

ÉNERGIE, CLIMAT

MINISTÈRE DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES

Arrêté du 7 mars 2018 relatif à l'agrément des modalités de prise en compte du système de « pompes à chaleur sur boucle d'eau avec récupération d'énergie » dans la réglementation thermique 2012 (JORF n° 0063 du 16 mars 2018)

NOR : TERL1803174A

Publics concernés : maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, constructeurs et promoteurs, architectes, bureaux d'études thermiques, contrôleurs techniques, diagnostiqueurs, organismes de certification, entreprises du bâtiment, industriels des matériaux de construction et des systèmes techniques du bâtiment, fournisseurs d'énergie.

Objet : prise en compte du système de « pompes à chaleur sur boucle d'eau avec récupération d'énergie » dans la réglementation thermique (procédure dite « Titre V »).

Entrée en vigueur : les dispositions prises par cet arrêté sont applicables à compter du lendemain de la date de publication.

Références : le présent arrêté peut être consulté sur le site Légifrance (<http://www.legifrance.gouv.fr>).

Le ministre d'Etat, ministre de la transition écologique et solidaire, et le ministre de la cohésion des territoires,

Vu la directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil en date du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments (refonte);

Vu le code de la construction et de l'habitation, notamment ses articles L. 111-9 et R. 111-20;

Vu l'arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments;

Vu l'arrêté du 28 décembre 2012 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments autres que ceux concernés par l'article 2 du décret du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions;

Vu l'arrêté du 30 avril 2013 portant approbation de la méthode de calcul Th-B-C-E prévue aux articles 4, 5 et 6 de l'arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments;

Vu l'arrêté du 11 décembre 2014 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique applicables aux bâtiments nouveaux et aux parties nouvelles de bâtiment de petite surface et diverses simplifications;

Vu l'arrêté du 19 décembre 2014 modifiant les modalités de validation d'une démarche qualité pour le contrôle de l'étanchéité à l'air par un constructeur de maisons individuelles ou de logements collectifs et relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique applicables aux bâtiments collectifs nouveaux et aux parties nouvelles de bâtiment collectif,

Arrêtent:

Art. 1^{er}. – Conformément à l'article 50 de l'arrêté du 26 octobre 2010 susvisé et à l'article 40 de l'arrêté du 28 décembre 2012 susvisé, le mode de prise en compte du système de « pompes à chaleur sur boucle d'eau avec récupération d'énergie » dans la méthode de calcul Th-B-C-E 2012, définie par l'arrêté du 30 avril 2013 susvisé, est agréé selon les conditions d'application définies en annexe (1) du présent arrêté.

Art. 2. – Le directeur de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages et le directeur général de l'énergie et du climat sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent arrêté, qui sera publié au *Journal officiel* de la République française.

Fait le 7 mars 2018.

Le ministre de la cohésion des territoires,
Pour le ministre et par délégation :
*Le sous-directeur de la qualité
et du développement durable
dans la construction,*
E. ACCHIARDI

*Le ministre d'État,
ministre de la transition écologique
et solidaire,*

Pour le ministre d'État et par délégation :

*Le sous-directeur de la qualité
et du développement durable
dans la construction,*
E. ACCHIARDI

*Le directeur général
de l'énergie et du climat,*
L. MICHEL

ANNEXE

MODALITÉS DE PRISE EN COMPTE DU SYSTÈME DE « POMPES À CHALEUR SUR BOUCLE D'EAU AVEC RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE » DANS LA RÉGLEMENTATION THERMIQUE 2012

1. Définition du système

Le système de « pompes à chaleur sur boucle d'eau avec récupération d'énergie » est composé de pompes à chaleur (PAC) sur boucle d'eau monobloc à installation intérieure, à refroidissement par eau et production de chaleur sur air recyclé, ainsi que d'une boucle d'eau. Elles sont implantées dans des locaux avec des besoins thermiques différents, et reliées par un circuit d'eau fermé qui circule dans l'ensemble du bâtiment. Dans le cadre du présent arrêté, une PAC sur boucle d'eau avec récupération d'énergie ne peut desservir qu'un seul bâtiment.

Le présent arrêté ne s'applique qu'aux PAC sur boucle d'eau de France Energie.

Cette boucle d'eau équilibre en permanence les charges thermiques ou frigorifiques du bâtiment. Ainsi, le système compense les déséquilibres des locaux à besoins thermiques très différents en fonction de leur orientation (façades nord/sud), locaux aveugles, locaux informatiques, salles de réunions, halls d'entrée.

La boucle d'eau permet également de récupérer de l'énergie sur trois types de récupérateurs :

- récupérateur sur l'air extrait
- récupérateur sur les eaux usées
- récupérateur sur le sol

Au minimum un de ces trois types de récupération doit être présent sur la boucle.

