

## Système EXUP : le beurre et l'argent du beurre



Les motoneigistes amateurs d'acronymes seront sûrement ravis, car grâce aux ingénieurs de Yamaha, ils pourront compter sur l'ajout de quelques nouvelles entrées au répertoire existant pour 2011. Ainsi, le système de Direction à assistance électronique (DAE) constitue une innovation technologique importante et il en va de même pour le système EXUP (« EXhaust Ultimate Power » ou « Puissance ultime échappement »). Si ce dernier est moins visible et directement perceptible, son impact sur la motorisation se fera ressentir pour des années à venir.

Au-delà des déclarations élogieuses du fabricant, de quoi s'agit-il au juste et comment fonctionne ce système à la fois simple et complexe? De plus, pourquoi cette technologie, qui existe depuis plusieurs années dans l'industrie de la moto, a-t-elle tant tardé à faire son apparition sur une motoneige? Les questions sont nombreuses et voici enfin les réponses.

### Air et puissance

À la base, un moteur à explosion (ou à combustion interne) est une pompe à air. C'est-à-dire qu'il est conçu en premier lieu pour admettre et évacuer de l'air. Il en va de soit que, de façon simpliste, la puissance d'un moteur dépend du débit d'air (et de carburant), plus on peut faire passer d'air dans le moteur, plus on peut produire de puissance, toutes choses étant égales par ailleurs. L'augmentation de la puissance d'un moteur doit donc logiquement passer par une hausse du débit d'air. Il existe différentes façons d'atteindre cet objectif, les trois principales étant une augmentation du volume, un accroissement de la vitesse du moteur ou une optimisation du rendement volumétrique.

La première possibilité, soit un agrandissement du volume, est facilement réalisable avec un accroissement de la cylindrée, celle-ci étant la mesure du volume contenu dans un cylindre du moteur (ou plus précisément du volume déplacé par une course complète du piston à l'intérieur du cylindre). Une augmentation de celle-ci produira donc un surcroît du volume d'air entrant et sortant du moteur. Cependant, pour une multitude de raisons, cette possibilité n'est pas toujours viable.

L'accroissement de la vitesse du moteur permet également d'augmenter la puissance. Rappelons que la formule de la puissance (en ch) est la suivante :

$$Ch = \frac{\text{couple (lb-pi)} \times \text{régime (tr/min)}}{5252}$$

Dans l'équation précédente, il est évident qu'une augmentation du régime (à couple égal) produira un gain de puissance. Cependant, tout comme dans le cas de l'accroissement de la cylindrée, il arrive qu'une augmentation du régime ne soit pas désirable, généralement pour des raisons de fiabilité et de longévité.

La dernière possibilité est une optimisation du rendement volumétrique, c'est-à-dire du rapport entre le volume refoulé et le volume déplacé par l'organe ou les organes de pompage d'une pompe volumétrique par cycle ou par tour. Autrement dit, il s'agit du rapport entre la quantité d'air déplacée par le moteur (vers l'intérieur et l'extérieur) et sa cylindrée réelle. Plus un moteur se remplit et se vide efficacement, plus son rendement volumétrique est élevé.

Une méthode éprouvée pour améliorer le rendement volumétrique est l'utilisation d'un système de pressurisation de l'admission, soit un turbocompresseur ou compresseur volumétrique. En effet, ces systèmes permettent à un moteur de fonctionner comme s'il avait une plus grande cylindrée, la pression artificielle d'admission forçant une plus grande quantité d'air à l'intérieur du moteur et produisant ainsi un rendement volumétrique nettement supérieur à 1. Si cette possibilité est efficace, les moyens de la mettre en œuvre sont coûteux, complexes, lourds et parfois fragiles.

Pour ces raisons, les fabricants de moteurs ont choisi d'autres façons d'optimiser le rendement volumétrique. S'il s'agissait autrefois presque exclusivement d'améliorer la finition des passages et des lumières afin de réduire la traînée, des innovations importantes en matière d'aérodynamique et de dynamique des fluides ont récemment permis aux fabricants de profiter des tendances naturelles de l'air en déplacement et ainsi de réaliser des gains de puissance impressionnants en plus de réduire les émanations polluantes, sans augmenter la consommation de carburant pour autant.

