

Echanges convectifs autour d'un arbre aileté en rotation.

Pascale BOUVIER^{1,2*}, Souad HARMAND², Félix BARRE²

¹HEI, 13 rue de Toul-59046 Lille

²Laboratoire LME, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Le Mont HOUY, 59313 Valenciennes cedex 09

* (auteur correspondant : pascal.bouvier@hei.fr)

Résumé - Cette communication concerne l'étude expérimentale du refroidissement d'un arbre aileté en rotation, soumis à un courant d'air parallèle aux ailettes. Un dispositif expérimental basé sur l'utilisation de la thermographie infrarouge a été mis en place. Le coefficient d'échange convectif moyen au niveau des ailettes est identifié à partir de la méthode des moments associée à la résolution de l'équation de l'énergie dans les ailettes en régime transitoire. Les résultats présentés concernent l'influence de la hauteur des ailettes sur le coefficient d'échange dans des conditions d'écoulement variées caractérisées par les nombres de Reynolds axial et rotationnel.

Nomenclature

| | | | |
|-------------|--|-----------------------------|--|
| A_r | amplitude de déplacement relative | <i>Symboles grecs</i> | |
| c | capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$ | ε | émissivité |
| D | diamètre intérieur des ailettes, m | λ | conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| e | épaisseur de l'ailette, m | ρ | masse volumique, $kg.m^{-3}$ |
| F | facteur de forme | τ | transmittivité atmosphérique |
| H | hauteur de l'ailette, m | ν | viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$ |
| H' | hauteur de l'ailette adimensionnelle ($=H/D$) | σ | constante de Stefan-Boltzmann |
| h_m | coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$ | φ | densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$ |
| J | radiosité, $W.m^{-2}$ | ω | vitesse de rotation, $rad. s^{-1}$ |
| N | vitesse de rotation, $tr.min^{-1}$ | θ | $= (T-T_\infty)/(T_0-T_\infty)$ |
| Nu | nombre de Nusselt ($=h_m D/\lambda_a$) | <i>Indices et exposants</i> | |
| Re_U | nombre de Reynolds axial ($=UD/\nu_a$) | a | relatif à l'air |
| Re_ω | nombre de Reynolds rotationnel ($=\omega R_i D/\nu_a$) | al | relatif à l'aluminium |
| R_i | rayon intérieur des ailettes, m | atm | relatif à l'atmosphère |
| R_e | rayon extérieur des ailettes, m | ∞ | en dehors de la couche limite de l'ailette |
| S | surface, m^2 | $M3W$ | relatif à la face « West » de l'ailette |
| T | température, K | $M3E$ | relatif à la face « Est » de l'ailette |
| T_0 | température initiale, K | n | relatif à la peinture noire |
| t | temps, s | ray | de rayonnement |
| U | vitesse du courant d'air, $m.s^{-1}$ | | |

1. Introduction

L'étude du transfert de chaleur convectif autour d'un cylindre aileté en rotation soumis ou non à un courant d'air parallèle aux ailettes concerne plusieurs domaines allant du refroidissement des machines électriques aux freins caloducs [1,2]. En effet, les rotors des machines tournantes ainsi que la partie condenseur des freins caloducs sont souvent équipés d'ailettes. Afin de prédire correctement les températures de surface de ces appareils, il est nécessaire de connaître l'expression du coefficient d'échange dans des conditions de fonctionnement variées caractérisées par les nombres de Reynolds axial et rotationnel. En

