

Annexe 4 - Pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

Les échangeurs de chaleurs placés dans le sol sont utilisés pour refroidir ou réchauffer l'air de ventilation (pré-refroidissement / pré-chauffage). Dans notre cas, c'est la masse thermique de la terre qui est utilisée pour fournir la chaleur à transférer. A une profondeur suffisante, la température du sol est stable. En été, l'air de ventilation fourni peut être refroidi ; en hiver, il peut être réchauffé. Dans des échangeurs de chaleur sol-air, l'air est envoyé à travers un ou plusieurs tubes souterrains. Le sol refroidira ou réchauffera l'air.

Si seulement une partie du débit de ventilation hygiénique de la zone de ventilation z est refroidie à l'aide d'un système de pré-refroidissement de l'air de ventilation, alors $r_{\text{precool,zone } z,m} = 1$.

1 Méthode PER pour des unités de logement

1.1 Facteur de multiplication pour l'effet du pré-refroidissement de l'air de ventilation

Le facteur de multiplication mensuel $r_{\text{precool,zone } z,m}$ pour l'effet du pré-refroidissement de l'air de ventilation pour les besoins de refroidissement de la zone de ventilation z est donné par:

$$r_{\text{precool,zone } z,m} = 1 - e_{\text{precool,m}} \frac{\theta_{\text{precool,ref,max,m}} - (\theta_{e,m} + \Delta\theta_{e,m})}{23 - (\theta_{e,m} + \Delta\theta_{e,m})} \quad [-]$$

avec :

$e_{\text{precool,m}}$ l'efficacité mensuelle du système de pré-refroidissement concerné, telle que déterminée ci-dessous (-) ;

$\theta_{\text{precool,ref,max,m}}$ la température de référence pour l'abaissement de température maximal, égale à la température moyenne mensuelle du sol $\theta_{\text{soil,m}}$, déduite du Tableau 20 de l'annexe PER, en °C ;

$\theta_{e,m}$ la température extérieure moyenne mensuelle, selon le Tableau 1 de l'annexe PER, en °C;

$\Delta\theta_{e,m}$ une hausse de la température extérieure moyenne mensuelle pour le calcul du besoin net en énergie pour le refroidissement, égale par hypothèse à 1°C.

Pour un échangeur de chaleur sol-air, l'efficacité $e_{\text{precool,m}}$ est déterminé par :

$$e_{\text{precool},m} = w_{\text{soil/air},m} \left(1 - e^{-\frac{\alpha_{\text{precool}} A_{\text{wt}}}{0.34 \sum \dot{V}_{\text{hyg,cool,sec } i}}} \right) \quad [-]$$

avec:

α_{precool} le coefficient de transmission thermique des conduites dans l'échangeur de chaleur sol-air, tel que déterminé ci-dessous, en $W/m^2.K$;

A_{wt} la surface d'échange des conduites, telle que déterminée ci-dessous, en m^2 ;

$\dot{V}_{\text{hyg,cool,sec } i}$ le débit de ventilation hygiénique du secteur énergétique i , pour les calculs de refroidissement, tels que définis au 7.8.4 de l'annexe PER, en m^3/h ;

$w_{\text{soil/air},m}$ un facteur mensuel qui tient compte du temps de fonctionnement de l'échangeur de chaleur sol-air (-) :

si $\theta_{e,m} - \theta_{\text{soil},m} \leq 0$ alors $w_{\text{soil/air},m} = 0$

si $0 < \theta_{e,m} - \theta_{\text{soil},m} \leq 2$ alors $w_{\text{soil/air},m} = 0,5$

si $\theta_{e,m} - \theta_{\text{soil},m} > 2$ alors $w_{\text{soil/air},m} = 1$

où:

$\theta_{e,m}$ la température extérieure moyenne mensuelle, selon le Tableau 1 de l'annexe PER, en $^{\circ}C$;

$\theta_{\text{soil},m}$ la température moyenne mensuelle du sol définie en fonction de la profondeur des conduites, selon le Tableau 20 de l'annexe PER, en $^{\circ}C$.

