

## Quelles matières utiliser pour les tuyaux d'un moteur pop-pop?

Quand un nouveau moteur ne marche pas comme il l'espérait, son constructeur suspecte une erreur de conception ou de matière. Etant donné que les tuyaux de mes premiers moteurs étaient en plastique (pour voir au travers), je suis convaincu que de nombreuses matières peuvent convenir. Evidemment, le choix pourra avoir une incidence sur la conception et sur la puissance de chauffe.

Juste pour faire travailler mes méninges (maintenant que je suis en retraite mon médecin me l'a prescrit), j'ai fait quelques calculs concernant la dissipation calorifique d'un tuyau. Les hypothèses sont les suivantes:

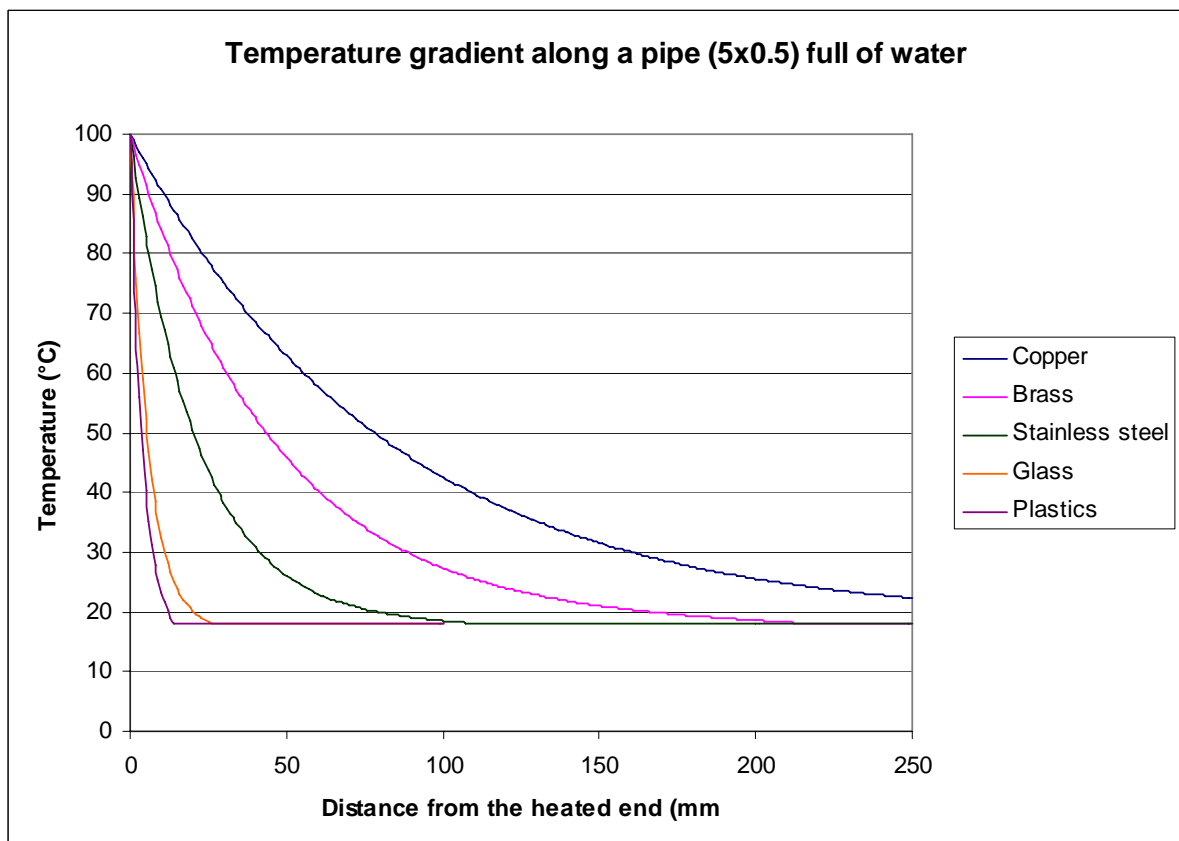
- Tuyau plein d'eau (ce qui est généralement le cas quand un moteur pop-pop est prêt à démarrer)
- Tuyau chauffé à son extrémité haute à 100°C (qui est la température d'ébullition de l'eau à la pression atmosphérique normale)
- Tuyau placé dans un air à 18°C (pour prendre une valeur plausible).

