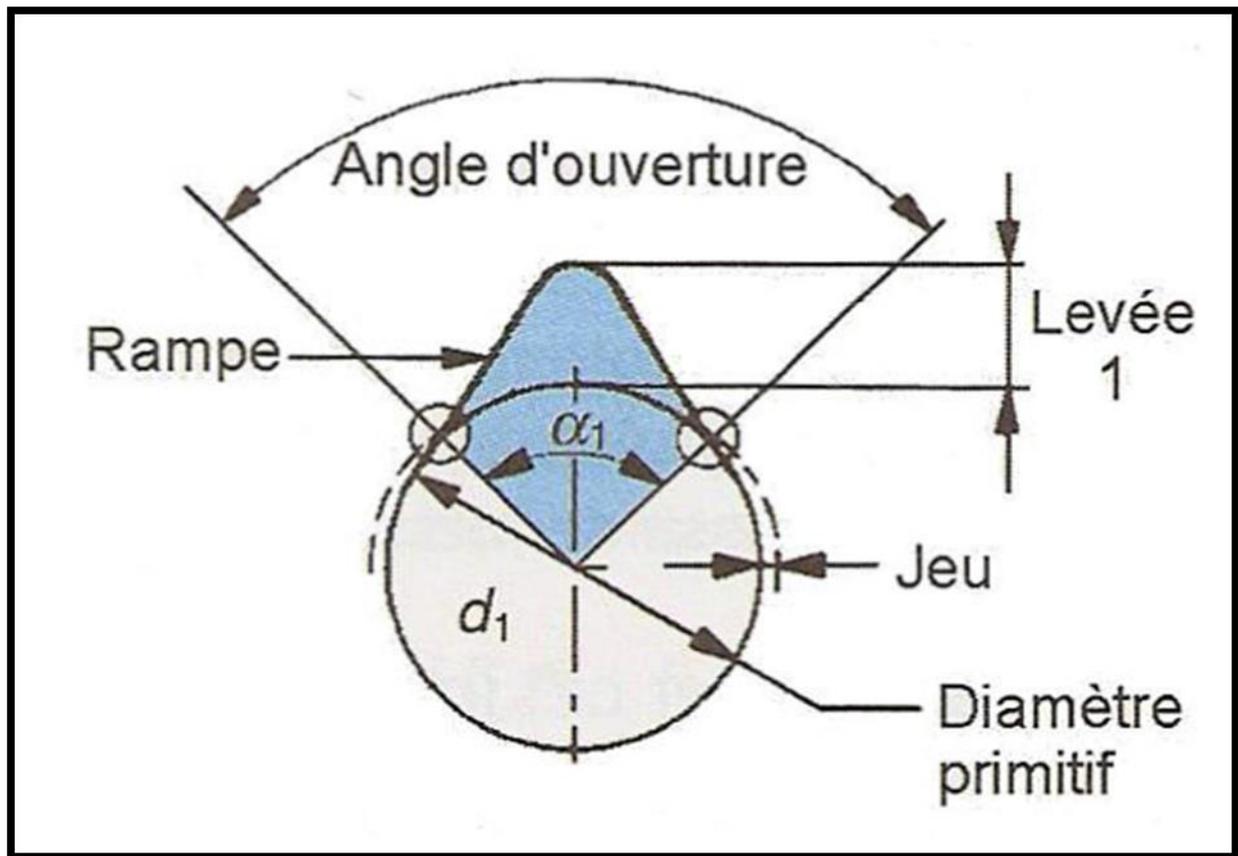


Figure II. 6 Cames une tête. [12]

- **L'angle d'ouverture** : angle pendant lequel la soupape est ouverte. Cet angle n'est pas obligatoirement symétrique par rapport à l'axe médian.
- **La rampe** : pente de la came permettant l'ouverture et la fermeture progressive de la soupape. Si cette pente est trop brutale, il y a risque d'affolement des soupapes par une accélération trop élevée.
- **La levée de soupape** : hauteur d'ouverture maximale de la soupape
- **Le diamètre primitif** : diamètre de base du cercle de la came. Le diamètre primitif n'est pas en contact avec la soupape dû au jeu de fonctionnement pour permettre une fermeture totale de la soupape. [12]

II.6.2. La forme d'une came

La forme d'une came se décompose en différentes sections. La base est la section où la soupape est appuyée sur son siège. À ce stade, la came ne touche pas le système de poussoir, ou à peine. Ensuite il y a le flanc, à ce stade la soupape est en mouvement et s'ouvre graduellement en vue d'atteindre la tête. La transition entre la base et le flanc est parfois difficile à percevoir, car il y a une zone de transition très fine. La tête de la came représente le sommet, c'est là que la soupape atteint son maximum d'ouverture avant d'entreprendre de nouveau sa descente vers la base [13].

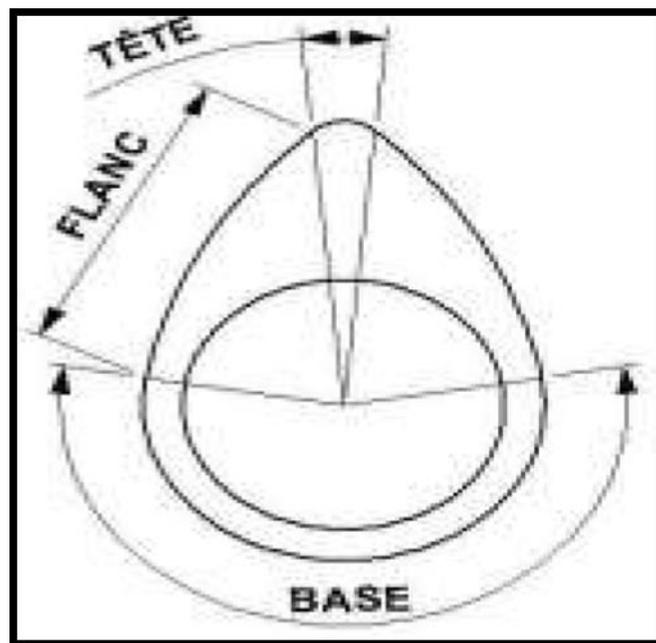


Figure II. 7 Forme d'une came. [13]

II.6.3. Phasage et levée

L'arbre à cames tourne en relation avec le vilebrequin avec une vitesse deux fois plus faible. En effet, le cycle 4 temps se fait sur deux tours de vilebrequin alors que l'arbre à cames tourne un seul tour. Ici, je parlerais toujours d'un arbre à cames alors que le nombre peut aller bien souvent de 1 à 4 sur un seul moteur. Lorsqu'on parle du phasage d'un arbre à cames, on se réfère toujours au vilebrequin. Ainsi, le phasage complet d'un arbre à cames se fait sur 720 degrés alors qu'en fait il tourne de seulement 360 degrés (il y a 360 degrés dans un tour complet). Un arbre à cames comprend plusieurs cames, bien souvent une came par soupape, mais cela peut varier en fonction de la configuration de la culasse. On appelle durée d'une came le nombre de degrés total où la came assure la levée de la soupape associée. La référence est souvent dès le

début d'ouverture des soupapes, mais parfois on verra la durée par rapport à une levée précise, la norme est souvent d'utiliser 0.050" (1.27mm). On retrouve bien souvent la durée exprimée comme suit : durée @ 0.004": 280 degrés, durée @ 0.050": 235 degrés [13].

