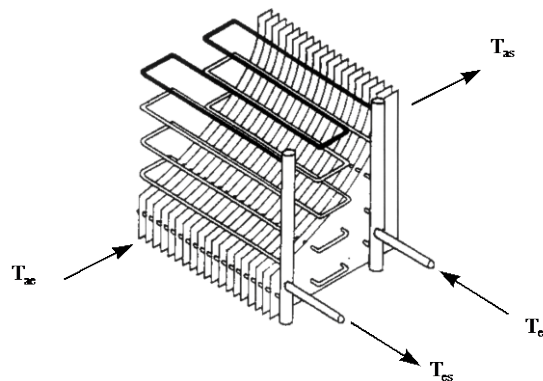
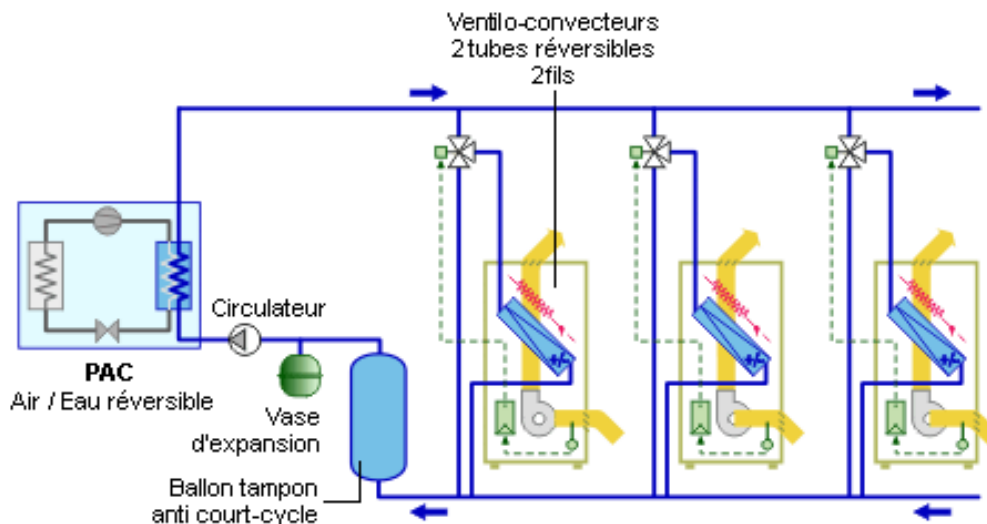


Etude de la batterie à Eau Glacée

La batterie froide à eau glacée est le composant central des systèmes de climatisation classique que l'on trouve dans les centrales de traitement d'air ou les ventilo-convecteurs. La batterie froide est un échangeur de chaleur entre deux fluides, l'air (fluide secondaire) et généralement l'eau (fluide primaire). La batterie est constituée de plusieurs rangées de tubes reliés entre eux par des coudes afin de former des circuits de circulation de fluide. Le fluide primaire (eau) circule dans les tubes qui sont perpendiculaires à l'écoulement du fluide secondaire (air). Afin d'équilibrer les résistances thermiques côté air et côté eau, on augmente la surface d'échange côté air à l'aide d'ailettes.

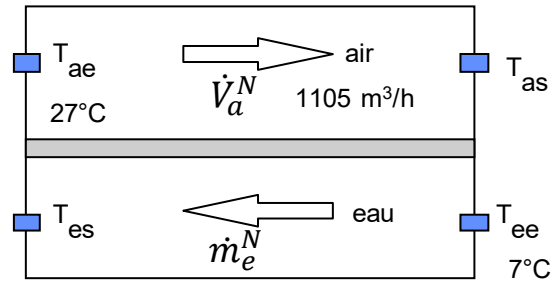


Il s'agit ici de caractériser les performances de la batterie froide. Dans l'installation présentée ci-dessous, le système est dimensionné pour une température départ du système de production d'eau glacée (PAC réversible) de 7°C et un retour à 12°C.



On s'intéressera ici à un ventilo-convecteur pour une pièce du bâtiment. Le besoin de refroidissement maximal pour la pièce est de 4,5 kW. Un constructeur nous propose un ventilo convecteur de puissance sensible 4647 W en conditions nominales (température d'eau : 7/12°C et température d'entrée de l'air 27°C avec un débit d'air de 1105 m³/h. La puissance absorbée par le moteur du ventilateur est de 77 W.

