

COMPRENDRE L'INJE



En quelques années seulement, l'injection de carburant, qui constituait une rareté (ou un ajout notable) dans l'industrie de la motoneige, est devenue une caractéristique assez banale. Si les raisons expliquant cette tendance sont nombreuses (beaucoup étant liées au règlement sur les émissions d'échappement récemment adopté par l'Environmental Protection Agency américaine), le fait demeure que le carburateur, un dispositif qui a bien servi l'industrie de la motoneige

pendant plusieurs années, est en voie de disparition. Ce mois-ci dans la chronique L'atelier, nous tenterons donc de faire la lumière sur le développement et le fonctionnement des systèmes d'injection de carburant.

Définition

Toute discussion des systèmes d'injection de carburant doit naturellement commencer par une définition, soit :

- l'un des nombreux moyens ou systèmes mécaniques par lesquels un carburant est pulvérisé et injecté dans les cylindres d'un moteur à combustion interne.

Prise littéralement, cette définition peut être interprétée de façon à inclure le carburateur, puisque ses fonctions de base comprennent la pulvérisation du carburant (ou plutôt sa transformation en petites gouttelettes) et l'alimentation du moteur. Dans le cadre de cet article, nous limiterons toutefois notre définition de l'injection de carburant aux systèmes alimentant le moteur en carburant sous forme pressurisée.

Les besoins du moteur

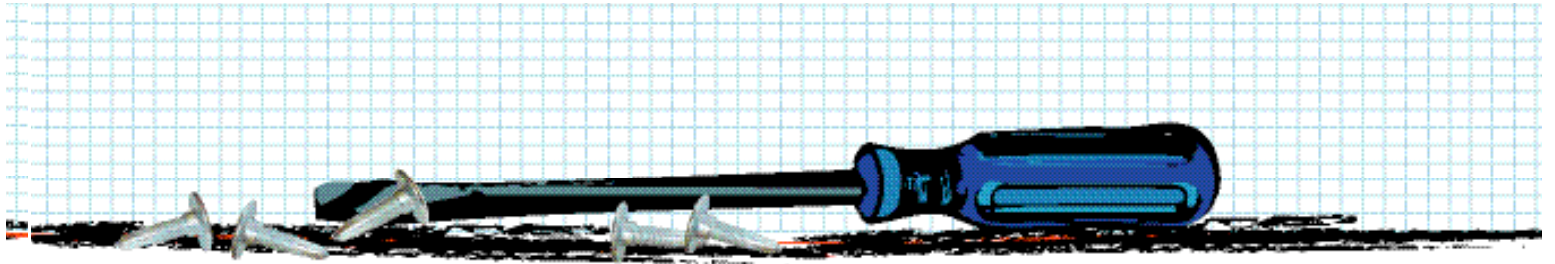
Tout moteur à combustion interne a besoin de trois éléments pour fonctionner : de l'oxygène (air), du carburant et une étincelle. La maximisation de l'efficacité du processus de combustion dans le moteur, qui optimise la puissance et minimise les sous-produits nocifs, exige que le mélange d'air et de carburant soit proportionnel : il s'agit du rapport stoechiométrique. Dans le cas de l'essence, ce rapport (exprimé sous la forme d'un rapport air/carburant en fonction du poids) est de 14,64:1. Lorsque cette condition est remplie, un moteur à essence (fonctionnant dans des conditions « normales ») produira une puissance maximale et une pollution minimale. Cependant, il est à noter que des déviations de la stoechiométrie sont habituellement requises dans les conditions de fonctionnement anormales telles qu'avec une charge lourde ou par temps froid. L'objectif devient alors pour les ingénieurs de trouver le moyen d'alimenter le moteur en carburant d'une façon permettant d'obtenir un rapport idéal en tout temps. Notez également que le rapport varie en fonction du carburant utilisé (diesel, essence, éthanol, méthanol, etc.).

