

ANNEXE

Modalités de prise en compte des systèmes de puits hydrauliques dans la réglementation thermique 2012

1. Définition du système

Le présent Titre V vise la prise en compte des systèmes de puits hydraulique à eau glycolée, en tant que système de prérefroidissement et/ou préchauffage de l'air neuf de la ventilation.

Un puits hydraulique consiste à utiliser l'énergie thermique du sol pour rafraîchir, en été, ou réchauffer en période de chauffage, l'air neuf qui sera insufflé dans le bâtiment. A la différence du puits climatique classique, où l'air neuf circule directement dans un ou des conduits enfouis dans le sol (échangeur sol/air), le puits hydraulique utilise l'eau glycolée comme fluide caloporteur intermédiaire. C'est alors ce dernier qui capte la fraîcheur/chaleur du sol en été/hiver (échangeur sol/eau) avant d'aller la restituer à l'air neuf entrant au travers d'une batterie d'échange eau/air.

Un puits hydraulique peut être associée aux différents types de centrale de ventilation suivant :

- Ventilation Mécanique Contrôlée Simple Flux par insufflation (VMC SF),
- Ventilation Mécanique Contrôlée Double Flux (VMC DF),
- Centrale de Traitement d'air à débit d'air constant (CTA DAC).

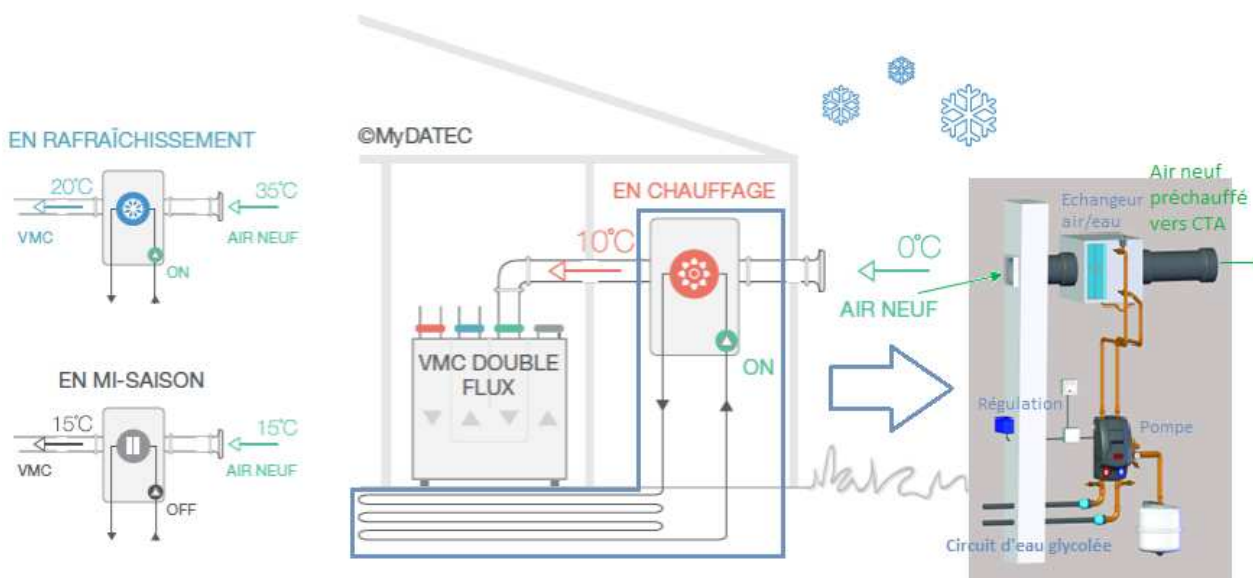


Figure 1 - Principe du puits hydraulique

La gestion/régulation du puits hydraulique se fait soit en fonction de la température extérieure uniquement, ou de la température extérieure et de la température d'eau en sortie du capteur enterré (en entrée de la batterie).

2. Champ d'application

Le puits hydraulique peut être déployé sur tout type de bâtiment, à l'exception des bâtiments qui ne sont pas équipés de VMC (simple ou double flux) puisque ce système doit absolument être relié à un système de ventilation mécanique. Suivant la liste indiquée dans la Méthode de calcul Th-BCE 2012, voici les types de bâtiment inclus dans le champ d'application :

- Bâtiment à usage d'habitation - maison individuelle ou accolée
- Bâtiment à usage d'habitation - logement collectif
- Bureaux
- Établissement d'accueil de la petite enfance (crèche, halte-garderie)
- Enseignement primaire
- Enseignement secondaire (partie jour)
- Enseignement secondaire (partie nuit)
- Enseignement - université
- Bâtiment à usage d'habitation - établissement sanitaire avec hébergement
- Bâtiment à usage d'habitation - foyer de jeunes travailleurs
- Bâtiment à usage d'habitation - cité universitaire
- Hôpital (partie jour)
- Hôpital (partie nuit)
- Hôtel 0 1* et 2* (partie jour)
- Hôtel 0 et 1* (partie nuit)
- Hôtel 2* (partie nuit)
- Hôtel 3*, 4* et 5* (partie jour)
- Hôtel 3* (partie nuit)
- Hôtel 4* et 5* (partie nuit)
- Restauration scolaire - 1 repas / jour, 5j/7
- Restauration - 1 repas / jour, 5j/7
- Restauration - 2 repas / jour, 6j/7
- Restauration - 2 repas / jour 7j/7
- Restauration scolaire - 3 repas / jour, 5j/7
- Restauration commerciale en continue (18h/j 7j/7)
- Tribunal

3. Méthode de prise en compte dans les calculs pour la partie non directement modélisable

3.1 GENERALITES

3.1.1 DESCRIPTION GENERALE DU MODELE

Le Titre V puits hydraulique est introduit sous la forme d'une **modification directe du moteur de calcul RT2012 version 8.1 (février 2019)**.