On suppose qu'il n'y a pas de condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air à la surface de l'échangeur. On suppose enfin l'échangeur sans pertes thermiques avec l'extérieur. On fait l'hypothèse que la batterie froide se comporte comme un échangeur à contre-courant (hypothèse valable à partir de 3 rangées de tubes). On suppose le régime permanent. Le flux d'air à travers une section de la batterie, perpendiculairement à la direction de l'écoulement, est supposé uniforme en vitesse et température. Symboliquement, l'échange peut être représenté comme ci-dessous :



Dans la gamme de température considérée :

$$C_{pe} = 4186 \text{ J/(kg.K)}$$

$$C_{pa} = 1006 \text{ J/(kg.K)}$$

$$\mu_e = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m.s)}$$

$$\mu_a = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m.s)}$$

$$\lambda_e = 0,583 \text{ W/(m.K)}$$

$$\lambda_a = 0,0262 \text{ W/(m.K)}$$

$$\rho_e = 1003 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_a = 1,177 \text{ kg/m}^3$$

Tubes en cuivre

4 rangs comportant 4 tubes

$$d_{int} = 0,0109 \text{ m}$$

$$d_{ext} = 0,0127 \text{ m}$$

$$\lambda_{Cu} = 389 \text{ W/(m.K)}$$

Ailettes en aluminium

$$S_{ailettes} = 13,67 \text{ m}^2 \text{ surface d'ailettes}$$

$$e_a = 0,0002 \text{ m} \text{ épaisseur}$$

$$P_a = 0,002 \text{ m} \text{ pas ou espacement}$$

$$2.L_a = 0,045 \text{ m} \text{ espace inter-tubes (centre à centre)}$$

$$\lambda_a = 200 \text{ W/(m.K)}$$

Nombre d'ailettes par tube : 225

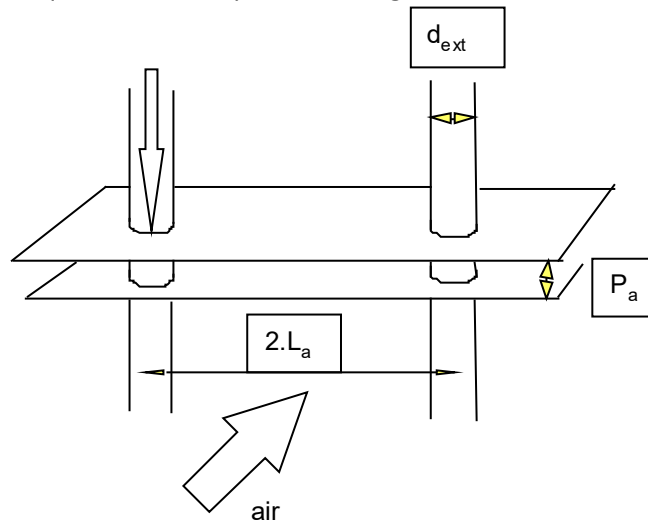
$$\text{Section de passage de l'air : } S_{passage} = 0,052 \text{ m}^2$$

1. - Etude globale - Identification des caractéristiques de l'échangeur à partir d'un point de fonctionnement nominal

Au régime nominal de l'échangeur ; connaissant la puissance échangée $\dot{Q} = 4647 \text{ W}$, déterminer le débit d'eau, \dot{m}_e^N , et la température de l'air en sortie d'échangeur, T_{as} . En déduire, le coefficient d'échange global KS^N (W/K). On néglige la conduction dans le tube. On suppose que la résistance côté air correspond à 35% de la résistance totale. Déterminer les deux coefficients KS_{air}^N et KS_{eau}^N .

2. - Etude locale - Variation du coefficient d'échange dans le cas où les débits varient

Déterminer les régimes d'écoulement côté air et côté eau. Pour l'air, on commencera par déterminer le diamètre hydraulique équivalent correspondant à la géométrie ci-dessous.



Résistance côté eau

Le débit total d'eau se répartit dans 4 tubes de diamètre intérieur 0,0109 m montés en parallèle. En déduire la vitesse de l'eau. Quelle corrélation peut-on utiliser pour le coefficient d'échange à l'intérieur des tubes ? Justifier votre réponse. En déduire h_{eau}^N (W/m².K).