Étant donné qu'il est extrêmement difficile d'obtenir un rapport air/carburant idéal en tout temps, les concepteurs de moteurs ont dû apprendre à composer avec les trois principaux types d'émissions toxiques (résultant de conditions de combustion imparfaites) du moteur à combustion interne, soit le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures imbrûlés (HC) et les oxydes d'azote (NOx). Le CO et les HC résultent d'une combustion incomplète du carburant causée par un manque d'oxygène dans la chambre de combustion, à la différence des NOx, qui résultent d'un excès d'oxygène dans la chambre de combustion ou d'une température de combustion trop élevée. Les causes opposées de ces trois polluants font qu'il est difficile de les contrôler simultanément.

Au début, il y avait le carburateur...

Le processus déterminant la quantité de carburant et l'alimentation du moteur est appelé le dosage du carburant. Comme on pourrait raisonnablement s'y attendre, l'évolution de la technologie de dosage du carburant a suivi de près celle du moteur à combustion interne. Peu de temps après que les hommes ont appris comment libérer l'énergie chimique contenue dans les hydrocarbures (et autres combustibles similaires) et la transformer en puissance mécanique, ils ont commencé à travailler sur des moyens d'alimenter en carburant la chambre de combustion du moteur de la façon la plus efficace possible. Si l'objectif initial était principalement d'accroître la production de puissance, il s'agit également depuis quelques années de réduire la consommation de carburant ainsi que les émissions d'échappement nocives.

Depuis son invention par Wilhelm Maybach en 1889, le carburateur a beaucoup évolué et ses incarnations modernes fonctionnent à merveille. Toutefois, il demeure un dispositif mécanique dépendant du vide créé par l'air d'admission s'y engouffrant pour ajouter le carburant au



CTION DE CARBURANT

Texte Michel Garneau

courant d'air. Essentiellement, le carburateur dirige l'air d'admission grâce à un venturi, ce qui entraîne une minuscule différence de pression d'air. Celle-ci émulsifie le carburant (en le mélangeant avec l'air au préalable), puis agit comme une force afin de pousser le mélange du gicleur du carburateur dans le courant d'air d'admission. Le carburateur constitue par conséquent un système de dosage du carburant non seulement autonome, mais encore économique, ce qui explique sa longévité et son utilisation répandue dans de nombreuses applications. Aussi perfectionné soit-il, le carburateur n'est cependant pas sans défauts et ceux-ci concernent essentiellement son incapacité à fournir au moteur exactement ce dont il a besoin à un moment donné. En fait, le carburateur fournit au moteur une approximation de la quantité de carburant dont il a besoin à un moment donné et dans des conditions données. Malheureusement, dans un monde moderne en quête de puissance accrue et surtout d'émissions plus propres, une telle approximation ne suffit plus.

Et puis il y a eu l'injection de carburant...

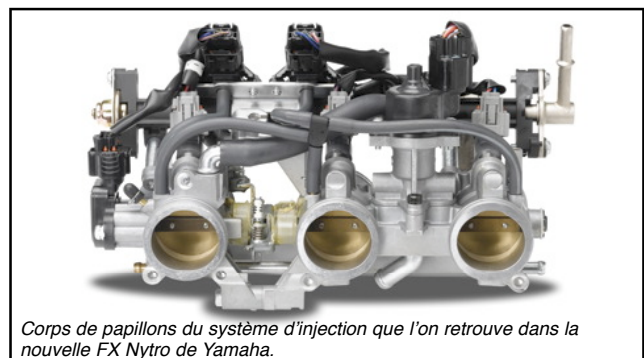
Si le carburateur est en voie de disparition, il doit bien exister quelque chose pour le remplacer, n'est-ce pas? En effet, et ce quelque chose est l'injection de carburant. À la différence des carburateurs, les systèmes d'injection de carburant permettent aux ingénieurs de contrôler plus précisément la quantité de carburant fournie au moteur. En outre, divers systèmes d'injection de carburant permettent aussi de contrôler non seulement le réglage, mais encore l'emplacement ainsi que le moment précis où se fera l'alimentation en carburant. Il n'est donc pas nécessaire d'être ingénieur afin d'apprécier le potentiel considérable qu'offrent de tels systèmes.

