



L'arbre à cames

En conteur extraordinaire de la chose, Jacques Perret, docteur ès mécanique, vous convie à voyager dans le monde étonnant de l'arbre à cames. Confidences et secrets d'une pièce sans laquelle un V-Twin H-D ne serait pas tout à fait ce vrai gros moteur dont il est possible de tirer le maximum...

GÉNÉRALITÉS :

L'arbre à cames assure la levée des soupapes, la durée d'ouverture des soupapes, et enfin le phasage de ces événements avec la rotation du vilebrequin (position du piston), c'est ce que l'on appelle le diagramme de distribution. De plus, l'arbre à cames devra s'acquitter de cette tâche en malmenant le moins possible les organes de distribution. Ce point est particulièrement crucial dans le cas du big-twin H-D dont la distribution "à l'ancienne" (poussoirs, longues tiges de poussoirs, culbuteurs) est nettement plus sensible aux "brusqueries" qu'une distribution par arbre à cames en tête.

Sur le moteur Harley-Davidson d'origine, les caractéristiques de l'arbre à cames ont été habilement déterminées pour limiter au maximum les émissions polluantes, le bruit, et augmenter la fiabilité. Cela se traduit par des cotes sous-dimensionnées par rapport à la cylindrée, qui limitent de façon dramatique les performances, surtout dans les tours. C'est particulièrement vrai sur les modèles à partir de 1992 dotés de cames dont les cotes laissent tout simplement rêveur au regard de la cylindrée.

Le montage d'un arbre à cames performance sur un moteur d'origine, accompagné bien sûr de la modification ou du remplacement de l'admission, de l'échappement et de l'allumage, apporte un gain de puissance sensible (de l'ordre de 75 cv à la roue arrière à 6000 tr/mn avec une excellente combinaison). L'influence de l'arbre à cames augmente de pair avec le degré de modification du moteur (culasses, pistons, rapport volumétrique, cylindrée...)

Dans le cadre d'une excellente préparation, l'arbre à cames doit être choisi en fonction de nombreux facteurs, comme la cylindrée, la plage de régime utilisée, la perméabilité des culasses, le rapport volumétrique, le rapport alésage/course, le système d'alimentation (atmosphérique ou suralimentation), le système d'échappement (drag-pipe ou silencieux). Parfois même le rapport course/longueur de bielle (dont dépend l'accélération du piston à partir du PMH) est pris en compte !

Le choix de l'arbre à cames idéal pour une combinaison donnée n'est donc pas chose facile, même si depuis quelques années l'informatique et des logiciels de plus en plus performants apportent une aide remarquable quant à l'analyse d'un certain nombre de paramètres, car le choix "du" bon profil de came n'est pas une science exacte. S'il est possible avec de l'expérience de sélectionner quelques arbres à cames qui conviennent à cette combinaison, seuls les essais intensifs au banc vont permettre de trouver le meilleur. Cela sera d'autant plus vrai que la combinaison en question sera radicale. Malheureusement, au hasard des discussions ou de la lecture de certaines fiches techniques, on se rend compte que trop souvent l'arbre à cames est choisi de façon arbitraire (y compris par certains professionnels), sans compréhension réelle des problèmes. Cela se traduit généralement par des performances pour le moins décevantes au regard de l'investissement réalisé. Car, comme dans d'autres domaines, trop gros n'est pas toujours meilleur.

1 - Ce schéma de la came de base montre les différentes caractéristiques qui lui sont liées :

1) La levée est la différence entre le rayon de base et la longueur totale de la came, il s'agit de la levée de la came et non pas de la soupape. Pour obtenir cette dernière il faut multiplier la levée de came par le coefficient multiplicateur du culbuteur (1,6 sur Evo.). Attention : la valeur de levée (total lift) inscrite dans la doc, accompagnant un arbre à cames est la levée de la soupape.

2) Le rayon de base de la came est un élément essentiel qui est trop souvent oublié lors du choix d'un arbre à cames.

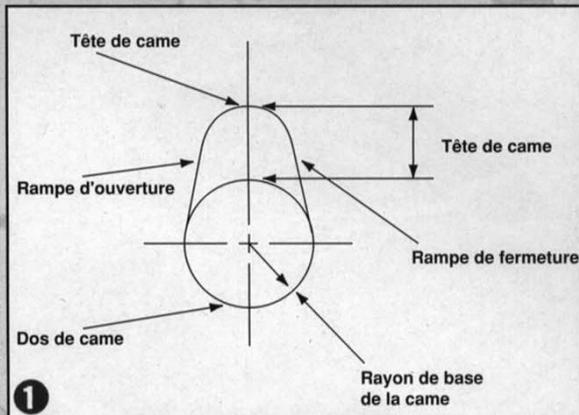
3) La rampe d'ouverture se décompose en deux parties : la rampe de silence qui est chargée de mettre "sous tension" les éléments de la distribution avec une relative douceur, et la rampe de levée proprement dite.

4) La rampe de fermeture ne doit pas être trop brutale car cela peut provoquer le rebondissement de la soupape sur son siège. La tenue mécanique de l'ensemble peut en être affectée.

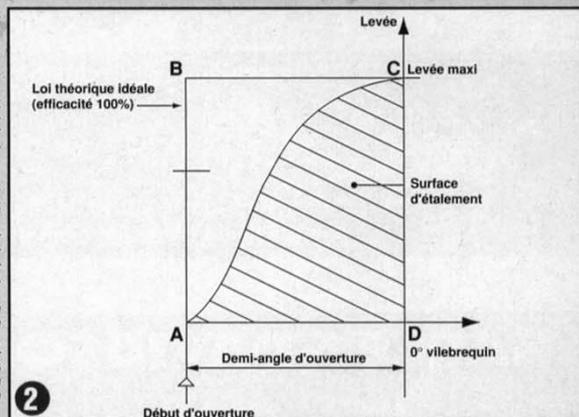
2 - L'efficacité de la loi de levée d'un arbre à cames se traduit par le rapport entre deux surfaces :

- La surface du rectangle ABCD correspondant à la loi théorique idéale (ouverture et fermeture instantanées de la soupape), impossible à obtenir pour des raisons mécaniques évidentes.

- La surface située sous la courbe représentant la loi de levée effective de l'arbre étudié, c'est la surface d'étalement. Plus cette dernière est importante, plus l'efficacité est grande. Les arbres à cames les plus performants possèdent une surface d'étalement égale à 60 % de la surface théorique totale.



1



2

LA LEVÉE DE SOUPEPE (schéma n°1)

La levée ainsi que le diamètre du siège de la soupape conditionnent la section de passage des gaz au travers de la culasse. Plus la levée augmente, plus le flux des gaz est important. Mais cela n'est vrai que jusqu'à une certaine valeur, liée aux caractéristiques de perméabilité de la culasse. Sur des culasses de drag, le flux augmente proportionnellement à la levée jusqu'à une valeur de l'ordre de 0.830 inch ; par contre, sur la culasse Evo d'origine, le flux se stabilise au-delà de 0.495 inch de levée.

Si le fait d'augmenter la levée permet de gagner effectivement en couple et en puissance, trop de gens se limitent à cette simple caractéristique. Car plus que la valeur de la levée maxi, c'est la façon dont s'ouvre la soupape qui est déterminante, et ce point est une règle de base dans la définition de tout arbre à cames performant.

En effet, à valeurs de levée et de durée identiques, une soupape s'ouvrant très rapidement laissera passer beaucoup plus de gaz qu'une soupape s'ouvrant et se fermant lentement. La première restant plus longtemps à la levée maxi. C'est ce que l'on appelle l'efficacité de la loi de levée.

EFFICACITÉ DE LA LOI DE LEVÉE (schéma n°2)

Pour traduire cette efficacité, on définit deux surfaces que l'on va comparer entre elles.

La première constitue la surface de référence qui représente la loi de levée idéale théorique,

c'est à dire une soupape s'ouvrant instantanément à sa levée maxi, y restant toute la durée d'ouverture, et se fermant instantanément. Cela est malheureusement impossible à obtenir pour des raisons mécaniques évidentes. Cette surface constitue donc un rectangle de référence ABCD.

On définit ensuite la surface d'étalement de la came, à étudier en représentant la courbe de levée de la soupape par rapport à la rotation du vilebrequin.

Le rapport de la surface située sous cette courbe (surface d'étalement) et de la surface de référence détermine le degré d'efficacité de la loi de levée. Bien entendu, plus ce rapport est élevé, mieux c'est. Dans le meilleur des cas, et avec des arbres à cames en tête à poussoirs plans, on arrive à des valeurs maxi de l'ordre de 60 %. Au-delà, les critères d'accélération, de décélération, de pression de Hertz, etc. entraînent des contraintes mécaniques trop élevées pour la distribution.