effet, à la fin du freinage pour les freins caloducs ou bien dans les moteurs électriques fermés, les transferts de chaleur sont contrôlés par une convection forcée axiale-rotationnelle car les débits d'air axiaux sont très faibles. Pour optimiser le refroidissement de ces appareils, on peut étudier l'influence des paramètres géométriques tels que l'espacement entre ailettes, la hauteur et l'épaisseur des ailettes sur le coefficient d'échange. Une étude de B. Watel [3,4] a déjà été réalisée sur l'influence de l'espacement entre ailettes. Elle a permis de mettre en évidence plusieurs domaines d'influence pour $Re_U \geq 2550$ sur lesquels les échanges convectifs sont contrôlés soit par la convection forcée de courant d'air, soit par la convection forcée de rotation ou bien par les deux, selon la valeur du nombre de Reynolds rotationnel Re_ω , qui est compris entre 400 et 30000. Pour un arbre aileté équipé de cinq ailettes de 5 cm de hauteur, de 1 mm d'épaisseur et pour un espacement variant de 2 mm à 40 mm, cette étude a montré que la diminution de l'espacement entraînait la diminution du coefficient d'échange dans toutes les conditions de fonctionnement considérées. L'objectif de notre étude consiste à poursuivre le travail de B. Watel en étudiant l'influence de la hauteur des ailettes sur le coefficient d'échange. La plupart des études qui traitent de l'influence de la hauteur considèrent des arbres ailetés fixes soumis à un courant d'air parallèle aux ailettes [5,6,7,8]. L'originalité de notre travail est d'étudier aussi l'effet de la rotation et le couplage des deux. A partir de la température de surface de l'ailette mesurée par caméra infrarouge, nous déterminons le coefficient d'échange moyen à l'aide d'un modèle théorique obtenu à partir du bilan énergétique de l'ailette en régime transitoire et de la méthode des moments. L'arbre aileté considéré est équipé de 5 ailettes espacées de 6 mm, d'épaisseur 2 mm et de hauteurs variant entre 3 et 8 cm. Les valeurs du nombre de Reynolds rotationnel ont été fixées à 950, 4800 et 9500 et le nombre de Reynolds axial varie entre 2000 et 40000. Nous décrivons les résultats concernant 5 ailettes, la méthode qui nous a permis de mesurer la température de l'ailette centrale à l'aide du dispositif expérimental et la méthode des moments utilisée pour déterminer le coefficient d'échange moyen.

2. Le dispositif expérimental

Le coefficient d'échange qui caractérise le refroidissement à la surface de l'ailette est obtenu à partir de son profil de température instantané, mesuré au point M_{3W} (*figure 1*) situé à 1 cm de l'arbre. Le refroidissement des ailettes soumises à un courant d'air parallèle à leurs faces est dû aux transferts de chaleur convectif et radiatif. L'équation de l'énergie intégrée sur un secteur angulaire de l'ailette et un intervalle de temps caractéristique conduit à une expression du coefficient d'échange moyen de l'ailette. L'ailette de mesure est l'ailette centrale a_3 de l'arbre aileté constitué de 5 ailettes (*figure 1*). L'arbre aileté est placé dans une conduite de section rectangulaire (*figure 2*). Il est mis en rotation à l'aide d'un moteur relié à un variateur de fréquence permettant des vitesses de rotation allant de 0 à 3200 tr/min. Le courant d'air est délivré par un ventilateur situé à l'extrémité de la conduite (1). Un volet (13) permet de limiter le débit d'air et ainsi de faire varier la vitesse du courant d'air entre 0 et 14 m/s. Un convergent (4) sert à uniformiser l'écoulement et un tube de Pitot relié à un micromanomètre permet de mesurer la vitesse du courant d'air en amont du tube aileté. Le chauffage des ailettes se fait à l'aide d'un panneau radiant émettant dans les infrarouges courts (11). Il est placé horizontalement au-dessus des ailettes et permet de les chauffer uniformément jusqu'à des températures allant de 90 à 110°C. Après l'interruption du chauffage et la mise en route du courant d'air, le niveau thermique issu de l'ailette centrale et de son environnement au cours du refroidissement est mesuré à l'aide d'une caméra matricielle (CEDIP modèle *Jade III MW*). La caméra est placée de manière à mesurer la température sur le rayon de l'ailette centrale à travers des petites fentes pratiquées dans la veine d'essai f_{pg} et f_{pd} ainsi que dans les ailettes a_1 et a_2 (f_1 et f_2) placées devant l'ailette a_3

