

Voulez-vous vraiment en savoir plus sur les résonateurs ?

Par Gordon Jennings - « Cycle » Mars 1972

Walter Kaaden, qui, en tant qu'ingénieur en chef du développement de MZ, avait des raisons de le savoir, a déclaré ceci à propos des systèmes d'échappement à résonateur : « Vous saurez quand vous aurez le bon design, car le résonateur sera alors impossible à monter sur la moto sans qu'il racle le sol, brûle la jambe du pilote ou oblige de déplacer au moins un composant majeur. »

Sa remarque a été faite en plaisantant, mais contient malheureusement beaucoup de vérité. Ce volumineux bout de tuyauterie d'échappement que nous appelons un « résonateur » est en fait très difficile à monter sur une moto. Placé en dessous, il dévore la garde au sol jusqu'à ce qu'il se fasse lui-même dévorer par les cailloux. Recroquevillé sur le côté de la moto, il mène une bataille acharnée pour l'espace avec toute la jambe du motard. Et il assaille toujours les tympans de son mugissement diabolique.

Malgré ces multiples inconvénients, le système d'échappement à résonateur est devenu le compagnon omniprésent des moteurs deux temps performants. Pourquoi ? Parce que sans lui, le moteur deux temps est une vraie calamité. Dans le sac à malice de l'ingénieur, rien ne peut remplacer le résonateur. Le gain de puissance, entre les moteurs équipés de silencieux et les moteurs identiques avec des résonateurs, varie en fonction de la qualité (ou de la mauvaise qualité) du silencieux d'origine, et sont en outre influencées par la taille du carburateur, le calage des lumières, etc. Cependant, la différence sera de l'ordre de 10 à 25 % et peut aller jusqu'à 50 % lorsqu'il est utilisé en conjonction avec une carburation et un calage modifié. Cette différence possible est largement appréciée, et cela explique le succès commercial des systèmes d'échappement de remplacement.

Cela a également conduit de nombreux passionnés à concevoir et construire leur propre résonateur. Malheureusement, le résultat final du travail expérimental de la plupart des gens est simplement la découverte qu'il est possible d'avoir tous les inconvénients du résonateur sans aucun de ses avantages compensatoires en termes de performances. Ou, comme j'ai entendu un expérimentateur (qui ne se distinguait des autres que par son honnêteté) dire, en regardant perplexe le résonateur qu'il avait bricolé pour sa propre moto :

« Ça ne fait pas beaucoup de puissance... mais c'est sûr que c'est bruyant ! »

Où s'est-il trompé ? Comme souvent, c'était probablement l'ignorance pure et simple de la façon dont fonctionne un système d'échappement à résonateur.

Ce que je me propose de faire ici, est de diluer suffisamment l'ignorance générale concernant ces résonateurs pour améliorer les chances de l'homme moyen d'arriver à des résultats plus satisfaisants.

Je dois ajouter que je ne considère pas ma propre compréhension du fonctionnement interne du résonateur comme étant la vérité révélée du Tout-Puissant : Mes théories coïncident raisonnablement avec la loi physique, et mes formules, lorsqu'elles sont appliquées à des moteurs spécifiques, semblent aboutir à un résonateur qui fonctionne. Ceux d'entre vous qui ont des points de vue différents sur le sujet (et l'expérience me dit que vous vous accrochez à vos points de vue avec une ténacité que la plupart des gens réservent aux religions mineures) sont les bienvenus.

Pour comprendre les résonateurs, il faut commencer par comprendre le comportement des ondes sonores dans les tubes. Ces ondes, qui sont en fait des quanta d'énergie, traversent les gaz à des vitesses déterminées par la température et ont la propriété particulière d'être réfléchies d'où elles viennent par l'extrémité fermée ou ouverte du tube dans lequel elles voyagent. Plus étrange encore est l'habitude de ces ondes d'inverser leur signe à l'extrémité ouverte d'un tube. Une

onde de pression positive, réfléchi à l'extrémité ouverte d'un tube, remonte le tube sous forme d'onde de pression négative ; à l'inverse, une onde négative se reflète positivement. Mais les réflexions à l'extrémité d'un tube fermé restent inchangées en signe : le positif reste positif ; négatif fait de même.