Dans le cas de notre cher V-Twin, les valeurs maxi admissibles sont bien sûr largement inférieures, en raison de la conception de la distribution. Les longues tiges de poussoirs (même les plus performantes), associées à la cinématique des culbuteurs, ne peuvent supporter en effet des valeurs d'accélération équivalentes à celles d'une distribution par arbre à cames en tête, ce qui constitue une des nombreuses limites du concept de ce moteur.

Une loi de levée efficace présente une forte accélération de la soupape dès l'ouverture pendant un temps très court, suivie d'une longue période de décélération pour éviter tout risque

(Suite page 104)



d'affolement à la levée maxi. En ce qui concerne l'accélération, on reste tributaire de la cinématique (coefficient multiplicateur du culbuteur de 1.6 sur un moteur Evolution) et de la rigidité relative des éléments de distribution (toujours ces fameuses tiges) ; on doit donc rester dans des normes acceptables. De plus, le phénomène d'affolement est à prendre particulièrement en compte sur un moteur H-D en raison de la masse totale de la distribution. L'affolement se caractérise par le fait que la soupape ayant subi une accélération trop forte (came très raide ou régime très élevé) se désolidarise du profil de came sous l'effet de sa propre inertie, au moment où l'accélération imprimée diminue.

L'inertie étant en relation directe avec la masse, sur un moteur H-D il faut tenir compte, en plus de celle de la soupape, de la masse de tous les éléments de la distribution (poussoirs, tiges, culbuteurs), ce qui à la fin donne une valeur très élevée favorisant largement le phénomène d'affolement.

Si l'ouverture rapide de la soupape est fortement souhaitable sur le plan de l'efficacité, elle possède cependant l'inconvénient d'exiger un

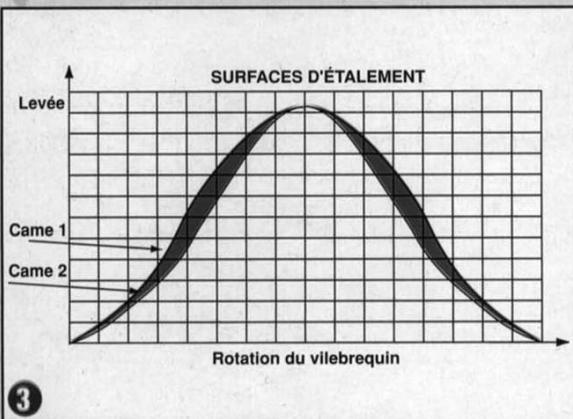
Toujours au niveau de la fiabilité, la came ne doit pas provoquer une fermeture trop brutale de la soupape, car malgré la force du ressort de rappel, la soupape peut rebondir sur son siège. Les vibrations parasites ainsi engendrées entraînent un matage du siège (perte d'étanchéité) et un risque de rupture des coupelles. Cependant l'utilisation de sièges en alliage de bronze, qui présentent de bonnes qualités d'amortissement, limite les risques.

Définir une loi de levée est donc complexe, et dépend du résultat de calculs brumeux prenant en compte les contraintes mécaniques subies par la distribution. Mais les constructeurs disposent d'une astuce pour associer au mieux efficacité et contraintes mécaniques limitées en jouant sur un élément essentiel, le rayon de base de la came.

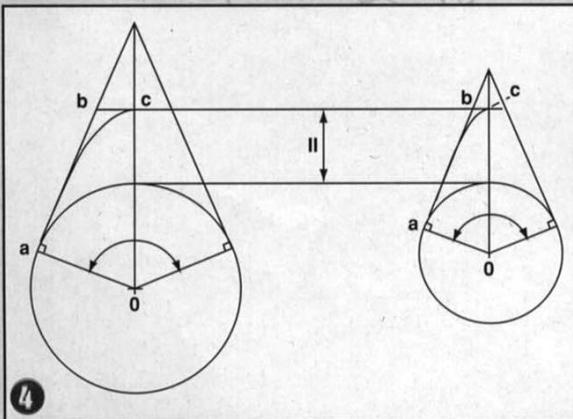
INFLUENCE DU RAYON DE BASE DE LA CAME

Il est illusoire de vouloir comparer les lois de levée de deux arbres à cames sur simple examen visuel, surtout si ceux-ci possèdent des rayons de base différents. (voir schéma n°3) En effet, pour une levée maxi et une durée d'ouverture données, l'influence du rayon de base de la came sur les accélérations et décélérations de la soupape est déterminante, les rayons de courbure des profils de cames étant totalement différents.

Il est à noter qu'à partir de rayons de base différents, il est tout à fait possible de dessiner des cames possédant les mêmes valeurs de levée et de durée. Cependant, la came au rayon de base le plus faible engendrera des accélérations et des décélérations plus importantes ainsi que des contraintes mécaniques plus élevées pour la distribution (la comparaison se faisant, bien entendu, au



3 - Comparer deux arbres à cames d'un simple coup d'œil n'est pas possible. Ce schéma représente les surfaces d'étalement de deux arbres à cames possédant des levées ainsi que des durées d'ouverture rigoureusement identiques, mais dont les lois de levée sont différentes. On constate que la came 1 possède une surface d'étalement bien supérieure à celle de la came 2, et sera par conséquent plus performante, malgré des caractéristiques d'apparence similaires.



4 - Le rayon de base a une influence déterminante sur les caractéristiques d'un arbre à cames. Ce schéma montre que pour des valeurs de levée et d'ouverture identiques, un rayon de base important donne beaucoup plus de latitude pour dessiner un profil de came idéal. De plus les arbres à cames à fort rayon de base sont beaucoup moins durs pour la distribution (à caractéristiques et à régime identiques bien sûr). En contrepartie, un fort rayon de base associé à une grande levée nécessite l'usinage du carter (sauf certaines marques comme S&S) pour installer l'arbre à cames.

même régime).

Sur le schéma n°4, on constate que le demi-profil de came doit s'inscrire dans une surface Oabc définie par la levée Oc fixée, par l'angle de sommet (dont la valeur est la moitié de l'angle d'ouverture), et enfin par le rayon de base de la came. Plus le rayon de base est

important, plus la surface Oabc est grande, donc plus on a la liberté de dessiner un profil large et très arrondi à son sommet. Un tel profil de came possède l'incontestable avantage de ralentir plus progressivement la soupape à l'approche de la levée maxi, et ses rayons de courbure plus importants diminuent les contraintes mécaniques (pressions de Hertz) subies par la distribution. Ce type de profil supporte mieux les hauts régimes, les tarages de ressort élevés, et limite les risques d'affolement. Dans un souci de fiabilité et de silence de fonctionnement, les arbres à cames d'origine ainsi que ceux qui se montent sans modification (bolt-

on) possèdent tous un rayon de base important. Lors de la conception d'un arbre à cames beaucoup plus méchant, le fabricant conserve dans la mesure du possible un rayon de base optimal. Mais là, encore et toujours, un problème de compatibilité se pose car on est toujours tributaire de l'architecture du carter. En effet, une levée importante (au-delà de 0,550) associée à un fort rayon de base nécessite la plupart du temps un retaillage du carter pour conserver un espace suffisant entre ce dernier et la came d'admission du cylindre arrière.

Entre rayon de base optimal et compatibilité, certains fabricants se fixent des priorités différentes. Prenons le cas d'arbres à cames possédant des caractéristiques similaires, le S&S 562 (0,560 de levée) et le Crane 310 H2 (0,550). S&S retient un rayon de base important dans un souci de tenue mécanique, mais, à moins de posséder un carter S&S, le 562 nécessite le retaillage de la plupart des carters existant sur le marché. Par contre, Crane a délibérément opté pour un rayon de base plus faible, concevant ainsi un arbre à cames fatiguant beaucoup la distribution (plus de bruit également), mais possédant l'avantage commercial d'être compatible avec tous les carters existants sans aucune modification. Rien que pour cette raison, beaucoup de professionnels, ne voulant pas se risquer dans l'usinage du carter, utilisent ce type d'arbre à cames.

Revenons à la levée proprement dite. Comme nous l'avons vu, la levée optimale dépend non seulement de la cylindrée mais aussi et surtout des caractéristiques de perméabilité des culasses. En fait, la levée idéale de soupape découle toujours de son diamètre. Jusqu'à une levée de 15 % du diamètre de soupape, le flux des gaz est contrôlé par la soupape et par le siège. A 25 %, le flux des gaz n'est plus restreint que par la perméabilité du conduit proprement dit, ainsi que par la forme de la chambre de combustion.