Donner l'expression du coefficient d'échange côté eau KS_{eau} en fonction du débit \dot{m}_e et de sa valeur au régime nominal KS_{eau}^N .

Résistance côté air

Compte tenu de l'emprise des tubes et des ailettes, la section de passage nette de l'air est de 0,052 m². On utilisera la corrélation de Colburn (les coefficients et exposants dépendent de la géométrie des ailettes) :

$$Nu = 0,095 \cdot Re^{0,7} Pr^{0,33}$$

Déterminer h_{air}^N (W/m².K). Représenter l'échange entre eau et air par un schéma d'analogie électrique en faisant apparaître côté air les résistances dues aux tubes et aux ailettes. En supposant une efficacité

d'ailette de 0,9 ; En déduire KS_{air}^N et comparer la valeur trouvée à celle obtenue dans la première partie.

On pourra donner une expression du coefficient d'échange côté air KS_{air} en fonction du débit \dot{m}_a et de sa valeur au régime nominal KS_{air}^N .

3 - Détermination des conditions de sortie pour un débit non nominal

A partir de ce qui précède, comment déterminer les conditions de sortie T_{es} , T_{as} et la puissance échangée \dot{Q} dans l'échangeur dans le cas où le débit d'eau varie. Ces conditions dites "non nominales" sont :

T_{ee} et T_{ae} sont inchangées

$\dot{m}_e = 0,15 \text{ kg/s}$

et le débit d'air est inchangé

A priori 2 méthodes de calcul d'échangeur présentées en cours sont envisageables : la méthode (KS, ΔT_{LM}) ou la méthode (NUT, efficacité E).

Laquelle est la mieux adaptée au problème d'un fonctionnement non nominal ? Pourquoi ?

CORRIGE

Dimensionnement ventilo-convecteur

1. - Etude globale - Identification des caractéristiques de l'échangeur à partir d'un point de fonctionnement nominal.

$$\dot{Q} = \dot{m}_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{ae} - T_{as}) = \dot{m}_e \cdot c_{pe} \cdot (T_{es} - T_{ee})$$

On peut en déduire T_{as} et \dot{m}_e

$$T_{as} = T_{ae} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_a \cdot c_{pa}} = 14,22 \text{ °C}$$

$$\dot{m}_e = \frac{\dot{Q}}{c_{pe} \cdot (T_{es} - T_{ee})} = 0,222 \text{ kg/s}$$

Pour déterminer le coefficient d'échange global de l'échangeur KS^N (W/K), on utilise la méthode KS- ΔT_{LM} :

$$\dot{Q} = KS \cdot \Delta T_{LM}$$

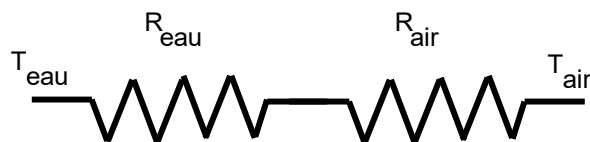
$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{ae} - T_{es}) - (T_{as} - T_{ee})}{\ln \left(\frac{T_{ae} - T_{es}}{T_{as} - T_{ee}} \right)}$$

Au point nominal, le ΔT_{LM} est égal à 10,6°C.

On en déduit le KS au point nominal

$$KS^N = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{LM}} = 436,8 \text{ W/K}$$

La résistance de conduction dans le tube est généralement négligeable dans les échangeurs, la résistance globale dans l'échangeur s'écrit comme la somme des résistances de convection côté air et côté eau (résistances en série).



La conductance globale (inverse de la résistance) ou autrement dit le coefficient d'échange global peut s'écrire comme :

$$\frac{1}{KS^N} = \frac{1}{KS_{air}^N} + \frac{1}{KS_{eau}^N}$$

Résistance côté air

La résistance côté air est supposée représenter 35% de la résistance totale, d'où

$$R_{air}^N = \frac{1}{KS_{air}^N} = 0,35 \frac{1}{KS^N}$$

$$KS_{air}^N = 1247,9 \text{ W/K}$$

Résistance côté eau

On en déduit la conductance côté eau

$$\frac{1}{KS_{eau}^N} = \frac{1}{KS^N} - \frac{1}{KS_{air}^N}$$

$$KS_{eau}^N = 672 \text{ W/K}$$

2 - Etude locale - Variation du coefficient d'échange dans le cas où les débits varient