Du point de vue utilisateur final, le puits hydraulique est décrit au niveau de la zone, comme le puits climatique. Plusieurs systèmes de traitement d'air (VMC SF, VMC DF ou CTA DAC) peuvent être reliés à un puits hydraulique, au travers d'un paramètre d'index défini dans chaque centrale.

Le puits hydraulique est modélisé dans la même logique d'assemblage que celle du puits climatique, telle que décrite dans le chapitre 8.11 S1_BAT_Aassemblage_puits_climatique de la méthode Th-BCE. Le

modèle a été réécrit à partir de celui du puits hydraulique pour le confort d'été développé dans le cadre du label E+C- pour le mode de calcul Th-D.

Les modifications par rapport au modèle initial sont les suivantes :

- Ajout du calcul du puits hydraulique dans les modes Th-C (bâtiment climatisé et non-climatisé) et Th-E.
- Ajout du mode préchauffage du puits hydraulique,
- Modification des algorithmes de gestion - régulation pour correspondre au fonctionnement des produits des fabricants ayant participé au Titre V,
- Modification de la saisie des performances de la batterie eau/air, pour intégrer une valeur par défaut et pouvoir la saisir à partir des puissances.
- Correction du modèle physique pour éviter une modélisation sur deux pas de temps, source d'incohérences (modélisation du circuit d'eau au pas de temps h, puis de la batterie eau/air au pas de temps h+1, etc...).

La modélisation du puits hydraulique ne se fait plus qu'en une seule étape regroupant :

- la modélisation de l'ensemble du circuit d'eau glycolée, visant à fournir en sortie le débit ainsi que la température de l'eau à l'arrivée de l'échangeur air/eau.
- la modélisation de la batterie eau/air située en amont de la centrale de ventilation de manière à calculer la température d'air neuf préchauffée/pré-refroidie en entrée de la centrale.

A l'issue de cette modélisation, on intègre la prise en compte de la régulation du système ainsi que le calcul des consommations de la pompe.

3.1.2 HYPOTHESES ET CARACTERISTIQUES DU MODELE

La modélisation des échanges au niveau du sol reprend la plupart des hypothèses du modèle de puits climatique classique, et reste inchangée par rapport au modèle développée pour le mode Th-D. A savoir :

- Le sol est considéré homogène et non perturbé par les échanges thermiques air/sol ;
- La température de la surface extérieure du conduit enterré est identique à celle du sol ;
- Le conduit enterré est considéré cylindrique, droit, et horizontal ;
- Les échanges latents sont négligés ;
- Le sol est considéré comme une source thermique infinie.

En préalable à la simulation, si l'utilisateur choisit de saisir sa propre valeur d'efficacité pour l'échangeur, il lui faudra saisir les puissances échangées en mode chauffage et rafraîchissement pour permettre le calcul des efficacités associées.

D'une part, nous avons choisi de saisir une puissance de batterie plutôt qu'une efficacité puisqu'il est plus simple d'obtenir des informations sur les puissances de batterie. En effet, de manière générale, il est très courant de voir les industriels fournir des courbes de fonctionnement de batteries qui définissent des puissances en fonction d'un débit d'air/d'eau donné.

D'autre part, nous avons choisi de définir une efficacité d'échangeur par défaut de 65%. Cette valeur est issue d'échanges avec les fabricants et d'une analyse de leur documentation, qui annonce des valeurs d'efficacité systématiquement supérieures à 70%.

3.1.3 TRAITEMENT DE LA REGULATION

Pour la partie de régulation en fonction de la température extérieure, deux paramètres de températures de consigne permettent de décrire la régulation du puits hydraulique selon si l'on est en saison de chauffage (hiver) ou hors saison de chauffage (été).

1^{er} cas : période de chauffage

Durant la période de chauffage, la pompe du puits hydraulique est arrêtée s'il n'y a pas d'intérêt à passer à l'intérieur ou s'il y a un risque de surchauffe.

Deux conditions doivent être respectées simultanément pour activer le circulateur du puits hydraulique

- La température extérieure est inférieure à une température de consigne (contrôle de la température de l'air extérieur) ;
- Uniquement si le type de gestion est « Gestion du circulateur en fonction de la température extérieure et de la température d'eau en sortie du capteur enterré » : la température extérieure est inférieure à la température d'eau en sortie du puits hydraulique

Ceci permet de ne pas comptabiliser de consommation d'auxiliaire de pompe si la température d'eau arrivant à l'échangeur n'était pas en mesure d'assurer le préchauffage de l'air.

2^{ème} cas : hors de la période de chauffage

Hors de la période de chauffage, les règles de l'arrêt de la pompe associée au puits hydraulique prennent en compte les stratégies de free-cooling.

Deux conditions doivent être respectées simultanément pour activer le circulateur du puits hydraulique :

- La température extérieure est supérieure à une température de consigne (contrôle de la température de l'air extérieur) ;
- Uniquement si le type de gestion est « Gestion du circulateur en fonction de la température extérieure et de la température d'eau en sortie du capteur enterré » : la température extérieure est supérieure à la température d'eau en sortie du puits hydraulique

Ceci permet de ne pas comptabiliser de consommation d'auxiliaire de pompe si la température d'eau arrivant à l'échangeur n'était pas en mesure d'assurer le refroidissement de l'air.

Par ailleurs, certaines centrales de ventilation peuvent intégrer une fonction de surventilation d'été synchronisée avec l'activation du puits hydraulique. Dans ce cas, on applique des surdébits d'air (et des surconsommations de ventilateurs) dès lors que le puits hydraulique est actif.