De façon concrète, nous avons pu observer l'évolution des systèmes d'admission et d'échappement au fil des ans. En plus de contribuer à réduire le bruit (une fonction qui prend de plus en plus d'importance), ces composantes sont devenues de véritables dispositifs de calibrage, aidant ainsi les ingénieurs à accroître de façon considérable le rendement et l'efficacité des moteurs. Par exemple, si la pratique consistant à enlever la boîte à air et à la remplacer par des filtres coniques permettait autrefois d'augmenter la puissance presque à tout coup, la même modification exécutée sur un moteur moderne produit en général non seulement une diminution de puissance, mais encore une dégradation importante de la qualité de fonctionnement du moteur ainsi qu'une hausse de sa consommation.

## Hors des sentiers battus

Les diverses contraintes mentionnées antérieurement, ensemble avec les exigences de consommation réduite de la clientèle, ont orienté les recherches vers une amélioration des moteurs. Après avoir considérablement perfectionné les systèmes d'admission et d'échappement traditionnels (les améliorations supplémentaires étant de plus en plus minimes et difficiles à réaliser), les ingénieurs ont poursuivi leurs recherches en sortant des sentiers battus, c'est-à-dire en explorant de nouvelles technologies.

## Une question d'ondes de pression

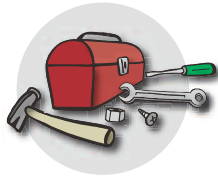
La course d'échappement dans un moteur à quatre temps se caractérise par l'ouverture (ou le soulèvement) de la soupape d'échappement, le piston qui remonte poussant les gaz d'échappement chauds, remplis de pression résiduelle et d'énergie sonore, dans le système d'échappement. Ce déplacement occasionne deux effets importants. Dans un premier temps, l'évacuation des gaz toujours en expansion produit un vide dans le cylindre. Pratiquement au même moment, l'expulsion des gaz crée une onde de pression positive qui s'éloigne du moteur en direction de la sortie du tuyau. Lorsque cette vague de pression arrive à un endroit plus volumineux (soit un collecteur à plus grand diamètre ou encore à l'extérieur), les gaz prennent de l'expansion, ralentissant et dégageant une onde négative en direction du cylindre et du moteur. Cette dernière rebondit à quelques reprises, changeant ainsi de direction et s'affaiblissant chaque fois.

Au fil des ans, les ingénieurs ont appris à exploiter ces phénomènes dans leur quête de puissance et d'efficacité. Par exemple, l'effet Kadenacy, baptisé du nom de l'ingénieur français Michel Kadenacy et breveté en 1933, est le principe selon lequel le dynamisme des gaz brûlés quittant le cylindre entraîne une baisse de pression, le vide partiel créé dans le cylindre aidant à attirer le mélange frais à l'intérieur du moteur. Les lecteurs qui connaissent le fonctionnement du moteur à deux temps remarqueront que cette description correspond parfaitement à ce qui se passe dans ce type de moteur lorsque la sortie des gaz par la lumière d'échappement aide à attirer la charge fraîche dans le cylindre par les lumières de transfert. Les ingénieurs ont fini par comprendre que ce même effet qui sert si bien le moteur à deux temps pouvait aussi être obtenu dans le moteur à quatre temps, mais que cela nécessitait un chevauchement des soupapes, c'est-à-dire une période où les soupapes d'admission et d'échappement étaient toutes les deux ouvertes en même temps. Nous ne savons pas si cette découverte a eu lieu par hasard (un effet inattendu de la course à la puissance ayant mené à des distributions de plus en plus dynamiques, celles-ci étant nécessaires afin de permettre au moteur de respirer à des régimes de plus en plus élevés) ou volontairement, mais peu importe, le chevauchement est devenu une réalité dans pratiquement tous les moteurs à quatre temps de haute performance. D'ailleurs, plus le calibrage est pointu, plus le chevauchement est nécessaire.