Résistance côté eau

La section interne d'un tube s'écrit

$$S_{int} = \frac{\pi \cdot d_{int}^2}{4}$$

Le débit se répartit dans 4 tubes, la vitesse dans les tubes est donc donnée par

$$V_e = \frac{\dot{m}_e}{4 \cdot \rho_e \cdot S_{int}} = 0,593 \text{ m/s}$$

D'où

$$Re = \frac{\rho_e \cdot V_e \cdot d_{int}}{\mu_e} = 4988 \text{ régime turbulent}$$

La corrélation de Dittus-Boelter permet de déterminer le coefficient d'échange convectif h_{eau} à partir du calcul du nombre de Nusselt :

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 51,1$$

avec

$$Pr = \frac{\mu_e \cdot c_{pe}}{\lambda_e} = 9,33$$

Cette corrélation est valable pour des écoulements caractérisés par un Reynolds compris entre 10^4 et $1,2 \cdot 10^5$. On l'utilise même si elle n'est pas validée pour le Reynolds trouvé à défaut de corrélation pour cette valeur.

On en déduit le coefficient d'échange convectif

$$h_{eau}^N = \frac{Nu \cdot \lambda_e}{d_{int}} = 2370,9 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Sur l'intervalle réduit de température de fonctionnement pour le régime d'eau (typiquement [7-12 °C]), les propriétés de l'eau (μ viscosité, λ conductivité et ρ_e masse volumique) peuvent être considérées comme constantes. Ainsi pour une même batterie, c'est-à-dire que le diamètre intérieur des tubes d_{int} est constant et que la surface d'échange intérieur S_{int} est constante, la variation du coefficient d'échange intérieur s'exprime en fonction du débit masse.

D'où

$$KS_{eau} = h_{eau} \cdot S_{ech-int} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \frac{\lambda_e}{d_{int}} \cdot S_{ech-int}$$

$S_{ech-int}$ est la surface d'échange entre l'eau et les tubes

$$KS_{eau} = 0,023 \cdot Pr^{0,4} \cdot \frac{\lambda_e}{(4 \cdot \mu_e)^{0,8}} \cdot \frac{S_{ech-int}}{d_{int}^{0,2} \cdot S_{int}^{0,8}} \dot{m}_e^{0,8}$$

$$KS_{eau} = cste \cdot \dot{m}_e^{0,8}$$

D'où

$$KS_{eau} = KS_{eau}^N \left(\frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_e^N} \right)^{0,8}$$

Résistance côté air

La vitesse débitante dans la batterie :

$$V_a = \frac{\dot{V}_a}{S_{passage}} = 5,88 \text{ m/s}$$

Cette vitesse est un peu élevée. En effet, il est recommandé de ne pas dépasser les 4 m/s de vitesse d'air sur une batterie froide humide afin d'éviter l'entraînement de gouttelettes d'eau dans le réseau aéraulique.

D_a est le diamètre hydraulique égal à 4S/P soit : 0,0034 m

Le diamètre hydraulique est calculé entre 2 ailettes et deux tubes, soit :

$$D_a = \frac{4 \cdot (2La - d_{ext}) \cdot (Pa - ea)}{2 \cdot (2La - d_{ext}) + 2 \cdot (Pa - ea)} = 0,0034 \text{ m}$$

Le nombre de Reynolds est de

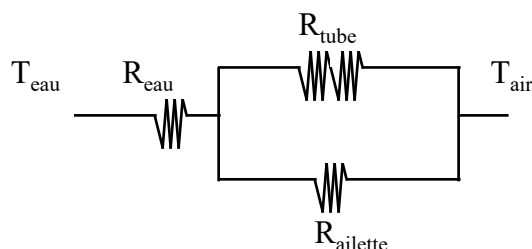
$$Re = \frac{\rho_a V_a D_a}{\mu_a} = 1276 - \text{régime laminaire}$$

$$Pr = \frac{\mu_a c_{pa}}{\lambda_a} = 0,71$$

$$Nu = 12,7$$

$$h_{air} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{D_a} = 97,4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Prise en compte de la résistance d'ailette



La conductance KS_{air} se détermine par la formule suivante :

$$KS_{air} = \frac{1}{R_{tube}} + \frac{1}{R_{aillette}}$$

Dans le cas de la batterie froide en considérant des tubes en cuivre, la résistance par conduction R_t sera négligée devant les phénomènes convectifs. La résistance convective s'exprime en fonction du coefficient d'échange convectif pour les ailettes et les tubes.