La saisie des valeurs des débits et puissance de ventilateurs en surventilation d'été est mutualisée avec celles du mode surventilation nocturne tel que décrit au chapitre 8.12C_Ven_Fonctions de rafraichissement nocturne des systèmes de ventilation et des CTA de la méthode Th-BCE.

Pour décrire cette fonction, il convient de donner des valeurs à $q_{spec,rep,rafnoc}$ et $q_{spec,souf,rafnoc}$ au niveau des composants bouche-conduits ainsi qu'à $P_{vent_rafnoc_rep}$ et $P_{vent_rafnoc_souf}$ des composants ventilation mécanique connectés au puits hydraulique.

3.2 PRINCIPE

Un puits hydraulique consiste à utiliser l'énergie thermique du sol en été pour rafraîchir, ou réchauffer en période de chauffage, l'air neuf qui sera insufflé dans le bâtiment. A la différence du puits climatique classique, où l'air neuf circule directement dans un ou des conduits enfouis dans le sol (échangeur air/sol), le puits hydraulique utilise l'eau glycolée comme fluide caloporteur intermédiaire. C'est alors ce dernier qui capte la fraîcheur/chaleur du sol en été/hiver (échangeur eau/sol) avant d'aller la restituer à l'air neuf entrant au travers d'une batterie d'échange eau/air.

En période d'hiver, la centrale de ventilation couplée au puits hydraulique est maintenue au débit hygiénique, pour minimiser les déperditions thermiques par l'air. Le débit appliqué dans le calcul est le débit d'air neuf calculé selon la fiche 7.8 *C_Ven_Débits_d'air_(Cep)* de la méthode Th-BCE.

En période d'été, certaines centrales prévoient l'activation d'une fonction de surventilation d'été, synchronisée sur le fonctionnement du puits hydraulique. Dans ce cas, le débit appliqué dans le calcul est le débit de surventilation nocturne, tel qu'introduit dans le chapitre 8.12C *Ven_Fonctions de rafraichissement nocturne des systèmes de ventilation et des CTA* de la méthode Th-BCE. On réemploie ainsi les valeurs de débits de surventilation au niveau des composants bouche-conduits ($q_{spec,rep,rafnoc}$ et $q_{spec,souf,rafnoc}$), ainsi que les puissances de ventilateurs correspondantes saisies au niveau de la centrale de ventilation ($P_{vent_rafnoc_rep}$ et $P_{vent_rafnoc_souf}$).

A chaque pas de temps, la modélisation du puits hydraulique est séquentielle :

- On modélise tout d'abord le puits hydraulique en supposant qu'il est activé. On en déduit la température d'air neuf préchauffé ou pré-refroidie potentielle,
- On applique ensuite les conditions de fonctionnement de la gestion-régulation, dépendant de la température d'air neuf potentielle calculée plus haut.
- Enfin, selon l'état du puits hydraulique au pas de temps h , on calcule la température d'air préchauffée ou pré-refroidie effective, ainsi que les consommations d'auxiliaires (circulateurs du puits hydraulique, surconsommation des ventilateurs associée à la surventilation).

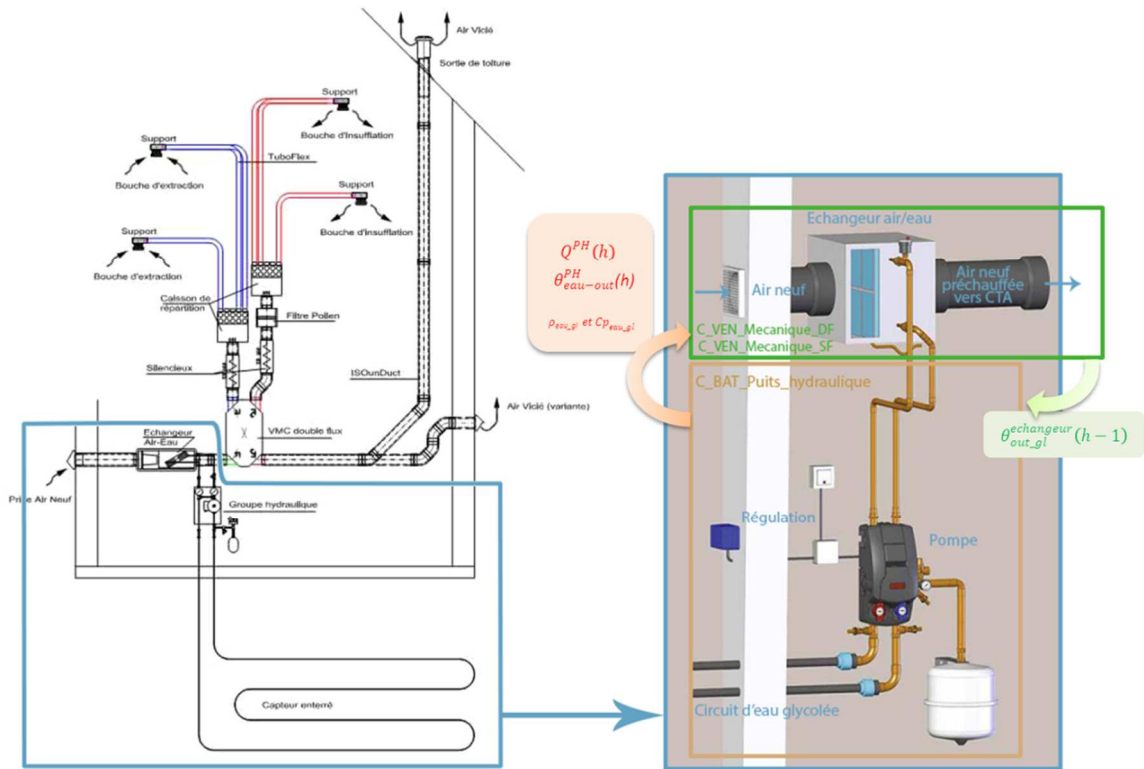


Figure 2 - Principe et modélisation du puits hydraulique

Le puits hydraulique est modélisé dans la même logique d'assemblage que celle du puits climatique, telle que décrite dans le chapitre 8.11 S1_BAT_Assemblage_puits_climatique de la méthode Th-BCE. Cependant, les aspects régulation sont traités directement dans la présente fiche.