Ces aspects du comportement des ondes sonores sont utilisés dans le système d'échappement du résonateur pour aider à vider le cylindre des gaz brûlés, puis pour empêcher la perte de la charge de gaz frais. Pour illustrer cela, regardons au ralenti l'activité dans un résonateur typique à travers un cycle de fonctionnement :

Lorsque la lumière d'échappement s'ouvre, les gaz d'échappement, encore sous une pression considérable, sont libérés et un front d'onde commence sa marche vers le système d'échappement. Après s'être déplacée sur une courte distance dans un tube à parois parallèles, cette onde atteint le mégaphone, plus exactement appelé divergent. Ici, les murs environnants divergent et l'onde réagit presque comme si elle avait atteint le bout du tuyau, sauf que le divergent est un convertisseur beaucoup plus efficace de l'énergie des ondes. Dans le divergent, une grande partie de l'énergie des ondes positives est inversée, en une onde négative, et est rapidement réfléchi dans le tube pour appliquer un vide à l'orifice d'échappement. Ce vide est plus fort qu'on pourrait le supposer. Son amplitude est d'environ moins 50 kPa (0,5 bar) à son maximum. De toute évidence, cette dépression peut être très utile pour aspirer les gaz d'échappement du cylindre et pour transporter la charge fraîche du carter à travers les orifices de transfert : c'est précisément la façon dont il est utilisé dans un résonateur.

Maintenant, si le système d'échappement s'arrêtait là, comme c'était le cas à l'époque des DKW suralimentés et des « blooey-pipe » de Greeves, cet effet d'aspiration serait une bénédiction mitigée : tout ce qui aspire les gaz brûlés d'un cylindre aspire aussi la charge de gaz frais qui est juste derrière. La puissance étant très directement liée à la masse de

la charge air/carburant emprisonnée dans le cylindre à la fermeture de l'échappement, cet effet du mégaphone n'est pas souhaitable.

C'est ici que l'extrémité refermée du résonateur entre en jeu. Alors qu'une partie de l'onde positive d'origine s'éloignant de l'orifice d'échappement a été inversée et renvoyée pour aider à vider le cylindre, le reste continue sa progression pour atteindre finalement, l'extrémité fermée du résonateur. L'onde positive se reflète naturellement en onde de signe toujours positif, vers l'orifice d'échappement. En arrivant là-bas, cette onde positive bloque l'écoulement de la charge de gaz frais et va en fait ramasser une grande partie de ce qui s'est déjà échappé, la remettre dans le cylindre et l'y maintenir jusqu'à ce que l'orifice d'échappement se ferme.

Il faut mentionner ici que le résonateur n'est pas purement un dispositif sonore : Le résonateur évacue également la pression dans l'atmosphère à travers un orifice restreint, et parce que l'impulsion des gaz d'échappement s'est étendue pour remplir le résonateur plus rapidement que la pression à l'intérieur peut être égalisée, il y a une augmentation générale de la pression dans tout le système. Cette augmentation de pression fonctionne de concert avec l'onde de pression réfléchi pour empêcher la perte de charge.

Tout ce processus, plutôt compliqué, fonctionne à merveille, tant que toutes les différentes ondes et pressions qui surgissent à l'orifice d'échappement sont en accord avec ce que le moteur essaie de faire à chaque instant.

Malheureusement, les mouvements des ondes sont à un rythme obstinément lié à la température des gaz d'échappement et totalement indifférents aux exigences du moteur. Ainsi, la tâche principale dans la conception d'un résonateur pour un moteur particulier, est d'établir une longueur entre l'orifice d'échappement du moteur et le point auquel la réflexion des ondes se produit dans l'extrémité du résonateur qui renverra une onde de pression positive à l'orifice d'échappement, juste avant la fermeture de la lumière.

Pour trouver cette longueur d'accord, il faut d'abord connaître la vitesse à laquelle les ondes sonores se propagent dans le résonateur, et c'est un point très difficile. Comme on l'a dit précédemment, la vitesse du son varie continûment au cours d'un même cycle de fonctionnement :

- Le divergent dilate les gaz et les refroidit.
- Le convergent provoque un certain degré de recompression et élève la température du gaz.
- Un refroidissement global des gaz dans le résonateur influence également la vitesse des ondes.