(figure 1). La fenêtre visée par la caméra possède une hauteur de 64 pixels et une largeur de 8 pixels pour permettre une fréquence d'acquisition allant jusqu'à 3000 Hz. Les mesures ont été effectuées à 1000 Hz et 3000 Hz suivant les vitesses de rotation fixées. Les mesures sont effectuées à ces fréquences d'acquisition et le niveau thermique correspondant à l'ailette centrale peut être repéré à l'aide de scotchs aluminium disposés de part et d'autre de la fente de l'ailette a_1 . Un programme de traitement permet ensuite d'extraire les niveaux thermiques relatifs à l'ailette a_3 . Dix thermocouples de 80 μm de type K sont reliés à une centrale d'acquisition (figure 1). Ils permettent de mesurer la température des parois de la veine et de l'air en amont du tube aileté (T_∞). Ces températures sont utilisées pour déterminer les radiosités des parois qui interviennent dans la détermination de la température de l'ailette (T_{M3W}).

3. Détermination de la température de l'ailette a_3

3.1. Niveau thermique incident et radiosités des parois

Pour pouvoir imposer un courant d'air parallèle aux faces des ailettes, il est nécessaire de réaliser une veine. Au niveau de l'arbre aileté, elle a été construite en aluminium. Les surfaces intérieures ont été dépolies de manière à rendre diffuse leur réflexion. Le signal reçu par le détecteur de la caméra (J_{inc}) est constitué du rayonnement issu de la face « West » de l'ailette centrale (a_{3W}) atténué par l'atmosphère. On peut l'exprimer à l'aide de l'équation 1 :

$$J_{inc} = \tau J_{M3W} + (1 - \tau) \sigma T_{atm}^4 \quad (1)$$

La radiosité de la face a_{3W} dépend des radiosités des surfaces intérieures des parois de la veine en aluminium dépoli ainsi que toutes les surfaces de l'arbre aileté qui ont été peintes en noir. Cela permet de considérer que toutes les surfaces de l'arbre aileté sont à la même température T_{M3W} . La radiosité de la face « West » de l'ailette s'exprime comme suit :

$$J_{M3W} = \varepsilon_n \sigma T_{M3W}^4 + (1 - \varepsilon_n) \sum_i F_{S_i - a_{3W}} S_i \quad (2)$$

A partir des équations (1) et (2), un programme de calcul permet de déterminer la température réelle de l'ailette T_{M3W} .

3.2. Détermination du coefficient d'échange

3.2.1. Modèle théorique

En considérant que la distribution de température possède une symétrie de révolution, que la variation de température suivant le rayon de l'ailette est faible [1] et que l'ailette constitue un milieu thermiquement mince. L'intégration de l'équation différentielle traduisant le bilan énergétique de l'ailette en régime transitoire sur un secteur angulaire conduit à l'expression suivante :

$$\rho_{al} c_{al} \left(\frac{\partial T_3}{\partial t} \right)_{M3W} e = -2h_m (T_{M3W} - T_\infty) - \varphi_{ray} \quad (3)$$

où T_3 est la température de l'ailette. La densité de flux de rayonnement possède l'expression suivante :

$$\varphi_{ray} = \left(\frac{\varepsilon_n}{1 - \varepsilon_n} \right) (2\sigma T_{M3W}^4 - J_{M3W} - J_{M3E}) \quad (4)$$

où J_{M3E} est la radiosité de la face « Est » de l'ailette, face arrière de l'ailette a_3 (figure 1). Elle s'exprime comme suit :

$$J_{M3E} = \varepsilon_n \sigma T_{M3W}^4 + (1 - \varepsilon_n) \sum_i F_{S_i - a_{3E}} S_i \quad (5)$$

En lissant la densité de flux de rayonnement par un polynôme de degré 5, on peut résoudre analytiquement cette équation. On obtient l'expression suivante pour la température :

$$T_3(t) = T_\infty + (T_0 - T_\infty - a'_0) e^{\left(\frac{-2h_m t}{\rho_{al} c_{al} \varepsilon}\right)} + \sum_{i=0}^5 a'_i t^i \quad (6)$$

où les a'_i s'expriment en fonction du coefficient de convection h_m et des coefficients du polynôme de degré 5 [4].

