

Les résonateurs des moteurs à deux temps aéronautiques.

Par Philippe Dejean – Janvier 2023

Même si je crois avoir une idée de leur fonctionnement, je suis loin d'avoir la connaissance des résonateurs qu'avait Gordon Jennings il y a cinquante ans. Je ne dispose pas non plus des logiciels qui permettent aujourd'hui aux professionnels de faire au moins aussi bien qu'à l'époque de l'article, en beaucoup moins de temps.

Pourtant, au vu de son article, qui était clairement destiné aux motos tout-terrain, il m'est venu quelques idées en rapport de ce qui m'intéresse : les moteurs à deux temps à usage aéronautique. Car si les moteurs à quatre temps ont une place très majoritaire en aviation légère, par le passé, les ULM étaient plutôt propulsés par des moteurs à deux temps. Les ULM 3 axes biplaces plus récents sont maintenant propulsés par des moteurs à quatre temps, mais les moteurs à deux temps ont conservé leur place pour les autres ULM.

Les deux temps en aéronautique

L'inconvénient principal du moteur à deux temps, par rapport à celui à quatre temps, est son rendement médiocre : Le moteur à deux temps consomme environ 400 g/kWh d'essence alors que le moteur à quatre temps se contente d'environ 300 g/kWh.

En revanche, le moteur à deux temps est relativement meilleur marché et surtout, avantage notable en aéronautique, léger : La puissance massique d'un groupe motopropulseur (moteur plus hélice) avec un moteur à deux temps peut dépasser les 1350 W/kg (Simonini 250 réducté avec hélice E-Props), alors que même avec un moteur à 4 temps moderne, (Rotax 912iS avec hélice E-Props) la puissance massique du GMP reste inférieure à 1000 W/kg, et tombe à beaucoup moins pour la plupart des moteurs aéronautiques en prise directe datant du milieu du vingtième siècle. De plus, la puissance massique des moteurs à quatre-temps

disponibles est d'autant plus faible que la puissance du moteur limitée...

Ce n'est donc pas étonnant que le moteur à deux temps se maintienne face au moteur à quatre temps partout où :

- Les puissances nécessaires sont relativement suffisamment faibles pour que le surcoût de consommation de carburant reste acceptable.
- Sa puissance massique permet de notables réductions de masse de l'appareil entier, et par conséquent une réduction de la puissance nécessaire.
- La durée des missions reste suffisamment courte pour que le surcroît de masse de carburant ne rende pas excessive la masse au décollage.

Si une moto tout-terrain a besoin d'un moteur « coupleux », c'est-à-dire dont la courbe de couple à bas-régime est suffisamment bombée pour que la moto ne cale pas dans la boue ou le sable, ce n'est pas le cas en usage aéronautique où le moteur entraîne une hélice. En effet, la courbe de couple est une parabole, autrement dit, le couple est proportionnel au carré de la vitesse de rotation, et par conséquent la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse de rotation. Autrement dit, un avion ou un paramoteur peuvent se contenter d'un moteur qui serait trop « pointu » pour un véhicule terrestre.

Le volume d'un capot moteur est limité, et il n'est pas beaucoup plus aisé de loger un résonateur sur une machine volante que sur une moto. Cependant, le problème est plus lié à la gestion de la chaleur et de la trainée. Sur le MC15 Cri-Cri, les résonateurs sont placés à l'extérieur, de part et d'autre du fuselage, dans le flux d'air des moteurs. Ils sont également peints en noir pour rayonner un maximum de chaleur, en plus du refroidissement par convection dans le flux accéléré par les hélices. En effet plus la température des gaz est faible plus la vitesse du son diminue et plus le résonateur peut être court, et donc léger.

Cet objectif de masse minimale, qui est beaucoup plus important pour une machine volante que pour un véhicule terrestre a donc été traité sur le MC15 Cri-Cri. On ne peut pas en dire autant concernant le bruit qui reste acceptable du sol, mais qui est très important pour le pilote dont la tête est entre les échappements des deux moteurs. Je reviendrai ultérieurement sur ce point.

Au vu de ces contraintes particulières, voici mes réflexions concernant les informations de l'article de Gordon Jennings.