Heureusement, il suffit juste de connaître la vitesse moyenne des ondes. Évidemment, cela variera quelque peu, mais par expérience, je sais qu'un bon nombre à utiliser pour établir une longueur en référence au régime moteur prévu à la puissance maximale est 518 mètres par seconde. C'est une valeur un peu élevée, mais vous pouvez l'utiliser avec une certaine assurance qu'il vous donnera une longueur accordée, proche, mais légèrement plus longue que ce que vous voulez vraiment. La longueur du système pourra alors être raccourcie pour amener le régime de puissance maximale à la valeur recherchée.

Voici une formule très simple pour trouver cette longueur accordée :

$$L_t = \frac{E_0 \times V_s}{12 \times N}$$

Où :

- L_t est la longueur accordée en mètres
- E_0 est l'angle d'ouverture de la lumière d'échappement en degrés
- V_s est la vitesse des ondes en mètres par seconde
- N est le régime moteur en tours par minute.

Par exemple : Un moteur a un angle d'ouverture de la lumière d'échappement de 180 degrés et un pic de puissance à 7000 tr/min. La vitesse des ondes que nous prendrons, à des fins de conception préliminaire, sera de 518 m/s.

$$L_t = \frac{180 \times 518}{12 \times 7000}$$

$$L_t = 1,11 \text{ m}$$

Cette longueur, 1,11 m, est mesurée à partir de la lumière d'échappement, au niveau de la face du piston, jusqu'à un point légèrement supérieur à la moitié du cône convergent, qui doit, dans un souci d'efficacité, être un cône plutôt qu'une plaque plane.

L'angle donné au cône convergent et celui du divergent sont sélectionnés en tenant compte des caractéristiques de sortie du moteur. Ma propre préférence, pour les divergents, est un angle de divergence minimum de 6 degrés et un maximum de 9 degrés. Les divergents coniques à moins de 5 degrés, angle inclus, sont presque impossibles à adapter dans la longueur disponible ; ceux avec des angles supérieurs à 10 degrés sont des inverseurs d'ondes inefficaces, et la récupération de l'énergie des ondes en souffre. Les chercheurs ont montré que l'efficacité maximale du divergent se produit avec un angle divergent de 8 degrés. Cependant, si vous voulez une puissance maximale et que vous n'êtes pas préoccupé par la plage de régime de gain de puissance, un divergent à 9 degrés renvoie une onde très forte de courte durée qui vous aidera. Inversement, si vous souhaitez une plage de puissance plus large, les divergents ayant une conicité plus lente répartiront la puissance au maximum, au prix de la puissance maximale. Pour la compétition, je recommanderais un divergent de 8 ou 9 degrés. Pour les motos de cross de petite cylindrée, jusqu'à 250 cm³, le meilleur choix est probablement un divergent à 7 degrés. Pour les grosses motos de cross, qui ont généralement plus de puissance que leur pneu arrière ne peut en passer au sol, un divergent à 6 degrés les rendra plus maniables.

Mais qu'en est-il du cône convergent ? Il se trouve que l'amplitude et la durée de l'onde réfléchi, et donc les caractéristiques de puissance du moteur, sont également influencées par la conicité.

Dans certaines limites, la conicité correcte sera le double de celle du divergent. Ainsi, un cône divergent à 8 degrés est associé à un cône convergent à 16 degrés. Cependant, vous pouvez faire varier cela de quelques degrés, parfois plus, dans le but d'obtenir précisément les caractéristiques de puissance dont vous avez besoin. Par exemple, un divergent à 6 degrés coiffé d'un cône convergent à 20 degrés produirait une bonne répartition de la puissance jusqu'au pic de puissance, puis couperait le moteur juste au-delà. La règle ici est que le divergent influence plus la courbe de puissance pour les régimes inférieurs au pic de puissance, tandis que la conicité convergent a son effet sur la courbe pour les régimes supérieurs au pic de puissance. Encore une fois, comme dans le divergent, un cône convergent long et peu conique donne une bonne répartition de la puissance à un certain coût pour une puissance maximale, et vice versa.

