

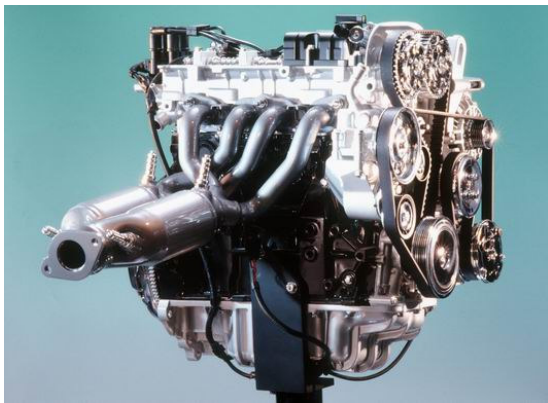


FORD DURATEC 1.6 TI-VCT

Moteur quatre cylindres, 16 soupapes, avec distribution à calage variable des deux arbres à cames.

Afin d'améliorer encore et toujours l'automobile, les ingénieurs se tournaient traditionnellement vers des moteurs de plus en plus puissants. Depuis pratiquement 120 ans, date à laquelle, les moteurs à combustion interne ont commencé d'animer des véhicules automobiles, des générations d'ingénieurs ont longtemps considéré que des soupapes de plus grand diamètre avec des durées d'ouverture plus longues étaient la "voie royale" vers la concrétisation du rêve d'un moteur plus performant.

Le développement pendant 120 ans des moteurs à combustion interne a été marqué par cette recherche d'un surcroît de puissance. Les ingénieurs ont principalement fait porter leurs recherches sur des durées d'ouverture plus longues des soupapes avec des valeurs de croisement accrues de ces dernières pour arriver à leur fin. Les moteurs de compétition ont souvent servi de prototypes aux moteurs de série ultérieure. La recherche traditionnelle de l'accroissement de la puissance pure n'a quitté le devant de la scène qu'au cours des dernières décennies lorsque la technologie de l'échappement et ses nombreuses implications ont commencé de prendre la relève dans le développement des moteurs. La technologie de la compétition a également cessé d'être le modèle repris pour le développement des moteurs de série. Depuis seulement quelques années les ingénieurs automobiles s'intéressent davantage à la technologie du groupe propulseur, faisant porter leurs efforts sur la dynamique de conduite et donc le plaisir au volant. Une plus grande souplesse de calage de la distribution permet d'obtenir des moteurs de plus haute qualité, plus agréables à conduire, sans compromis sur les rejets polluants ou la consommation.



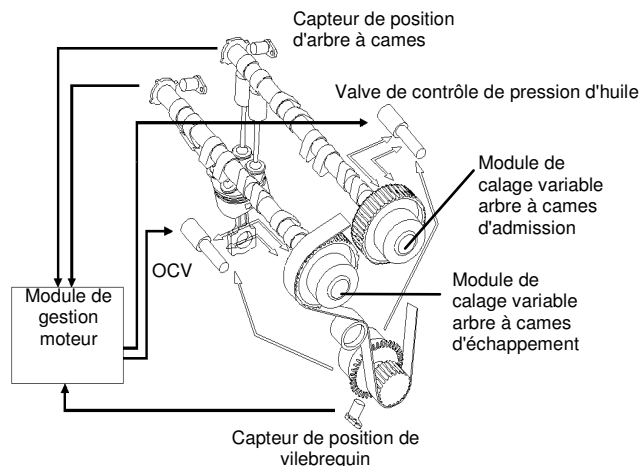
Le moteur Ford Duratec Ti-VCT est doté d'un convertisseur catalytique à double flux. Tous les composants mécaniques du système de calage variable de la distribution sont situés à l'intérieur