3.2.2. Méthode des moments

A partir de la température adimensionnelle expérimentale $\theta_{M3W}(t)$, on définit le moment expérimental à l'aide de l'expression suivante :

$$m_{\text{exp}} = \int_0^{t_f} \theta_{M3W}(t) dt \quad (7)$$

où t_f est un temps caractéristique du refroidissement déterminé graphiquement. A partir de la température théorique (équation 4) adimensionnalisée ($\theta_3(t)$), on définit le moment théorique comme suit :

$$m_{\text{th}} = \int_0^{t_f} \theta_3(t) dt \quad (8)$$

Le coefficient d'échange moyen recherché est celui qui permet d'égaliser les moments théorique et expérimental. Sur la figure 3, on a tracé les évolutions des courbes expérimentale et théorique correspondant au cas (5 ailettes, $e=2$ mm, $R_e=7,9$ cm, $N=100$ tr/min, $U=4,77$ m/s, $t_f=76,5$ s, $h_m=29,3$ W.m⁻².K⁻¹) pour montrer la validité de la méthode. L'écart observé entre les deux courbes à la fin du refroidissement est dû au fait que l'hypothèse qui consiste à considérer un coefficient d'échange h_m constant est acceptable au début du refroidissement [4], c'est à dire de 100 à 50 °C.

4. Résultats

4.1. Mise en évidence de la convection forcée axiale-rotationnelle

Sur la figure 4, nous avons représenté l'évolution du nombre de Nusselt local en fonction du nombre de Reynolds axial pour différentes hauteurs : $H'=0,517$ cas (a), $H'=0,689$ cas (b), $H'=0,862$ cas (c), $H'=1,379$ cas (d). Dans tous ces cas, le nombre de Nusselt augmente avec le nombre de Reynolds axial. Pour $Re_U < 15000$, le nombre de Nusselt dépend de la vitesse de rotation pour les cas (a), (b) et (c). Nous considérerons que dans ces conditions, les échanges convectifs sont contrôlés par la rotation et le courant d'air axial. Pour $Re_U \geq 15000$, les effets dus à la rotation sont négligeables par rapport à ceux du courant d'air.

4.2. Influence de la hauteur

Sur la figure 5, nous avons représenté l'évolution du nombre de Nusselt en fonction des différentes hauteurs adimensionnelles, pour $Re_\omega=4800$ et $15000 \leq Re_U \leq 40000$ dans le cas (a), pour $Re_\omega=950$ et $2000 \leq Re_U \leq 15000$ dans le cas (b). Dans le cas (a) pour lequel la convection

forcée de courant d'air est prédominante, pour les différentes valeurs du nombre de Reynolds axial considéré, le nombre de Nusselt est maximal pour le cas correspondant à $H^*=0,689$. A partir de $H^*=1,034$, le nombre de Nusselt ne dépend plus de la hauteur des ailettes. Avec l'augmentation de la hauteur des ailettes, l'écoulement de l'air sur l'ailette se transforme progressivement en écoulement sur une plaque plane plus défavorable à l'échange de chaleur [8]. De plus, pour un courant d'air donné, plus les ailettes sont hautes ou proches les unes des autres, plus la perte de charge par frottement dans l'écoulement entre elles est importante et le coefficient d'échange est faible [6,9]. Dans le cas (b) pour lequel les effets de la rotation ne sont plus négligeables par rapport aux effets du courant d'air, on observe une diminution du nombre de Nusselt avec la hauteur. D'autres mesures sont nécessaires pour analyser plus finement le rôle de la hauteur des ailettes dans ce régime et ainsi vérifier si la hauteur $H^*=0,862$ correspond bien à un nombre de Nusselt minimal.

