
Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

1	INTRODUCTION	2
2	MÉTHODE PER POUR UNITÉS DE LOGEMENT	2
2.1	Facteur de multiplication pour l'effet du pré-refroidissement de l'air de ventilation	2
2.2	Consommation d'énergie auxiliaire pour le pré-refroidissement de l'air de ventilation	6
3	METHODE PEN POUR LES UNITÉS EPN	7
3.1	Facteur de multiplication pour l'effet du pré-refroidissement de l'air de ventilation	7
3.2	Consommation d'énergie auxiliaire pour le pré-refroidissement de l'air de ventilation	11

Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

1 Introduction

Les échangeurs de chaleurs placés dans le sol sont utilisés pour refroidir ou réchauffer l'air de ventilation (pré-refroidissement / pré-chauffage). Ici, c'est la masse thermique de la terre qui est utilisée pour fournir la chaleur à transférer. À une profondeur suffisante, la température du sol est stable. En été, cela signifie que 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 une ou plusieurs tubes souterraines. Le sol refroidira ou réchauffera l'air.

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

2 Méthode PER pour unités de logement

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 :

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

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, égal 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.

Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

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 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$;

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 $^{\circ}\text{C}$;

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

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

 Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

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

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

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 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$;
- 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 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$;
- λ_{soil} la conductivité thermique du sol, considérée égale à 2, en $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$.

Le coefficient de convection interne est donné par :

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

avec :

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

et

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

Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

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

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

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

$$\text{Pr} = 0.714$$

avec:

$\dot{V}_{\text{hyg,cool,seci}}$ le débit de ventilation hygiénique du secteur énergétique i , pour les calculs de refroidissement, tels que définis au §7.8.6 de l'annexe PER, en m³/h;

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

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.

Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

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 pour le pré-refroidissement de l'air de ventilation comme suit :

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

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

avec :

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

$w_{soil/air,m}$ un facteur mensuel qui tient compte du temps de fonctionnement de l'échangeur de chaleur sol-air, déterminé selon §2.1 (-);

$\dot{V}_{hygcool,seci}$ le débit de ventilation hygiénique du secteur énergétique i , pour les calculs de refroidissement, tels que définis au 7.8.6 de l'annexe PER, en m^3/h ;

f un facteur de friction :

Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

- 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 2.1 (-);

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

3 Methode PEN pour les unités PEN

3.1 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:

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

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, égal à la température moyenne mensuelle du sol $\theta_{\text{soil}, m}$, déduite du §B.2.2 de l'annexe PEN, en °C ;

$\theta_{e, V, \text{cool}, m}$ la valeur de calcul conventionnelle pour la température de l'air neuf pour la ventilation hygiénique lors des calculs de refroidissement déterminée selon Tableau 45 de l'annexe PEN, en °C;

$\theta_{i, \text{cool}, \text{fctf}}$ la valeur de calcul de la température intérieure pour la partie fonctionnelle f , déterminé selon §5.2.3 de l'annexe PEN, en °C;

Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

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

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

avec :

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

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

$\dot{V}_{hyg,fcf}$ Le débit de conception de l'air extérieur pour la ventilation hygiénique qui est pré-refroidit par l'échangeur sol-air dans la partie fonctionnelle f , en m^3/h , déterminé selon les principes du §5.6.2.2 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 (-) :

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 PER, en $^{\circ}C$;

$\theta_{soil,m}$ la température moyenne mensuelle du sol définie en fonction de la profondeur des conduites, selon le § B.2.2 de l'annexe PEN, en $^{\circ}C$.

Il faut faire la somme sur tous les débits partiels k et sur toutes les parties fonctionnelles f de la zone de ventilation z .

 Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

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

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

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 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$;
- 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 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$;
- λ_{soil} la conductivité thermique du sol, considérée égale à 2, en $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$.

Le coefficient de convection interne est donné par :

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

avec :

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

et

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

 Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

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

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

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

$$\text{Pr} = 0.714$$

avec :

$$\dot{V}_{\text{hyg,fcf}}$$

Le débit de conception de l'air extérieur pour la ventilation hygiénique qui est pré-refroidit par l'échangeur sol-air dans la partie fonctionnelle f, en m³/h, déterminé selon les principes du §5.6.2.2 de l'annexe PEN.

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 toutes les parties fonctionnelles f 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 ;

Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

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 (-).

3.2 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 :

$W_{\text{precool,m}} = W_{\text{soil/air,m}}$	[kWh]
$W_{\text{soil/air,m}} = 0.167 \cdot t_m \cdot w_{\text{soil/air,m}} \cdot \frac{\sum f_{\text{vent,cool,fctf}} \dot{V}_{\text{hyg,fctf}}}{3600} \cdot f \cdot \frac{L_{\text{tube}}}{D_{\text{tube}}} \left(\frac{\sum \dot{V}_{\text{hyg,fctf}}}{3600 n_{\text{tube}} \frac{\pi}{4} D_{\text{tube}}^2} \right)^2$	[kWh]
avec:	
t_m	la longueur du mois considéré en Ms, voir Tableau 1 de l'annexe PEN ;
$f_{\text{vent,cool,fctf}}$	la fraction de temps durant laquelle la ventilation est en fonctionnement, pour les calculs de refroidissement de la partie fonctionnelle f, repris du Tableau 7 de l'annexe PEN.
$w_{\text{soil/air,m}}$	un facteur mensuel qui tient compte du temps de fonctionnement

 Annexe 5 - Spécifications pour la prise en compte du pré-refroidissement de l'air de ventilation avec un échangeur de chaleur sol-air

	de l'échangeur de chaleur sol-air, déterminé selon 3.1 (-);
$\dot{V}_{\text{hyg,fcf}}$	Le débit de conception de l'air extérieur pour la ventilation hygiénique qui est pré-refroidit par l'échangeur sol-air dans la partie fonctionnelle f, en m ³ /h, déterminé selon les principes du §5.6.2.2 de l'annexe PEN.
f	un facteur de friction : $f = \frac{64}{\text{Re}}$ <ul style="list-style-type: none"> - Si $\text{Re} < 2300$: - Dans tous les autres cas : $f = (1.58 \cdot \ln \text{Re} - 3.28)^{-2}$ avec Re : le nombre de Reynolds déterminé selon 3.1 (-);
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 toutes les parties fonctionnelles f de la zone de ventilation z

Vu pour être annexé à l'arrêté ministériel portant modification et exécution des annexes XII et XIII 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 9 novembre 2017

La Ministre du Logement, de la Qualité de Vie, de l'Environnement et de l'Energie

C. FREMAULT