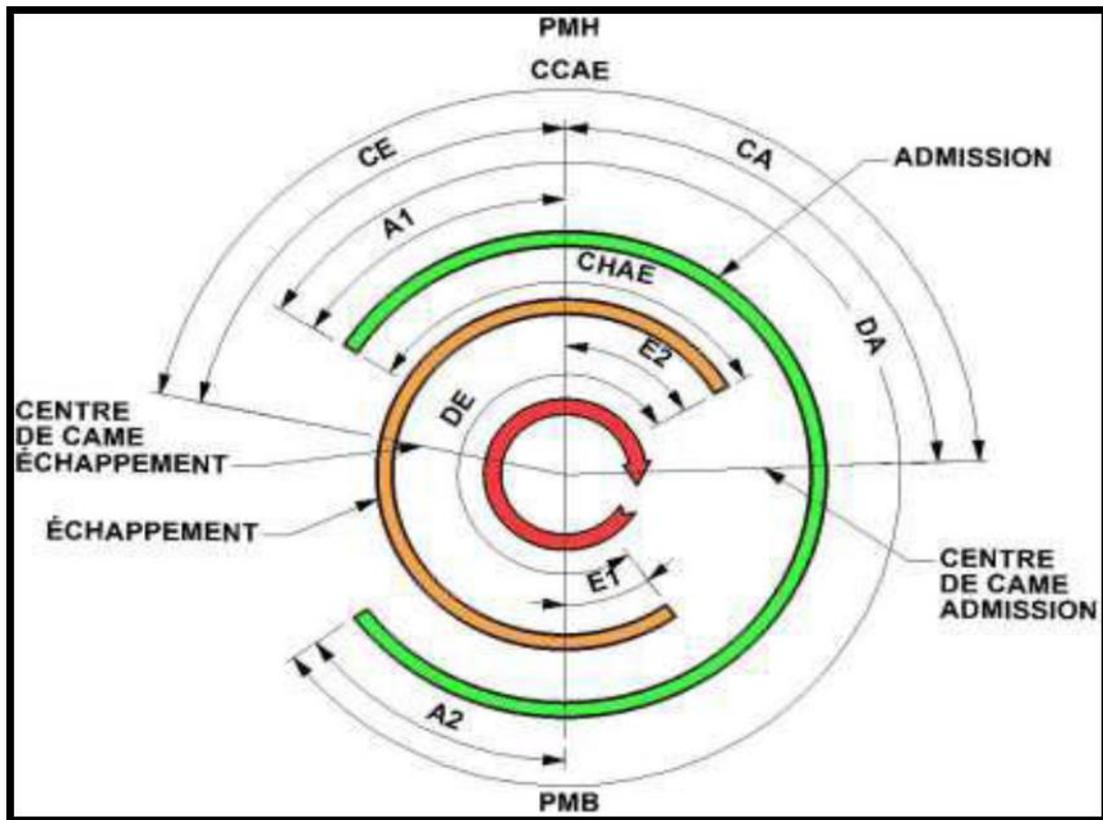


Figure II. 8 Diagramme de phasage d'un arbre à cames. [13].

La Figure II.8. Montre le diagramme de phasage des arbres à cames ainsi que plusieurs angles utilisés afin d'aider à l'interprétation.

A1 : Angle d'ouverture des soupapes d'admission avant le PMH

A2 : Angle de fermeture des soupapes d'admission après le PMB

CA : Centre de la came d'admission par rapport au PMH, égale $DA/2 - A1$

CE : Centre de la came d'échappement par rapport au PMH, égale $DE/2 - E2$

CCAE : Centre-centre des centres de came admission et échappement, égale $DA/2 + DE/2 - A1 - E2$

CHAE : Chevauchement des ouvertures des soupapes d'admission et d'échappement, égale $A1 + E2$

DA : Durée de la came d'admission, égale $A1 + A2 + 180$

DE : Durée de la came d'échappement, égale $E1 + E2 + 180$

E1 : Angle d'ouverture des soupapes d'échappement avant le PMB

E2 : Angle de fermeture des soupapes d'échappement après le PMH

PMB : Point mort bas

PMH : Point mort haut

Les caractéristiques des cames donnent souvent la valeur CA et CE. Ces valeurs sont souvent les mêmes sur les moteurs à simple arbre à cames. Il ne faut donc pas confondre ces caractéristiques avec CCAE. Sur les moteurs à arbre à cames unique par banc de cylindre, nous ne retrouvons très souvent qu'A1 égale E2. Dans ces moteurs, lorsque A1 est plus grand que'E2, on dit normalement que le phasage est en avance. On dit qu'il y a du retard lorsque'E2 est plus grand que A1. Lorsqu'on avance ou recule l'arbre à cames, ces actions ne changent en rien le chevauchement (CHAE) ainsi que le centre-centre des centres de cames (CCA). Dans ce type de configuration, avancer la came aidera généralement à obtenir plus de puissance à bas et moyen régime. Retarder la came donnera légèrement plus de puissance à haut régime. Il est d'usage normal d'avancer de quelques degrés la came. [13].



Figure II. 9 Système d'avance hydraulique de came. [13]

II.6.4. Mesure de la forme de la came

Avant d'entreprendre une série de mesure, il faut d'abord s'assurer de savoir ce qu'on cherche. La modification du système d'entraînement des soupapes et des soupapes elles-mêmes peut créer plusieurs effets néfastes. La liste des problèmes et des mesures appropriées est la suivante :

- Contact des soupapes avec le piston : Le contact peut être causé par un flottement des soupapes

ou par un jeu insuffisant entre les soupapes et le piston. Le jeu sert essentiellement de facteur de sécurité lié à un manque de confiance sur le régime moteur qui sera atteint et la capacité des ressorts à suivre la forme de la came. Plus le système d'entraînement est flexible et plus on demandera un jeu important. De plus, ce jeu varie et n'est pas le même pour les soupapes d'admission versus celle d'échappement. Il faut au minimum un jeu pour compenser entre autres l'accumulation future de carbone sur le piston. Il y a trois façons de mesurer ce jeu : soit par calcul, mais c'est déconseillé; en utilisant de la gomme à mâcher ou de la pâte à modeler, en l'apposant sur la surface du piston, en assemblant la culasse et toutes les composantes du système de commande des soupapes, puis en faisant tourner le moteur lentement à la main avec soin; la troisième façon est celle que je préfère, qui est similaire à la méthode 2 mais au lieu de mettre de la gomme sur le piston, il s'agit de pousser manuellement la soupape et de noter la distance qu'elle parcourt avant contact, pour ce faire, il faut idéalement installer un ressort très mou que vous trouverez dans une quincaillerie. Lorsque vous prenez la méthode 2, si le mouvement demande un effort anormal, cessé de tourner, il se peut que la soupape soit déjà en contact avec le piston. Le jeu nécessaire varie donc d'un moteur à l'autre et de votre niveau d'incertitude. On parle donc d'un jeu d'environ 1 à 2 mm pour la soupape d'échappement et un peu moins pour la soupape d'admission. J'ai déjà mesuré un moteur d'origine avec un jeu de moins de .75 mm pour une soupape d'admission. Un jeu plus important est toujours le bienvenu. Noter que l'endroit où la soupape d'échappement sera le plus près du piston arrive normalement avant le point mort haut. Maintenant, si le jeu est insuffisant, vous avez quelques choix : vous pouvez enlever du matériel sur le piston, c'est tout de même beaucoup de travail; changer les pistons par des pistons avec plus de dégagement est une option, mais un peu dispendieux; usiner le siège de soupape pour entrer plus profondément la soupape dans la culasse, mais cette solution devient très complexe avec les moteurs à arbre en tête, car cela demande de modifier la longueur de la soupape. Noter que certaines anciennes voitures comme des Aston Martin d'époque demandaient de modifier les soupapes pour faire l'ajustement du jeu.

- Contact entre les soupapes d'échappement et d'admission : Si vous avez installé des cames plus agressives, que vous avez changé la dimension des soupapes, puis qu'enfin les soupapes sont selon un aménagement de type Hémi avec un angle important, il y a un risque de contact. Idéalement, il faut faire l'analyse par calcul avant de décider d'usiner la culasse pour recevoir des soupapes plus grandes. Dans ce cas, il faut le diagramme de levée détaillé des soupapes, puis il faut modéliser la culasse, c'est un travail particulièrement théorique. La vérification pratique est quant à elle très simple. Il faut assembler le système de commande au complet dans le moteur avec la culasse, puis mesurer la distance entre les soupapes dans un cylindre où il n'y a pas de piston ni de bielle. Je me suis déjà fait un bloc d'essai où le côté était coupé pour donner une

meilleure visibilité. Un bloc moteur endommagé peut toujours resservir [13].