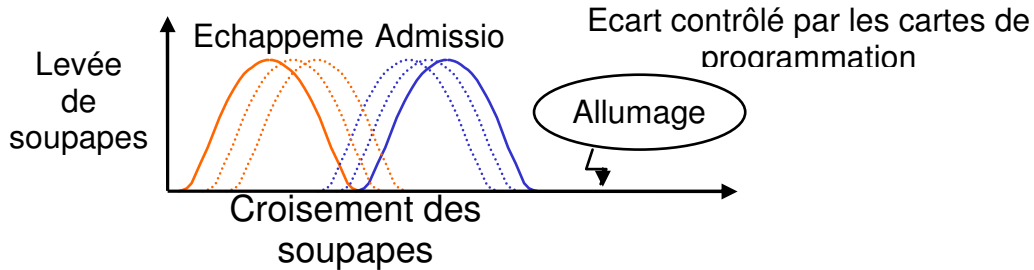
Chez Ford, le chemin qui conduit à ce type de progrès privilégie une nouvelle technologie : le calage variable des arbres à cames ou Ti-VCT, qui correspond à l'abréviation anglaise de "Twin independent Variable Cam Timing". Ce système agit en permanence sur le calage des deux arbres à cames grâce à des organes de commande. Ce système deuxième génération avec modification par une pression d'huile hydraulique du calage des arbres à cames dans le sens normal de rotation fait varier les durées d'ouverture des soupapes par rapport à la position du piston.

Par le passé, un certain nombre de mécanismes de commande de calage variable ont été utilisés or ils n'offraient que deux positions : "augmentation de l'avance" ou "diminution de l'avance", le choix était donc limité.

A la différence des modèles précédents, le système hydraulique qui commande la position des arbres à cames n'est pas simplement limité aux deux positions évoquées précédemment. Le système Ti-VCT est commandé par cartographie informatique en fonction de la charge du moteur ; en d'autres termes en fonction de la relation entre position de la pédale d'accélérateur et du régime moteur. La capacité du système à s'adapter à une vaste gamme de situations est soutenue par la mesure de plus de 2000 paramètres dans les différentes cartes de programmation, qui sont toutes soigneusement et continuellement raffinées par les ingénieurs Ford au cours de leurs travaux de développement.



Le trait caractéristique du système Ti-VCT du moteur Ford Duratec est le contrôle variable des deux arbres à cames commandés d'après les paramètres



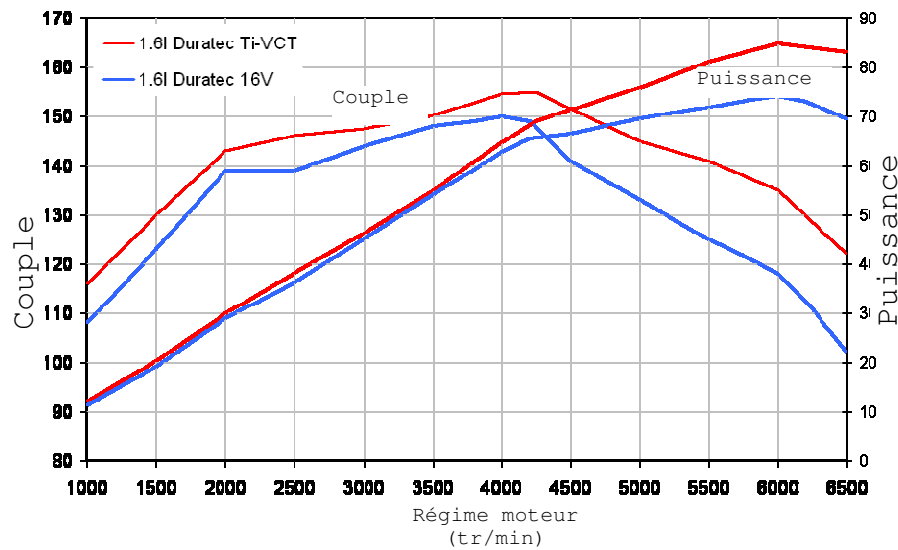
La nouveauté de l'approche de Ford est l'application de cette technologie complexe de calage variable de la distribution aux deux arbres à cames d'un moteur à essence 1,6 litre à haut rendement. Ce moteur a déjà connu une optimisation pour atteindre une excellente consommation avec de faibles rejets des gaz d'échappement non traités. L'adoption de ce dispositif de calage variable à commande cartographique améliore très nettement le potentiel du moteur. La puissance délivrée par le moteur Ford Duratec 1,6 litre Ti-VCT a été accrue d'une valeur respectable de 15 ch par rapport au modèle d'origine de 100 ch pour atteindre 115 ch. Egalement remarquable, le couple maxi du moteur qui atteint 155 Nm. Pour impressionnante que soient ces valeurs, ces améliorations n'étaient pas la motivation première des développements entrepris.