5 Conclusion

Dans cette communication, nous avons présenté le dispositif expérimental et la méthodologie permettant de caractériser les transferts de chaleur convectifs autour d'un tube aileté en rotation soumis à un courant d'air parallèle aux ailettes. A partir de mesures de température effectuées à 1 cm de l'arbre sur l'ailette centrale de mesure, nous avons mis en évidence deux régimes en fonction des valeurs des nombres de Reynolds axial et rotationnel. L'un pour lequel les effets de la rotation sont négligeables par rapport à ceux du courant d'air ($Re_U > 15000$) et l'autre pour lequel les transferts convectifs sont contrôlés par la rotation et le courant d'air ($950 \leq Re_\omega \leq 9500$). Dans le premier régime, on a identifié une hauteur correspondant à un refroidissement maximum à $H^*=0,689$. Pour l'autre régime, nous avons observé une diminution du nombre de Nusselt avec l'augmentation de la hauteur. D'autres mesures effectuées à différents rayons des ailettes sont en cours de réalisation de manière à affiner cette analyse.

Références

- [1] B. Watel, S. Harmand, B. Desmet, Etude de faisabilité du refroidissement d'un disque de frein équipé d'un caloduc, *Entropie*, 187 (1994), 25-37.
- [2] B. Watel, S. Harmand, B. Desmet, Etude expérimentale de faisabilité du refroidissement d'un disque de frein équipé d'un caloduc, *Entropie*, 191 (1995), 25-33.
- [3] B. Watel, S. Harmand, B. Desmet, Etude des échanges convectifs sur un arbre aileté tournant, soumis à un courant d'air parallèle aux ailettes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 41 (1998), 3741-3757.
- [4] B. Watel, Etude des échanges convectifs sur un cylindre aileté en rotation, soumis à un courant d'air parallèle aux ailettes, Thèse de doctorat de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (1997).
- [5] H.J. Sung, JS Yang, TS Park, Local convective mass transfer on circular cylinder with transverse annular fins in crossflow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 39 (1996), 1093-1101.
- [6] M.S. Mon, U. Gross, Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47 (2004), 1953-1964.
- [7] X. Hu, A.M. Jacobi, Local heat transfer behaviour and its impact on a single-row annularly finned tube heat exchanger, *ASME J. Heat Transfer*, 115 (1993), 66-74.
- [8] V. G. Grass, F.P. Coenen, Systematische Untersuchungen über den Wärmeübergang und Strömungswiderstand von Rippenrohren, ein Beitrag zur Verwendung von Spezial Rohren bei Gasgekühlten Reaktoren, *Atomkernenergie*, H.2, J.4 (1959), 41-48.
- [9] O. Krisher, W. Kast, W. VDI-Forschungsheft, 474 (1959).