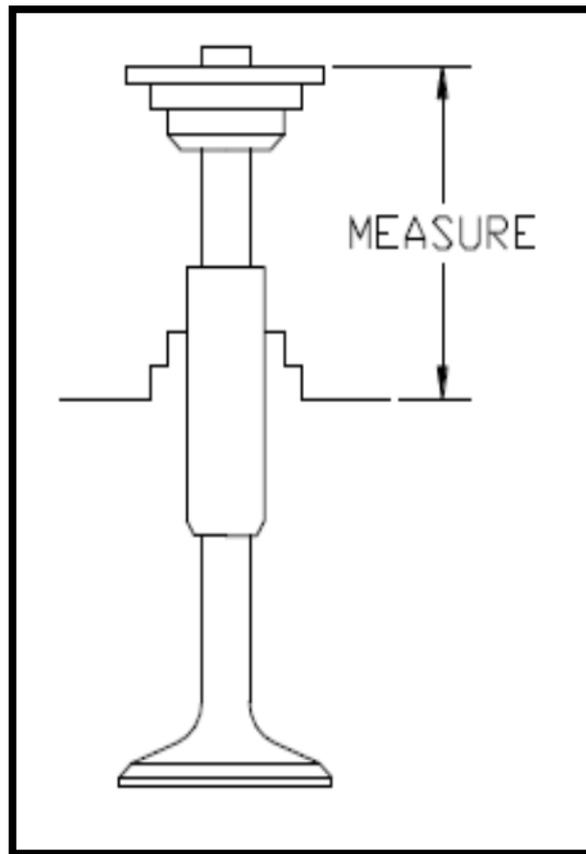


Figure II. 10 Mesure de la levée d'une soupape [13].

- Contact entre la soupape et le piston dû au risque de flottement. Si vous prévoyez faire les calculs de ressort, il n'est pas nécessaire de prendre toute la courbe de levée en détail, mais seulement la section légèrement avant le haut de la tête de la came et jusqu'à ce que la soupape touche son siège. Vous devrez néanmoins le faire pour l'admission et l'échappement si vous croyez que ce n'est pas pareil. Vous n'avez pas non plus besoin de vous assurer du phasage exact avec le vilebrequin. L'analyse par calcul devient assez complexe et représente une approche extrêmement théorique pour une personne qui n'est pas à l'aise avec les mathématiques. Évidemment, si vous voulez connaître et vérifier le phasage exact de la levée avec le vilebrequin, il faudra assembler le moteur, puis le faire tourner en prenant des mesures de levée de soupape en fonction de la position exacte du vilebrequin. Une mesure à tous les 15 degrés du vilebrequin est normalement suffisante, débutée au point mort haut au temps d'allumage. Vous devrez prendre les mesures sur deux tours complets de vilebrequin. Vous pouvez opter pour une plus grande précision, mais un angle de moins de 10 degrés entre les lectures n'apporte plus grand gain. Le but est de prendre une lecture précise en utilisant une position de mesurage qui ne change pas d'une mesure à l'autre. Personnellement, j'utilise normalement la mesure telle que montrée à la Figure II.10. Prenez les mesures avec un jeu de soupape d'au plus .001" (.025mm).

II.7. Matériaux et procédé de fabrication

Les matériaux qu'on peut utiliser à la fabrication de l'arbre à came sont la fonte grise et l'acier. L'invention a pour objectif de fournir un procédé de fabrication d'arbre à came obtenu par stabilisation de résultat d'amélioration de caractéristiques d'usure telles que la résistance au tangage, à l'éraillure, ou similaire. Afin d'atteindre cet objectif, le procédé de fabrication d'arbre à came pour moteur à combustion interne de l'invention comporte : une étape de traitement thermique au cours de laquelle un arbre à came formé par assemblage d'une pièce de came en matériau fritté sur un corps principal d'arbre en tube métallique est chauffé jusqu'à une température de frittage par un dispositif de traitement thermique; et une étape de traitement de refroidissement au cours de laquelle l'arbre à came ayant subi un traitement thermique, est refroidi par un dispositif de traitement de refroidissement. Lors de l'étape de traitement de refroidissement, le refroidissement est effectué à travers deux niveaux d'étapes : une étape de traitement de refroidissement de premier niveau au cours de laquelle l'arbre à came est disposé dans un état dans lequel il est entouré de plaques de graphite sur la périphérie interne du dispositif de traitement de refroidissement, puis un refroidissement lent est effectué; et une étape de traitement de refroidissement de second niveau au cours de laquelle un gaz de refroidissement est injecté à l'intérieur du dispositif de traitement de refroidissement, et mis en circulation par un ventilateur afin d'effectuer un refroidissement rapide[14].

Chapitre III

Mécanismes à cames

Introduction

Un mécanisme à cames est constitué par un organe moteur, qui comporte un profil formé par une suite de courbes se raccordant le plus souvent tangentiellement, appelé **came**, et un organe entraîné $pa + r$ le premier suivant une loi déterminée, appelé **suiveur**. La came peut être tournante autour d'un axe, elle est dite circulaire (c'est le cas le plus fréquent). Elle peut être animée d'une translation, elle est dite alors rectiligne (figure III.1). De même, le suiveur peut être mobile en rotation ou en translation. La came, par son profil qui détermine le mouvement du suiveur, est l'organe principal.

III.1. Classification des cames

III.1.1 Suivant le cycle

Le mouvement communiqué au suiveur est constitué de périodes élémentaires fonction de la position angulaire de la came (ou du temps) et qui constituent le cycle du mécanisme. Il existe trois périodes élémentaires, deux dynamiques et une de repos :

- la première est appelée montée, abréviation M ;
- la seconde est désignée par descente, abréviation D ;
- la période de repos est aussi désignée par stationnaire, abréviation S.

Une came peut délivrer des cycles variés par juxtaposition d'une suite plus ou moins nombreuse de périodes élémentaires.

Les principaux cycles utilisés sont :

- SMS (en anglais, DRD), très courant, spécialement dans les indexeurs à cames qui en font un usage exclusif (figure III.1a) ;
- SMDS (ou DRRD), moins fréquent car l'association MD n'est pas très bonne sur le plan dynamique pour les mouvements rapides (figure III.1b) ;
- SMSDS (ou DRDRD), très courant (figure III.1c) ;
- MD (ou RR), simple mais employé surtout pour les mouvements lents (figure III.1d).