Sur le moteur d'origine, la levée n'excède pas 27 % du diamètre de la soupape d'admission (0.495 inch de 88 à 91, et 0.472 inch à partir de 92). Sur des moteurs plus performants la valeur de 30% est régulièrement atteinte, ce qui correspond à 0.600 inch avec des culasses performance équipées de soupapes plus grandes de 1.940 ou de 2 inch. Le meilleur moyen de déterminer la levée idéale est de passer la culasse en soufflerie (sujet que nous traiterons ultérieurement) et de tester différentes valeurs de levée. Cela permet de repérer la valeur où le flux est maximum et au-delà de laquelle il se stabilise. Sur la culasse d'origine, sachez que cette valeur est de 0.500 inch et qu'il n'est pas la peine d'installer un arbre à cames de levée supérieure, vous ne réussirez qu'à fatiguer inutilement votre distribution.

Sur des culasses HD préparées ou des culasses performance, la levée idéale est variable. En général, elle est comprise entre des valeurs de 0.560 à 0.630, alors que certaines culasses radicales permettent des levées supérieures à 0.780 inch. Sur les moteurs où la recherche de puissance est la priorité n°1, quitte à changer les guides de soupapes un peu plus souvent, il est intéressant d'utiliser un arbre à cames dont la levée est supérieure à la levée idéale. En effet, de par le design de la came, la loi de levée présentera une surface d'étalement supérieure, la soupape passant plus de temps à la levée idéale (inférieure à la levée max. de la came).

Dernier point concernant la levée d'un arbre à cames, celle indiquée dans les documents de référence accompagnant la pièce, est la levée effective de la soupape, c'est à dire que l'on a pris en compte le coefficient multiplicateur du culbuteur (1.6/1 sur Evolution). Par exemple, l'arbre à cames Red Shift 575 lève la soupape de 0.575 inch alors que la levée du lobe de la came est de 0.575 / 1.6 = 0.359 inch.

(À suivre...)

L'arbre à cames

Maintenant que vous savez tout sur la levée des soupapes, l'ami Jacques va vous expliquer le pourquoi du comment de ce que les Américains appelle "duration" mais que nous préférons appeler plus simplement - et plus explicitement - l'angle d'ouverture de la soupape. Ready... Go...

L'ANGLE D'OUVERTURE

L'angle d'ouverture s'exprime en degrés la rotation du vilebrequin (et non pas de l'arbre à cames lui-même), pendant laquelle la came soulève la soupape de son siège. Le gros avantage de cette notion d'angle par rapport à celle de durée d'ouverture est d'être uniquement liée à l'arbre à cames, et de permettre ainsi les comparaisons. En effet, la durée d'ouverture de la soupape ne dépend pas seulement de l'angle de levée de la came, mais également du régime moteur, facteur totalement indépendant de la nature de l'arbre à cames. Pour un angle d'ouverture donné, la durée d'ouverture va diminuer proportionnellement à l'augmentation du régime.

Prenons par exemple l'arbre à cames Andrews EV 46 dont l'angle d'ouverture est de 246°. À 3000 tr/mn, la durée d'ouverture de la soupape d'admission est de 13,6 millièmes de seconde ; à 6250 tr/mn, cette durée est réduite à 6,6 ms, soit de plus de la moitié. Et pourtant, les gaz d'admission doivent toujours remplir le même volume en passant par le conduit de culasse dont la section demeure fixe.

Par conséquent, le remplissage diminue avec l'augmentation du régime. Optimal au régime de couple maxi, il décroît ensuite au fur et à mesure que le régime augmente. En fait, le seul moyen disponible pour améliorer le remplissage dans les tours est d'augmenter la durée d'ouverture de la soupape, donc l'angle d'ouverture de la came. Mais attention, cela n'est valable que jusqu'à un certain point. Car, comme toujours, tout est histoire de compromis.

Pour une cylindrée donnée, l'augmentation de l'angle d'ouverture va, certes, permettre au moteur d'atteindre des régimes plus élevés, mais la valeur de couple maxi va également se situer à un régime plus élevé. Les performances à bas régime vont donc s'en trouver affectées. Ce que l'on gagne dans les tours, on le perd en bas, ce qui n'est pas toujours l'objectif recherché sur un big-twin.

En effet, si un angle d'ouverture important les soupapes seront ouvertes trop longtemps pour permettre de conserver une compression suffisante dans les cylindres, condition indispensable aux performances à bas régime.

Quelle valeur d'angle choisir ?

Là encore, tout dépend de ce que l'on recherche car il n'y a pas de recette miracle. On est obligé de choisir entre deux caractéristiques moteur peu compatibles : gros couple à bas régime ou puissance maximum dans les tours. D'une certaine façon, la valeur de l'angle d'ouverture va déterminer la plage de régime dans laquelle le moteur va

s'exprimer pleinement.

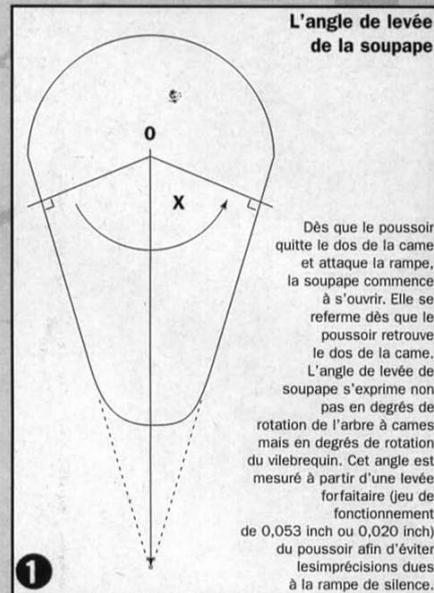
Un angle très important donnera un moteur pointu, avec un couple placé très haut conditionnant une plage d'utilisation très réduite mais où la puissance sera importante. D'autre part, le ralenti se verra très affecté en raison, nous le verrons plus loin, d'un croisement et d'un "retard fermeture échappement" importants. C'est ce qui se passe sur les drags dont le régime de ralenti est parfois supérieur à 2500 tr/mn, et dont le moteur commence à se réveiller, brutalement certes, au delà de 6000 tr/mn.

Un angle de faible valeur va donner des conditions optimales de remplissage dès les plus bas régimes. Le couple maxi sera placé très bas et procurera des reprises franches à la moindre sollicitation de la poignée. Le ralenti sera très stable dès 800 tr/mn. Cependant, au-delà du régime de couple maximum, le remplissage chutera très vite et le moteur montera péniblement dans les tours. C'est ce que l'on observe, entre autres, sur le moteur d'origine.

Dans le cas du moteur Harley-Davidson, le choix est cependant favorisé par le fait que sa plage d'utilisation "normale" est relativement réduite par rapport à des moteurs multicylindres montant très haut dans les tours. D'une façon générale, hormis ceux qui souhaitent faire de la course de drag, on peut considérer dans un souci de fiabilité qu'une plage d'utilisation comprise entre 1000 et 6200 tr/mn peut être considérée comme satisfaisante. Au-delà de 6500 tr/mn on commence à user franchement la mécanique. En fonction du type de machine (poids, carénage...) et du type d'utilisation (routière ou "street"), on peut diviser cette plage en deux parties : de 1000 à 4000 tr/mn (Electra Glide, utilisation routière) et de 3000 à 6000 tr/mn ("street machines").

Pour un moteur Evolution 1340 cm³, l'arbre à cames d'origine (après 1992) possède un angle à l'admission de... 208° ! Dans le cadre d'une préparation simple où l'on ne touchera pas à la culasse, une valeur d'ouverture de l'ordre de 235° correspondra à la première plage, alors qu'une valeur de 250° permettra d'exploiter partiellement la deuxième. Avec une combinaison plus poussée (culasses modifiées, rapport volumétrique augmenté...), un angle de l'ordre de 260° doit être considéré comme un maximum et les 6500 tr/mn peuvent alors être facilement atteints.

Cependant, plus la cylindrée est élevée, plus le moteur est en mesure d'accepter des angles importants, et les "effets secondaires" liés aux fortes valeurs se font alors moins ressentir. Pour un 1600 cm³ (98 cid), la fourchette se situe entre 255° et 275° alors que pour des grosses cylindrées on peut aller jusqu'à 290° dans le cadre



d'utilisations extrêmes.

Les valeurs données ici sont valables pour un moteur atmosphérique équipé de culasses classiques bi-soupapes. Dans le cadre d'applications avec compresseur volumétrique ou turbocompresseur, ou avec des culasses multi-soupapes, ces valeurs sont revues à la baisse en raison, entre autres, d'un remplissage beaucoup plus efficace, en particulier dans les tours.

DURATION "@ 0.053" ou "@ 0.020"

Lorsqu'un fabricant annonce une valeur angulaire de levée de soupape, celle-ci est toujours donnée en correspondance avec un certain jeu de fonctionnement à la soupape. Comme nous l'avons vu, dans un souci de fiabilité, une came est toujours taillée pour brusquer le moins possible la distribution. C'est pourquoi on distingue, lors de l'attaque de la came, la rampe de silence et la rampe d'ouverture.