Le calage variable des deux arbres à cames est assuré par des rotors à palettes montés dans les pignons d'entraînement des arbres à cames. Cette commande repose sur des cartes de programmation définie avec précision et uniquement actionnée par la pression d'huile du moteur ainsi que par des ressorts aux tarages soigneusement définis.



Le fait que le moteur Duratec 1.6 litre 2ACT développe un couple élevé sur une plage de régime large et inhabituel constitue un véritable progrès. Ceci se remarque par le fait que si le moteur développe son couple maximum de 155 Nm à 4000 tr/min, le couple est déjà proche de cette valeur dès 2000 tr/min. Pour un moteur à alimentation atmosphérique, la courbe de couple présente une phase en plateau exceptionnelle, elle augmente rapidement puis se stabilise sur une large plage de régimes moteur à l'instar du type de courbe que l'on trouve pour des moteurs suralimentés beaucoup plus complexe.



Le moteur Ford Duratec 1.6 Ti-VCT présente une courbe de couple impressionnante sur une large plage de régime moteur.



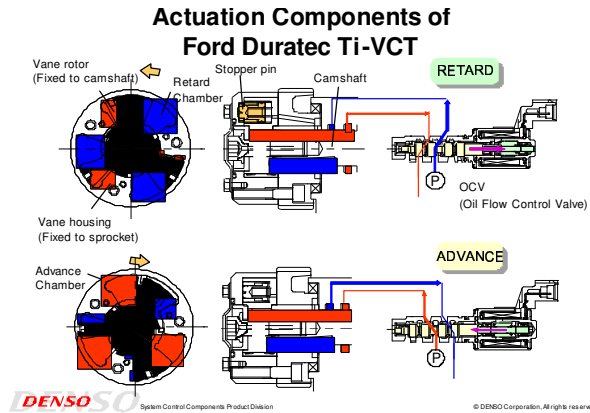
Indicateur de performance du moteur : La pression moyenne effective

La pression moyenne effective, p_{me} , est un excellent facteur de description du niveau de performance d'un moteur moderne. Elle est déterminée en divisant le couple maximum (en Nm) par la cylindrée du moteur (en litres) et en multipliant le quotient par un coefficient invariant de 0,1279 ($p_{me} = M_{d_{max}} / V_h \times 0,1279$). Le résultat de ce calcul représente la pression de combustion moyenne intérieure du cylindre, en bars. Indépendamment de la cylindrée du moteur, cette valeur fournit une mesure de la qualité du couple du moteur. Pour le 1,6 litre **Ti-VCT's**, la p_{me} de 12,4 bars est exceptionnellement élevée pour un moteur à alimentation atmosphérique. En outre, le fait que cette valeur ne présente que des écarts mineurs sur une large plage de régime moteur, est une preuve supplémentaire de la qualité élevée de ce moteur. Ce facteur, en et par lui-même, révèle que le Duratec **Ti-VCT** est un moteur à la fois efficace et à haut rendement, offrant une excellence souple sur une large plage de régime.

Base technologique

Dans son principe, le système de calage variable du moteur Ti-VCT ne nécessite que trois éléments différents. Deux éléments de commande hydraulique, appelés actionneurs de phase et situés à l'intérieur des pignons d'entraînement des arbres à cames. Les effets de la pression de l'huile et de la force des ressorts permet à ces éléments de faire varier le calage des arbres à cames en fonction du régime et de la charge du moteur.