3.3 NOMENCLATURE

Le **Tableau 1** donne la nomenclature des différentes variables du modèle de calcul. Dans toute la suite de la fiche, on notera h le pas de temps de simulation.

Entrées du composant

Nom	Description	Unité	Min	Max	Conv
$\theta_{ext}(h)$	Température extérieure au pas de temps h	°C			
$q_{m-AN-occ-cond}^s$	Débit massique d'air neuf de la centrale de ventilation en période d'occupation (incluant les débits de fuite réseau et le coefficient de dépassement des bouches)	kg/s			
$q_{m-sou-rafnoc-cond}^s$	Débit massique d'air neuf de la centrale de ventilation en période de surventilation (incluant les débits de fuite réseau et le coefficient de dépassement des bouches)	kg/s			

$q_{m-air-neuf}^S(h)$	Débit massique d'air neuf de la centrale de ventilation au pas de temps h	kg/s
$Aut, ch(j)$	Indicateur de saison de chauffage propre au puits hydraulique (1 : en saison de chauffage)	Ent
$Isconf_adapt(h)$	Indicateur de période de confort adaptatif 0 - hors période de confort adaptatif 1 - en période de confort adaptatif	-

Sorties du composant

Nom	Description	Unité
$\theta_{AN}^S(h)$	Température de l'air neuf en entrée de la centrale de ventilation S (en sortie du puits hydraulique)	°C
$W_{elec}^{PH,S}(h)$	Quantité d'énergie absorbée par le puits hydraulique et attribuée à la centrale de ventilation S	Wh
$i_{rafnoc,active}^S(h)$	Statut d'activation de la surventilation : 0 : désactivé, 1 : activé.	Ent

Paramètres intrinsèques du composant

Nom	Description	Unité			
$I_{hydraulique}$	Booléen indiquant le raccordement éventuel à un puits hydraulique pour chaque système de ventilation	Bool	Vrai	Faux	-
Q_{max}^{PH}	Débit maximum fourni par la pompe	m ³ /s	0	+ ∞	-
P_{max}^{PH}	Puissance nominale de la pompe	W	0	+ ∞	-
L_{puits}	Longueur du conduit hydraulique (Longueur d'échange sol/eau glycolée)	m	0	+ ∞	-
λ_{tube}	Conductivité thermique du conduit hydraulique	W/(m.K)	0	+ ∞	-
e_p	Epaisseur du conduit hydraulique	m	0	+ ∞	-
d_i	Diamètre intérieur du conduit hydraulique	m	0	+ ∞	-
$type_{gest_PH}$	Type de gestion du puits hydraulique et de sa pompe associée : 0. Gestion de la pompe en fonction de la température extérieure 1. Gestion du bypass en fonction de la température extérieure et de la température d'eau en sortie du capteur enterré	-	0	1	-
$type_{eff-échangeur}^S$	Type de valeur choisi pour définir l'efficacité de l'échangeur 0. Valeur par défaut 1. Valeur saisie par l'utilisateur Défini au niveau de la centrale de ventilation	-	0	1	-

d'indice s

Type_Surventilation _PH ^s	Présence d'une fonction de surventilation d'été associée au puits hydraulique : <i>0 : Pas de surventilation,</i> <i>1 : Surventilation d'été synchronisée avec le fonctionnement du puits hydraulique</i> <i>Si « type_{eff_échangeur} » = 0 (valeur par défaut) :</i>	-	0	1	-
ε _{batt_défaut}	Efficacité en accord avec un valeur par défaut de l'échangeur air/eau glycolée du puits hydraulique pour une représentation simplifiée <i>Si « type_{eff_échangeur} » = 1 (valeur saisie par l'utilisateur) :</i>	ad	0	1	0.65
P _{ch} ^s	Puissance de la batterie en préchauffage pour un air neuf à -10°C et une température d'eau entrant dans la batterie de 10°C, aux débits nominaux d'air et d'eau. Définie au niveau de la centrale de ventilation d'indice s. <i>Si « type_{eff_échangeur} » = 1 (valeur saisie par l'utilisateur) :</i>	kW	0	+ ∞	
P _{fr} ^s	Puissance de la batterie en pré-refroidissement pour un air neuf à 30°C et une température d'eau entrant dans la batterie de 10°C, aux débits nominaux d'air et d'eau du projet. Définie au niveau de la centrale de ventilation d'indice s.	kW	0	+ ∞	

Paramètres d'intégration du composant

	Nom	Description	Unité			
Puits hydraulique	Z	Profondeur d'enfouissement des conduits du puits hydraulique	m	0	+ ∞	-
	θ _{ext,arrêt_PHhiver}	Température extérieure de consigne au-dessus de laquelle la pompe du puits hydraulique peut être arrêtée en période de chauffage	°C	0	+ ∞	-
	θ _{ext,arrêt_PHété}	Température extérieure de consigne au-dessus de laquelle la pompe du puits hydraulique peut être arrêtée hors période de chauffage	°C	0	+ ∞	-

Variables internes

	Nom	Description	Unité			
	θ _{eau-in-PH} (h)	Température d'eau en entrée du puits hydraulique	°C			
	θ _{eau-out-PH} (h)	Température de l'eau glycolée après passage dans le puits hydraulique (= température d'entrée échangeur)	°C			
	θ _{eau-out-batt} (h)	Température de l'eau glycolée en sortie de la batterie eau/air associée au puits hydraulique	°C			
	W _{elec} ^{PH} (h)	Quantité d'énergie absorbée par la pompe du puits hydraulique au pas de temps h	Wh			