Le but de la rampe de silence est de mettre "sous tension" la distribution en rattrapant, avec la plus grande douceur possible, le jeu de fonctionnement. Cela permet de minimiser les chocs lors de l'attaque de la rampe d'ouverture proprement dite qui, elle, est beaucoup plus brutale.

Dans la zone de la rampe de silence, une levée de l'ordre de 0,1 mm peut correspondre à plus de 10° de rotation du vilebrequin. On comprend facilement que dans ces conditions il est impossible d'effectuer une mesure précise de la valeur angulaire de levée d'un arbre à cames. C'est pourquoi le fabricant fixe un jeu à partir duquel il estime la mesure angulaire valable.

Cette mesure s'effectue non pas au niveau de la soupape mais au niveau du poussoir. On positionne le vilebrequin de façon à ce que le poussoir se trouve sur le dos de la came. Sa levée est donc nulle. On fait tourner le vilebrequin jusqu'à ce que le poussoir s'élève à la valeur du jeu fixée, c'est la référence 0°. On continue à faire tourner le vilebrequin jusqu'à ce que le poussoir redescende à la valeur du jeu fixée. Le nombre de degrés de rota-

(Suite page 116)

tion du vilebrequin effectués correspond à la valeur angulaire de levée de la came.

Il apparaît comme évident que si cette mesure est effectuée sur une même came avec des valeurs de jeu différentes, la valeur de l'angle de levée sera différente. Par exemple, l'arbre à cames Andrews EV 46 possède un angle de levée de 246° avec un jeu de 0,053, mais mesuré avec un jeu de 0,020 inch cet angle est de 283°, et pourtant il s'agit de la même came.

C'est pour cela que lorsque l'on compare deux arbres à cames, il est nécessaire de s'assurer que les valeurs angulaires de levée sont données avec un jeu identique.

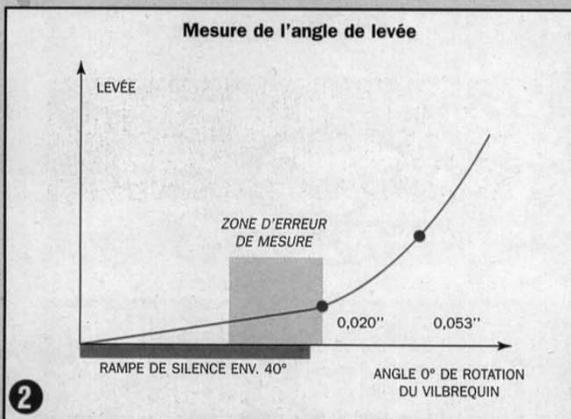
Dans le cas des arbres à cames pour Harley-Davidson, la valeur de ce jeu est fixée à un standard de 0,053 inch (1,34 mm) par tous les fabricants sauf un ; la firme Leineweber, qui mesure en effet la valeur angulaire de levée de ses arbres à cames avec un jeu de 0,020 inch (0,5 mm). L'intérêt d'un jeu de 0,053 est que, au-delà, l'élévation du poussoir est rapide par rapport à la rota-

tion du vilebrequin, rendant ainsi la mesure plus précise.

Les arbres à cames Crane sont livrés avec une fiche technique donnant l'angle de levée à @ 0,053 et leur dénomination correspond à l'angle de levée à @ 0,020. Le Crane 296 H2 par exemple, possède un angle de levée à l'admission de 252° à @ 0,053 et de 296° à @ 0,020. Le problème avec un arbre à cames Leineweber, c'est qu'il est difficile de le comparer précisément avec un autre dont on ne possède pas la valeur de levée à @ 0,020.

Valeurs angulaires à l'admission et à l'échappement :

Si on se penche un peu sur les angles de levée des arbres à cames disponibles sur le marché, on constate rapidement que la plupart du temps la valeur angulaire à l'échappement est supérieure à celle à l'admission. Cette différence varie de quelques degrés, parfois jusqu'à 16°, ce qui est très important. En fait cela est lié aux caractéristiques des culasses qui présentent le plus souvent une perméabilité à l'échappement inférieure à celle à l'admission. Avec la culasse d'origine et une levée de soupape de 0,500 inch, la perméabilité à l'échappement est de l'ordre de 80 % de celle à l'admission. C'est ce qui explique que les fabricants optent généralement pour un angle de levée supérieur sur le lobe d'échappement. Cependant sur des culasses parfaitement préparées, la différence entre échappement et admission est beaucoup plus réduite, moins de 10 %. Dans le cas d'utilisation de telles culasses, des arbres à cames avec une différence d'angle de levée beaucoup plus faible s'imposent, ce qui est très souvent le cas des arbres à cames "pointus" destinés à des moteurs très performants.



N'importe quelle came est usinée de façon à brusquer le moins possible la distribution afin d'éviter les bruits et l'usure excessive. La rampe de silence est chargée de mettre sous tension la distribution avant l'attaque de la rampe de levée proprement dite qui est beaucoup plus brutale. Sur ce schéma, on constate que sur la rampe de silence une rotation de 40° du vilebrequin est nécessaire pour obtenir une levée très faible (0,5 mm). Dans cette zone il est très délicat d'effectuer une mesure précise de l'instant (position du vilebrequin) où la soupape se lève. C'est pourquoi on utilise par convention un jeu forfaitaire (0,053 inch ou 0,020 inch pour les arbres à cames adaptables sur les Harley) à partir duquel la mesure est plus précise car la levée est beaucoup plus rapide. Lorsque l'on compare deux arbres à cames, il est fondamental de s'assurer que les angles de levée sont donnés avec les mêmes jeux. Avec le même arbre à cames, l'angle de levée @ 0,020 inch est supérieur d'environ 40° à celui mesuré à @ 0,053 inch.

LE CYCLE D'OUVERTURE ET DE FERMETURE DES SOUPAPES

On pourrait penser que lors des phases d'admission, la soupape s'ouvre lorsque le piston est au PMH (point mort haut) et se ferme lorsque le piston est au PMB (point mort bas), de même que lors de la phase d'échappement la soupape s'ouvre lorsque le piston est au PMB et se referme lorsqu'il est au PMH. Cela correspondrait à un angle de levée de 180° (un demi-tour de vilebrequin). En fait, il n'en n'est rien. Nous avons parlé précédemment d'angles de levée de 246°, 252°, voire même de 290°. Cela signifie que les soupapes sont ouvertes bien plus longtemps qu'un demi-tour de vilebrequin, car les moments d'ouverture et de fermeture sont volontairement décalés par rapport au PMH et au PMB, ceci pour deux raisons essentielles :

- les soupapes, étant commandées mécaniquement, imposent un délai significatif d'ouverture et de fermeture.
- les gaz d'admission et d'échappement ne se mettent pas instantanément en mouvement, ils sont l'objet d'un phénomène d'inertie très important.

L'admission :

Afin de provoquer le phénomène de balayage que nous étudierons plus loin, et de profiter de l'ouverture maximale de la soupape d'admission dès la descente du piston, il est

intéressant d'ouvrir cette dernière avant le PMH. L'angle de rotation du vilebrequin, compris entre le moment d'ouverture de la soupape et le PMH, est l'angle AOA (avance ouverture admission).

La descente rapide du piston crée à l'intérieur du cylindre une dépression avec aspiration du mélange. Lorsque le piston arrive au PMB, la pression régnant à l'intérieur du cylindre est encore inférieure à la pression atmosphérique. Le remplissage est donc incomplet, limité par les capacités du conduit d'admission de la culasse. L'astuce pour augmenter encore la quantité des gaz frais aspirés consiste à exploiter le fait qu'au PMB la dépression est toujours présente dans le cylindre et que la vitesse (donc l'inertie) des gaz dans le conduit d'admission est encore élevée, en retardant la fermeture de la soupape après le PMB. On aspire encore des gaz frais alors que le piston a déjà entamé sa remontée ! L'idéal est bien sûr de refermer la soupape d'admission lorsque la pression régnant dans le cylindre atteint la pression atmosphérique.

L'angle de rotation du vilebrequin compris entre le PMB et la fermeture de la soupape d'admission est l'angle RFA (retard fermeture admission).

L'angle de levée de la soupape d'admission ("duration") est égal à $AOA + 180° + RFA$.

L'échappement :

L'explosion du mélange provoque la descente du piston (temps moteur) ; arrivé au PMB, si la soupape d'échappement ne s'ouvre qu'à cet instant, la pression régnant dans le cylindre sera encore si élevée qu'elle va freiner notablement la remontée du piston, qui devra de plus évacuer la totalité des gaz brûlés en remontant. Cela occasionne une perte de puissance considérable.

En ouvrant la soupape d'admission avant que le piston n'arrive au PMB, les gaz brûlés s'évacuent d'eux-mêmes en raison de leur grande énergie résiduelle (température et pression) et la pression au-dessus du piston au moment de sa remontée est très fortement diminuée. On arrive ainsi à obtenir un gain de puissance pour le moins intéressant.