Angle du divergent du résonateur. Gordon Jennings écrit :

« 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. »

Compte tenu de l'utilisation avec une hélice, où la puissance est primordiale et le couple à bas régime secondaire, l'angle à retenir a priori est donc 9 degrés.

Angle du convergent du résonateur, Gordon Jennings écrit :

« 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. »

En se basant sur un angle de divergent de 9 degrés, on devrait donc choisir un angle de 18 degrés pour le convergent.

Comme l'angle du convergent conditionne plus les performances au-delà du pic de puissance qu'en deçà, il est tentant d'utiliser un angle de convergent plus important pour limiter le risque de dépasser la ligne rouge en piquer. Mais il est peut-être plus judicieux de réduire légèrement la vitesse de rotation du pic de puissance pour faciliter la prise de régime au décollage. Ceci augmente donc en rapport la longueur de référence mais permet de conserver garder un angle de convergent qui ne risque pas d'augmenter dangereusement la température de la culasse.

Place du tube d'échappement et bruit, Gordon Jennings écrit :

« Après avoir construit un résonateur avec un montage par pince pour son tuyau de sortie, nous avons pu effectuer un test approprié de ma théorie selon laquelle le tuyau de sortie d'un résonateur devrait être situé bien en avant de sa position conventionnelle. Il y a quelques années, j'ai essayé un ensemble de résonateurs sur un Bridgestone de course avec des tuyaux de sortie déplacés vers l'avant, à l'intérieur des cônes de chicane. L'idée était de placer l'extrémité avant du tuyau de sortie devant le convergent, et ainsi de refuser à l'onde sonore une évacuation facile à l'arrière du cône convergent, dans l'espoir d'obtenir une réflexion plus forte et donc d'augmenter la puissance développée. Faute de dynamomètre, je n'ai pas été en mesure de déterminer s'il y avait, en fait, une augmentation de puissance attribuable à ce changement. Néanmoins, j'ai noté qu'il y avait beaucoup moins de bruit avec le tuyau d'échappement inséré à l'intérieur » ...

Compte tenu des vitesses et altitudes faibles d'évolution de certains moteurs à deux temps aéronautiques, comme ceux des paramoteurs, la réduction du bruit est un sujet d'importance.

Si les observations de Gordon Jennings sont indéniables, je ne partage pas son interprétation du phénomène, qui me semble biaisée par sa volonté initiale de maximiser l'énergie de l'onde sonore renvoyée par le convergent, et non de minimiser l'énergie de l'onde sonore qui s'échappe par le tuyau d'échappement. Ces deux considérations peuvent sembler très proches, voire équivalentes, mais elles se traduisent différemment en pratique.

Si on veut limiter le bruit émis par le tuyau d'échappement qui conduit les gaz vers l'extérieur, il faut que son extrémité intérieure soit placée là où les ondes sonores ont la plus faible amplitude. On peut considérer que les ondes sonores dans le résonateur sont des ondes planes, qui se déplacent selon l'axe longitudinal du résonateur. Leur énergie est quasi-constante, et donc leur énergie par centimètre carré de surface est donc inversement proportionnelle à la section du résonateur à l'endroit considéré.

Pour que le tuyau d'échappement ne fasse sortir qu'un minimum d'énergie sonore, il faut que son extrémité interne se trouve dans la zone de plus grande section du résonateur, c'est-à-dire entre le divergent et le convergent.

Quelle proportion de l'énergie de l'onde entre alors dans le tuyau d'échappement ? Cette proportion est alors le rapport inverse des sections. Le diamètre du résonateur et du tuyau d'échappement étant respectivement de 2,5 fois et de 0,6 fois celui de la pipe venant du moteur, le rapport de section est de :

$$\left(\frac{0,6}{2,5}\right)^2 = 5,76\%$$

La puissance sonore entrant dans le tuyau d'échappement est donc seulement 5,76% de celle qui est présente dans le résonateur. Si on convertit cette proportion en décibels, on obtient :

$$10 \times \text{Log} \left(\left(\frac{0,6}{2,5} \right)^2 \right) \\ = -12,4 \text{ dB}$$

(Je rappelle pour ceux qui seraient surpris par le facteur 10 que les décibels sont définis comme 20 fois le logarithme de la pression acoustique, et 10 fois le logarithme de la puissance acoustique, qui nous intéresse ici puisqu'on considère l'énergie...)