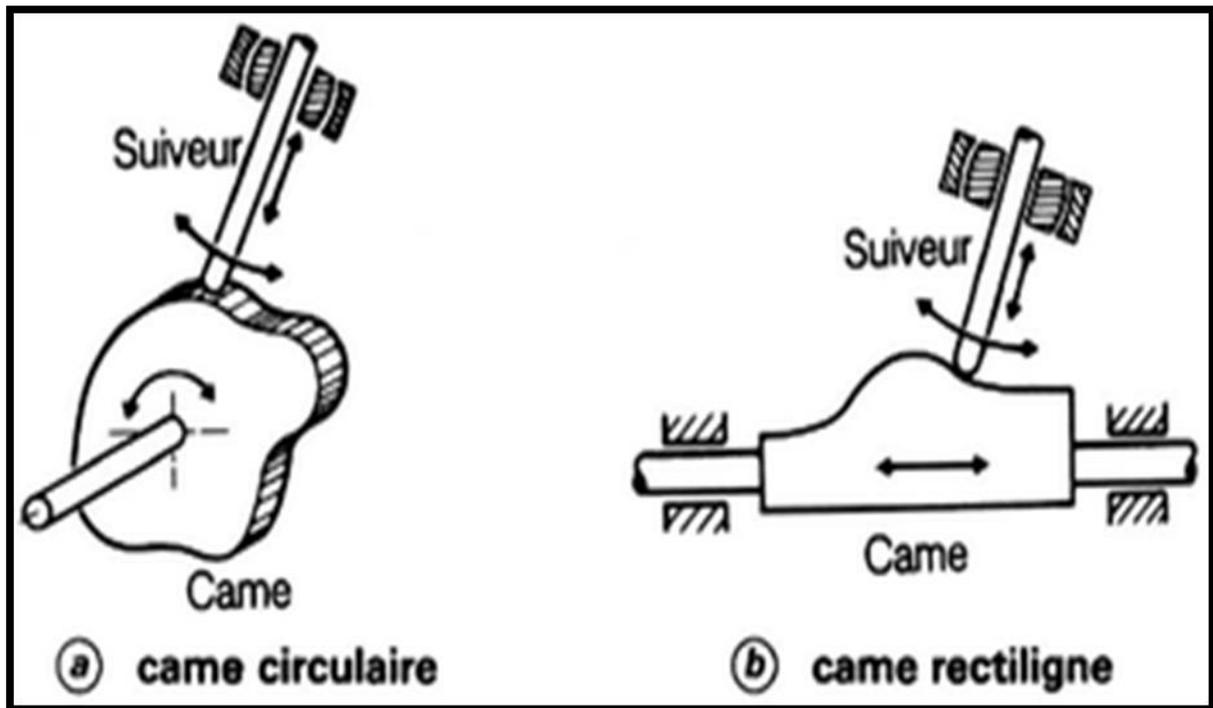


Figure III. 1 Mécanismes à came : définitions

III.1.2. Suivant la forme

Les cames se divisent en cames circulaires, de beaucoup les plus répandues, et en cames rectilignes qui ne sont qu'un cas particulier des précédentes, le centre de rotation étant rejeté à l'infini.

Les **cames circulaires** se présentent sous deux classes.

- **Cames disques** : elles sont elles-mêmes divisées en deux types :
 - came disque périphérique (figure III.1a)
 - came disque à rainure (figure III.1b)

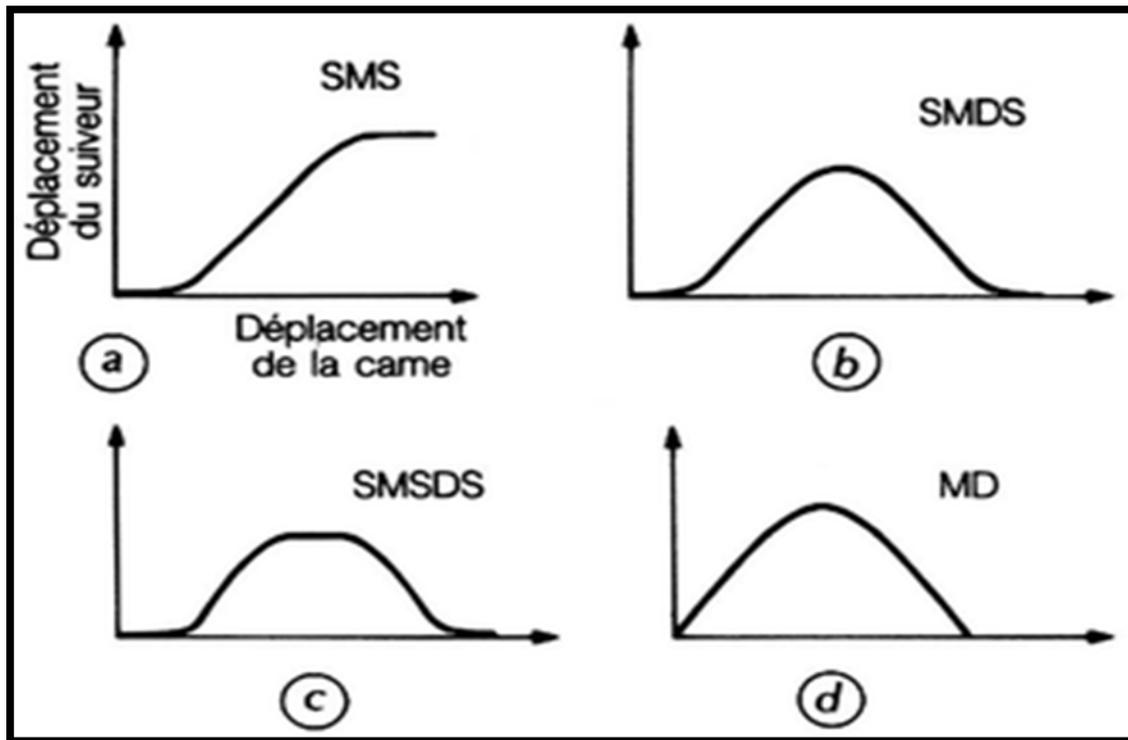


Figure III. 2 Classification des cames suivant le cycle

Avec les cames disques, le suiveur se déplace dans un plan perpendiculaire à l'axe de la came.

- **Cames tambours** : elles présentent un certain nombre de variantes.

La plus courante est cylindrique ; on distingue alors les types suivants :

- came à rainure (figure III.2c) : une rainure est usinée à la surface du cylindre ; cette rainure peut ne pas être fermée sur elle-même, mais se présenter comme un pas de vis partiel (figure III.2d), c'est le cas de beaucoup de cames d'indexeurs ;
- came cloche : voisine de la précédente, la rainure étant ouverte ; la surface active peut être normale à l'axe (figure III.2e) ou tronconique (figure III.2f) ;
- came à nervure en saillie (figure III.2g) : très utilisée dans les indexeurs (mécanisme Ferguson), la rainure n'étant pas alors fermée sur elle-même.

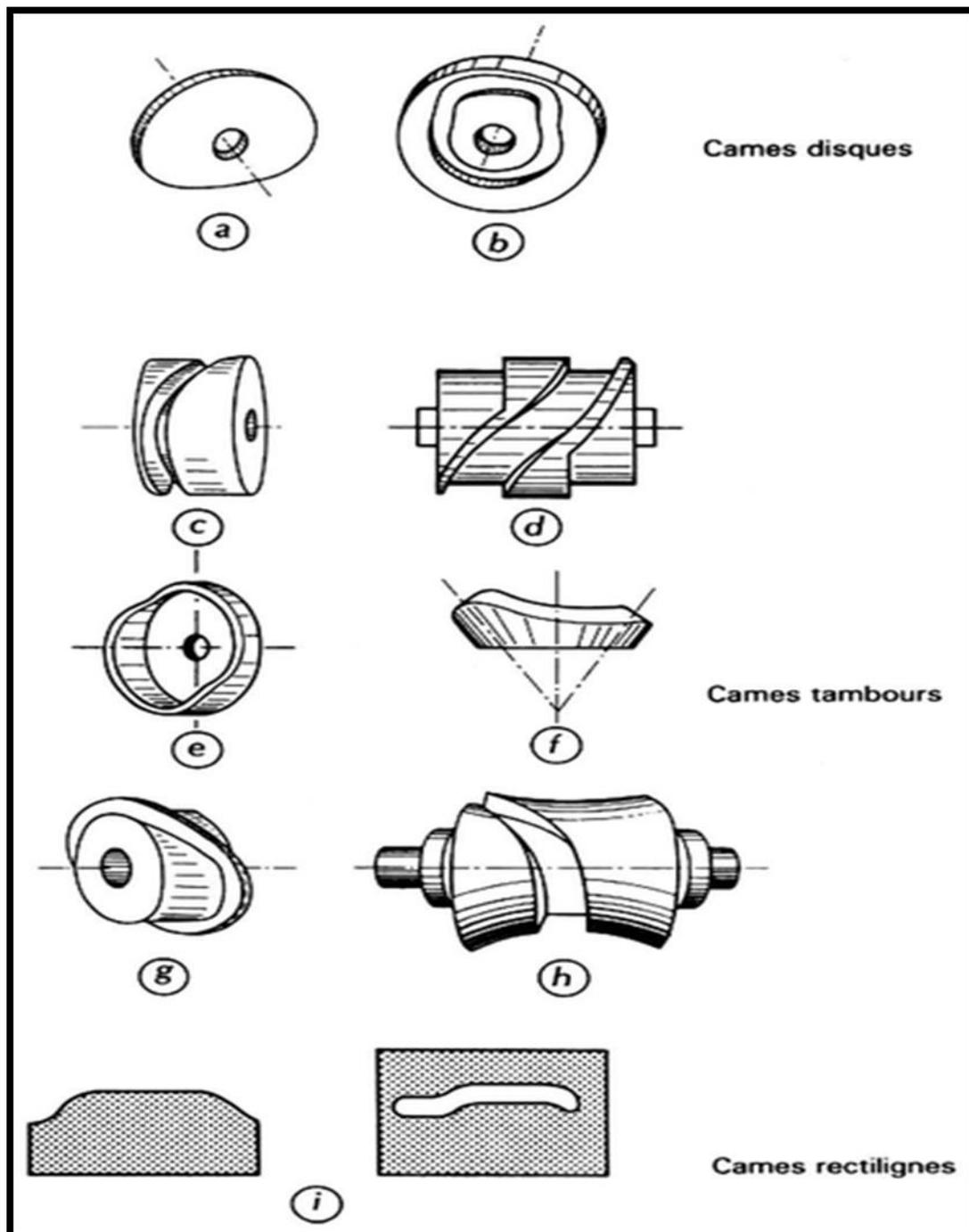


Figure III. 3 Les cames cylindriques précédentes à génératrices droites

Les cames cylindriques précédentes sont à génératrices droites. Il en existe à génératrice courbe (figure III.3h).