L'angle de rotation du vilebrequin compris entre l'ouverture de la soupape d'échappement et le PMB est l'angle AOE (avance ouverture échappement).

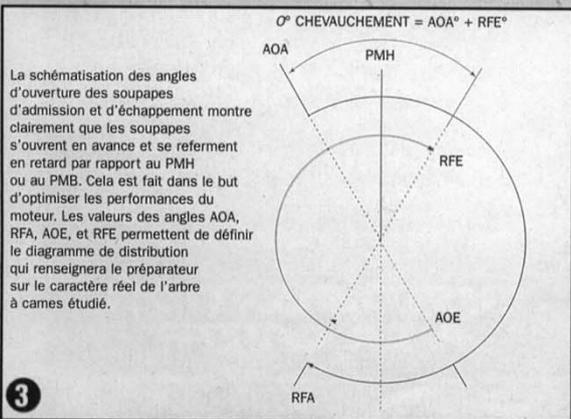
Après la remontée du piston au PMH, l'inertie des gaz d'échappement dans le conduit est encore élevée et provoque une dépression dans la chambre de combustion. En retardant délibérément la fermeture de la soupape d'échappement, on parvient non seulement à extraire encore des gaz brûlés après le PMH (on limite ainsi la dilution), mais aussi à mettre en mouvement les gaz frais à l'admission. En effet, le retard de fermeture de la soupape d'échappement permet d'amplifier la dépression créée dans la chambre de combustion, qui est communiquée au conduit d'admission, puisque la soupape d'admission est déjà ouverte. Par cette ouverture simultanée des deux soupapes, ce que l'on appelle le *croisement*, on active l'admission des gaz frais avant même la descente du piston. C'est le phénomène de balayage.

L'angle de rotation du vilebrequin entre le PMH et la fermeture de la soupape d'échappement est l'angle RFE (retard fermeture échappement).

L'angle de levée de la soupape d'échappement est égal à $AOE + 180° + RFE$.

Les valeurs des angles AOA, RFA, AOE et RFE déterminent le diagramme de distribution qui constitue la véritable carte d'identité d'un arbre à cames. Son analyse dévoile une foule d'informations sur cette pièce parfois si mystérieuse... C'est ce que nous aborderons la prochaine fois.

(À suivre)





L'arbre à cames (3)

Maître Jacques vous l'avait promis : vous saurez tout, mais vraiment tout, sur les secrets insondables de la mécanique Harley. Alors puisque vous êtes des accros de cette rubrique, il a décidé de ne rien vous cacher sur les arbres à cames. À lire sans modération !

LE DIAGRAMME DE DISTRIBUTION

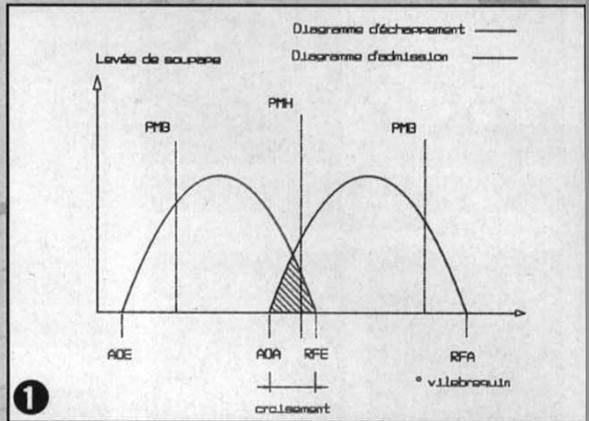
La levée et la valeur de l'angle d'ouverture ne sont pas les seules caractéristiques d'un arbre à cames. Les instants où les soupapes d'admission et d'échappement s'ouvrent et se ferment sont tout aussi influents sur les performances.

Ce timing d'ouverture et de fermeture des soupapes est, comme nous l'avons vu dans le numéro précédent, défini par rapport à la position du vilebrequin grâce aux angles AOA, RFA, AOE et RFE. Changer la valeur de ces angles correspond à changer les moments où les soupapes s'ouvrent et se ferment. Ceci a des conséquences très sensibles sur les performances du moteur et en particulier sur la plage de régime dans laquelle celui-ci va s'exprimer pleinement. Là encore, il faudra choisir le bon compromis entre hauts et bas régimes, car il sera impossible de satisfaire les deux simultanément.

Comme nous l'avons vu, l'augmentation de l'angle d'ouverture de la came déplace les valeurs de couple et de puissance maxi plus haut dans les tours. Conséquence immédiate, les bas régimes s'en trouvent directement affectés.

En effet, si on augmente l'angle d'ouverture, les soupapes vont s'ouvrir plus tôt, et se refermer plus tard. Ouvrir la soupape d'admission plus tôt (angle AOA plus grand) peut favoriser le remplissage dans les tours, mais peut également provoquer à bas régime des retours de gaz frais dans la tubulure d'admission. De même, une fermeture plus tardive de la soupape d'échappement (angle RFE plus grand) est intéressante à haut régime

Le diagramme de distribution :
L'ensemble des caractéristiques de l'arbre à cames, levée, angle de levée, AOA, RFA, AOE, et RFE, définissent le diagramme de distribution. Son étude, notamment l'analyse du calage des lobes et du croisement permet de se faire une bonne idée sur le tempérament de l'arbre à cames. C'est un outil indispensable pour comparer deux cames entre elles afin de faire d'emblée un choix cohérent en fonction de ses besoins.



car elle favorise le phénomène de balayage, mais provoque dans les basses plages une perte de gaz frais dans le conduit d'échappement.

Mais, bien plus que les angles AOA et RFE, ce sont dans l'ordre les angles RFA et AOE qui sont de loin les plus importants en matière de recherche de puissance, et leur modification aura des répercussions très marquées sur les caractéristiques moteur. En effet, ces deux angles indiquent respectivement le moment où la soupape d'admission se referme et celui où la soupape d'échappement s'ouvre. Entre ces deux événements, le cylindre est hermétiquement clos puisque les deux soupapes sont fermées, et il s'y passe deux phénomènes essentiels : la compression, puis l'explosion-détente du mélange.

Angle RFA et rapport volumétrique effectif :

La fermeture de la soupape d'admission marque le passage du cycle d'admission au cycle de compression des gaz. Or à cet instant, le piston a dépassé le PMB de la valeur de l'angle RFA et a déjà entamé sa remontée.

Nous avons vu dans le chapitre précédent la nécessité de ce retard de fermeture de la soupape d'admission pour exploiter au maximum l'énergie inertielle des gaz frais dans le

conduit d'admission et ainsi favoriser grandement le remplissage. Cependant, il apparaît évident qu'il ne faut pas exagérer la valeur de l'angle RFA car cela va dans le sens d'une réduction de la course de compression (diminution du rapport volumétrique effectif), ce qui est très pénalisant sur le plan des performances.

Ouvrons une petite parenthèse. Le rapport volumétrique exprime le rapport du volume occupé par le mélange gazeux en début de compression à celui qu'il occupe en fin de compression. En théorie, on considère que la phase de compression débute lorsque le piston est au PMB. On calcule alors le rapport volumétrique (théorique) de la façon suivante :

$$Rv = \frac{V + v}{v} \text{ où } V = \text{cylindrée unitaire et } v = \text{volume de la chambre d'explosion.}$$

Sur le moteur Evolution d'origine, ce rapport est de 8,5 /1.

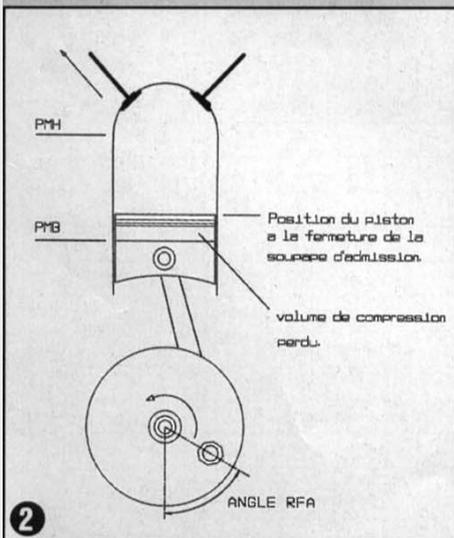
En réalité, comme la soupape d'admission se ferme avec retard, la phase de compression s'en trouve différée de la valeur de l'angle RFA. Au début de celle-ci, le gaz n'occupe plus le volume $V + v$, mais un volume $V' + v$ plus petit (le piston étant plus haut, $V' < V$).

On parle alors de rapport volumétrique effectif qui devient alors :

$$Rv_{eff} = \frac{V' + v}{v}$$

Si on ne raisonne que sur les volumes, la différence est significative : jusqu'à 3 points de moins avec un RFA de 63°.