$\theta_G(h)$	Température du sol	°C
$Q^{PH}(h)$	Débit d'eau glycolée dans le puits hydraulique	m ³ /h
$\theta_{air,out_batt_ch}^S$ $\theta_{air,out_batt_fr}^S$	Température d'air en sortie de la batterie eau/air dans les conditions nominales de débits et de températures d'entrée d'air/d'eau, pour la centrale de ventilation S	°C
$\varepsilon_{batt_ch}^S$ $\varepsilon_{batt_fr}^S$	Efficacité de la batterie air/eau glycolée du puits hydraulique calculée à l'aide des puissances de batterie, en mode préchauffage ou pré-refroidissement de l'air, pour la centrale de ventilation S	-
$q_{m-AN-hiv}^S$ $q_{m-AN-ete}^S$	Débit massique d'air neuf de référence de la centrale de ventilation S lors de l'activation du puits hydraulique, en saison de chauffe et hors saison de chauffe	kg/s
$\varepsilon_{soleau}(h)$	Efficacité équivalente de l'échangeur sol/eau constituant le puits hydraulique	-
$q_{mair-neuf}(h)$	Débit d'air neuf total circulant dans l'ensemble des batteries eau/air	kg/s
$DC_{airneuf}(h)$ $DC_{eau gly}(h)$	Débits calorifiques d'air et d'eau glycolée de part et d'autre de l'ensemble constitué par les batteries eau/air	W/K
$Rdc(h)$	Ratio des débits calorifiques de l'ensemble constitué par les batteries eau/air	-
$\varepsilon_{batt}(h)$	Efficacité équivalente moyenne des batteries eau/air au pas de temps h	-
U_g	Coefficient d'échange global entre l'eau glycolée et le sol (dépend du type de tube)	W/(m. K)
h_i	Coefficient de surface interne entre l'eau glycolée et la face intérieure du conduit (échange par convection)	W/(m. K)
AH	Facteur de correction de l'amplitude pour la température du sol	-
VS	Déphasage de la température du sol par rapport à la température extérieure	h
gm	Coefficient de correction de la température du sol en fonction de la nature du sol	-
θ_{am}	Température extérieure moyenne annuelle	
$\Delta\theta_a$	Amplitude de la variation annuelle de la température	
JH	Heure annuelle	h

$C_{air_neuf_total}$	Débit total capacitif de l'air neuf avant distribution aux différents systèmes desservis par le puits hydraulique	W/K
C_{eau_PH}	Débit capacitif de l'eau glycolée du puits hydraulique	W/K
C_{PH}	Rapport du débit capacitif minimal au débit maximal des deux fluides de l'échangeur air/eau glycolée du puits hydraulique	-

Constantes

Nom	Description	Unité	
ρ_{eau_gl}	Masse volumique de l'eau glycolée	kg/m ³	1040
λ_{eau_gl}	Conductivité thermique de l'eau glycolée	W/(m.K)	0.49 6
μ_{eau_gl}	Viscosité dynamique de l'eau glycolée	kg/(m.s)	1.51 6.10 ⁻³
Cp_{eau_gl}	Capacité calorifique massique de l'eau glycolée	J/(kg.K)	3751
Cp_{air}	Capacité calorifique massique de l'air	J/(kg.K)	1004
$Coef_{cp(i), i=10 \text{ à } 60}$	Matrice des coefficients d'énergie primaire associés aux différents types d'énergie.	Réel	-

Tableau 1 : Nomenclature du modèle

3.4 DESCRIPTION ALGORITHMIQUE ET MATHÉMATIQUE

3.4.1 HYPOTHESES ET CARACTERISTIQUES DU MODELE

Le puits climatique est décrit au niveau de la zone. Il peut être relié à plusieurs systèmes de traitement d'air.

La modélisation des échanges au niveau du sol reprend la plupart des hypothèses du modèle de puits climatique classique. A savoir :

- Le sol est considéré homogène et non perturbé par les échanges thermiques air/sol ;
- La température de la surface extérieure du conduit enterré est identique à celle du sol ;
- Le conduit enterré est considéré cylindrique, droit, et horizontal ;
- Les échanges latents sont négligés ;
- Le sol est considéré comme une source thermique infinie.

En préalable à la simulation, si « $type_{eff_échangeur}$ » = 1, on calcule l'efficacité de la batterie eau/air de chaque centrale de ventilation S à partir des puissances thermiques déclarées.

Pour le fonctionnement en mode préchauffage, le débit d'air neuf de référence est le débit d'air neuf en occupation total :

$$q_{m-AN-hiv}^S = q_{m-AN-occ}^S \quad (1)$$

$$\theta_{air-out-batt_ch}^S = -10^\circ C + \frac{1000 \cdot P_{ch}^S}{Cp_{air} \cdot q_{m-AN-hiv}^S} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{batt_ch}^S = \frac{\theta_{air-out-batt_ch}^S - (-10^\circ C)}{10^\circ C - (-10^\circ C)} \quad (3)$$