Ironiquement, alors même que Wilhelm Maybach était occupé à inventer le carburateur, un certain Frederick William Lanchester s'affairait à mener ce qui constituait peut-être les premières expériences en matière d'injection de carburant. Fait intéressant, cette technologie a d'abord été utilisée dans les moteurs diesel en raison de la plus grande viscosité du carburant diesel et de la nécessité de résoudre le problème de la haute pression de l'air comprimé dans les cylindres. Après son utilisation dans les moteurs diesel commerciaux à partir du milieu des années 1920, le concept a été adapté aux avions de chasse à essence durant la Deuxième Guerre mondiale, offrant aux moteurs d'avions un fonctionnement beaucoup plus flexible et uniforme. Par la suite, l'injection de carburant s'est retrouvée dans les automobiles à la fin des années 1950 et au début des années 1960 lorsque divers constructeurs ont introduit des modèles dotés de systèmes d'injection de carburant mécaniques innovateurs. Enfin, en 1966, l'injection de carburant électronique a été mise au point, permettant un contrôle précis de l'alimentation en carburant et en air des cylindres pour un fonctionnement optimal du moteur.

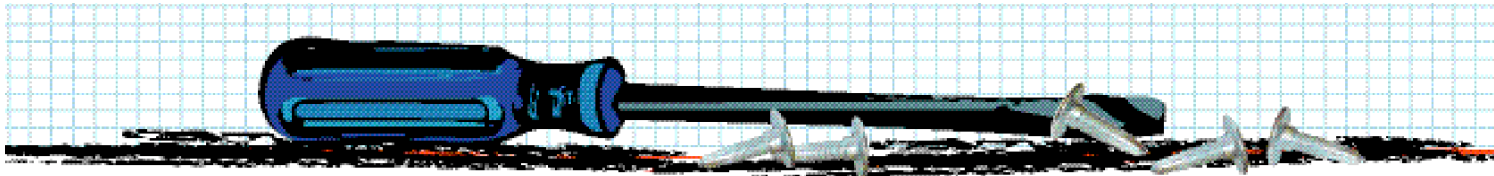
Une question de pression

La principale différence fonctionnelle entre le carburateur et l'injection de carburant est que cette dernière atomise le carburant en le pompant de force à travers un petit gicleur à haute pression, tandis que tel que noté précédemment, le carburateur dépend du vide créé par l'air d'admission s'y engouffrant pour ajouter le carburant au courant d'air. Le résultat est que l'injection de carburant offre un mélange air/carburant plus homogène grâce à une meilleure atomisation du carburant pénétrant dans les cylindres.

Tel que mentionné plus haut, les premiers systèmes d'injection utilisaient des moyens mécaniques afin de doser le carburant, mais les systèmes modernes sont presque tous électroniques et la plupart sont dotés de design similaires. Un capteur de débit massique de l'air ou un capteur de pression absolue dans la tubulure d'admission est situé au niveau de l'admission et habituellement monté soit dans le tube d'air allant de la boîte à air au corps de papillon, soit directement sur le corps de papillon. Comme son nom l'indique, le capteur de débit massique de l'air mesure la masse de l'air en circulation et donne à l'ordinateur une idée précise de la quantité d'air pénétrant dans le moteur. Le composant suivant en ligne est le corps de papillon, qui dispose d'un capteur (habituellement monté sur le papillon même) signalant la position du papillon à l'ordinateur. Le module de commande électronique utilise alors cette donnée afin de calculer la charge exercée sur le moteur. Un capteur de température du liquide de refroidissement est également utilisé et signale la température du moteur au module de commande électronique, une donnée permettant de calculer le rapport de carburant adéquat requis.