Deux valves hydrauliques de type quatre / trois voies servent d'éléments de contrôle. Elles permettent soit d'augmenter, soit de diminuer le calage des soupapes. Le raccordement hydraulique entre le circuit d'huile et le système de calage variable est assuré par un support de palier de conception nouvelle. Il comporte les conduits des éléments de commande hydraulique en plus des conduits habituels de lubrification des paliers d'arbres à cames. Avec le système du moteur Ti-VCT, ils sont actionnés uniquement en fonction de la pression d'huile de commande du moteur.



Deux éléments de contrôle variable provoquent la rotation de l'actionneur de phase à palettes fixé dans chaque arbre à cames. Le contrôle du calage variable est assuré uniquement par la pression d'huile du moteur par l'intermédiaire de deux valves à 4 - 3 voies.

Caractéristiques de base du concept d'ingénierie

Pour mieux comprendre comment fonctionne le dispositif de calage variable de Ford, il peut être utile de rappeler brièvement ce que l'on connaît comme notions extrêmes des caractéristiques d'un moteur. Dans les années 1950 et 1960, les moteurs de série utilisaient de façon générale un calage de la distribution quelque peu "contenu", caractérisé par une faible durée d'ouverture des soupapes et une faible durée de croisement. Si cela se traduisait par une puissance relativement faible, le ralenti était extrêmement stable. Ces moteurs donnaient l'impression d'être très "musclés", ce qui est toujours une surprise pour quelqu'un qui conduit l'un de ces véhicules pour la première fois. Un moteur 1,6 litre de cette époque développait de 55 à 60 ch, ce qui est à peu près moitié de la puissance développée par un moteur actuel.

Des moteurs d'une époque encore plus ancienne présentaient des caractéristiques encore supérieures à celles des moteurs des années 50. Ils ne développaient que pratiquement du couple par rapport à leur faible régime de rotation et comparés aux critères d'aujourd'hui, ils semblaient plus appropriés à bord d'une locomotive que d'une automobile. L'un des modèles légendaires de Ford de cette époque était la Modèle T, produite à 16 millions d'exemplaires. Ce véhicule doté d'un moteur de 2890 cm³ développait avec une grande facilité au vilebrequin (course : 101,5 mm, alésage : 95 mm) une puissance de 20 ch à environ 1800 tr/min. Cela était suffisant faisait remarquer en 1912, le magazine automobile britannique "Motor", pour accélérer de 0 à 65 km/h en environ 40 secondes. Le rapport inférieur des "Tin Lizzy" à train planétaire offrait une plage d'accélération jusqu'à environ 14 km/h et elles s'avéraient tout à fait appropriées pour "tracter 2 tonnes de foin ou 1 charrue dans un champ". Aucun doute, le leitmotiv "rien ne vaut une forte cylindrée" date de cette époque.



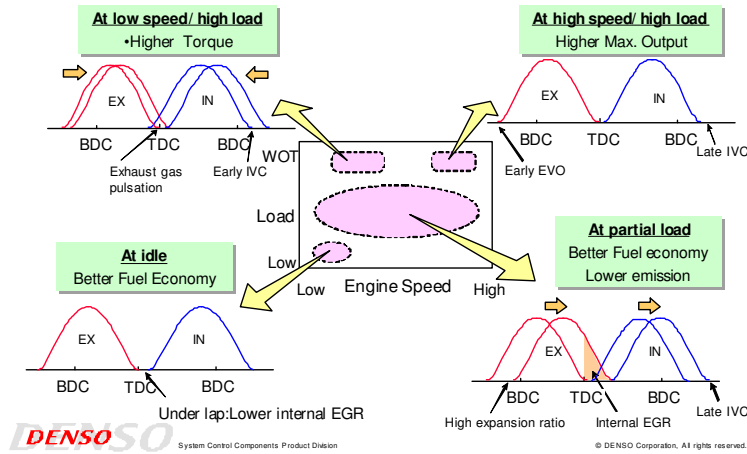
L'autre valeur extrême du calage de la distribution est l'apanage des moteurs de compétition. Ils exploitent totalement le potentiel de puissance du moteur grâce à une levée maximum des soupapes et une durée d'ouverture longue. Aujourd'hui, la version compétition Fiesta Cup du moteur 1,6 litre de la Ford Fiesta développe environ 200 ch. Et cette puissance se manifeste très clairement par la sonorité du moteur, plus particulièrement au ralenti. Le moteur ratatouille et son régime est totalement instable. Cette caractéristique provient des valeurs très importantes de durée d'ouverture et de levée des soupapes qui ne permet pas une distribution régulière de la charge et une bonne combustion dans les cylindres. Ce bruit particulier au ralenti provient du compromis de la mise au point du moteur qui a été optimisé pour qu'il développe sa puissance maximum à 8500 tr/min. Tout le reste de la plage de régime du moteur n'est d'aucun intérêt pour les ingénieurs compétition.