Pour le fonctionnement en mode prérefroidissement,

Si la centrale de traitement d'air S dispose d'une fonction de surventilation d'été synchronisée avec le fonctionnement du puits hydraulique ($Type_Surventilation_PH^S = 1$), alors le débit d'air neuf de référence est le débit de surventilation :

$$q_{m-AN-ete}^S = q_{m-sou-rafnoc-cond}^S \quad (4)$$

Sinon, ($Type_Surventilation_PH^S = 0$), il s'agit du débit d'air neuf en occupation :

$$q_{m-AN-ete}^S = q_{m-AN-occ-cond}^S \quad (5)$$

On en déduit l'efficacité de la batterie :

$$\theta_{air-out-batt_fr}^S = 30^\circ C - \frac{1000 \cdot P_{fr}^S}{Cp_{air} \cdot q_{m-AN-ete}^S} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{batt_fr}^S = \frac{30^\circ C - \theta_{air-out-batt_fr}^S}{30^\circ C - 10^\circ C} \quad (7)$$

Si $\varepsilon_{batt_ch}^S$ ou $\varepsilon_{batt_fr}^S$ sont supérieurs à 1 à l'issue de ce calcul, un message d'erreur est renvoyé à l'utilisateur pour lui signaler que les puissances de batteries eau/air saisies sont supérieures à la puissance maximale physiquement admissible au débit de ventilation renseigné.

Cependant, si « **type_{eff_échangeur}** » = 0, on attribue la valeur par défaut « **$\varepsilon_{batt_défaut}$** » à l'efficacité de la batterie air/eau comme suit :

$$\varepsilon_{batt_ch}^S = \varepsilon_{batt_fr}^S = \varepsilon_{batt_défaut} (= 0.65 \text{ par convention}) \quad (8)$$

3.4.2 TEMPERATURE DU SOL AU NIVEAU DU CONDUIT ENTERRE

Le calcul de la température du sol ne dépend pas du type de puits climatique (air ou hydraulique) mais de la nature du sol et de la profondeur d'enfouissement du conduit d'eau glycolée (Z). Le calcul est donc identique à celui présent dans la fiche algorithmique existante du puits climatique.

La température du sol dépend de la température moyenne annuelle d'air extérieur (θ_{am}), de l'amplitude annuelle de la température d'air neuf ($\Delta\theta_a$), de la nature du sol et de la profondeur d'enfouissement du conduit (Z).

Etant donné que les variations de températures dans le sol sont moins importantes qu'à la surface, la température de l'air neuf est corrigée par les coefficients AH, VS et gm. Ainsi, la température du sol est modélisée sous la forme d'une courbe sinusoïdale.

Avec :

$$AH = \max (1 - 0,1993 \cdot Z + 0,01381 \cdot Z^2 - 0,000335 \cdot Z^3; 0) \quad (9)$$

$$VS = 24 \times (0.1786 + 10.298 \times Z - 1.0156 \times Z^2 + 0.3385 \times Z^3 - 0.0195 \times Z^4) \quad (10)$$

Où AH représente l'amplitude et VS la dérive de la courbe.

Finalement, la température du sol à une profondeur Z, est déterminée suivant la formule :

$$\theta_G = gm \cdot \left(\theta_{AM} - AH \cdot \Delta\theta_A \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi}{8760} \times [JH - VS + 24 \cdot 25] \right) \right) \quad (11)$$

θ_{AM} est la moyenne des moyennes mensuelles.

$\Delta\theta_A$ = (La moyenne mensuelle maximale- la moyenne mensuelle minimale)/2.

Les valeurs par défaut pour le coefficient gm sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Type_sol _{pc}	Conductivité (W/mK)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité (J/kgK)	Facteur correctif gm
0-Sol humide	1,5	1400	1400	1,00
1-Sable sec	0,7	1500	920	0,90
2-Sable humide	1,88	1500	1200	0,98
3-Argile humide	1,45	1800	1340	1,04
4-Argile mouillée	2,9	1800	1590	1,05

Tableau 2 : Propositions de gm pour différents types de sol

3.4.3 TEMPERATURE D'EAU GLYCOLEE EN SORTIE DU PUITTS HYDRAULIQUE

La température de l'eau glycolée attendue en entrée et en sortie du puits climatique est calculée **à tous les pas de temps** que le puits fonctionne ou non.

La première étape consiste à calculer l'efficacité moyenne équivalente de l'ensemble des batteries eau/air connectées au puits $\varepsilon_{batt}(h)$. Pour cela, on calcule le débit d'air neuf total circulant dans l'ensemble des batteries, $qm_{air,neuf}(h)$.

En saison de chauffage ($Aut_{ch} = 1$), $qm_{air,neuf}(h)$ est le débit d'air d'hygiène total de l'ensemble des systèmes de ventilation « s » :

$$qm_{air-neuf}(h) = \sum_S qm_{air-neuf}^S(h) \quad (12)$$

Hors saison de chauffage, la centrale de ventilation peut posséder une fonction de surventilation synchronisée avec l'activation du circulateur du puits hydraulique ($Type_Surventilation_PH^S = 1$). Si tel est le cas, le débit d'air neuf est alors pris égal au débit en mode surventilation de la centrale :

$$qm_{air-neuf}(h) = \sum_S qm_{sou-rafnoc-cond}^S \quad (13)$$

$qm_{sou-rafnoc-cond}^S$ est le débit total soufflé par la centrale de ventilation en mode surventilation, intégrant la correction associée aux infiltrations d'air au travers des conduits, défini à partir du chapitre *C_Ven_Fonctions de rafraichissement nocturne des systèmes de ventilation et des CTA* de la méthode Th-BCE.