Avec les cames tambours, le déplacement du suiveur se fait dans un plan parallèle à l'axe de rotation de la came.

Les **cames rectilignes** sont essentiellement utilisées sous la forme homologue des cames disques (figure III.3i).

III.2. Classification des suiveurs

III.2.1 À simple contact

- **Suiveurs effectuant une translation**

On distingue :

- ceux à *contact cylindrique* ; l'extrémité est généralement munie d'un galet suivant le profil de la came ; l'axe du suiveur peut passer par le centre de rotation de la came (figure III.4a) ou être excentré par rapport à celui-ci (figure III.4b) ;

- ceux à *contact plan* ; ici l'excentricité n'a pas d'importance : l'angle entre la direction de translation et le plan en contact peut être différent ou non de 90° (figure III.4c).

- **Suiveurs oscillant ou tournant**

Le suiveur exécute un mouvement d'oscillation. Le contact peut être, comme dans le cas précédent, centré ou excentré (figures III.4d et e).

La rotation est complète dans le cas des indexeurs (figure III.4f).

La partie du suiveur en contact avec la came peut être un plan (figure III.4g), voire un profil conjugué avec celui de la came. Le cas limite le plus important est alors celui des dents d'engrenage.

III.2.2. À double contact

Ce type de suiveur a pour but d'éliminer tout jeu sans utiliser d'artifice particulier, notamment des ressorts, quelle que soit la position du mécanisme.

Deux parties du suiveur peuvent être en contact avec la même came (figure III.5a), ou avec deux cames différentes (figures III.5b et c). Elles peuvent être du type coulissant ou rotatif, ce dernier cas étant très fréquemment utilisé dans les indexeurs.