Il faut faire la somme sur tous les secteurs énergétiques i de la zone de ventilation z

Le coefficient de transmission thermique des conduites α_{precool} est déterminé suivant :

$$\alpha_{\text{precool}} = \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_{\text{tube}} + 2t_{\text{tube}}}{D_{\text{tube}}}\right)}{2\lambda_{\text{tube}}/D_{\text{tube}}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{\text{tube}} + 2t_{\text{soil}}}{D_{\text{tube}} + 2t_{\text{tube}}}\right)}{2\lambda_{\text{soil}}/D_{\text{tube}}} \right)^{-1} \quad [W/m^2K]$$

avec:

α_i	le coefficient de convection interne de l'écoulement dans la conduite de l'échangeur de chaleur pour le pré-refroidissement, tel que déterminé ci-dessous, en W/m ² .K ;
t_{soil}	l'épaisseur du massif de terre autour de la conduite considérée, telle que déterminée ci-dessous, en m ;
D_{tube}	le diamètre intérieur de la conduite, en m ;
t_{tube}	l'épaisseur de la paroi de la conduite, en m ;
λ_{tube}	la conductivité thermique de la conduite, en W/m.K ;
λ_{soil}	la conductivité thermique du sol, considérée égale à 2, en W/m.K.

Le coefficient de convection interne est donné par :

$$\alpha_i = 0.026 \frac{Nu}{D_{tube}} \quad [W/m^2K]$$

avec:

$$Nu = \left(Nu_{lam}^5 + Nu_{turb}^5 \right)^{1/5}$$

et

$$Nu_{lam} = \left[3.66^3 + 1.61^3 \cdot \left(\frac{Re \cdot Pr \cdot D_{tube}}{L_{tube}} \right) \right]^{1/3}$$

$$Nu_{turb} = \frac{f_{turb} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{2 \cdot \left(1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{f_{turb}}{2}} \cdot \left(Pr^{2/3} - 1 \right) \right)}$$

$$f_{turb} = (1.58 \cdot \ln Re - 3.28)^{-2}$$

$$Re = 64935 \frac{4}{3600\pi} \frac{\sum \dot{V}_{hyg,cool,sec i}}{n_{tube} D_{tube}}$$

$$Pr = 0.714$$

avec:

$\dot{V}_{\text{hyg,cool,sec } i}$ le débit de ventilation hygiénique du secteur énergétique i , pour les calculs de refroidissement, tels que définis au 7.8.4 de l'annexe PER, en m^3/h ;

D_{tube} le diamètre intérieur de la conduite, en m ;

L_{tube} la longueur de la conduite, en m ;

Il faut faire la somme sur tous les secteurs énergétiques i de la zone de ventilation z .

L'épaisseur du massif de terre autour de la conduite considérée, t_{soil} , est donnée par :

$$t_{\text{soil}} = \frac{p_{\text{tube}} - D_{\text{tube}}}{2} \quad \text{als } p_{\text{tube}} - D_{\text{tube}} < 0.5$$

$$t_{\text{soil}} = 0.25 \quad \text{als } p_{\text{tube}} - D_{\text{tube}} \geq 0.5$$

avec:

p_{tube} la distance entre les conduites parallèles, en m ;

D_{tube} le diamètre intérieur de la conduite, en m .

La surface d'échange des conduites A_{wt} est donnée par :

$$A_{\text{wt}} = \pi D_{\text{tube}} L_{\text{tube}} n_{\text{tube}} \quad [\text{m}^2]$$

avec :

D_{tube} le diamètre intérieur de la conduite, en m ;

L_{tube} la longueur de la conduite, en m ;

n_{tube} le nombre de conduites en parallèle (-).

1.2 Consommation d'énergie auxiliaire pour le pré-refroidissement de l'air de ventilation

On détermine la consommation mensuelle d'électricité de l'échangeur de chaleur sol-air comme suit :

$$W_{\text{precool,m}} = W_{\text{soil/air,m}} \quad [\text{kWh}]$$

$$W_{\text{soil/air,m}} = 0.167 \cdot t_m \cdot w_{\text{soil/air,m}} \cdot \frac{\sum \dot{V}_{\text{hyg,cool,sec } i}}{3600} \cdot f \cdot \frac{L_{\text{tube}}}{D_{\text{tube}}} \left(\frac{\sum \dot{V}_{\text{hyg,cool,sec } i}}{3600 n_{\text{tube}} \frac{\pi}{4} D_{\text{tube}}^2} \right)^2 \quad [\text{kWh}]$$

avec:

t_m la longueur du mois considéré en Ms, voir Tableau 1 de l'annexe PER ;

$w_{\text{soil/air,m}}$ un facteur mensuel qui tient compte du temps de fonctionnement de l'échangeur de chaleur sol-air, déterminé selon 1.1 (-);

$\dot{V}_{\text{hyg,cool,sec } i}$ le débit de ventilation hygiénique du secteur énergétique i , pour les calculs de refroidissement, tels que définis au 7.8.4 de l'annexe PER, en m^3/h ;

f un facteur de friction :

- Si $Re < 2300$: $f = \frac{64}{Re}$

- Dans tous les autres cas : $f = (1.58 \cdot \ln Re - 3.28)^{-2}$

avec Re : le nombre de Reynolds déterminé selon 1.1 (-);

L_{tube} longueur de la conduite dans le sol, en m ;

D_{tube} diamètre intérieur de la conduite dans le sol, en m ;

n_{tube} le nombre de conduites en parallèle (-).