Cependant, ces considérations toutes théoriques supposent un remplissage égal à 1, ce qui est loin d'être le cas. Si le rapport volumétrique est une caractéristique géométrique fixe du moteur, le taux de remplissage lui est une variable dépendante du régime. La raison d'être de l'angle RFA est de favoriser le remplissage optimal du moteur, et ce particulièrement dans les régimes élevés. Un moteur qui fonctionnerait avec un RFA nul aurait un remplissage bien médiocre. En début de compression (au PMB), la quantité de gaz introduite se trouverait en forte



Angle RFA et rapport volumétrique effectif :

L'angle RFA est une des caractéristiques les plus importantes du diagramme de distribution, puisqu'elle permet de définir le rapport volumétrique effectif. Le rapport volumétrique exprime le rapport du volume occupé par le mélange gazeux en début de compression à celui qu'il occupe en fin de compression. Dans le rapport volumétrique théorique on considère que la compression débute lorsque le piston est au PMB, alors que le rapport volumétrique effectif ne prend en compte la compression que lorsque la soupape d'admission est fermée. Plus l'angle RFA est important, plus le rapport volumétrique effectif sera faible ; on parle aussi de compression statique de l'arbre à cames. Cette caractéristique a une forte influence sur le caractère moteur.

2



dépression, cela est d'autant plus vrai que le régime est élevé.

Il faut donc déterminer l'angle RFA en fonction du régime auquel on souhaite exploiter le moteur, la soupape d'admission devant se refermer au moment où la masse des gaz admis atteint la pression atmosphérique. Ce moment arrive d'autant plus tard que le régime est élevé. Par conséquent, le meilleur moment pour refermer la soupape d'admission dépend directement du régime.

On en déduit que pour un angle RFA donné, le rapport volumétrique effectif ne sera proche du rapport volumétrique théorique que dans une plage de régime réduite. Plus on s'éloignera de cette plage, plus la différence sera sensible et plus les performances du moteur seront altérées.

Compression statique de l'arbre à cames :

Le rapport volumétrique effectif est directement lié à l'angle RFA, donc à l'arbre à cames. On parle aussi de compression statique de l'arbre à cames. Plus l'angle RFA est important, plus celle-ci est faible. Aussi, pour éviter les pertes de rendement dans les basses plages liées aux grandes valeurs de RFA, il convient d'augmenter le rapport volumétrique théorique du moteur. Des arbres à cames à faible compression statique sont systématiquement utilisés sur des moteurs à rapport volumétrique élevé. À titre d'exemple, sur un 1340 proche de l'origine possédant un rapport volumétrique de 8,5 / 1, des RFA de 35° à 40° sont monnaie courante. Avec une préparation très poussée et un rapport de 10 / 1, on peut aller jusqu'à 50°, 54°. Un drag de 120 Cid, avec un rapport de 13 / 1 et tournant à plus de 7000

tr/mn, s'accommodera sans problème d'un RFA de 70° ! (par contre inutile d'espérer le démarrer avec un arbre à cames possédant un RFA de 35° donnant des compressions trop élevées).

Lorsque l'on compare deux arbres à cames possédant des levées et des angles de levée similaires, il faut donc prendre en compte en priorité la valeur de l'angle RFA. Plus celui-ci sera important, plus la plage de régime de couple maxi et de puissance maxi se trouvera dans les tours. Inutile donc de monter un arbre à cames avec un RFA de 67° (valeur courante en drag) sur une Electra d'origine équipée d'un side-car.

L'angle AOE :

L'instant d'ouverture de la soupape d'échappement, donc l'angle AOE, vient en second dans l'étude du diagramme de distribution. Le moment d'ouverture de la soupape d'échappement va influencer plusieurs facteurs :

l'évacuation des gaz brûlés, la pression résiduelle lors de la remontée du piston juste après le PMB, et la pression de combustion utilisée

Plus tôt la soupape d'échappement est ouverte, plus facilement seront évacués les gaz brûlés. Cette évacuation se fera spontanément en raison de la pression encore très élevée régnant dans le cylindre à l'issue de la combustion, et la pression résiduelle au dessus du piston, lorsque celui-ci entamera sa remontée après le PMB, sera faible limitant ainsi les pertes de puissance.

Cependant, plus l'ouverture de la soupape d'échappement intervient tôt dans le cycle explosion-détente, moins on bénéficie de la pression de combustion qui reste, ne l'oublions pas, la force motrice qui déplace le piston. Un angle AOE excessif diminue le rendement de façon très sensible. La valeur de l'angle AOE est donc encore sujette à un compromis pour favoriser au maximum le déplacement du piston, et ce, toujours en fonction de la plage de régime que l'on souhaite utiliser.

Dans les tours, où l'évacuation des gaz brûlés est un souci constant en raison du peu de temps disponible pour effectuer cette opération, l'utilisation d'un angle AOE important amène un gain de puissance en permettant la purge rapide et spontanée des gaz brûlés sans avoir recours à la force du piston pour ce faire. Cela nécessite cependant un système d'échappement particulièrement efficace, car l'effet de bouffée est important. Un moteur tournant avec un arbre à cames possédant un angle AOE important sera très sensible à la conception du système d'échappement, dans un sens comme dans l'autre. Il est

à noter qu'un arbre à cames possédant un angle AOE important rendra le volume sonore de l'échappement beaucoup plus élevé.

À bas régime, il est préférable de retarder l'ouverture de la soupape d'échappement afin d'utiliser le plus longtemps possible la force motrice des gaz issue de l'explosion, ce qui est prioritaire sur l'évacuation des gaz brûlés facilitée par le fait que l'on dispose de plus de temps avant le PMB pour l'effectuer puisque le moteur tourne moins vite.

De façon générale, le régime de puissance

maxi. augmente avec la valeur de l'angle AOE.

Le croisement des soupapes :

La valeur de croisement des soupapes correspond à l'angle q° de rotation du vilebrequin durant lequel les soupapes d'admission et d'échappement sont ouvertes simultanément. En fait, cela se produit lorsque le piston est proche du PMH et $q^\circ = AOA + RFE$. La valeur de croisement des soupapes est une caractéristique importante de l'arbre à cames puisque durant cette période se produisent des phénomènes essentiels au bon fonctionnement du moteur.

Comme les soupapes ne peuvent s'ouvrir et se fermer instantanément, leur mouvement progressif impose la période de croisement. Si la conception du système d'échappement est parfaitement réalisée, le croisement des soupapes permet l'évacuation des gaz brûlés résiduels alors que le piston termine sa remontée et atteint le PMH.

À haut régime à proximité du PMH, l'inertie des gaz d'échappement est encore très importante et peut être utilisée pour faciliter l'admission des gaz frais durant la période de croisement. Cela favorise énormément le remplissage, puisque la colonne gazeuse dans le conduit d'admission est instantanément mise en mouvement par la dépression créée dans la chambre de combustion par les gaz brûlés qui finissent de s'évacuer dans le conduit d'échappement.

À bas régime, l'inertie des gaz d'échappement est trop faible pour permettre ce phénomène de balayage dans la chambre de combustion. Aussi, si la valeur de croisement des soupapes est trop importante, on assiste à un phénomène de retour des gaz brûlés non seulement dans la chambre mais également dans la tubulure d'admission, ce qui provoque une gêne considérable de la carburation. Ce phénomène est courant sur les moteurs très "pointus" dont l'échappement n'est pas correctement réalisé, ce qui rend la mise au point de la carburation très délicate.

En fait une valeur donnée de croisement des soupapes n'est efficace que pour une plage de régime très faible dans laquelle le balayage de la chambre sera optimal.

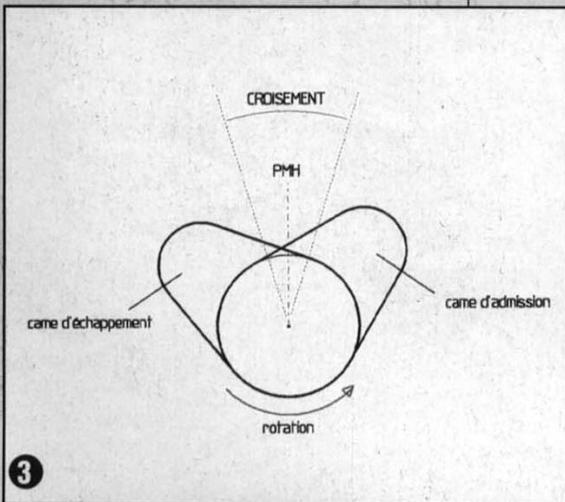
La valeur de l'angle de croisement des soupapes est fonction de deux facteurs :

- la valeur de l'angle de levée de soupape ("duration" dans la doc américaine) ;
- le calage des diagrammes de distribution (écart entre les sommets des cames).