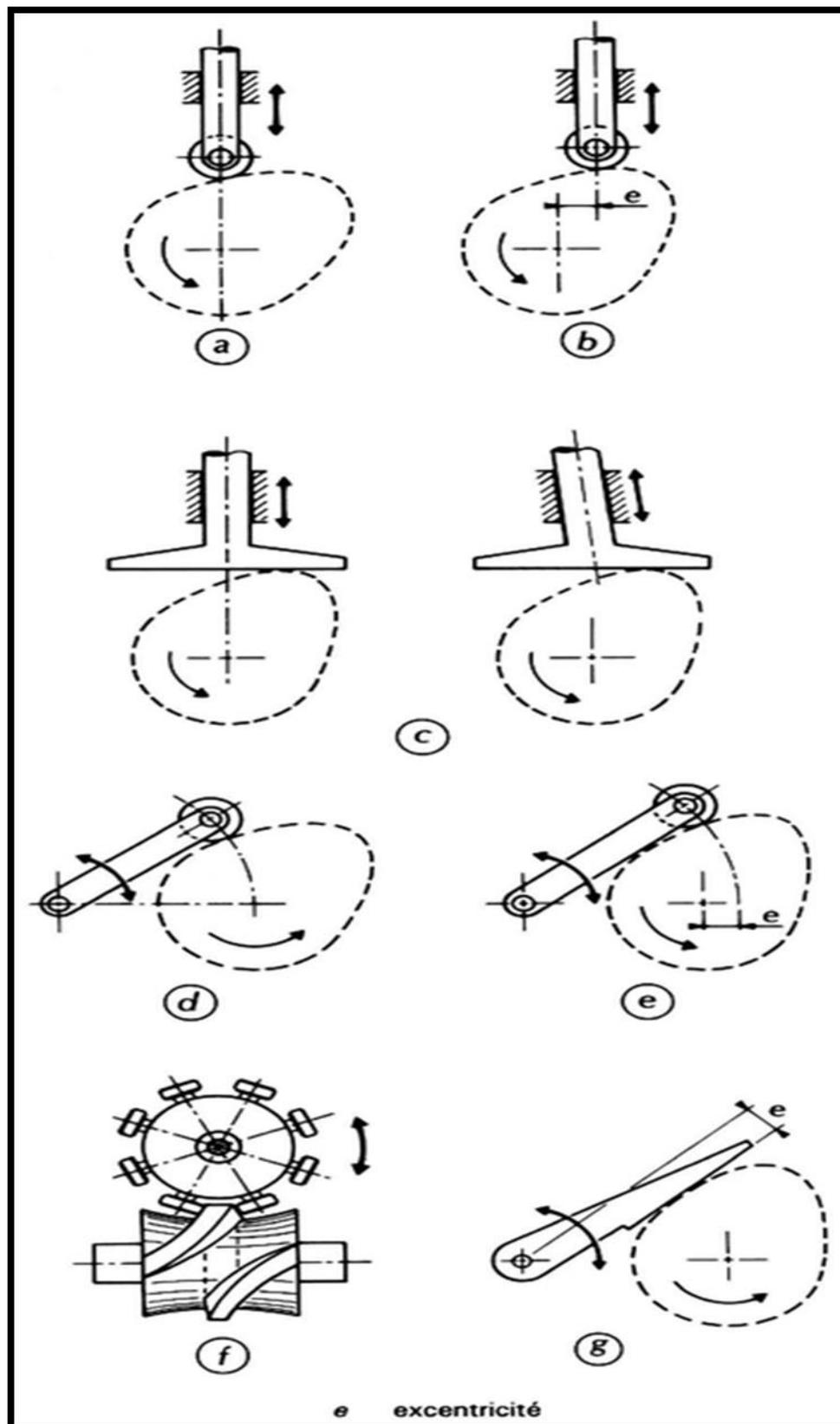


Figure III. 4 Classification des suiveurs à simple contact

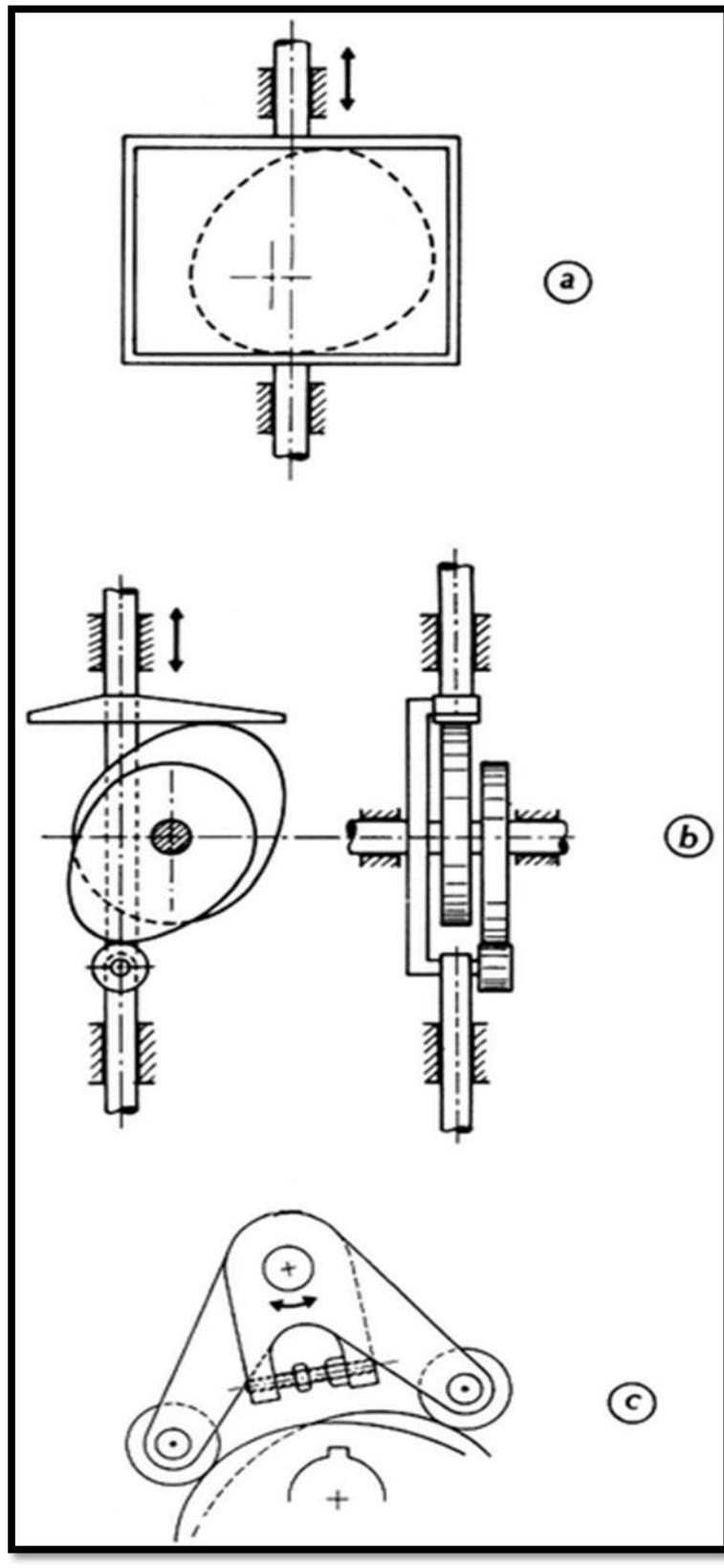


Figure III. 5 Classification des suiveurs à double contact

III.3. Caractéristiques géométriques des cames

Le tracé de la came découle de la loi de mouvement imprimé au suiveur ou loi de levée , de la forme de la came (circulaire ou rectiligne), du diamètre du cercle de base, du diamètre du galet du suiveur et de celui de son mode d'exécution (outil de taillage).

Pour le calcul, le tracé de la came est obtenu en considérant dans un premier temps, dans le cas d'un suiveur à galet, le rayon de ce galet nul.

Le profil de came est alors une courbe parallèle à ce tracé, ce qui ne change rien aux valeurs des angles (propriétés des courbes parallèles).

III.3.1 Calcul des coordonnées polaires de la trajectoire du point de contact suiveur-came

III.3.1.1. Définition des paramètres

- Rayon polaire r ou distance de base y (tableau III.1)

➤ *Cas d'une came effectuant une rotation* : le rayon r relie le centre de rotation de la came à celui du suiveur ou de l'outil de taillage. Dans le cas d'un suiveur plan, le rayon polaire relie le centre de rotation de la came et le point de contact du suiveur plan.

➤ *Cas d'une came effectuant une translation* : la distance y correspond à la distance entre le centre du suiveur ou du galet et la ligne de base de la came. Cette ligne de base est parallèle à la direction de translation ; elle sert de référence à la description de la came.

- **Angle de pression** (tableau III.1)

C'est l'angle entre la normale au profil de la came au point de contact suiveur-came et la tangente à la trajectoire de ce point.

- **Angle ou longueur de correction** (tableau III.1)

Tableau 1 - Définition de paramètres de cames		
Nom Symbole	Came effectuant une rotation	Came effectuant une translation
Rayon polaire r ou distance de base y		
Angle de pression δ		
Angle ou longueur de correction Δ		
Angle de pente γ		

Tableau III. 1 Définition de paramètres de cames

- **Cas d'une came effectuant une rotation** : dans les calculs, on incrémente la position angulaire de la came de point en point. Dans la plupart des cas, l'incrément de l'angle polaire vers le centre du suiveur n'est pas constant mais au contraire variable ; cela signifie que le suiveur avance ou retarde par rapport à la rotation de la came et que les différentes positions angulaires du centre du galet sont réparties irrégulièrement.

L'angle de correction est l'angle entre le rayon polaire du suiveur et le rayon polaire vers le point où le centre du suiveur se trouverait si le suiveur n'avait pas effectué de montée ou de descente.

- *Cas d'une came effectuant une translation* : la longueur de correction est la distance entre le centre du suiveur et l'endroit où ce centre se trouverait si le suiveur n'avait pas bougé.

- **Angle de pente** (tableau III.1)

C'est l'angle entre la normale à la trajectoire du suiveur et le rayon polaire vers le point considéré.

On se sert de cet angle pour le calcul de la trajectoire de l'outil de taillage.

Pendant une période stationnaire, le rayon polaire et les angles de pression, de correction et de pente restent constants et leurs valeurs sont égales à celles qu'elles ont acquises à la fin de la levée précédente.

III.3.1.2 Méthodes de détermination

On utilise le **théorème de Kennedy** : considérons le mouvement relatif de deux corps comme une rotation instantanée autour d'un point appelé pôle.

Si l'on considère le mouvement de trois corps, on trouve trois pôles (figure 6) :

- corps \hat{A} - corps \hat{A} : pôle P_{12}
- corps \hat{A} - corps \hat{A} : pôle P_{23}
- corps \hat{A} - corps \hat{A} : pôle P_{13}

Qui, selon le théorème de Kennedy, se trouvent sur une droite.

On utilise aussi les propriétés suivantes des pôles : si l'on considère que le pôle P_{23} est relié aussi bien au corps \hat{A} qu'au corps \hat{A} et que la vitesse relative de ce pôle par rapport au corps \hat{A} peut être calculée de deux façons (selon que le pôle est considéré comme lié au corps \hat{A} ou au corps \hat{A}), on a deux vitesses et qui, pour le pôle P_{23} , sont telles que :

Les méthodes de détermination des angles de pression et les coordonnées polaires de la trajectoire du centre du suiveur sont fonction du type de suiveur. En revanche, les méthodes de calcul de la courbure et de la trajectoire du centre de l'outil de taillage, ainsi que le contrôle des phénomènes d'interférence, sont indépendants du type de suiveur. On peut donc les étudier de façon générale.

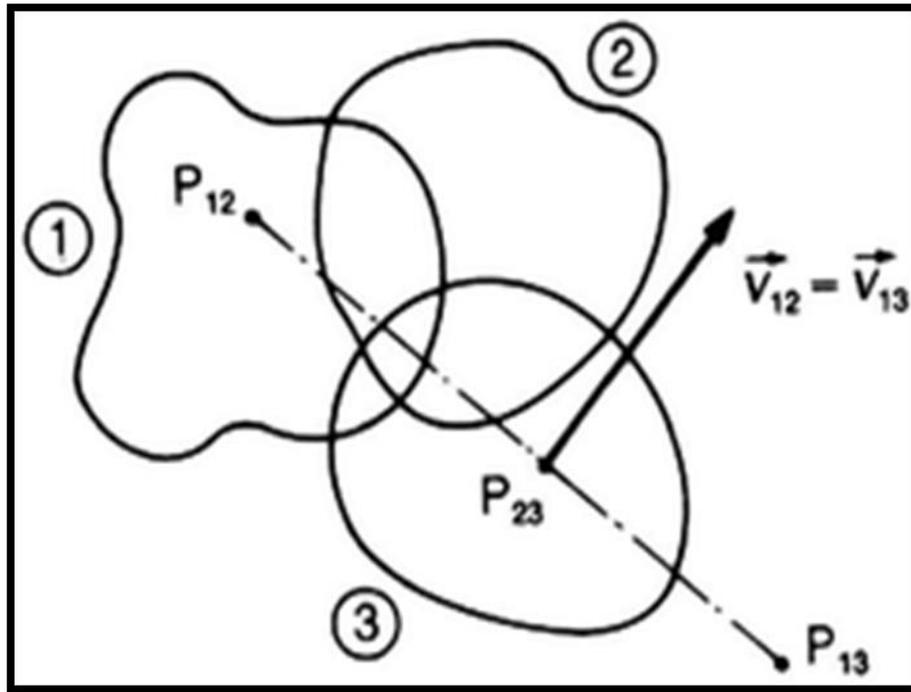


Figure III. 6 Théorème de Kennedy

III.3.1.3. Came disque et suiveur coulissant à galet centré

Valeurs des paramètres (figure III.8)

Rayon polaire :

$$r = [(r_0 + s)^2 + e^2]^{1/2} \tag{III.1}$$

avec :

e : excentricité.

