

Comme promis on rentre un peu dans le détail, mais pas d'inquiétudes on s'en tient aux fondamentaux et aux 4 opérations. L'objectif de ce court document n'est clairement pas de fournir une méthode de calcul mais de comprendre ce qui passe et de mettre quelques chiffres en appui des allégations précédentes.

- Dans ces petites chaudières il n'y a pas de circulation forcée ni côté eau, ni côté fumées (tirage naturel)
- Les tubes étant relativement minces la formule qui sert de base à l'explication qui suit est simplifiée par rapport à celle exacte pour les tubes mais le raisonnement reste valable
- La notation 10^{-4} signifie que le nombre qui précède est divisé par 10 000 ;
ex : $515 \cdot 10^{-4} = 0,0515$

Comment ça se passe ?

La puissance échangée s'écrit sous la forme :

$$P = k \cdot S \cdot (T_c - T_f)$$

S est la surface d'échange considérée

T_f est la température froide (l'eau) ; en mode évaporation si la pression est constante alors la température est constante et on sait la mesurer.

T_c c'est la température des gaz, moins commode car elle varie depuis l'entrée jusqu'à la sortie

k est le coefficient d'échange global

Pour faire simple on l'exprime sous la forme :

$$k = 1 / (R_e + R_{ec} + R_t + R_{gc} + R_g) \text{ son unité est en } W / (m^2 \cdot ^\circ C)$$

R sont des résistances thermiques que l'on souhaite bien sûr les plus faibles possibles. Elles s'expriment en $(m^2 \cdot ^\circ C) / W$.

R_e = résistance de l'échange paroi extérieure du tube → eau

se calcule à partir d'un coefficient de convection *h*. On a $R_e = 1/h_e$

Pour de la convection libre sans ébullition pour de l'eau, *h_e* varie de 100 à 900

Pour de l'ébullition nucléée en circulation libre, *h_e* varie de 2500 à 10 000

R_{ec} = résistance d'encrassement côté eau

généralement non documentée. En milieu industriel il y a un traçage des températures et débits qui permet de contrôler l'évolution de l'efficacité de l'échangeur

R_t = résistance du tube. Elle s'exprime par $R_t = e / \text{conductivité}$ avec *e* = épaisseur

Conductivité cuivre : 390 W/(m.°C)

Conductivité acier doux : 45 W/(m.°C)

Conductivité acier inox : 25 W/(m.°C)

R_{gc} = résistance d'encrassement côté fumée

généralement non documenté. J'avais trouvé cette valeur pour encrassement normal avant maintenance : $R_{gc} = 20 \cdot 10^{-4}$ à $70 \cdot 10^{-4}$ pour les combustibles gazeux

R_g = résistance gaz → paroi intérieure du tube

se calcule à partir d'un coefficient de convection *h*. On a $R_g = 1/h_g$

circulation naturelle (vitesse faible) *h_g* : 5 à 25

circulation forcée (vitesse jusqu'à 30 m/s) *h_g* : 25 à 300

Petit exemple numérique pour fixer les idées

Re : ébullition nucléée bien régulière $h_e=5000$ donc $Re=1/5000=2 \cdot 10^{-4}$

Rec : tube parfaitement nettoyé $Rec=0$

Rt : tube cuivre d'épaisseur 2mm $R_t=0,002/390=0,051 \cdot 10^{-4}$

Rgc : tube déjà encrassé par de la suie $R_{gc}=20 \cdot 10^{-4}$

Rg : bon tirage naturel $R_g=1/20=0,05$

alignons notre brochette de résistances pour les comparer

Eau	Re	Rec	Rt	Rgc	Rg	Fumées
	$2 \cdot 10^{-4}$	0	$0,051 \cdot 10^{-4}$	$20 \cdot 10^{-4}$	$500 \cdot 10^{-4}$	

La somme des résistances est de $522 \cdot 10^{-4}$, le coefficient d'échange global sera de $k=1/(522 \cdot 10^{-4})$ soit 19,16

Pour $T_e=110^\circ\text{C}$ et $T_g=500^\circ\text{C}$ on échangera par m^2 de surface d'échange

$P=19,16 \cdot 1 \cdot (500-110)=7472 \text{ W}$.

Donc la petite chaudière de Jacques avec ses 1dm^2 de surface pourrait en théorie échanger 750W à supposer que la température moyenne des fumées soit de 500°C ce qui est peu probable.

Premières conclusions :

1. Ce n'est pas du côté de l'eau que va se trouver le problème d'échange mais du côté des gaz de combustion. L'évaporation est capable d'absorber une grande quantité de chaleur
2. La résistance thermique du métal du tube est négligeable
3. La résistance thermique des suies est très importante par rapport au reste. Un bon nettoyage doit en venir à bout
4. la résistance thermique convective d'échange des gaz est élevée et c'est ici que l'on pourrait faire des progrès, mais les contraintes propres au modélisme bloquent ces pistes d'amélioration

Nota : ne pas oublier dans le bilan final les échanges par rayonnement du brûleur vers le ciel de foyer

Tubes cuivre ou acier ?

Métal	Conductivité	épaisseur	$R=e/\text{conductivité}$
Cuivre	390	0,002	$0,051 \cdot 10^{-4}$
Acier doux	45	0,003	$0,67 \cdot 10^{-4}$
Acier inox	25	0,003	$1,2 \cdot 10^{-4}$

Si on compare la résistance thermique de l'acier doux par rapport aux autres résistances thermiques elle demeure très faible par rapport à celles qui nous préoccupent : encrassement et échange fumées-parois intérieures du tube.

Ce n'est pas la contrainte thermique qui va départager l'acier et le cuivre

Les avantages invoqués pour l'acier sont:

- prix de réalisation beaucoup plus faible que le cuivre (matériau et brasure à l'argent)
- caractéristiques mécaniques plus élevées
- grand choix de nuances
- poids moindre (acier : 7800 kg/m^3 cuivre 8800 kg/m^3)
- très bonne usinabilité de l'acier
- fabrication simplifiée de la chaudière

Isolation ou pas ?

Sur la paroi intérieure de la virole il n'y a pas d'ébullition et le coefficient h sera compris entre 100 et 900. Prenons $h=500$. $Re=1/500= 20 \cdot 10^{-4}$

Sur la paroi extérieure on est en convection naturelle sur une paroi verticale $h= 5$ à 17 . Prenons $h=11$ alors $R_{ext}=1/11= 909 \cdot 10^{-4}$

Prévoyons d'emmailloter la virole de 6mm de liège et de 1 mm de bois dur

Matériau	e	conductivité	R
Liège	0,006	0,04	$0,15 = 1500 \cdot 10^{-4}$
Bois sec	0,001	0,15	$66,7 \cdot 10^{-4}$
			$1567 \cdot 10^{-4}$

La plus grande partie de l'isolation est le fait du liège (les valeurs de conductivité données varient de 0,04 à 0,05)

Récapitulons

	R_{ext}	Isolant	Re	R
Sans isolant	$909 \cdot 10^{-4}$	0	$20 \cdot 10^{-4}$	$929 \cdot 10^{-4}$
Avec isolant	$909 \cdot 10^{-4}$	$1567 \cdot 10^{-4}$	$20 \cdot 10^{-4}$	$2496 \cdot 10^{-4}$

Le simple fait d'ajouter une plaque de liège va diminuer considérablement les pertes par la virole.