Pour un calage donné, l'augmentation de l'angle de levée de la soupape va se traduire par une période de croisement plus grande puisque l'on augmente de façon égale les angles AO et RF. Dans ce cas, l'accroissement de la période de chevauchement est favorable aux régimes élevés mais pénalise les bas régimes. C'est pour cela qu'afin de conserver un minimum de couple à bas régime, il est nécessaire d'augmenter le rapport volumétrique. Il est à noter que les dragpipes sont particulièrement efficaces lorsqu'ils sont associés à des arbres à cames à fort chevauchement et des rapports volumétriques élevés.

Pour une valeur donnée d'angle de levée de soupape, la modification du calage des diagrammes d'admission et d'échappement fait également varier la valeur du croisement des soupapes, mais l'évolution des angles AO et RF est tout autre, et les effets sur le comportement moteur différents. C'est ce que nous aborderons une prochaine fois.

(À suivre)



VALEUR DE CROISEMENT DES SOUPAPES :

La valeur de croisement des soupapes correspond à l'angle q° de rotation du vilebrequin durant lequel les soupapes d'admission et d'échappement sont ouvertes simultanément.

Le croisement se produit lorsque le piston est proche du PMH. Sa valeur est égale à la somme des angles AOA et RFE, et son influence est grande sur le caractère moteur.

L'arbre à cames (4)

e vous avais dit que Jacques était intarissable sur les secrets et les mystères de l'arbre à cames. Aujourd'hui, il vous convie à déguster par le menu le deuxième chapitre qu'il consacre au diagramme de distribution et, à mon avis ce n'est pas terminé...

LE DIAGRAMME DE DISTRIBUTION (suite)

Le calage du sommet de came

En poussant plus avant l'étude de la documentation accompagnant un arbre à cames, vous ne manquerez pas de tomber une fois de plus sur une valeur angulaire présentée le plus souvent sous la dénomination de "max lift" ou, moins fréquemment, "lobe centerline". Chez nous, on appelle cela le calage du sommet de came. Le sommet de came est, comme son nom l'indique, le point où la levée de la soupape est maximale.

Le calage du sommet de came est toujours défini en degrés de rotation du vilebrequin nécessaires pour atteindre la levée max. de la soupape en prenant comme origine le PMH (point mort haut).

Pour le lobe d'admission on parle de degrés après le PMH, et pour le lobe d'échappement de degrés avant le PMH. Si l'on trouve quelques arbres à cames présentant des calages symétriques pour les lobes d'admission et d'échappement, la grande majorité adoptent systématiquement une valeur angulaire plus importante pour le calage du lobe d'échappement. Dans tous les cas l'angle de calage se situe dans une fourchette allant de 95° à 115° par rapport au PMH.

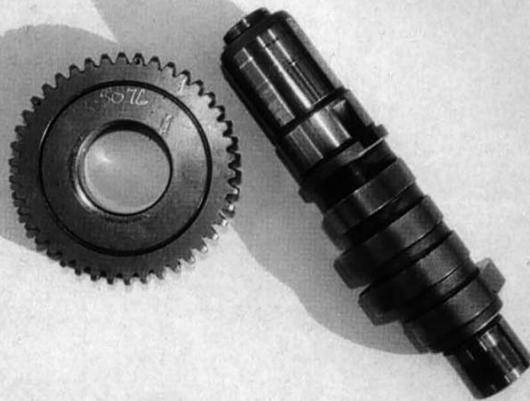
Lorsque la valeur de calage du sommet de came n'est pas spécifiée dans la fiche technique, il est possible de la calculer facilement :

- pour l'admission, on divise par 2 l'angle de levée de soupape puis on soustrait la valeur de l'angle AOA.

- pour l'échappement, on divise également par 2 l'angle de levée de soupape puis on soustrait la valeur de l'angle RFE.

Prenons un exemple avec l'arbre à cames Crane H296-2 :

Un arbre à cames pour H-D est constitué de deux parties, l'arbre à cames proprement dit et le pignon d'entraînement qui est uniquement emmanché en force à l'aide d'une presse. Si, dans le cadre d'une mise au point, le préparateur désire modifier le calage de l'arbre à cames, il doit enlever le pignon et le replacer en fonction du calage souhaité. Cette opération d'apparence simple requiert beaucoup de précision. Un décalage d'une dent du pignon d'entraînement correspond à 8,5° de rotation du vilebrequin.



- à l'admission, l'angle de levée est de 252° et l'angle AOA de 24°. Le calage du sommet de came est donc de $(252/2 = 126) - 24 = 102^\circ$.

- à l'échappement, l'angle de levée est de 262° et l'angle RFE de 25°. Le calage du sommet de came est donc de $(262/2 = 131) - 25 = 106^\circ$.

Quel est l'intérêt de cette notion de calage du sommet de came ?

En fait, pour un profil de came donné, une variation du calage du sommet de came va modifier la courbe de performance du moteur. On note un changement de la valeur du couple maximum mais surtout du régime auquel il s'exprime.

Le grand avantage de la caractéristique de calage du sommet de came est que, contrairement à la levée et à l'angle de levée, elle n'est pas liée à l'arbre à cames proprement dit, mais plutôt à la position de ce dernier par rapport au vilebrequin. Un simple déplacement angulaire de l'arbre à cames par rapport au vilebrequin permet donc de modifier les performances du moteur.

Cela intéresse d'autant plus le préparateur que, s'il lui est extrêmement difficile de modifier les caractéristiques de durée et de levée (le retailage des lobes d'un arbre à cames nécessitant un matériel très performant donc onéreux), il lui est beaucoup plus facile, au montage, de jouer sur la valeur angulaire de calage de l'arbre à cames par rapport au PMH, afin d'obtenir des performances optimales.

De plus, sur un plan purement technique, pour réaliser de façon très rigoureuse cette opération de calage de l'arbre à cames, il n'existe qu'une seule manière de faire qui ne soit pas tributaire des imprécisions de mesure : c'est de se baser sur le calage des sommets des cames, donc de la levée max. de soupape dont le repérage est beaucoup plus précis que celui de l'instant d'ouverture de la soupape (cf. : articles précédents).

Les arbres à cames Crane de la série "hi-roller" sont équipés d'un pignon doté de trois index repérés qui simplifient singulièrement le calage. Le préparateur a ainsi le choix entre trois positions :

"avance de 4°", "neutre", "retard de 4°".

L'arbre à cames ici photographié est un Crane H310-2 en position "avance de 4°".

Les conséquences d'une modification du calage du sommet de came

Ces conséquences sont si intéressantes à exploiter que les ingénieurs motoristes se sont penchés, il y a longtemps déjà, sur la possibilité de modifier lorsque le moteur tourne le calage des sommets des cames. Il en a résulté les distributions variables qui, largement utilisées en Formule 1, équipent de nos jours certains moteurs de série haut de gamme. Les bénéfices d'une distribution variable sont énormes. En fonction du régime, le calage des cames d'admission et d'échappement est constamment réajusté de façon à obtenir le meilleur couple possible. On peut ainsi obtenir des moteurs très puissants qui restent facilement utilisables à bas régime. Mais nous n'en sommes pas là sur un moteur Harley-Davidson où les choses sont moins complexes. Cependant, les possibilités de réglage ne sont pas les mêmes sur tous les modèles. En effet, la distribution d'un Sportster comprend quatre arbres n'ayant chacun qu'une came, alors que le Big Twin ne dispose que d'un seul arbre qui supporte les quatre cames. Vous comprendrez rapidement la supériorité du concept du Sportster qui permet au préparateur de caler indépendamment les cames d'admission et d'échappement. Il peut ainsi travailler non seulement sur le calage des sommets des cames, mais aussi sur la séparation des sommets des cames (LSA : lobe separation angle), notion importante que nous allons aborder en détail plus avant. Sur un arbre à cames de Big Twin la séparation des sommets des cames est une caractéristique fixe, dépendante de l'arbre à cames, que le préparateur est malheureusement forcé de changer s'il veut modifier cette valeur angulaire lors d'une mise au point moteur. C'est d'ailleurs cette contrainte trop lourde qui a amené les compétiteurs de drag à utiliser une distribution à quatre arbres à cames de type Sportster sur leurs Big Twins survitaminés. La société Delkron propose d'ailleurs aux amateurs fortunés un superbe carter pour Big Twin permettant le montage de quatre cames de Sportster.

Mais revenons à notre arbre à cames de Big Twin, en prenant toujours comme exemple

(Suite page 114)





le Crane H296-2. On constate sur la fiche technique que le sommet de la came d'admission se situe à 102° après le PMH. Si, lors du montage, on décale l'arbre de 4° pour placer le sommet de la came d'admission à 106° après le PMH, cela signifie que les mouvements des soupapes d'admission et d'échappement vont se produire 4° de rotation du vilebrequin plus tard. On dit que l'arbre à cames est retardé.