Le calcul de la résistance thermique à la surface des ailettes utilise la relation suivante :

$$1/R_{aillette} = h_{air} \cdot S_{aillette} \cdot \eta_{ail} = 1197,7 \text{ W/K}$$

$$1/R_{tube} = h_{air} \cdot S_{tube} = 25,1 \text{ W/K}$$

avec $\eta_{ail} = 0,9$, $S_{aillette} = 13,67 \text{ m}^2$ et $S_{tube} = 0,258 \text{ m}^2$,

On obtient $KS_{air} = 1\,222,8 \text{ W/K}$ assez proche de la valeur obtenue dans la première partie (à 2%) : $1\,247,9 \text{ W/K}$

De façon analogue au côté eau, on peut exprimer la conductance côté air comme suit :

$$KS_{air} = KS_{air}^N \left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^N} \right)^{0,7}$$

3 - Détermination des conditions de sortie pour un débit non nominal

Le coefficient d'échange varie avec le débit, il faut donc utiliser le résultat précédent pour calculer sa nouvelle valeur :

$$KS_{eau} = KS_{eau}^N \left(\frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_e^N} \right)^{0,8} = 672 * \left(\frac{0,15}{0,222} \right)^{0,8} = 491 \text{ W/K}$$

Le KS côté air est inchangé.

Le KS global devient :

$$KS = \frac{1}{\frac{1}{KS_{air}^N} + \frac{1}{KS_{eau}}} = 352,4 \text{ W/K}$$

Méthode $KS-\Delta T_{LM}$

Les équations utilisables sont :

$$\dot{Q} = \dot{m}_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{ae} - T_{as})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_e \cdot c_{pe} \cdot (T_{es} - T_{ee})$$

$$\dot{Q} = KS \cdot \Delta T_{LM}$$

Il y a bien trois équations pour 3 inconnues mais à cause du ΔT_{LM} dans la 3^{ème} équation, le problème n'est pas linéaire.

Méthode NUT-Efficacité

$$R = \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_{max}} = \frac{\dot{m}_a \cdot c_{pa}}{\dot{m}_e \cdot c_{pe}} = 0,579 \leq 1$$

$$NUT = \frac{KS}{\dot{C}_{min}} = \frac{KS}{\dot{m}_a \cdot c_{pa}} = 0,969$$

On utilise l'expression relative aux échangeurs à contre-courant :

$$E = \frac{1 - \exp(-NUT \cdot (1 - R))}{1 - R \cdot \exp(-NUT \cdot (1 - R))} = 0,545$$

Et comme on peut écrire l'efficacité comme le rapport entre l'écart de température entrée/sortie du fluide ayant le débit capacitif minimum (ici l'air) et l'écart de température maximal dans l'échangeur,

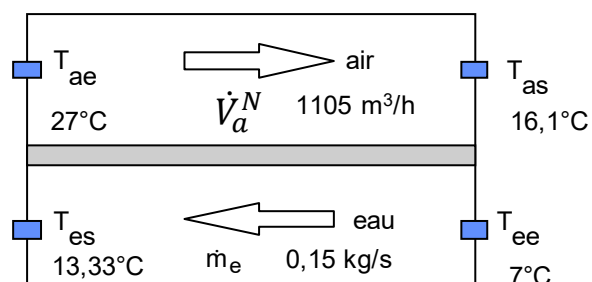
$$E = \frac{T_{ae} - T_{as}}{T_{ae} - T_{ee}}$$

On en déduit la température en sortie côté air :

$$T_{as} = T_{ae} - E \cdot (T_{ae} - T_{ee}) = 16,1^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_a \cdot c_{pa} \cdot (T_{ae} - T_{as}) = 3961 \text{ W}$$

$$T_{es} = T_{ee} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_e \cdot c_{pe}} = 13,3^\circ\text{C}$$



L'efficacité de l'échangeur a diminué.