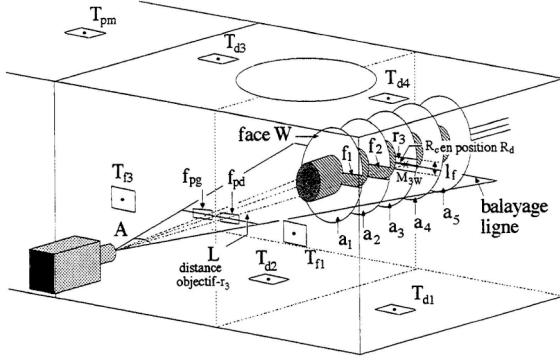


Figure 1 : Arbre aileté et veine en aluminium

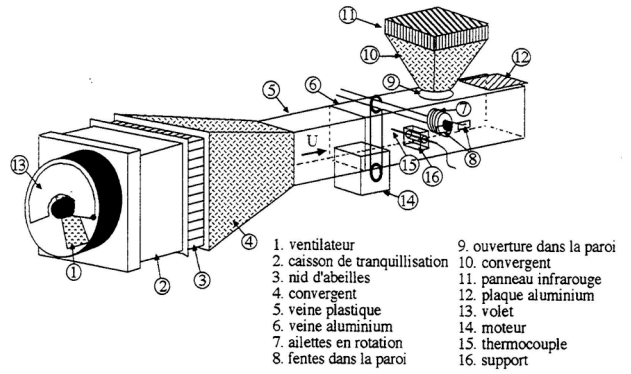


Figure 2 : Banc d'essai

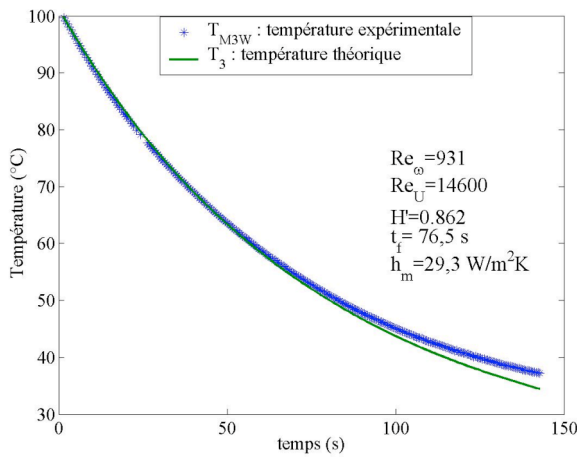


Figure 3 : Comparaison des profils de température

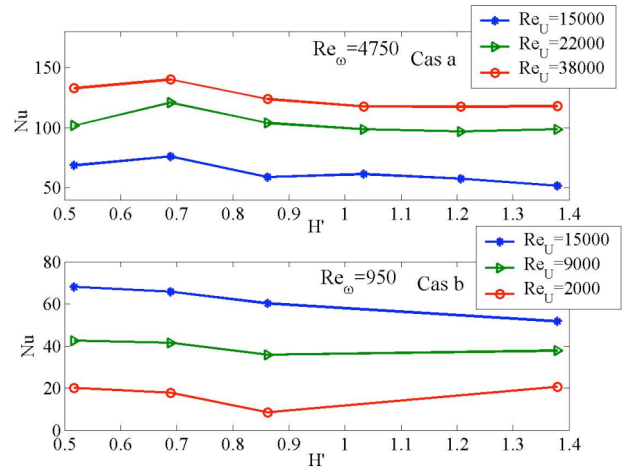


Figure 5 : Influence de la hauteur en convection forcée de courant d'air et en convection mixte

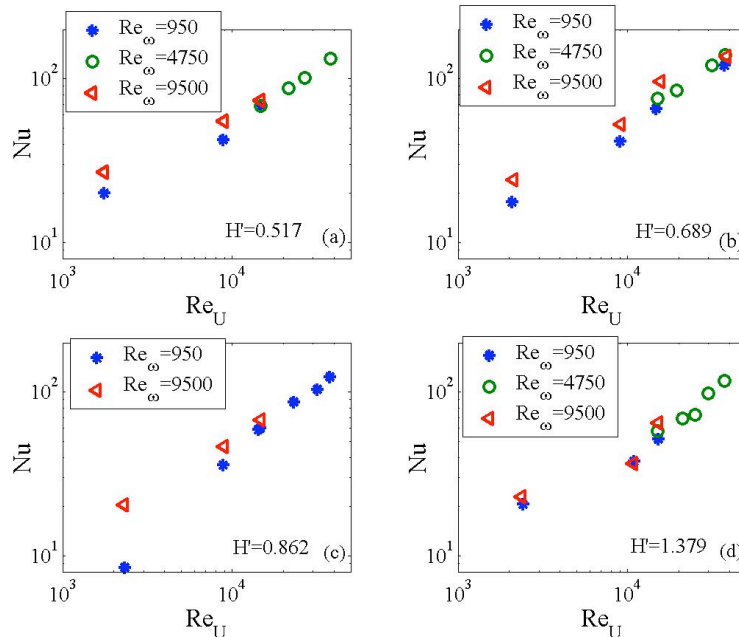


Figure 4 : Mise en évidence de la convection mixte