Le calage variable de la distribution utilisée par le système Ford, vise à combiner les avantages de ces deux extrêmes, sans être pénalisé par leurs inconvénients.

Le dispositif de calage variable du moteur Ford Duratec 1.6 litre Ti-VCT élargit les avantages dans les deux directions sans compromis sur le raffinement, la douceur, la puissance ou les performances du moteur. Proche du ralenti et à faible charge, le calage est tel que les soupapes d'admission s'ouvrent et se ferment relativement tard. Au lieu du croisement habituel pendant lequel les soupapes d'admission et d'échappement restent ouvertes simultanément, le Ford Duratec fait même appel à un décroisement, ce qui signifie que les deux soupapes de la chambre de combustion restent fermées pendant un très court instant. Ceci permet d'obtenir un ralenti stable et de très faibles rejets.

La charge est le premier facteur qui influe sur le calage de la distribution. En cas de charge élevée à faible régime moteur - par exemple, lorsque le véhicule est accéléré sans que le conducteur ne rétrograde - les deux arbres à cames modifient leur calage vers un croisement plus important des soupapes. Des commandes appropriées, plus particulièrement sur l'arbre à cames d'échappement permettent d'avoir un effet de "rinçage" approprié de la chambre de combustion et les gaz d'échappement sortant aspirent la charge fraîche derrière eux. Il en résulte l'obtention d'un excellent couple tout en préservant la consommation.

Control Strategies for Ford Duratec Ti-VCT



A charge et à régime moyens du moteur, le calage est optimisé pour obtenir un croisement plus important des soupapes. Au ralenti et à régime élevé, cette position est évitée. Ce type d'optimisation sophistiquée ne peut être obtenu que par des cartes de commande soigneusement programmées.

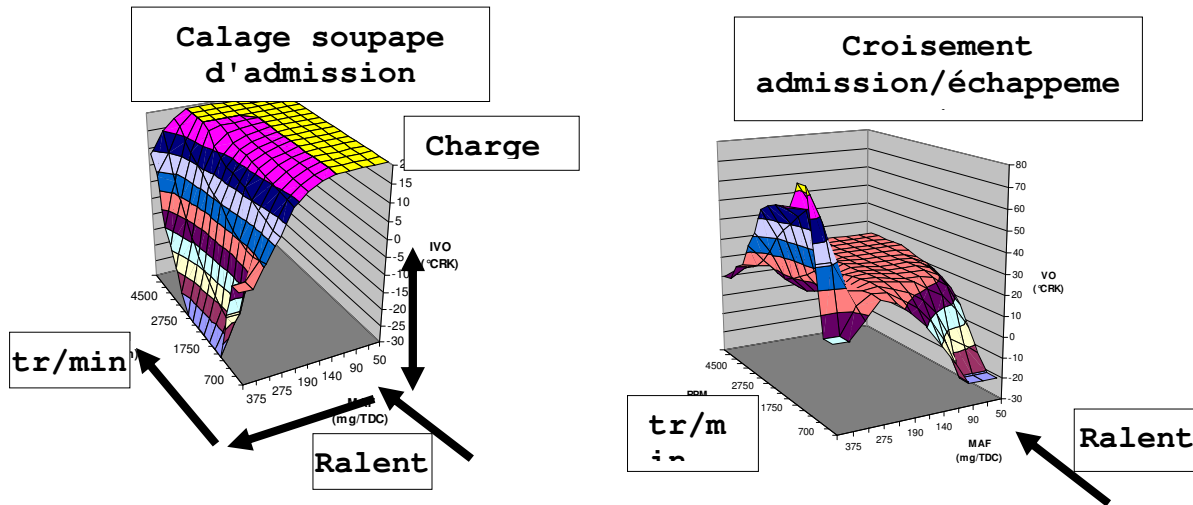
Dans le cas particulier des charges moyennes, les deux arbres à cames voient leur calage doucement diminuer de manière que les soupapes s'ouvrent plus tard. Le système de gestion du moteur cale avec précision le croisement des soupapes de manière à provoquer la recirculation interne d'une certaine quantité de gaz d'échappement à faible charge, ce qui permet de réduire les oxydes d'azote qui sont plus communément générés sous fortes charges.