Alors que le cône convergent doit être placé très précisément en ce qui concerne la distance par rapport à la fenêtre de l'orifice d'échappement (cette distance mesurée le long de l'axe du système d'échappement), il n'y a pas de point unique dans le cône où la réflexion se produit. En fait, une onde entrant dans le cône commence à se refléter dès le moment de l'entrée, et la réflexion se poursuit sur toute la longueur du cône. Il y a, cependant, un point médian en termes de réflexion, qui n'est pas, comme vous pourriez le supposer et comme je le pensais au début, à mi-chemin du cône convergent. Pour trouver ce point moyen de réflexion, imaginez que le cône convergent soit complet, plutôt que tronqué à sa petite extrémité pour faire un trou pour le tuyau de sortie. Si vous utilisez la moitié de la distance entre la grande extrémité du cône et sa pointe imaginaire, cela vous donnera votre point de réflexion moyen. Par exemple, un cône ayant un diamètre de 90 mm et convergeant sur un angle inclus de 16 degrés aurait une longueur d'environ 213,5 mm s'il était coupé court pour se joindre à un tuyau de sortie de 30 mm, mais sa longueur totale est de 320 mm.

Vous devez donc utiliser un point situé à 160 mm en arrière de l'extrémité ouverte du cône pour établir la longueur de référence du résonateur.

Quiconque a observé le développement des résonateurs au fil des ans a remarqué que le plus grand changement dans leur apparence concernait leur section. Les premiers exemples étaient assez minces, mais c'était avant que les chercheurs n'établissent que les divergents, dans les divergences et les "pressions applicables ici, offrent une efficacité maximale lorsque leurs sections transversales pour l'entrée et la sortie sont proportionnées à 1: 6,25.

Pour des sections parfaitement circulaires, lorsque la section de la grande extrémité des divergents est de 6,25 fois celle de l'extrémité d'entrée cela revient à dire que le diamètre de la grande extrémité est 2,5 fois le diamètre de l'extrémité d'entrée. Ainsi, si le diamètre d'entrée est de 40 mm (pour correspondre à un tuyau d'entrée de même diamètre), le diamètre de la grande extrémité sera de $40 \times 2,5 = 100$ mm.

La surface de la petite extrémité sera de $(40 \times 40 \times \pi / 4) = 1256,64$ mm².

La surface de la grande extrémité sera de $(100 \times 100 \times \pi / 4) = 7854$ mm².

En multipliant 1256,64 par 6,25, on retrouve la même valeur de 7854 mm².

Déterminer la longueur d'un divergent, ou d'un cône convergent, après avoir établi les diamètres majeur et mineur et la conicité, est un simple exercice de trigonométrie. J'utilise la formule suivante :

$$L = \frac{D_2 - D_1}{2 \times \tan(A)}$$

Où :

- L est la longueur :
- D_1 est le petit diamètre
- D_2 est le grand diamètre
- $\tan(A)$ est la tangente de la moitié de l'angle de divergence (ou de convergence) du cône divergent ou du cône convergent.

Par exemple, pour un divergent ayant un petit diamètre de 40 mm, un grand

diamètre de 100 mm et un angle divergent de 8 degrés,

$$L = \frac{100 - 40}{2 \times \tan(4 \text{ degrés})}$$

$$L = 429 \text{ millimètres}$$

Après avoir couvert les divergents et les convergents et réglé les longueurs, nous pouvons maintenant nous attaquer aux tuyaux d'entrée et de sortie. Le diamètre du premier est établi principalement par la taille de l'orifice d'échappement du moteur. Si le moteur a un orifice d'échappement d'une superficie de, disons, 1000 mm², le tuyau d'entrée reliant cet orifice au divergent doit avoir une section transversale de 15 à 20% plus grande, d'où un diamètre intérieur (pour cet exemple) de 38,265 à 39,088 mm.