En outre, il est important de noter que chaque fois que les ondes de pression produites par le processus d'évacuation des gaz d'échappement sont positives, le chevauchement des soupapes permet d'en profiter en aidant à remplir le cylindre davantage.

## L'effet du chevauchement

Le chevauchement des soupapes et son ampleur ont un impact important sur le rendement d'un moteur. Ainsi, le moteur deux cylindres Rotax de 800 cm<sup>3</sup> figurant sur les motos BMW F800GS et F650GS en est un parfait exemple. La 800 est dotée d'une version à calibrage plus pointu avec chevauchement des soupapes produisant 85 ch. La 650, quant à elle, dispose du même moteur (malgré son nom), mais avec un calibrage moins dynamique et donc moins de chevauchement. D'une puissance annoncée de 72 ch, le moteur réussit les tests d'émanations sans catalyseur (contrairement au 800) tout en étant beaucoup plus éconergétique.



## La YPVS lance le bal

Les systèmes de soupapes modifiant la hauteur de la lumière d'échappement des moteurs à deux temps existent depuis plusieurs années maintenant dans l'industrie de la motoneige. Cependant, tout comme le système EXUP, cette technologie a fait son apparition dans l'industrie de la moto plusieurs années auparavant. Dans le cas du système pour moteurs à deux temps, Yamaha a lancé le bal à la fin des années 1970 lorsqu'elle a introduit le fameux système YPVS (« Yamaha Power Valve System »). Fruit des efforts du fabricant en course de moto 500 GP, la YPVS a été mise au point afin d'aider le célèbre pilote américain Kenny Roberts à remporter le championnat du monde en 1978. Introduit sur le modèle OW35K 1978, le premier système YPVS était constitué d'une valve en forme de bobine disposée au-dessus de la lumière d'échappement du

cylindre. Selon le régime du moteur, un boîtier de commande électronique et un micro-moteur commandaient par câble la rotation de la soupape pour la placer dans la position requise, fournissant ainsi la meilleure configuration sur toute la plage de régimes. Grâce à sa capacité d'élargir la plage de puissance, la technologie YPVS a amélioré de façon importante l'accélération de l'OW à la sortie des virages, aidant ainsi Kenny Roberts à repousser les attaques des pilotes de Suzuki, notamment le célèbre Barry Sheene, et lui permettant de gagner son deuxième championnat du monde consécutif.

À partir de 1980, la TZ500 est dotée d'un système entièrement mécanique entraîné par le vilebrequin, tout comme la motocross YZ250 1982. En 1983, les TZ ainsi que les célèbres RD 250 et 350 de route héritent d'une gestion électronique du système. Les amateurs de motoneiges Yamaha, quant à eux, ont dû attendre

jusqu'en 1998 avant de pouvoir profiter de cette technologie avec le lancement des SRX 600 et 700.



Cependant, comme dans le cas d'un moteur à deux temps, cette dynamique peut se révéler un problème, le risque d'une charge imbrulée s'échappant dans l'atmosphère par le tuyau d'échappement étant bien réel. C'est là que le deuxième phénomène qui se produit durant la course d'échappement, soit la création d'ondes négatives, peut venir à la rescousse. Toujours dans une dynamique qui ressemble beaucoup à celle du moteur à deux temps, la vague négative se dirigeant vers le cylindre a tendance non seulement à bloquer la sortie de la charge imbrulée, mais encore à la repousser dans le cylindre où elle pourra être brûlée, augmentant ainsi le couple et la puissance du moteur. Dans certains cas (ou plutôt à certaines vitesses), il se peut que cette dynamique complexe produise une sorte de suralimentation, permettant au moteur de dépasser un rendement volumétrique de 100 %.

## Les choses se compliquent

Si l'interaction des facteurs mentionnés plus tôt peut se révéler très avantageuse par moments, elle peut aussi comporter certains inconvénients, par exemple lorsque les mêmes éléments qui augmentent la puissance à 5 000 tr/min produisent une baisse à 7 500 tr/min. Comment cela est-il possible?