Il faut faire la somme sur tous les secteurs énergétiques i de la zone de ventilation z

2 Méthode PEN pour les unités PEB bureaux et services et enseignement

2.1 Facteur de multiplication pour l'effet du pré-refroidissement de l'air de ventilation

Le facteur de multiplication mensuel $r_{\text{precool,zone } z,m}$ pour l'effet du pré-refroidissement de l'air de ventilation pour les besoins de refroidissement de la zone de ventilation z est donné par:

$$r_{\text{precool,zone } z,m} = 1 - e_{\text{precool,m}} \frac{\theta_{\text{precool,ref,max,m}} - \theta_{\text{e,V,cool,m}}}{\theta_{\text{i,cool}} - \theta_{\text{e,V,cool,m}}} \quad [-]$$

avec :

- $e_{precool,m}$ l'efficacité mensuelle du système de pré-refroidissement concerné, telle que déterminée ci-dessous (-) ;
- $\theta_{precool,ref,max,m}$ la température de référence pour l'abaissement de température maximal, égale à la température moyenne mensuelle du sol $\theta_{soil,m}$, déduite du Tableau 29 de l'annexe PEN, en °C ;
- $\theta_{e,V,cool,m}$ la valeur de calcul conventionnelle pour la température de l'air neuf pour la ventilation hygiénique lors des calculs de refroidissement déterminée selon Tableau 1 de l'annexe PEN, en °C ;
- $\theta_{i,cool}$ la température intérieure moyenne établie par convention pour la détermination du besoin en énergie pour le refroidissement, reprise au Tableau 2 de l'annexe PEN, en °C ;

Pour un échangeur de chaleur sol-air, l'efficacité $e_{precool,m}$ est déterminée par :

$$e_{precool,m} = w_{soil/air,m} \left(1 - e^{-\frac{\alpha_{precool} A_{wt}}{0.34 \sum \dot{V}_{hyg,seci,k}}} \right) \quad [-]$$

avec:

- $\alpha_{precool}$ le coefficient de transmission thermique des conduites dans l'échangeur de chaleur sol-air, tel que déterminé ci-dessous, en W/m².K ;
- A_{wt} la surface d'échange des conduites, telle que déterminée ci-dessous, en m² ;
- $\dot{V}_{hyg,seci,k}$ le débit partiel k du débit de conception d'alimentation en air neuf qui passe à travers l'échangeur de chaleur sol-air dans le secteur énergétique i, en m³/h.
- $w_{soil/air,m}$ un facteur mensuel qui tient compte du temps de fonctionnement de l'échangeur de chaleur sol-air (-) :
- si $\theta_{e,m} - \theta_{soil,m} \leq 0$ alors $w_{soil/air,m} = 0$
- si $0 < \theta_{e,m} - \theta_{soil,m} \leq 2$ alors $w_{soil/air,m} = 0,5$
- si $\theta_{e,m} - \theta_{soil,m} > 2$ alors $w_{soil/air,m} = 1$

où:

$\theta_{e,m}$ la température extérieure moyenne mensuelle, selon le Tableau 1 de l'annexe PEN, en °C;

$\theta_{soil,m}$ la température moyenne mensuelle du sol définie en fonction de la profondeur des conduites, selon le Tableau 29 de l'annexe PEN, en °C.

Il faut faire la somme sur tous les débits partiels k et sur tous les secteurs énergétiques i de la zone de ventilation z .

Le coefficient de transmission thermique des conduites $\alpha_{precool}$ est déterminé suivant :

$$\alpha_{precool} = \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_{tube} + 2t_{tube}}{D_{tube}}\right)}{2\lambda_{tube}/D_{tube}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{tube} + 2t_{soil}}{D_{tube} + 2t_{tube}}\right)}{2\lambda_{soil}/D_{tube}} \right)^{-1} \quad [W/m^2K]$$

avec:

α_i le coefficient de convection interne de l'écoulement dans la conduite de l'échangeur de chaleur pour le pré-refroidissement, tel que déterminé ci-dessous, en $W/m^2.K$;

t_{soil} l'épaisseur du massif de terre autour de la conduite considérée, telle que déterminée ci-dessous, en m ;

D_{tube} le diamètre intérieur de la conduite, en m ;

t_{tube} l'épaisseur de la paroi de la conduite, en m ;

λ_{tube} la conductivité thermique de la conduite, en $W/m.K$;

λ_{soil} la conductivité thermique du sol, considérée égale à 2, en $W/m.K$.