Gordon Jennings continue :

« Quoi qu'il en soit, j'avais maintenant les moyens de tester la théorie et c'est ce que nous avons fait, prendre des mesures de puissance avec le tuyau de sortie s'étendant à l'arrière du résonateur, poussé tout en avant, et à des points intermédiaires. Et il y avait en effet une légère augmentation de puissance à avoir avec le tuyau de sortie en position complètement vers l'avant. Une très, très légère augmentation, et surtout à bas régime. Vous devez dire qu'il n'y a pas eu d'amélioration valable par rapport à l'emplacement du tuyau de sortie conventionnel en termes de puissance. »

Il ressort de que le gain de puissance espéré par Gordon Jennings en conservant plus d'énergie dans le résonateur n'était pas au rendez-vous. Je ne sais pas comment interpréter ce fait, mais il me semble que d'enfoncer le tuyau d'échappement sur toute la longueur du convergent en modifie la géométrie comme indiqué dans la figure suivante. Quand le tube d'échappement est placé au bout du cône convergent, Gordon Jennings préconise de prolonger géométriquement le cône pour en calculer la demi-longueur qui est prise en compte pour longueur de référence du résonateur. A mon sens, cela revient à prendre en compte la variation de section du cône convergent. Quand le tube d'échappement est enfoncé jusqu'à la grande section du cône convergent, il en résulte un raccourcissement de fait du cône convergent.

Pour illustrer ce fait prenons un convergent dont le grand diamètre $D_2 = 100 \text{ mm}$ et donc celui du tuyau

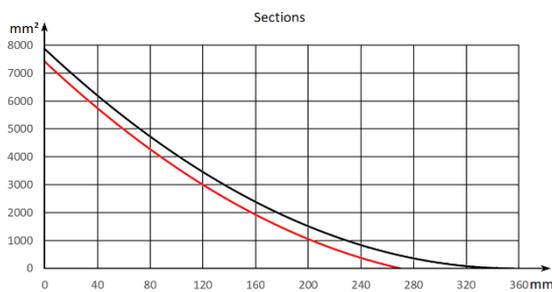
d'échappement $D_3 = 24$ mm. L'angle est fixé à 16 degrés. Selon les formules,

$$L_2 = \frac{D_2}{2 \times \tan\left(\frac{16 \text{ degrés}}{2}\right)} = 356 \text{ mm}$$

Et

$$L_6 = \frac{D_2 - D_3}{2 \times \tan\left(\frac{16 \text{ degrés}}{2}\right)} = 270 \text{ mm}$$

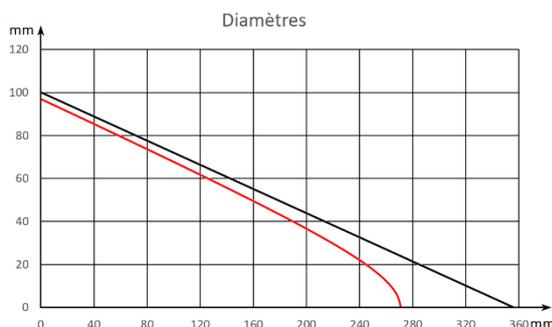
Repousser le tuyau d'échappement dans le convergent en modifie la géométrie. En effet, considérons d'abord la section du cône le long de l'axe du résonateur :



La courbe noire est la section du cône réel fictivement prolongé dans le tuyau d'échappement comme prescrit par Gordon Jennings. C'est naturellement une parabole qui atteint zéro à l'extrémité pointue du cône, à $L_2 = 356$ mm.

La courbe rouge est celle de la section du cône, moins celle du tube qui le traverse. C'est donc la même parabole, mais décalée vers le bas. Elle atteint son zéro à $L_6 = 270$ mm.

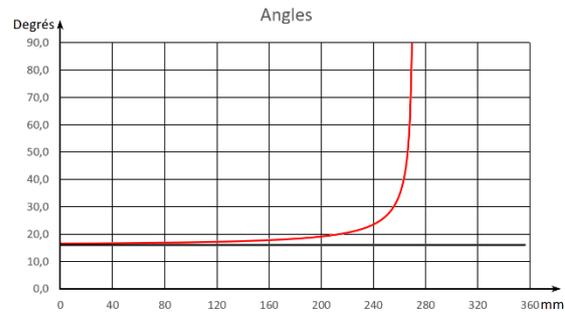
Considérons maintenant le diamètre des cônes de révolution qui auraient les mêmes sections :



La courbe noire est évidemment le profil du cône réel fictivement prolongé dans le tuyau d'échappement comme prescrit par Gordon Jennings.