Le ratio des débits calorifiques de l'échange de chaleur, $Rdc(h)$, est calculé comme suit :

$$DC_{airneuf}(h) = qm_{air-neuf}(h) \cdot Cp_{air} \quad (14)$$

$$DC_{eaugly}(h) = \frac{Q_{MAX}^{PH} \cdot \rho_{eau_gl} \cdot Cp_{eau_gl}}{3600} \quad (15)$$

$$Rdc(h) = \frac{MIN(DC_{airneuf}(h); DC_{eaugly}(h))}{MAX(DC_{airneuf}(h); DC_{eaugly}(h))} \quad (16)$$

Enfin, l'efficacité moyenne équivalente des batteries est :

$$\varepsilon_{batt}(h) = \frac{\sum_S (qm_{air-neuf}^S(h) \cdot \varepsilon_{batt}^S(h))}{qm_{air-neuf}(h)} \cdot Rdc(h) \quad (17)$$

Avec ε_{batt}^S les efficacités des batteries eau/air de chacune des centrales de ventilation d'indice S, en fonction de la saison au pas de temps h :

$$\text{En saison de chauffage } (Aut_{ch}(h) = 1) : \varepsilon_{batt}^S(h) = \varepsilon_{batt,ch}^S \quad (18)$$

$$\text{Hors saison de chauffage } (Aut_{ch}(h) < 1) : \varepsilon_{batt}^S(h) = \varepsilon_{batt,fr}^S$$

On utilise les relations suivantes basées sur l'équilibre thermique de la boucle d'eau glycolée :

L'équilibre thermique entre la boucle d'eau et le sol s'écrit :

$$\theta_{eau-out-PH}(h) = \theta_{eau-in-PH}(h) + \varepsilon_{soleau}(h) \cdot (\theta_g(h) - \theta_{eau-in-PH}(h)) \quad (19)$$

L'équilibre thermique entre la boucle d'eau et l'air neuf (via la batterie air-eau) s'écrit :

$$\theta_{eau-in-PH}(h) = \theta_{eau-out-PH}(h) + \varepsilon_{batt}(h) \cdot (\theta_{ext}(h) - \theta_{eau-out-PH}(h)) \quad (20)$$

Ainsi, en injectant l'équation (19) dans la nouvelle équation et en factorisant par le terme « $\theta_{eau-in-PH}(h)$ », on obtient l'équation suivante :

$$\theta_{eau-in-PH}(h) = \frac{(\varepsilon_{soleau}(h) - \varepsilon_{batt}(h) \cdot \varepsilon_{soleau}(h)) \cdot \theta_g(h) + \varepsilon_{batt}(h) \cdot \theta_{ext}(h)}{\varepsilon_{soleau}(h) + \varepsilon_{batt}(h) - \varepsilon_{batt}(h) \cdot \varepsilon_{soleau}(h)} \quad (21)$$

Avec $\varepsilon_{soleau}(h)$ l'efficacité équivalente du capteur enterré :

$$\varepsilon_{soleau}(h) = 1 - \exp\left[\frac{-3600 \cdot U_g \cdot L_{puits}}{Q_{MAX}^{PH} \cdot \rho_{eau_gl} \cdot Cp_{eau_gl}}\right] \quad (22)$$

$$U_g(h) = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{tube}} \ln\left(\frac{d_i + 2 \cdot e_p}{d_i}\right) + \frac{1}{\pi \cdot d_i \cdot h_i(h)}} \quad (23)$$

La circulation de l'eau glycolée dans le puits hydraulique est forcée et généralement turbulente ($Re > 2300$). On considère donc le régime turbulent établi dans le tube. On évalue alors h_i avec la formule de Colburn pour un fluide en refroidissement ou en échauffement selon la saison de fonctionnement (l'eau glycolée se refroidit ou se réchauffe en passant dans le sol après s'être échauffée ou refroidie au contact de l'échangeur air/eau):

$$h_i(h) = 0.023 \times \frac{\lambda_{eau_gl}}{d_i} \times \left[\frac{\rho_{eau_gl} \cdot \frac{4 \cdot Q_{MAX}^{PH}}{3600 \cdot \pi \cdot d_i}}{\mu_{eau_gl}}\right]^{0.8} \cdot \left[\frac{\mu_{eau_gl} \cdot Cp_{eau_gl}}{\lambda_{eau_gl}}\right]^{0.30} \quad (24)$$

Les caractéristiques de l'eau glycolée sont prises pour un mélange à 25% de glycol.

3.4.4 GESTION/REGULATION DU Puits HYDRAULIQUE

La gestion/régulation du puits hydraulique se fait soit en fonction de la température extérieure θ_{ext} uniquement, ou de la température extérieure et de la température d'eau en sortie du capteurs enterrée (en entrée de la batterie).

Pour la partie de régulation en fonction de la température extérieure, deux paramètres de températures de consigne, $\theta_{ext,arrêt_PH_{hiver}}$ et $\theta_{ext,arrêt_PH_{été}}$, permettent de décrire la régulation du puits hydraulique selon la distinction « saison de chauffage » (hiver) ou « hors saison de chauffage » (été).

Voici ci-dessous le fonctionnement de la régulation basée sur le contrôle de la température extérieure :

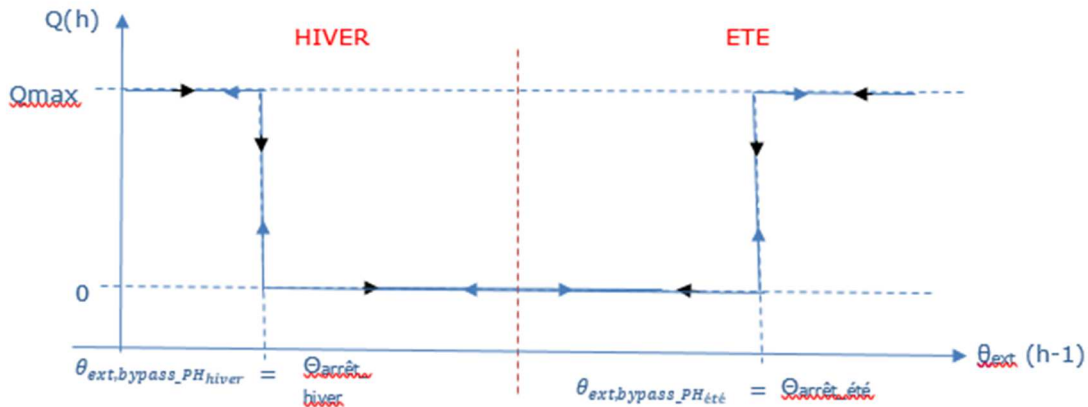


Figure 2 - Débit d'eau glycolée dans le puits hydraulique en fonction de la température moyenne du bâtiment au pas de temps précédent dans le cas d'une pompe à débit constant.