Retarder un arbre à cames diminue les angles AO (avance ouverture) et augmente les angles RF (retard fermeture). Cette modification des angles et notamment l'augmentation de l'angle RFA provoque une perte sensible de compression à bas régime (cf. : chapitre précédent). Le couple dans les basses plages diminue, au profit d'une puissance plus élevée dans les tours.

Lorsque le préparateur diminue le calage du sommet de la came d'admission lors du montage, on dit que l'arbre à cames est avancé. Cela a pour effet de favoriser le couple à bas régimes par l'augmentation du rapport volumétrique effectif, l'angle RFA étant plus faible (cf. : chapitre précédent). Cependant, les hauts régimes s'en trouvent affectés avec notamment une diminution de la valeur de puissance max.

En résumé, retarder un arbre à cames déplace la courbe de couple dans les hauts régimes, alors qu'un arbre à cames avancé déplace la courbe de couple dans les bas régimes. Dans le cas qui nous intéresse, c'est à dire sur un moteur à arbre à cames unique, le préparateur ne dispose cependant que d'une marge de manoeuvre réduite puisque, comme nous l'avons vu, il ne peut pas caler indépendamment les cames d'admission et d'échappement. Cette marge de manoeuvre se limite à plus ou moins 4° seulement. Au-delà, on considère que l'arbre à cames choisi n'est pas adapté

au moteur. C'est pour cela que lors de l'achat d'un arbre à cames pour votre combinaison moteur particulière, votre choix devra être particulièrement pertinent.

Un arbre à cames retardé ou avancé de 4° déplacera la courbe de couple de 300 à 400 tr/mn en haut ou en bas. Attention ! Avancer un arbre à cames augmente la valeur de levée des soupapes lorsque le piston est au PMH, et dans certains cas les *clearances* (ou espaces) piston-soupapes ne sont alors plus respectées.

Tels qu'ils sont vendus, tous les arbres à cames pour Big Twin sont constitués de l'arbre à cames proprement dit et du pignon d'entraînement. Le travail de calage s'effectue désaccouplant le pignon emmanché de force à la presse, et en le repositionnant sur l'arbre à la valeur voulue. Cette opération apparemment simple nécessite cependant beaucoup de précision. La manufacture Crane Cams propose tous ses modèles en version "hi-roller", dont le pignon dispose de trois index de repérage permettant facilement d'opter entre trois positions : "avance de 4°", "neutre", ou "retard de 4°". L'opération est alors rendue à la portée de tous.

Pour ceux qui envisageraient de "caler" leur arbre à cames en décalant d'une dent le pignon d'entraînement, sachez que la variation angulaire est alors de... 17° ! Sans commentaire !

L'opération de calage a également un autre but. Tout professionnel consciencieux se doit, après le montage d'un arbre à cames, de vérifier à l'aide de comparateurs si les caractéristiques techniques de l'arbre sont respectées en valeur et en timing. Parfois ce n'est pas le cas au regard des tolérances retenues lors de l'assemblage du moteur. Le préparateur recale alors l'arbre à cames en privilégiant l'événement le plus important, à savoir l'instant de fermeture de la soupape d'admission, qui doit absolument se produire à l'instant précis qui est souhaité.

L'angle de séparation des sommets de came

Pour terminer ce chapitre sur le diagramme de distribution, nous allons étudier cette caractéristique dont on ne parle pas souvent, et pour cause, puisqu'elle n'est pratiquement jamais mentionnée dans la fiche technique accompagnant l'arbre à cames.

L'angle de séparation des sommets des cames ou encore l'angle de calage des diagrammes (d'admission et d'échappement) est une des rares caractéristiques qui se mesure en degrés de rotation de l'arbre à cames et non pas du vilebrequin. Comme nous l'avons vu, sur un arbre à cames de Big Twin qui supporte les cames d'admission et d'échappement, cet angle est fixe et n'est pas modifiable par le préparateur. C'est un des gros inconvénients de ce concept d'arbre à cames unique.

Cet angle se calcule facilement : il suffit d'ajouter les deux valeurs angulaires de calages des sommets des cames et de diviser la valeur ainsi obtenue par deux. Reprenons notre Crane H296-2, les sommets des lobes d'admission et d'échappement sont respectivement à 102° après et à 106° avant le PMH. L'angle de séparation des sommets des cames sur cet arbre à

cames est donc de $(102 + 106 = 208) / 2 = 104°$. Cette caractéristique technique a une influence directe sur le croisement des soupapes (cf. : chapitre précédent).

Deux arbres à cames peuvent posséder les mêmes caractéristiques de levée et d'angle de levée et être usinés avec des angles de séparation des sommets des cames différents. Quelle sera donc la différence entre ces deux arbres à cames ?

Avec celui possédant l'angle de séparation le plus faible on aura une ouverture de la soupape d'admission plus tôt, une fermeture de la soupape d'échappement plus tard, une augmentation de la valeur de croisement des soupapes, une augmentation du temps durant lequel le cylindre est hermétique (les deux soupapes sont fermées), une augmentation de la PME (pression moyenne effective = pression moyenne régnant dans le cylindre). On notera une augmentation sensible du couple dans les bas régimes, mais après avoir atteint sa valeur maximale, la valeur de couple s'écroule rapidement avec le régime en raison d'un RFA insuffisant.

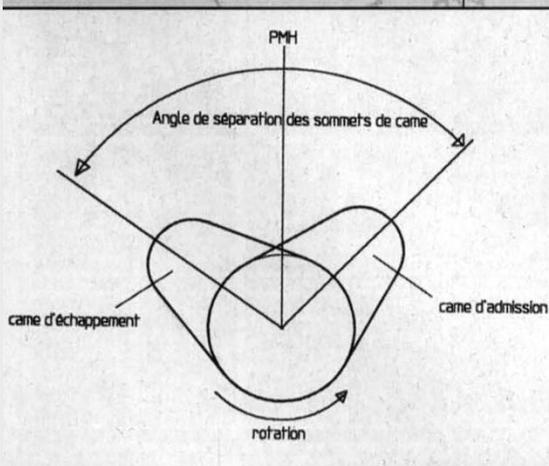
Avec celui possédant l'angle de séparation le plus important on aura une ouverture de la soupape d'admission plus tard, une fermeture de la soupape d'échappement plus tôt, une diminution de la valeur de croisement des soupapes (les deux soupapes seront closes simultanément moins longtemps) et une diminution de la PME. On notera également une puissance maxi plus élevée avec une courbe de couple plus plate, mais la valeur du couple maxi est inférieure au cas précédent.

Tous les arbres à cames disponibles sur le marché possèdent un angle de séparation des lobes compris entre 99° et 112°, ce qui constitue une fourchette relativement étroite. Lorsqu'on étudie cette caractéristique, il faut toujours le faire en rapport avec la valeur de l'angle de levée de l'arbre à cames. En effet, on pourrait penser que plus la "durée" est importante, plus l'angle de séparation des lobes est important. Ce n'est pas toujours le cas. Parmi les gros arbres à cames prévus pour des cylindrées importantes, on trouve des angles de séparation des lobes relativement faibles en regard de la durée. Prenons par exemple l'arbre à cames Red Shift 710 ("durée" de 292°) : l'angle de séparation des lobes n'est que de 104°, le même que celui du Crane H296-2 dont la "durée" n'est que de 252°.

L'intérêt de cet angle de séparation des sommets des cames est que, à la différence du 710, avec un angle de levée de 292° des valeurs de levée et de durée, il n'évolue pas en fonction de la cylindrée. Il permet au sein d'un même groupe d'arbres à cames (on peut regrouper les cames en fonction des cylindrées auxquelles ils s'appliquent) de différencier le caractère de chacun pour une même application. On remarque d'ailleurs en fonction des fabricants des affinités marquées, soit pour des angles de séparation importants, soit pour des angles faibles. Chez S&S par exemple, on privilégie des angles de séparation faibles donnant des arbres à cames généreux dès les bas régimes conformément à l'esprit de la machine. Chez Crane au contraire, on penche plutôt pour des angles de séparation plus importants donnant des arbres à cames plus pointus à utiliser.

(À suivre)

■ JACQUES PERRET



L'angle de séparation des sommets des cames (ou de séparation des diagrammes) est une caractéristique fixe de l'arbre à cames d'un Big Twin mesurée en degrés de rotation de l'arbre à cames et non pas du vilebrequin. Sur un Big Twin, à l'inverse d'un Sportster où l'on peut caler indépendamment les cames d'admission et d'échappement et donc modifier l'angle de séparation des sommets des cames, le préparateur n'a d'autre alternative que de changer l'arbre à cames s'il veut modifier l'angle de séparation des lobes. C'est une des raisons pour lesquelles les pilotes de drag utilisent des distributions de type Sportster sur leur Big Twins survitaminés.