Un autre capteur faisant souvent partie du système d'injection de carburant est le capteur d'oxygène ou O_2 , permettant de déterminer la quantité d'oxygène dans l'échappement. Cette donnée est utilisée par l'unité de contrôle électronique afin de régler le rapport air-carburant en temps réel. L'ajout du capteur d'oxygène a



permis un contrôle plus précis et plus rapide du mélange en tout temps, et son utilisation résulte en grande partie de la nécessité de répondre à des règlements toujours plus stricts en matière d'émissions d'échappement. Les systèmes disposant d'un capteur d'O₂ (parfois appelé sonde Lambda) sont dits de type boucle fermée, tandis que ceux qui ne possèdent pas de tel capteur sont de type boucle ouverte. Bien sûr, les systèmes à boucle ouverte ne sont pas aussi précis et la plupart sont en train d'être éliminés.



Capteur de O₂

Le système de carburant consiste en une pompe de carburant (habituellement montée dans le réservoir), un régulateur de pression du carburant, des conduites d'alimentation en carburant (faites de plastique à haute résistance, de métal, ou de caoutchouc renforcé), un rail de carburant auquel les injecteurs sont raccordés et un ou plusieurs

injecteur(s). L'injecteur moderne, habituellement un dispositif électromagnétique (commandé par solénoïde) consistant en un gicleur et une soupape, agit comme un distributeur de carburant en injectant le carburant liquide directement dans le courant d'air du moteur. La quantité optimale de carburant injecté dépend de conditions telles que la température ambiante et celle du moteur, la vitesse du moteur et la charge exercée ainsi que la composition des gaz d'échappement (dans les systèmes à boucle ouverte seulement). Le logiciel de l'unité de contrôle électronique est programmé pour compenser ces conditions et de nombreux autres facteurs.

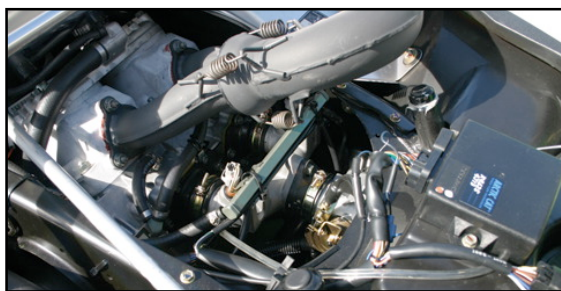
L'injecteur de carburant électronique est normalement fermé et s'ouvre afin d'injecter le carburant pressurisé aussi longtemps que la bobine du solénoïde de l'injecteur est alimentée en électricité. La durée de cette opération, appelée largeur d'impulsion, est proportionnelle à la quantité de carburant désirée. La largeur d'impulsion est inversement liée à la différence de pression de part et d'autre de l'injecteur. Par exemple, si la pression des conduites d'alimentation en carburant augmente (à l'entrée de l'injecteur) ou si la pression d'admission diminue (à la sortie de l'injecteur), une largeur d'impulsion réduite admettra la même quantité de carburant. Un régulateur de pression du carburant contrôle la pression du carburant à chaque injecteur ou la pression différentielle de part et d'autre de l'injecteur. Des injecteurs de carburant de taille et de caractéristiques de pulvérisation variées sont disponibles.

Les types de systèmes d'injection électronique de carburant

Les systèmes d'injection de carburant habituellement utilisés dans les moteurs à essence (à l'exception des systèmes à injection directe) injectent le carburant dans l'air avant qu'il ne pénètre dans la chambre de combustion. Cette opération peut être effectuée presque n'importe où dans le courant d'admission et les systèmes d'injection de carburant sont généralement classés en fonction de l'endroit où elle a lieu.

Le premier type et le plus élémentaire est l'injection monopoint, où l'injecteur est situé à l'extérieur du corps