Une majorité des systèmes de calage actifs précédemment utilisés ne permettaient que d'agir entre l'augmentation et la diminution maximum de l'avance. Avec le système Ti-VCT, Ford utilise le premier système de calage variable de la distribution à contrôle cartographique sur des moteurs de petites cylindrées : cette technologie de pointe permet une meilleure consommation et de produire un couple plus élevé.

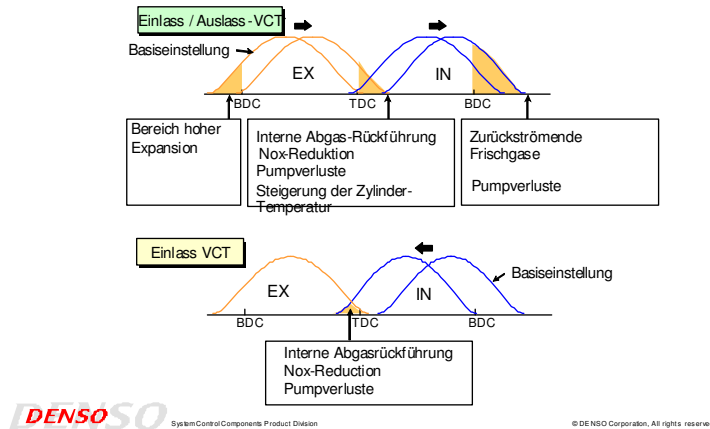
Dans les phases d'accroissement de charge et de régime, le croisement des soupapes est progressivement réduit. Ceci provient du principe physique de la colonne de gaz en pulsation côté admission. Le système d'admission a été mis au point avec précision pour produire une charge à pulsation extrêmement efficace provoquée par une vibration très élevée de la colonne gazeuse à haut régime. Sans dégrader la charge du cylindre, il a été possible de caler l'arbre à cames d'admission - en reprenant un processus identique à celui employé au ralenti - pour une fermeture tardive des soupapes d'admission et un croisement minimum, ce qui minimise la phase de court-circuit entre la charge fraîche et l'évacuation des gaz d'échappement. En dépit du fait, que la durée de levée des soupapes à 6000 tr/min n'est que de quelques centièmes de secondes, ceci permet à la chambre de combustion d'être néanmoins correctement remplie.

Ford Duratec Ti-VCT : Calage variable de la distribution



La caractéristique de la carte de calage de l'arbre à cames d'admission (à gauche) provient du fait qu'à partir du ralenti (angle inférieur droit), le calage variable est passif jusqu'à environ 50 % de la charge (secteur jaune du schéma), puis se déplace progressivement vers l'augmentation de l'avance de manière que l'ouverture de l'admission en position d'avance maximum ne se produise qu'à faible régime moteur sous pleine charge. La partie droite du schéma représente le croisement entre les deux durées, caractérisé par une longue plage de calage constant (secteur orange) sous charge et régime moyens. Le croisement maximum se produit à régime moyen et sous pleine charge et un décroisement significatif ne se produit que lorsque le moteur tourne à un régime proche du ralenti.