La courbe rouge n'est pas une droite, mais une sorte de cône qui se ferme de plus en plus rapidement pour finir à $L_6 = 270$ mm.

Cette fermeture est d'autant plus nette quand on considère les angles en fonction de l'abscisse :



La courbe noire correspond logiquement à l'angle de construction du convergent, 16 degrés.

La courbe rouge reste très loin proche de la noire : l'angle ne dépasse les 20 degrés qu'au-delà de 200 mm, alors que la demi-longueur du cône n'est que de 178 mm.

A mon sens, c'est la raison principale pour laquelle les performances du moteur sont très proches dans les deux cas, malgré la notable différence de longueur apparente des deux cônes.

La suite du texte de Gordon Jennings est une confirmation du calcul théorique :

« ...mais le changement fait chuter la pression acoustique d'environ 115 dB(A) à 100 dB(A), sans aucune autre forme d'insonorisation. Et cette seule raison est suffisante pour déplacer le point de sortie »

Aux erreurs de lecture d'un sonomètre des années 1970 dans un atelier de mécanique, la chute du niveau de bruit mesurée, de 115 dB(A) à 100 dB(A), correspond bien aux -12,4 dB théoriques (et donc sans courbe de correction en fréquence).

Un tel gain obtenu « sans aucune autre forme d'insonorisation. » et donc sans augmentation de la contrepression ni de dégradation du devis de masse est précieux. C'est pourquoi il est étonnant que ce montage ne soit pas employé et

qu'on trouve régulièrement le montage où un silencieux est ajouté au bout d'un résonateur dont le tuyau d'échappement est placé au petit bout du convergent :



On peut imaginer qu'on pourrait faire un montage au niveau de bruit satisfaisant pour moins lourd et plus compact, ou bien un système plus silencieux pour le même encombrement et la même masse.

Enfin, Gordon Jennings fait un conseil de mise en œuvre de son montage :

« Il suffit de ne pas faire de demi-mesures à cet égard : nous avons constaté, en déplaçant le tuyau de sortie d'avant en arrière, qu'à moins que l'extrémité avant du tuyau ne soit déplacée vers le haut devant le cône convergent, il devrait être laissé en arrière à sa pointe. La puissance chute assez nettement lorsque le tuyau de sortie est poussé vers le haut dans le cône convergent, atteint un minimum à peu près à mi-chemin, puis augmente lentement pour retrouver la valeur maximale lorsque l'extrémité avant du tuyau est finalement amenée devant le convergent. »

L'explication de ce phénomène est claire. Comme dans une flûte, il suffit d'un petit trou pour changer la note jouée, la mise à la pression atmosphérique que constitue le tuyau d'échappement peut modifier le régime des ondes dans le convergent, et nuire à son efficacité : La position de cette mise à l'air libre doit donc être hors du cône, à un bout ou à l'autre.

Pour aller plus loin

Ce qui compte, pour minimiser le bruit sans perturber le fonctionnement du résonateur, c'est d'évacuer les gaz d'échappement dans la zone de plus grande section du résonateur.

Il est notable que c'est aussi la région où, indépendamment des ondes sonores, les gaz d'échappement sont les plus lents. Comme la vitesse moyenne des gaz est inversement proportionnelle à la section du tuyau qui les conduit, on peut dire que la vitesse moyenne des gaz est 6,25 fois plus lente dans la zone de plus grande section du résonateur que dans la pipe d'échappement près du moteur. Cette réduction de vitesse se traduit par une diminution de la pression dynamique et une augmentation correspondante de la pression statique : la zone de plus grande section du résonateur est en surpression.

Ce phénomène est mis à profit sur le MC15 Cri-Cri : un petit tuyau raccordé à cette zone de surpression des résonateurs sert à pressuriser le réservoir de carburant. (Particulièrement léger et fiable, comme pompe à carburant !)

Positionner la sortie des gaz d'échappement dans la zone de surpression a aussi l'avantage de permettre l'installation d'un silencieux qui a une plus forte perte de charge, sans nuire à la puissance du moteur.