En fait, les problèmes surviennent pour une raison simple : la vitesse des ondes est fixe (vitesse du son), alors que la vitesse du moteur varie. Évidemment, le temps dont disposent les ondes pour effectuer leur travail, et donc repousser les gaz en direction du cylindre, varie aussi, en fonction de la vitesse du moteur. Cela veut dire que si à certaines vitesses les ondes de pression négatives aident à repousser la charge fraîche dans le cylindre, à d'autres elles agissent de manière à forcer l'entrée de gaz déjà brûlés, diluant ainsi la charge et nuisant au rendement du moteur, ce qui n'est pas tout à fait un scénario désirable. En outre et comme nous l'avons mentionné plus tôt, il est à noter que plus le calibrage du moteur est pointu, plus le chevauchement est nécessaire, et par conséquent, plus la question des points morts dans la courbe de puissance pose un problème.

La réalité est qu'un système d'échappement est calibré pour fonctionner à pleine efficacité à une vitesse particulière ou en fonction des harmoniques de celle-ci, puisqu'il s'agit d'ondes. À d'autres vitesses, les ondes de pression sont mal synchronisées et produisent des baisses. Comme nous le savons tous, il existe très peu d'applications où un moteur est appelé à fonctionner à la même vitesse continuellement, et la propulsion d'une motoneige ne figure certainement pas dans cette catégorie. Alors comment faire pour résoudre ce problème? Au fil des ans, les ingénieurs ont eu recours à diverses techniques visant à élargir la zone d'optimisation, comme par exemple l'utilisation de tuyaux de différentes longueurs (sur les moteurs multicylindres), de liens entre les tuyaux et de tuyaux biseautés. Si ces techniques se sont révélées avantageuses jusqu'à un certain point, il n'en reste pas moins qu'il s'agit de compromis.

## Et Yamaha crée le système EXUP

La technologie des moteurs à quatre temps a changé de façon importante lorsque Yamaha a lancé la première soupape EXUP sur une moto de série en 1987 (voir encadré). Voilà que le placement d'une soupape rotative dans le collecteur d'échappement permettait aux ingénieurs de contrôler avec précision la dynamique des ondes de pression. En ajustant précisément la dimension de l'orifice d'échappement du collecteur, la soupape EXUP permettait en effet de modifier la configuration des conduits en fonction de certains paramètres, dont le régime du moteur et l'ouverture des gaz, pour gérer avec le maximum d'efficacité le cycle des ondes de pression dans le système d'échappement. Il s'agissait donc non seulement d'éliminer les effets secondaires indésirables des ondes négatives (soit de forcer des gaz inertes dans le cylindre), mais encore de manipuler le déplacement des ondes pour faire en sorte que les ondes positives soient utilisées de façon optimale afin de maximiser le remplissage du cylindre de mélange frais.

De façon tangible, l'utilisation de la technologie EXUP permet de réduire les émanations polluantes et d'améliorer la consommation (l'essence étant brûlée et donc utilisée de façon plus

## EXUP : version quatre temps de la YPVS

La mise au point du système YPVS et les gains impressionnants que celui-ci a permis d'obtenir ont poussé les ingénieurs de Yamaha à se demander si quelque chose de semblable serait possible pour le moteur à quatre temps. Une équipe d'ingénieurs utilisant un ordinateur – un outil aujourd'hui courant, mais plutôt révolutionnaire à l'époque – a calculé le flux et la pression qui existaient dans le système

d'échappement d'une FZR400 (moto sport munie d'un moteur quatre cylindres de 400 cm<sup>3</sup>). Les ingénieurs ont aussitôt découvert que l'ajout d'un papillon des gaz au bout du collecteur pouvait servir à contrôler les ondes de pression, ce que des essais actuels ont confirmé. Ils ont alors réalisé qu'ils pouvaient ainsi dessiner un échappement de course, puis utiliser un papillon des gaz pour éliminer les baisses dans la courbe de puissance. Le lancement de la FZR400RR EXUP 1987

sur le marché japonais a suivi et le reste appartient à l'histoire.