Fuel Economy Improvement in the Medium Load Range



Le moteur Ford Duratec Ti-VCT permet également un contrôle fin des effets qui peuvent dégrader le passage de la charge dans les cylindres. La recirculation des gaz d'échappement par un croisement

En résumé, la culasse du moteur Ford Duratec **Ti-VCT** 1.6 litre dispose de quelques atouts supplémentaires par rapport à ceux des moteurs à dispositif de calage classique de la distribution. Bien que les valeurs maximum de puissance et de couple restent inférieures à celles atteintes par des moteurs de plus fortes cylindrées, les améliorations apportées à la puissance et au couple font du moteur Ford Duratec **Ti-VCT** 1.6 litre un moteur moderne extrêmement intéressant. La répartition d'une valeur de couple élevée sur une large plage de régime amène le conducteur à penser qu'il conduit un véhicule doté d'un moteur de plus forte cylindrée. Outre l'impression principale de "muscle puissant", le nouveau moteur Ford offre une dynamique de conduite nettement améliorée sans oublier une amélioration de la consommation de 5 % environ.



Postscript :

A l'époque de la Ford T, de telles qualités n'étaient pas du tout prises en compte. Il a fallu pratiquement un siècle avant que des caractéristiques extrêmement sophistiquées concernant le calage de la distribution ne voient le jour.

En 1912, la Ford T n'avait que deux petites soupapes latérales par cylindre positionnées inversées par rapport aux modèles actuels et d'un diamètre d'environ 30 mm. La levée était de 5 mm. Le décroisement des soupapes, en d'autre terme, la durée pendant laquelle les deux soupapes étaient fermées correspondait à "1/8^{ème} de tour de rotation du vilebrequin", comme indiqué dans le Manuel d'Atelier publié en 1912 - ce qui correspond aujourd'hui à 45 degrés vilebrequin. Au titre de consolation, la consommation était d'environ 10 l/100 km. En cas de traction d'une charrue, cependant, comme l'indiquait des sources de cette époque, la consommation était nettement plus élevée. Elles affirmaient qu'un plein (réservoir de 38 litres) était à peu près suffisant pour labourer 1 hectare.

Par rapport à la Ford T, qui apparemment pouvait convenir à l'agriculture, le diamètre des soupapes (30 mm) et leur levée (5 mm) correspond à une surface soupape ouverte de 3,5 cm² par cylindre et à une ouverture pendant une fenêtre angulaire totale de 225 degrés chacune, mesuré au vilebrequin.

En tant que moteur à 4 soupapes, le Ford Duratec Ti-VCT bénéficie naturellement d'une surface d'ouverture plus importante bien que d'une cylindrée plus faible de 1,6 litre par rapport à son ancêtre de 2,89 litres. Outre l'alésage de 79 mm du moteur Duratec Ti-VCT, la surface d'ouverture est d'environ 20 cm² pour une fenêtre angulaire d'ouverture d'environ 232 degrés : cette surface est à elle seule 6 fois supérieure à celle de la Ford T. Il convient de remarquer, outre cette multiplication par six de la surface d'ouverture des soupapes, que le régime nominal d'un moteur moderne a sextuplé. D'une façon générale, le moteur Ford Duratec 1,6 TI-VCT, a évolué d'un facteur 6 et le fait que cette évolution ne fasse pas ressembler ce moteur à celui d'une voiture de compétition provient - entre autre facteur - de son calage variable de la distribution à contrôle cartographique.

Cependant, au contraire de son ancêtre, le moteur Ford Duratec n'est pas du tout adapté à "l'agriculture", mais aujourd'hui, Ford Motor Company offre des gammes de produits qui incluent des tracteurs agricoles parfaitement adaptés à cette application.



A la belle époque de la Ford T, les ingénieurs n'avaient pas encore inventé le régime maxi. Au contraire, les moteurs de fortes cylindrées étaient totalement exploités pour développer du couple. La "Tin Lizzy" produisait une puissance impressionnante de 20 ch à 1800 tr/min. de son moteur de 2,89 litres et le couple maximum de 110 Nm à 900 tr/min n'était pas négligeable. La figure représente, la

Pour de plus amples informations:

Jo Declercq

Tel: +32 3 821 21 03

Fax: +32 3 821 21 07

jdecler2@ford.com