Mais (et c'est là que le choix devient difficile) des augmentations de la section du tuyau d'entrée jusqu'à 50 % de plus que la section de l'orifice d'échappement peuvent être indiquées si, pour des raisons de commodité d'installation, il devient nécessaire d'utiliser un tuyau d'entrée exceptionnellement long. De plus, un tuyau d'entrée long et de grand diamètre peut être utile pour élargir la plage de puissance du moteur vers le bas, mais le même effet peut alors être obtenu avec un tuyau plus court et de plus petit diamètre relié à un divergent à faible conicité. Le modèle est que les tuyaux de grand diamètre se comportent comme s'ils étaient plus courts que leur longueur réelle, et les tuyaux de petit diamètre vice-versa.

Dans l'application réelle, la question du diamètre du tuyau d'entrée aura été réglée pour vous par ceux qui ont conçu votre moteur, et qui ont donné son diamètre à l'orifice d'échappement. Vous ne pouvez pas faire grand-chose pour changer cela. Je n'offre donc qu'une règle empirique pour la longueur : pour une courbe de puissance orientée vers la sortie maximale, la longueur du tuyau d'entrée doit être comprise entre 6 et 8 diamètres. Ainsi, un tuyau ayant un diamètre de 40 mm aurait une longueur comprise entre 240 et 320 mm, et ce chiffre comprend la

longueur de l'orifice d'échappement depuis sa lumière dans le cylindre jusqu'à la bride de raccordement. Une plage de puissance plus large sera obtenue avec des longueurs de tuyau d'entrée comprises entre 9 et 11 diamètres. Si vous ne parvenez pas à établir la connexion entre l'orifice et le divergent avec des longueurs dans ces plages, modifiez le diamètre dans le sens approprié. De même, si vous souhaitez élargir ou réduire la plage de puissance, améliorer le couple à basse vitesse ou augmenter le pic de puissance, et qu'il n'y a pas de place pour jouer avec les longueurs d'entrée, vous pouvez faire l'ajustement avec le diamètre.

Le tuyau de sortie est une question moins compliquée. Il fonctionne comme une résistance à la pression, ce qui signifie qu'il existe plus d'une « bonne » combinaison de diamètre et de longueur. Néanmoins, j'ai trouvé que quelque chose de très proche de l'optimum est obtenu avec un diamètre de tuyau de sortie compris entre 0,58 et 0,62 fois le diamètre du tuyau d'entrée. Ainsi, si le diamètre du tuyau d'entrée est de 40 mm, le diamètre de sortie doit être compris entre 23,2 et 24,8 mm. Les résonateurs ayant des volumes plus grands ou plus petits que ceux développés comme indiqué ici peuvent nécessiter des diamètres de tuyau de sortie proportionnellement plus petits et plus grands, les règles inverses s'appliquent.

Et la longueur du tuyau de sortie ? Faites-le de 12 diamètres et oubliez toutes les coupes que d'autres (et moi-même) avons suggérées dans le passé. Vous ne vous en approchez pas sans un dynamomètre pour guider vos efforts.

Un mot d'avertissement : ne faites pas le tuyau de sortie trop petit en diamètre. Dans le stock de tubes disponible, sélectionnez toujours la taille supérieure à ce que ma « règle » prédit. Mes tests au dynamomètre ont montré que la température du moteur, en particulier celle du piston, augmente très fortement lorsque le diamètre de sortie est restreint même légèrement au-delà de l'optimum de puissance. A l'inverse, une tubulure de sortie un peu trop large a un effet tout

aussi léger sur la baisse de puissance, mais permet au moteur de tourner à des températures beaucoup plus confortables. Incidemment, un cône convergent trop raide aura à peu près le même effet. Je déconseille les angles supérieurs à 30 degrés (inclus) pour les cônes convergents.