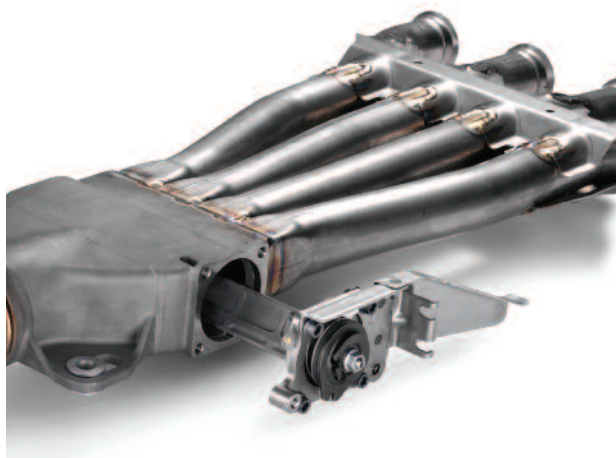


efficace, plutôt que relâchée imbrulée par l'échappement) tout en optimisant la puissance et la réponse du moteur sur une large plage de régimes.

En outre, la vitesse de ralenti est plus stable grâce à la combustion améliorée à basse vitesse. Enfin, comme la soupape est souvent en position autre que complètement ouverte, sa présence aide aussi à atténuer le bruit d'échappement.

## Enfin sur une motoneige

Dès son lancement dans le monde de la moto, la technologie EXUP a été copiée par la concurrence. Actuellement, presque tous les grands fabricants de motos offrent une technologie semblable dans leurs gammes de produits, non seulement sur les modèles sport, mais encore sur les « cruisers » et les motos hors-route. Ce système est devenu un outil essentiel afin de réduire les émanations et la consommation ainsi que d'accroître la convivialité et la puissance des modèles.



À des fins de précision et d'efficacité, le système EXUP utilisé sur l'Apex tient compte de plusieurs paramètres, dont le régime du moteur et la position des papillons des gaz.

On peut se demander pourquoi la communauté des motoneigistes a dû attendre si longtemps avant de pouvoir enfin profiter des nombreux avantages offerts par cette technologie. Certains diront qu'il s'agit d'une question de coûts et de complexité, surtout compte tenu du fait que les moteurs à quatre temps ont toujours répondu aux normes d'émissions d'échappement sans devoir recourir à ce système. Ceux qui sont plus versés dans les questions techniques pencheront possiblement du côté du système de poulies à variation continue utilisé sur les motoneiges, qui offre une marge de manœuvre plutôt large en ce qui concerne sa capacité de tolérer et de compenser des plages de puissance qui autrement poseraient problème.

## L'avenir

Si le système EXUP est actuellement exclusif à Yamaha dans l'industrie de la motoneige, cette situation ne devrait pas durer indéfiniment. Ainsi, le fabricant Suzuki, fournisseur de moteurs pour Arctic Cat, possède une technologie très semblable baptisée Suzuki Exhaust Tuning (SET) et utilisée sur ses motos de haute performance. Par conséquent, ce système pourrait bien faire son apparition sur un modèle Arctic Cat dans un avenir rapproché.



Suzuki, fabricant de cette moto custom M109R, fait une utilisation répandue de son système SET. Il ne serait donc pas surprenant que celui-ci fasse son apparition sur une motoneige Arctic Cat prochainement.

Par ailleurs, compte tenu des progrès impressionnants qu'ont permis les systèmes YPVS (ainsi que RAVE, APV, VES) dans l'évolution du moteur à deux temps, sans oublier l'impact du lancement de la soupape EXUP dans le monde de la moto, nous pouvons nous attendre à une amélioration rapide du rendement des moteurs à quatre temps dotés de cette technologie. Par exemple, dans le monde des véhicules à deux roues, elle a permis aux ingénieurs de mettre au point des calibrages plus précis et par conséquent des moteurs plus puissants sans devoir subir le problème des baisses de puissance à bas et à moyen régime.

La capacité du système EXUP à atténuer le bruit provenant de l'échappement devrait aussi prendre plus d'importance dans l'avenir, la question de la nuisance (notamment soulevée dans le cadre du jugement du Petit Train du Nord) n'étant pas près de disparaître.