Bien sûr, le plus simple, consisterait à pratiquer une sortie en T, perpendiculaire et radiale dans la région la plus large du résonateur. Mais c'est à proscrire car ça risquerait de perturber les ondes sonores. Ce qui est primordial, de limiter la section de la sortie des gaz, pour ne récupérer qu'un minimum de l'énergie des ondes, tout en conservant la symétrie de révolution du système.

Enfoncer le tuyau d'échappement au centre du convergent comme le fait Gordon Jennings répond évidemment à cette exigence, mais il y a une autre solution qui consiste à pratiquer une mince sortie annulaire autour d'un convergent borgne de section équivalente à celle calculée.

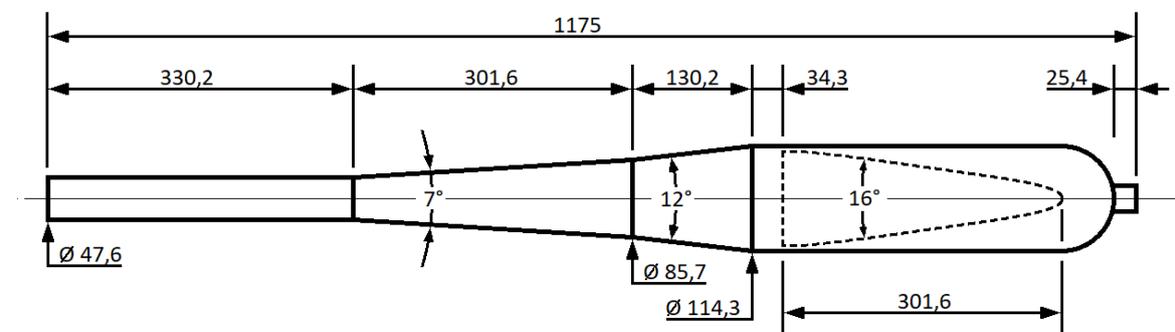
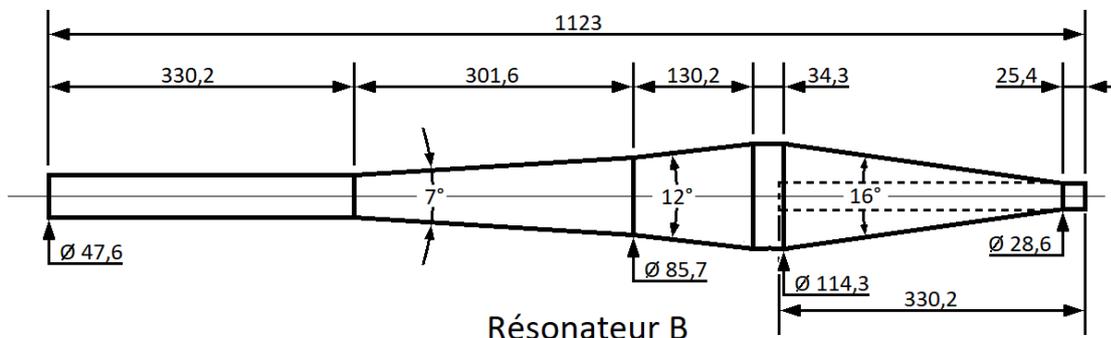
L'espace autour du convergent est alors utilisé pour construire une chambre de tranquillisation cylindrique terminée par un fond hémisphérique qui constitue donc un second divergent autour du convergent comme indiqué dans la figure suivante.

La petite partie des ondes sonores qui passe par cette sortie annulaire traverse ce second divergent qui diminue encore leur amplitude avant de les faire rebondir dans la chambre de tranquillisation, qui n'est mise à l'air libre que par un tuyau qui ne représente qu'une petite fraction de sa surface.

D'un tel système, on peut espérer une atténuation du bruit d'environ 25 dB par rapport à un résonateur classique avec le tuyau d'échappement raccordé au petit bout du convergent. Le silencieux supplémentaire qui y est généralement ajouté, comme sur la photo ci-dessus (cylindre bleu) ne serait plus utile.

Cette proposition reste à adapter à un moteur et à éprouver sur un banc

Philippe Dejean



Résonateur "équivalent B" avec sortie annulaire et chambre de tranquillisation