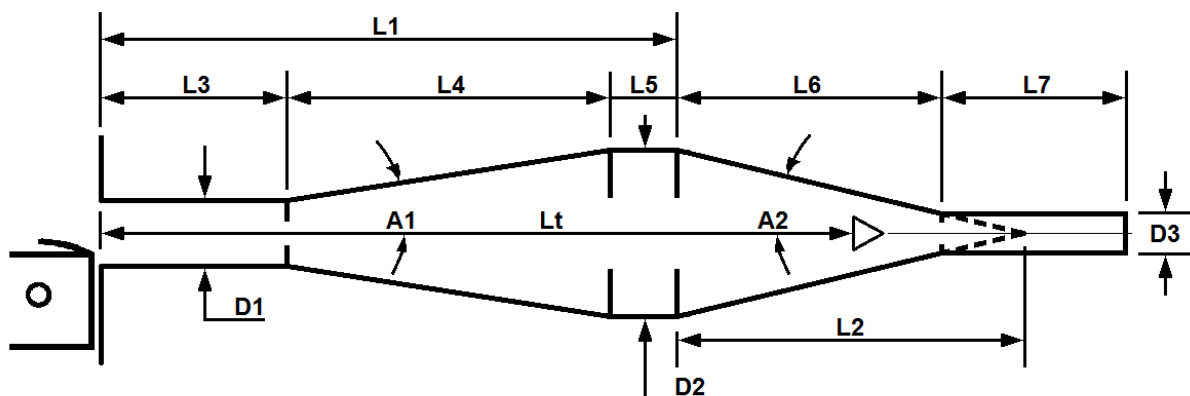
Je déconseille également la pratique très courante d'aplatir, d'encocher et de bosseler les résonateurs pour qu'elles s'adaptent plus facilement à la moto. Tout écart par rapport à une section ronde compromet l'efficacité du résonateur, car les ondes sonores ressentent chaque changement de section.

D'autre part, le système d'échappement peut être bouclé et tordu dans n'importe quel sens sans aucun inconvénient. En revanche vous devez faire attention à fournir un passage en douceur dans le tuyau d'entrée et à l'entrée du divergent : la vitesse du gaz dans cette partie du système est très élevée, et bien que les ondes sonores soient indifférentes aux virages brusques, le débit de gaz, lui, ne l'est pas.

Les résonateurs construits selon les principes de conception fournis ici ne représenteront pas l'optimum. Suivre les formules vous en rapprochera, mais il y aura toujours une marge d'amélioration que le dynamomètre vous révélera.

Pourtant, d'expérience, je sais que les résonateurs construits juste avec ces formules sont assez bons, tels quels ; Meilleurs, en fait, que la plupart de ceux vendus en remplacement des silencieux d'origine.

Évidemment, je ne m'attends pas à ce que vous preniez ma parole non fondée comme preuve de tout ce que j'ai dit. Pour prouver ce point, je construis un résonateur, à la formule, pour un essai sur un Yamaha DT-1E standard. Les gens de Webco me permettent d'utiliser leur excellent dynamomètre, qui permettra de prendre des courbes de puissance pour le moteur Yamaha avec son silencieux d'origine, puis avec mon résonateur. Vous serez informé des résultats de ces tests, ainsi que du type de puissance que Yamaha développe avec un échantillon de résonateurs conçues pour lui par d'autres. Enfin, nous étudierons les effets des changements dans la synchronisation des orifices, le taux de compression et la carburation, et couronnerons le tout avec quelques informations sur les silencieux pour réduire le bruit des résonateurs. Nous pouvons vivre avec l'encombrement des résonateurs, mais si nous ne réduisons pas les émissions sonores, tout le reste n'aura plus guère d'importance.



- E0 angle d'ouverture de la lumière d'échappement (en degrés)
 Vs vitesse moyenne de l'onde sonore : 518 m/s
 N vitesse de rotation du moteur en tr/min
 D1 diamètre dont la section est égale à celle de la lumière d'échappement plus 15 à 20%
 D2 = D1 x 2,5
 D3 = D1 x (0,58 à 0,62)
 A1 Demi-angle du divergent (la moitié de 6 à 9 degrés)
 A2 = A1 x (2 environ : Voir texte)
 Lt Longueur de référence (en m) $Lt = (E0 \times Vs) / (12 \times N)$
 L2 = D2 / (2 x tan(A2))
 L1 = Lt - (L2 / 2)
 L3 = D1 x (6 à 12 : Voir texte)
 L4 = (D2 - D1) / (2 x tan(A1))
 L5 = L1 - (L3 - L4)
 L6 = (D2 - D3) / (2 x tan(A2))
 L7 = D3 x 12

Formules de base du résonateur