Ensuite j'ai calculé la puissance de chauffe nécessaire pour maintenir ces 100°C pour différents matériaux et différentes dimensions. Ex :

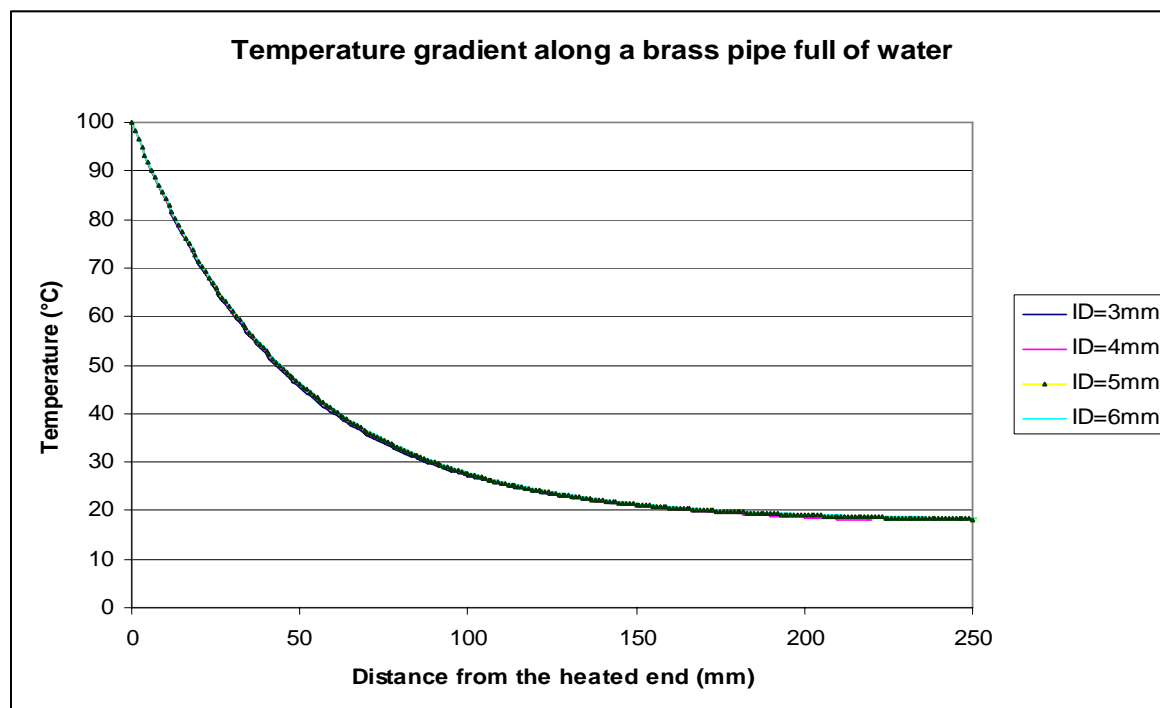
Matière	cuivre	laiton	inox	verre	plastique
Tuyau de 10x1 (diamètre intérieur 8mm) L=350mm	7.5W	4.2W	2W	0.6W	0.4
Tuyau de 5x1 (diamètre intérieur 3mm) L=250mm	2.7W	1.7W	0.7W	0.2W	0.14W

Toutes ces valeurs peuvent sembler très faibles, mais il ne s'agit pas de la puissance de la bougie. C'est seulement la puissance transmise au tuyau et à l'eau qu'il contient afin de maintenir 100°C. Ni plus, ni moins. Ceci signifie qu'une telle petite puissance suffit (avec du temps) pour atteindre la température d'ébullition (100°C) à l'extrémité haute.

Puis, j'ai étudié la température tout le long du tuyau pour différentes matières. Par exemple, pour un tuyau de 5x0,5 (diamètre interne 4mm) le résultat est représenté sur le graphe suivant.



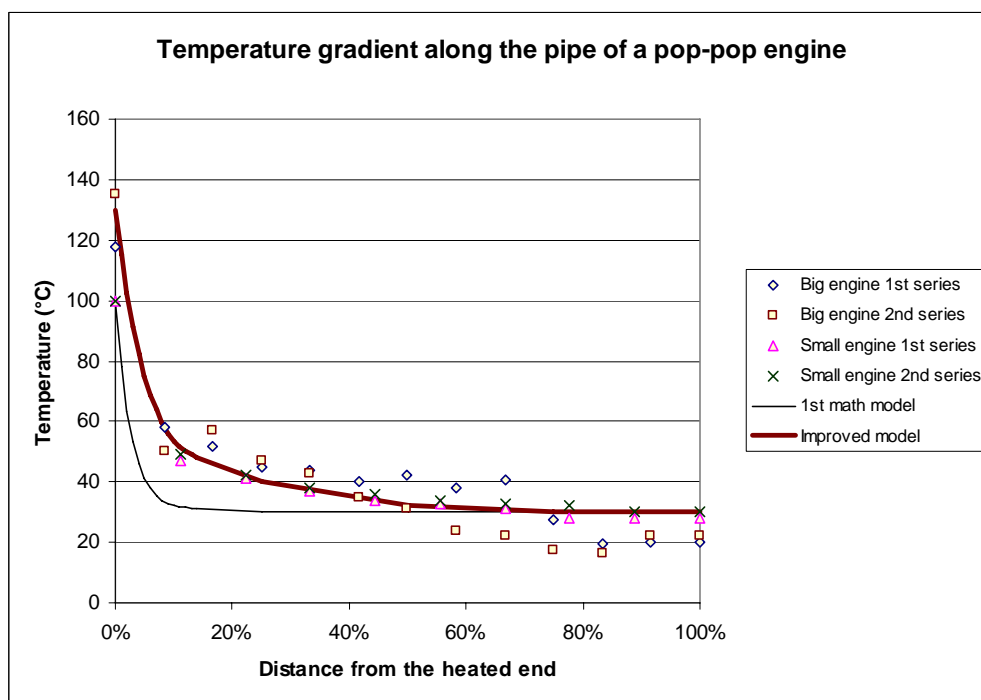
Ensuite, pour une matière donnée j'ai étudié le gradient de température pour différents diamètres. Un exemple est donné ci-dessous pour des tuyaux en laiton d'épaisseur 0,5mm.