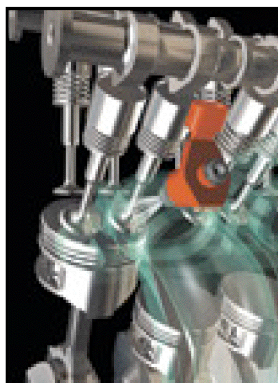
de papillon de façon à injecter le carburant lorsque le mélange d'admission traverse les passages d'admission (comme dans un carburateur). L'injection monopoint a été introduite dans les automobiles au milieu des années 1980 comme une technologie de transition vers l'injection individuelle dans l'orifice d'admission, son principal avantage étant un coût réduit (puisque nombre des composants de soutien du carburateur pouvaient être réutilisés). Le principal inconvénient de ce système est que s'il offre un calibrage plus précis que celui des carburateurs, il ne permet pas de contrôler avec beaucoup de précision le réglage de l'injection même. À une époque de règlements stricts en matière d'émissions d'échappement, un tel système n'est pas optimal, car il laisse s'échapper du moteur un air riche en carburant imbrûlé (ce qui signifie des niveaux de HC élevés pour les moteurs à deux temps comme à quatre temps). Les systèmes d'injection de carburant utilisés dans les moteurs à deux temps Arctic Cat (Suzuki) actuels sont de ce type.



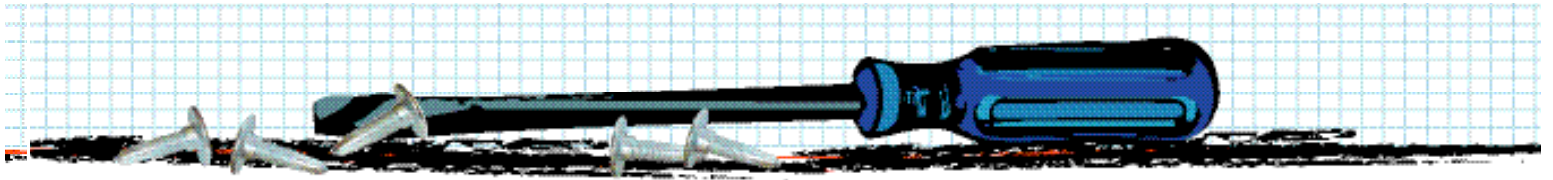
Injecteur monopoint utilisé dans le moteur de la Sabercat 500 2005 d'Arctic Cat.

L'injection dans l'orifice d'admission (parfois appelée injection multipoint) constituait l'étape d'évolution suivante. Dans ce système, le carburant est injecté dans l'orifice d'admission juste en amont de la ou des soupape(s) d'admission du cylindre plutôt qu'à un point central. Si elle est plus coûteuse que l'injection monopoint (nécessitant par exemple au moins un injecteur par

cylindre), l'injection dans l'orifice d'admission offre beaucoup plus de contrôle sur le réglage de l'injection même. Ainsi, le carburant peut être ajouté au dernier moment possible (juste avant la fermeture des soupapes d'admission dans un moteur à quatre temps), ce qui réduit considérablement les émissions de HC du moteur tout en améliorant l'économie de carburant. L'injection dans l'orifice d'admission n'a pas d'application directe en ce qui concerne le moteur à deux temps.



Cela dit, les moteurs à deux temps ont évolué avec l'arrivée des systèmes à injection semi-directe. Introduit par Rotax en 2003, le système à injection semi-directe place les injecteurs dans les orifices de transfert et permet à l'injection même d'être retardée jusqu'au dernier moment possible (c'est-à-dire juste avant que les orifices ne soient fermés par le piston montant), ce qui contribue beaucoup à limiter l'émission de gaz imbrûlés dans l'échappement. Comme les moteurs à quatre temps dotés de l'injection

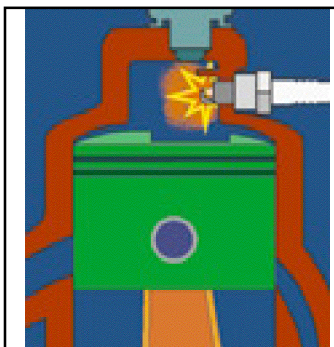


dans l'orifice d'admission, les moteurs à injection semi-directe ont permis de réduire considérablement les émissions de HC et la consommation de carburant. En plus de Ski-Doo, Polaris offre à présent un système similaire dans ses moteurs Cleanfire.