Angle de pression :

$$\delta = \arctan \frac{e}{r_0 + s} \text{ pour la partie active} \tag{III.2}$$

$$\delta = \arctan \frac{e}{r_0} \text{ pour la partie arrêt} \tag{III.3}$$

Angle de correction :

$$\Delta = \arctan \frac{e}{r_0 + s} - \arcsin \frac{e}{r_0} \tag{III.4}$$

Angle de pente :

$$\Delta = \arctan \frac{v_s / \omega - e}{r_0 + s} - \arcsin \frac{e}{s + r_0} \tag{III.5}$$

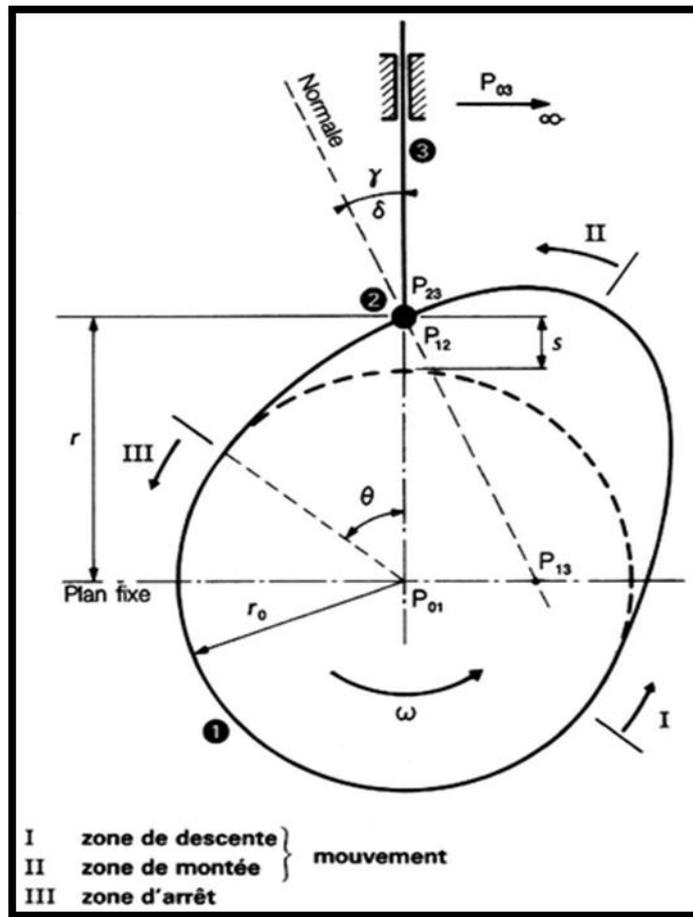


Figure III. 7 Came disque et suiveur coulissant à galet centré : paramètres

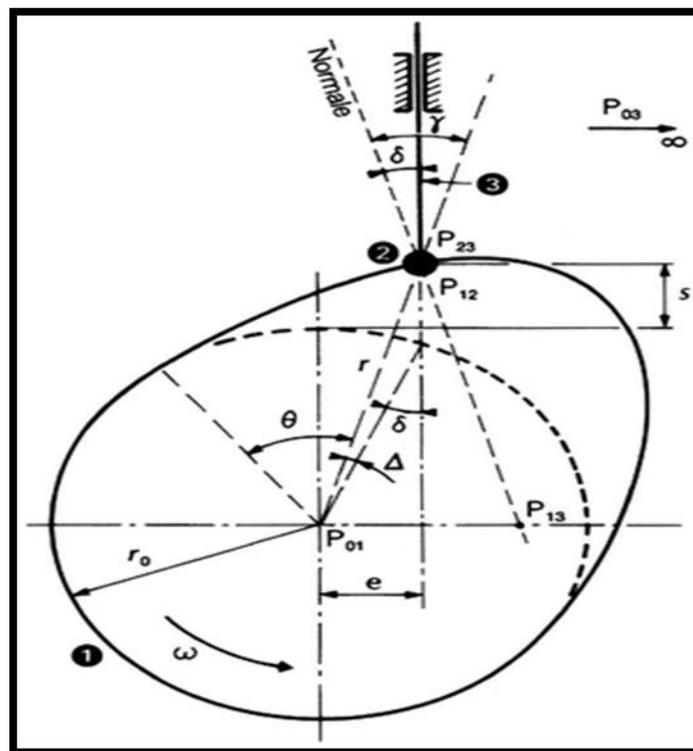


Figure III. 8 Came disque et suiveur coulissant à galet excentré : paramètres

III.3.1.4. Came disque et suiveur coulissant à plateau

- Valeurs des paramètres (figure III.9)

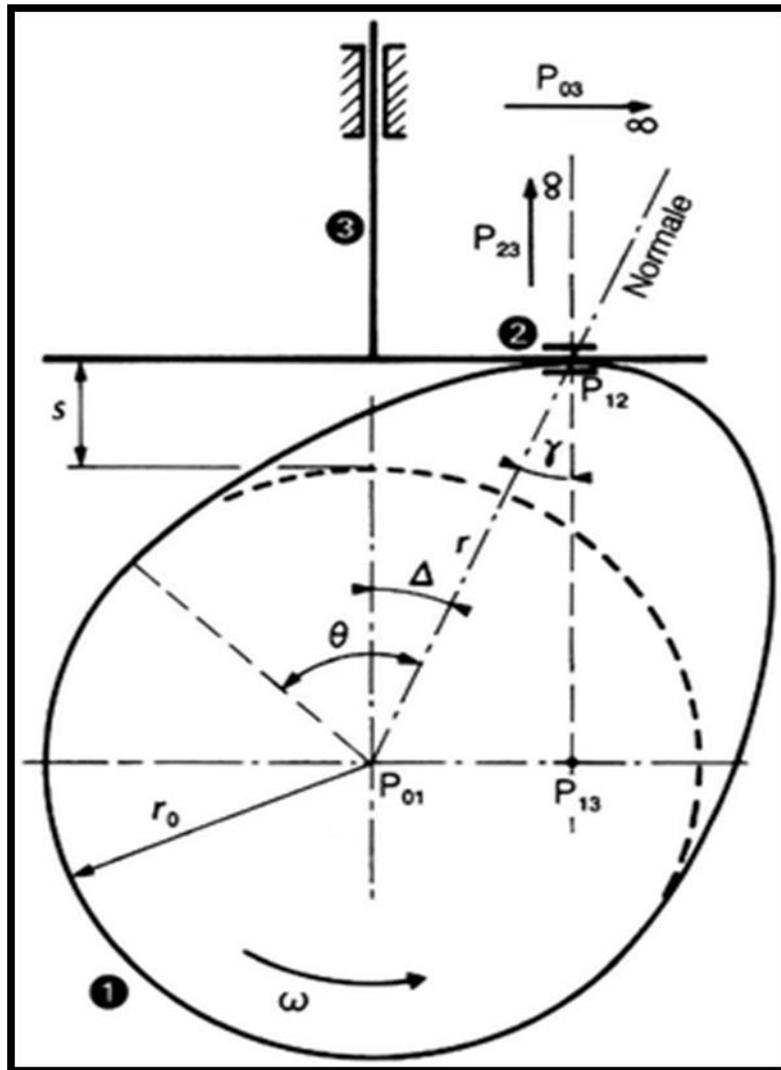


Figure III. 9 Came disque et suiveur coulissant à plateau : paramètres

Rayon polaire :

$$r = \left[(r_0 + s)^2 + \left(\frac{v_s}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{III.6})$$

Angle de pression :

$$\delta = 0 \quad (\text{III.7})$$

Angle de correction :

$$\Delta = \arctan \frac{v_s / \omega}{r_0 + s} \quad (\text{III.8})$$

Angle de pente :

$$\gamma = \Delta \quad (\text{III.9})$$

III.3.1.5. Came rectiligne et suiveur coulissant

- Valeurs des paramètres (figure III.12)

Ordonnée du centre du suiveur :

$$y = s + s_0 \quad (\text{III.10})$$

Angle de pression :

$$\delta = \arctan \frac{v_s}{v_c} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

v_c : vitesse linéaire de la came

v_s : vitesse de la tige du suiveur.