1^{er} cas : période de chauffage

Durant la période de chauffage ($Aut_ch(h) = 1$), la pompe du puits hydraulique est arrêtée s'il n'y a pas d'intérêt à passer à l'intérieur ou s'il y a un risque de surchauffe.

Deux conditions doivent être respectées simultanément pour passer dans le puits hydraulique

- La température extérieure est inférieure à une température de consigne, notée $\theta_{ext,arrêt_PH_hiver}$ (contrôle de la température de l'air extérieur) ;
- Uniquement si le type de gestion est « Gestion du circulateur en fonction de la température extérieure et de la température d'eau en sortie du capteur enterré » : la température extérieure est inférieure à la température d'eau en sortie du puits hydraulique, notée $\theta_{eau-out-PH}(h)$;

Soit sous forme d'algorithme :

$$\text{Si } \theta_{ext}(h) < \theta_{ext,arrêt_PH_hiver} \text{ et si } [type_{gest_PH} = 0 \text{ OU } \theta_{ext}(h) < \theta_{eau-out-PH}(h)] \text{ alors,} \\ Q^{PH}(h) = Q_{MAX}^{PH} \quad (25)$$

Sinon

$$Q^{PH}(h) = 0$$

Ceci permettant de ne pas faire de consommation d'auxiliaire de pompe si la température d'eau arrivant à l'échangeur n'était pas en mesure d'assurer le préchauffage de l'air.

2^{ème} cas : hors de la période de chauffage

Hors de la période de chauffage ($Aut_ch(h) < 1$), les règles de l'arrêt de la pompe associée au puits hydraulique prennent en compte les stratégies de free-cooling.

Deux conditions doivent être respectées simultanément pour passer dans le puits hydraulique :

- La température extérieure est supérieure à une température de consigne, notée $\theta_{ext,arrêt_PH_été}$ (contrôle de la température de l'air extérieur) ;

- Uniquement si le type de gestion est « Gestion du circulateur en fonction de la température extérieure et de la température d'eau en sortie du capteur enterré » : la température extérieure est supérieure à la température d'eau en sortie du puits hydraulique, notée $\theta_{eau-out-PH}(h)$,

Soit sous forme d'algorithme :

$$\text{Si } \theta_{ext}(h) > \theta_{ext,arrêt_PHhiver} \text{ et si } [type_{gest_PH} = 0 \text{ OU } \theta_{ext}(h) > \theta_{eau-out-PH}(h)], \text{ alors,} \\ Q^{PH}(h) = Q_{MAX}^{PH} \quad (26)$$

$$\text{Sinon} \\ Q^{PH}(h) = 0$$

Ensuite, pour chaque centrale de ventilation S connectée au puits hydraulique possédant une fonction de surventilation d'été synchronisée avec l'activation du puits (Type_Surventilation_PH^S = 1), on décrète la surventilation si on se trouve hors période de chauffage et que le puits hydraulique est activé :

$$\text{Si } Aut_ch(h) < 1 \text{ et } Q^{PH}(h) > 0, \text{ alors,} \\ i_{rafnoc,active}^S(h) = 1 \quad (27)$$

$$\text{Sinon} \\ i_{rafnoc,active}^S(h) = 0$$

3.4.5 CALCUL DE LA TEMPERATURE D'AIR NEUF

Pour chaque système de ventilation mécanique « s » connecté (simple flux par insufflation ou double flux), à l'issue du calcul de la température d'eau de sortie d'eau du puits hydraulique, on calcule la température d'air neuf corrigée $\theta_{air-out-PH}(h)$.

Si $Q^{PH}(h) > 0$, alors le puits hydraulique est en fonctionnement et l'air entrant passe par la batterie eau-air. Pour chaque centrale de ventilation, la température d'air en sortie du puits hydraulique est alors définie par :

$$\theta_{AN}(h)^S = \theta_{ext}(h) + \varepsilon_{batt}^S \cdot (\theta_{eau-out-PH}(h) - \theta_{ext}(h)) \quad (28)$$

3.4.6 CALCUL DE LA CONSOMMATION DU PUIITS HYDRAULIQUE

A chaque pas de temps h, la quantité d'énergie électrique consommée par la pompe du puits hydraulique est calculée comme suit :

Si $Q^{PH}(h) > 0$:

$$W_{elec}^{PH}(h) = P_{max}^{PH} \quad (29)$$

A chaque pas de temps, la puissance absorbée par le puits hydraulique est répartie dans chaque centrale de ventilation S au prorata des débits d'air neuf du pas de temps en cours :

$$W_{elec}^{PH,S}(h) = W_{elec}^{PH}(h) \cdot \frac{qm_{air-neuf}^S(h)}{\sum_S qm_{air-neuf}^S(h)} \quad (30)$$

La consommation de circulateur du puits hydraulique est ainsi comptabilisée dans la consommation **des auxiliaires de ventilation**.

Par ailleurs, si la centrale de ventilation S connectée au puits hydraulique possède une fonction de surventilation d'été synchronisée avec l'activation du circulateur du puits hydraulique ($\text{Type_Surventilation_PH}^S = 1$), les consommations de ventilateurs basculent sur les consommations en mode surventilation dès lors que $i_{rafnoc,active}^S(h) = 1$.