Le coefficient de convection interne est donné par :

$$\alpha_i = 0.026 \frac{Nu}{D_{tube}} \quad [W/m^2K]$$

avec:

$$Nu = \left(Nu_{lam}^5 + Nu_{turb}^5 \right)^{1/5}$$

et

$$Nu_{lam} = \left[3.66^3 + 1.61^3 \cdot \left(\frac{Re \cdot Pr \cdot D_{tube}}{L_{tube}} \right) \right]^{1/3}$$

$$Nu_{turb} = \frac{f_{turb} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{2 \cdot \left(1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{f_{turb}}{2}} \cdot \left(Pr^{2/3} - 1 \right) \right)}$$

$$f_{turb} = (1.58 \cdot \ln Re - 3.28)^{-2}$$

$$Re = 64935 \frac{4 \sum \dot{V}_{hyg,sec i,k}}{3600\pi n_{tube} D_{tube}}$$

$$Pr = 0.714$$

avec:

$\dot{V}_{hyg,sec i,k}$ le débit partiel k du débit de conception d'alimentation en air neuf qui passe à travers l'échangeur de chaleur sol-air dans le secteur énergétique i, en m³/h.

D_{tube} le diamètre intérieur de la conduite, en m.

L_{tube} la longueur de la conduite, en m ;

n_{tube} le nombre de conduites en parallèle (-).

Il faut faire la somme sur tous les débits partiels k et sur tous les secteurs énergétiques i de la zone de ventilation z.

L'épaisseur du massif de terre autour de la conduite considérée, t_{soil} , est donnée par :

$$t_{soil} = \frac{p_{tube} - D_{tube}}{2} \quad \text{als } p_{tube} - D_{tube} < 0.5$$

$$t_{soil} = 0.25 \quad \text{als } p_{tube} - D_{tube} \geq 0.5$$

avec:

p_{tube} la distance entre les conduites parallèles, en m ;

D_{tube} le diamètre intérieur de la conduite, en m.

La surface d'échange des conduites A_{wt} est donnée par :

$$A_{wt} = \pi D_{tube} L_{tube} n_{tube} \quad [m^2]$$

avec :

D_{tube} le diamètre intérieur de la conduite, en m ;

L_{tube} la longueur de la conduite, en m ;

n_{tube} le nombre de conduites en parallèle (-).

2.2 Consommation d'énergie auxiliaire pour le pré-refroidissement de l'air de ventilation

On détermine la consommation mensuelle d'électricité de l'échangeur de chaleur sol-air comme suit :

$W_{precool,m} = W_{soil/air,m}$	[kWh]
$W_{soil/air,m} = 0.167 \cdot t_m \cdot w_{soil/air,m} \cdot \frac{\sum f_{vent,cool,k} \dot{V}_{hyg,sec\ i,k}}{3600} \cdot f \cdot \frac{L_{tube}}{D_{tube}} \left(\frac{\sum \dot{V}_{hyg,sec\ i,k}}{3600 n_{tube} \frac{\pi}{4} D_{tube}^2} \right)^2$	[kWh]
avec:	
t_m	la longueur du mois considéré en Ms, voir Tableau 1 de l'annexe PEN ;
$f_{vent,cool,k}$	la fraction du temps conventionnelle pendant laquelle la ventilation est en service, selon Tableau 4 de l'annexe PEN;
$W_{soil/air,m}$	un facteur mensuel qui tient compte du temps de fonctionnement de l'échangeur de chaleur sol-air, déterminé selon 2.1 (-);
$\dot{V}_{hyg,sec\ i,k}$	le débit partiel k du débit de conception d'alimentation en air neuf qui passe à travers l'échangeur de chaleur sol-air dans le secteur énergétique i, en m ³ /h.
f	un facteur de friction :

	$f = \frac{64}{Re}$ <ul style="list-style-type: none"> - Si $Re < 2300$: - Dans tous les autres cas : $f = (1.58 \cdot \ln Re - 3.28)^{-2}$ <p>avec Re : le nombre de Reynolds déterminé selon 2.1 (-);</p>
L_{tube}	la longueur de la conduite dans le sol, en m ;
D_{tube}	le diamètre intérieur de la conduite dans le sol, en m ;
n_{tube}	le nombre de conduites en parallèle (-).

Il faut faire la somme sur tous les débits partiels k et sur tous les secteurs énergétiques i de la zone de ventilation z .

Vu pour être annexé à l'arrêté ministériel portant exécution des annexes V, IX et X de l'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 21 décembre 2007 déterminant des exigences en matière de performance énergétique et de climat intérieur des bâtiments

Bruxelles, le 6 mai 2014

Evelyne HUYTEBROECK