On peut voir que les 4 courbes sont quasiment les mêmes. Ceci est essentiellement dû à la mauvaise conductibilité thermique de l'eau par rapport à celle du laiton (0,556W/mK pour l'eau et 120W/mK pour le laiton).

Tout ce que nous avons vu précédemment correspond à des conditions statiques. Quand un moteur pop-pop fonctionne le comportement de l'eau n'est plus le même. Comme ça secoue la conductivité

apparente de l'eau est bien plus grande. Pour le gros moteur, au lieu de la courbe "statique" (celle en noir) la courbe réelle est à peu près celle qui est représentée en marron. Tous les points reportés sur ce graphe ont été mesurés sur deux moteurs différents. Je n'en sais pas assez sur ce qui se passe à l'intérieur d'un moteur pour



calculer la courbe avec précision. Cependant, j'ai obtenu cette courbe marron facilement en remplaçant le coefficient de conductivité de l'eau au repos (0,556W/mK) par un coefficient plus élevé (33W/mK) pour prendre en compte la convection. Et le résultat a bonne allure.

Tout ce qui a été calculé correspond à une petite puissance de chauffe. Très petite comparée à la puissance de chauffe réelle car dans ce modèle il n'a pas été tenu compte d'échanges thermiques avec l'eau du bac. Evidemment, c'est une erreur. Maintenant, examinons ce qui se passe à l'extrémité inférieure du tuyau.

Pour "coller" à la réalité nous allons utiliser les caractéristiques d'un de mes moteurs. Moteur avec un seul tuyau en laiton de 10x1 (diamètre interne 8mm). Il délivre sa meilleure poussée avec une course de 180mm à une fréquence de 3,2Hz. Dans ces conditions sa puissance de chauffe utile est 30,5W (mesurée grâce à une chauffe électrique).

De ces données nous pouvons déduire la cylindrée ( $9\text{cm}^3$ ) et le débit moyen ( $29\text{cm}^3/\text{s}$ ). A ce débit, la température moyenne de l'eau qui sort est seulement  $0,25^\circ\text{C}$  supérieure à celle de l'eau du bac [ $30,5/(4,18 \times 19) = 0,25$ ]. Ceci explique pourquoi la partie inférieure d'un moteur pop-pop est toujours froide quand il fonctionne.

Le modèle mathématique et le résultat des mesures permettent tous les deux de dire que la température de la partie basse du tuyau est faible. On l'a observé sur plusieurs douzaines de moteurs.

### **Conclusion:**

**La matière constitutive d'un tuyau de moteur pop-pop (au moins pour les 2/3 inférieurs) a une influence négligeable sur les performances de ce moteur.**

Par exemple, d'un côté Guus a construit en cuivre des moteurs à spires performants. De l'autre côté, Slater a utilisé des pailles de bistrot en plastique pour ses moteurs performants. Entre les deux nous connaissons tous de bons exemples de moteurs pop-pop avec des tuyaux en acier, aluminium, verre, laiton...

### **Attention:**

L'affirmation que la matière n'est pas un facteur important concerne seulement la conductivité thermique. Cependant, l'état de la surface interne du tuyau peut jouer un rôle. Quand un moteur délivre une très faible poussée la cause (parmi bien d'autres) peut être une mauvaise adhérence du film d'eau et consécutivement un mauvais échange thermique à la partie supérieure du tuyau.

Un moyen d'améliorer cela est de nettoyer la surface. Guus y a travaillé avec ses moteurs en verre. Il a utilisé du verre traité à l'acide fluorhydrique (dangereux !) afin d'obtenir une bonne adhérence de l'eau.

Le professeur Le Bot a travaillé dans une autre direction intéressante. Il a modifié la tension superficielle de l'eau en y ajoutant un agent mouillant. Et Christophe a fait marcher avec succès son moteur en verre en y mettant de l'alcool au lieu de l'eau.