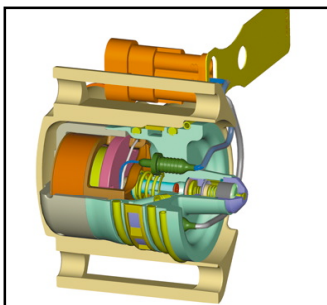


Moteur Liberty 600 HO CFI utilisant une technologie à injection semi-directe.

L'injection directe est une variante de l'injection de carburant utilisée dans les moteurs à essence modernes à deux et à quatre temps, où le carburant gicle directement dans la chambre de combustion juste avant la combustion. L'idée n'est pas nouvelle puisque presque tous les moteurs diesel utilisent ce type d'alimentation en carburant, et ce, depuis un certain temps. Les principaux avantages du moteur à injection directe sont une amélioration de la consommation, un accroissement de la puissance et, ce qui est peut-être le plus important, une réduction considérable des émissions, particulièrement dans les conditions de charge faible. L'injection directe offre un contrôle précis de la quantité de carburant et un réglage de l'injection variant en fonction des conditions de charge. Fait intéressant, les avantages de l'injection directe sont encore plus prononcés dans les moteurs à deux temps, bien que les moteurs à quatre temps profitent également de cette technologie.



Exemple de combustion stratifiée.



Injecteur utilisé dans les moteurs à injection directe E-Tec d'Evinrude/BPR.

Dans un moteur à injection directe, le système de gestion du moteur choisit continuellement entre trois modes de combustion (chacun étant caractérisé par le rapport air/carburant) : mélange ultra-pauvre, stoechiométrique, et pleine puissance.

Le mode à mélange ultra-pauvre est utilisé pour les conditions de charge légère n'exigeant pas ou presque pas d'accélération, et peut correspondre à des rapports aussi élevés que 65:1. Pour un fonctionnement optimal, la petite quantité de mélange air/carburant est placée à proximité de la bougie d'allumage. Cette charge stratifiée est principalement entourée d'air, ce qui maintient le carburant à l'écart des parois du cylindre pour des émissions minimales. La combustion a habituellement lieu dans une cavité sur la surface du piston, ce qui permet l'utilisation de mélanges ultra-pauvres, impossible avec le carburateur ou l'injection de carburant traditionnelle.

Le mode stoechiométrique est utilisé pour les conditions de charge modérée. Le carburant est injecté durant la course d'admission, créant un mélange air/carburant homogène dans le cylindre. À partir du rapport stoechiométrique, une combustion optimale permet d'obtenir des émissions d'échappement propres.

Le mode pleine puissance est utilisé pour l'accélération rapide et les charges lourdes (afin de grimper une colline par exemple). Le mélange air/carburant est homogène et le rapport est légèrement plus riche que le rapport stoechiométrique, ce qui contribue à prévenir le cognement. Le carburant est injecté durant la course d'admission.

L'injection de carburant et l'industrie de la motoneige

Les exigences en matière d'émissions d'échappement récemment introduites pour les motoneiges ont, à toutes fins pratiques, sonné le glas des carburateurs. En effet, il est raisonnable de s'attendre à ce que ceux-ci disparaissent des motoneiges dans un avenir proche, ne laissant que les modèles à injection de carburant. En plus des carburateurs, on peut s'attendre à ce qu'une grande partie de la technologie d'injection de carburant actuellement utilisée dans les motoneiges disparaisse au profit des systèmes à boucle fermée (dans les moteurs à quatre temps) et à injection directe (dans les moteurs à deux temps). L'avenir s'annonce donc rempli de moteurs offrant une performance plus uniforme, une flexibilité et une polyvalence accrues ainsi qu'une consommation de carburant réduite. Bien sûr, le coût de ces nouvelles technologies se traduira par une augmentation générale des prix de détail, confirmant l'adage selon lequel on n'a rien pour rien!



Le moteur 750 cc turbo de Polaris utilise un système d'injection à carburant car celui-ci s'apprête mieux aux applications turbocompressées.

Dans le prochain numéro :

Kevin Cameron nous décortiquera les systèmes de freinage. À ne pas manquer.