Longueur de correction :

$$\Delta = 0 \quad (\text{III.12})$$

Angle de pente :

$$\gamma = \delta \quad (\text{III.13})$$

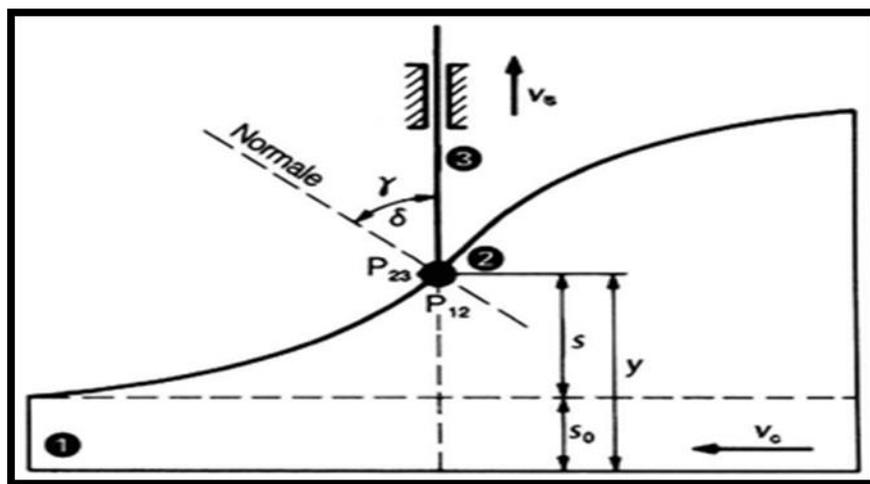


Figure III. 10 Came rectiligne et suiveur coulissant : paramètre

III.3.1.6. Came rectiligne et suiveur oscillant

- Valeurs des paramètres (figure III.13)

Ordonnée en partie active :

$$y = y_0 + L_2(\cos\varphi_0 - \cos\varphi) \quad (\text{III.14})$$

Avec y_0 et φ_0 ordonnée et position angulaire au début du mouvement du suiveur par rapport à la normale au déplacement de la came.

Pendant l'arrêt, l'ordonnée est :

$$y_0 = L_1 + L_2 \cos\varphi_0 \quad (\text{III.15})$$

Angle de pression :

- pour la partie montante :

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(L_2 + \frac{v_c}{\dot{\varphi}} \cos\varphi\right) \left(\frac{v_c^2}{\dot{\varphi}^2} + L_2^2 + 2 \frac{v_c L_2}{\dot{\varphi}} \cos\varphi\right)^{-1/2} \quad (\text{III.16})$$

- pour la partie descendante :

$$\delta = \arccos\left(L_2 + \frac{v_c}{\dot{\varphi}} \cos\varphi\right) \left(\frac{v_c^2}{\dot{\varphi}^2} + L_2^2 + 2 \frac{v_c L_2}{\dot{\varphi}} \cos\varphi\right)^{-1/2} - \frac{\pi}{2} \quad (\text{III.17})$$

Conclusion générale

Enfin, nous concluons que l'arbre à cames est un dispositif découvert dès le Moyen Âge. Aujourd'hui, l'arbre à cames est un élément essentiel du moteur. On l'appelle aussi "arbre de distribution" car il contrôle l'ouverture des soupapes.

Nous avons également abordé dans ce chapitre la position de l'arbre à cames.

L'arbre à cames a trois types : L'arbre à cames latéral, L'arbre à cames en tête, Double arbre à cames en tête.

Dans le deuxième chapitre, nous avons parlé des détails de l'arbre à cames et de son importance, Nous avons donc parlé de ses définitions d'abord puis de son mécanisme de fonctionnement avec quelques dessins et structures dessinées. Nous avons également parlé des positions des arbres à cames dans les moteurs et d'un schéma détaillant son rôle important dans le moteur. Nous avons parlé de ses contacts avec les roulements. Au final, nous avons parlé des cames en particulier, de leur mécanisme d'action et de leur conception.

Dans le troisième chapitre, nous avons parlé du mécanisme d'action des cames et de leurs classifications Suivant le cycle et Suivant le modèle. Nous avons également parlé de la classification des suiveurs, et à la fin nous avons parlé des propriétés d'ingénierie des cames.

Bibliographie

- [1]. DESIGN & ANALYSIS OF CAMSHAFT 1S.G.THORAT, 2NITESH DUBEY, 3ARVIND SHINDE, 4PUSHKAR FULPAGARE, 5MANISH SURYAVANSHI .
- [2]. (en) Wilson, Andrew (2002), « Machines, Power and the Ancient Economy », *The Journal of Roman Studies*, vol. 92, p. 1–32 (16).
- [3]. Brun, J.-P., « Les fortunes de la roue... à eau » [archive], *Pourlascience.fr* et *Pour la Science*, n° 88, juillet-septembre 2015.
- [4]. Jean Gimpel, *La Révolution industrielle du Moyen Âge*, Éditions du Seuil, 1975 (ISBN 978-2-02-054151-0).
- [5]. Technique : L'arbre à cames, page 2 ([http:// www. motorlegend. com/ entretien-reparation/ moteur-voiture/ l-arbre-a-cames/ 9,11653. html](http://www.motorlegend.com/entretien-reparation/moteur-voiture/l-arbre-a-cames/9,11653.html)) - *Motorlegend*, 2 août 2005
- [6]. arbre à cames [Guesmi Lamine & Zitouni Sabri, cours moteur thermique, ISET du Kef, 20 décembre 2014
- [7]. [.sur site ornikar](#)
- [8]. **Arbre à cames** *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73426156>
Contributeurs: A2, AhBahDaiMonPauvreVieux, Akiko, Alno, Arnaud.Serander, Ascaron, BenoitStandre, Bestter, Borowski, Chatsam, Chris93, Dr Brains, Dryt, Dupontetdupond, Emico31, Eutvakerre, FILLL, Fabriced28, Greudin, Gédé, Ilario, Jbaropuig, LaurentG, Litlok, Ludo29, Nanoreso, Nerijp, Pano38, Philippe.petrinko, Pulsar, Rigoureux, Ruizo, Sador, Scullder, Ton1, Touchatou, Van Rijn, Wikig, X-Ray91270, Xlory, Zetud, 25 modifications anonymes
- [9]. [http:// www. conceptcarz. com/ vehicle/ z13561/ Peugeot-L45. aspx](http://www.conceptcarz.com/vehicle/z13561/Peugeot-L45.aspx) .
- [10]. Design and Analysis of Camshaft SUDHEER Y1, RAGHUNATHA REDDY C2
- [11]. Technique : L'arbre à cames, page 2, *Motorlegend*, 2 août 2005.
- [12]. http://lpjp.moto.free.fr/images/file/MA/distribution_commande_prof.pdf
- [13]. Marc Julien, performance 4 temps, *Edition Configtech*, 31 décembre 2012.
- [14]. <http://i68.servimg.com>.
- [15]. **Jean MARTIN**. Mécanismes de transformation de mouvement à contact local Article de référence : B5910 v2. Date de publication : 10 oct. 2004.