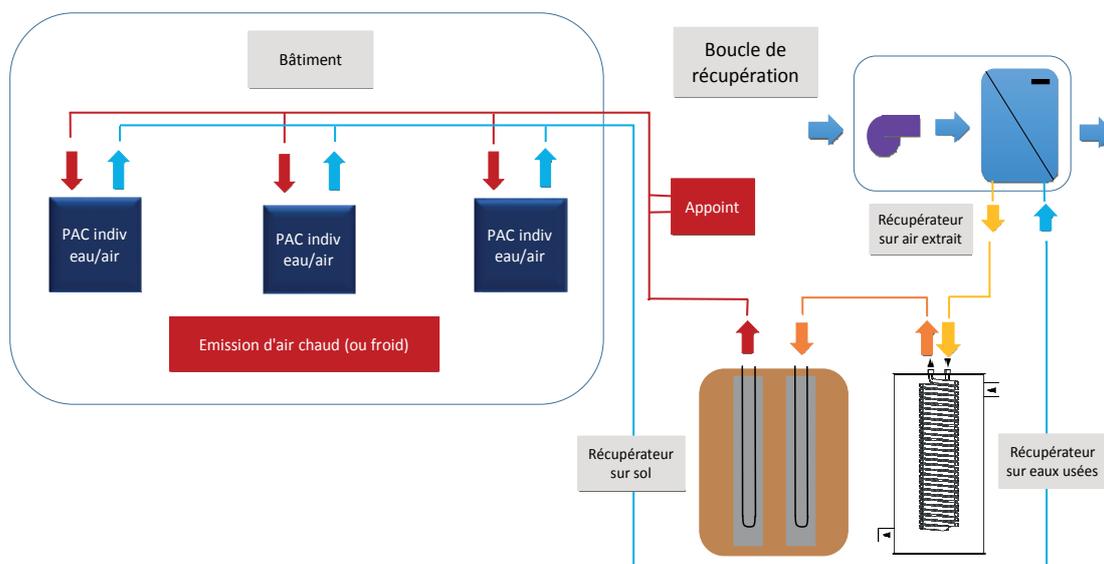


Figure 1 : PAC sur boucle d'eau avec récupération d'énergie en mode de fonctionnement hiver

Un ou plusieurs générateurs d'appoint complémentaires peuvent refroidir ou réchauffer la boucle après les systèmes de récupération, lorsque ceux-ci ne peuvent fournir l'énergie nécessaire pour équilibrer la boucle.

2. Champ d'application

Le système de « PAC sur boucle d'eau avec récupération d'énergie » peut être appliqué à tout type de bâtiment.

Le présent arrêté ne s'applique qu'aux systèmes de « PAC sur boucle d'eau avec récupération d'énergie » desservant un seul bâtiment.

Le présent arrêté ne peut s'appliquer pour un bâtiment comportant une ventilation double flux ou un autre système récupérant de l'énergie sur l'air extrait, dès lors que le récupérateur sur air extrait de la boucle de récupération est présent. Il ne peut s'appliquer pour un bâtiment comportant un système récupérant de l'énergie sur les eaux grises ou sur eaux usées, dès lors que le récupérateur sur eaux usées de la boucle de récupération est présent.

Pour l'application du présent arrêté, la cuve de récupération des eaux usées, lorsque présente, doit se trouver en volume chauffé.

Le refroidissement complémentaire peut être assuré par une tour de refroidissement modélisée dans l'extension dynamique à partir de la méthode Th-BCE. Il peut aussi être assuré par tous les autres générateurs de froid de la méthode Th-BCE dont le fluide aval est de l'eau :

- PAC à compression électrique eau/eau, PAC à compression électrique air/eau, PAC à compression électrique eau de nappe/eau : id type = 503
- PAC à absorption gaz, air/eau ou eau/eau : id type = 504
- Thermofrigopompe : id type = 508
- Réseau de froid : id type = 601
- Tout système générateur de froid intégré en tant que Titre V dont le fluide aval est l'eau

Le chauffage complémentaire de la boucle peut être assuré par tous les générateurs de chaleur de la méthode Th-BCE dont l'id type est différent de 507 et dont le fluide aval est de l'eau :

- Chaudière standard au gaz : id type = 100
- Chaudière basse température au gaz : id type = 10
- Chaudière à condensation au gaz : id type = 102
- Chaudière standard au fioul : id type = 200
- Chaudière à condensation au fioul : id type = 201
- Chaudière au bois : id type = 400
- PAC à compression électrique eau/eau, PAC à compression électrique air/eau, PAC à compression électrique eau de nappe/eau : id type = 503
- PAC à absorption gaz, air/eau ou eau/eau : id type = 504
- Thermofrigopompe : id type = 508
- Réseau de chaleur : id type = 600
- Système de cogénération : id type = 700
- Tout système générateur de chaud intégré en tant que Titre V dont le fluide aval est de l'eau

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

La prise en compte du système est décrite en quatre parties :

- la description de la boucle de récupération ;
- la description de la récupération sur air extrait ;
- la description de la récupération sur eaux usées ;
- la description de la récupération sur le sol.

Boucle de récupération :

Les apports de chaleur ou de froid dus au fonctionnement des PAC sont cumulés sur la boucle au pas horaire. En fonction du bilan, un apport complémentaire de chaleur ou de froid est réalisé sur la boucle (cf. paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE). Cet apport est effectué prioritairement par les systèmes de récupération.

Un premier bilan sur les PAC est effectué par le moteur de calcul pour déterminer l'ensemble des rejets chaud et froid effectués sur la boucle à chaque pas de temps. Ces rejets chaud et froid sur la boucle constituent les appels de chauffage et de refroidissement à couvrir.

Sont modélisés les récupérateurs suivant :

- Récupérateur sur air extrait ;
- Récupérateur sur eaux usées ;
- Récupérateur sur sol.

Pour chaque récupérateur, l'apport d'énergie disponible est calculé au pas horaire. En fonction de la demande d'énergie sur la boucle, l'énergie disponible est utilisée pour couvrir la demande. Lorsqu'il n'y a pas de demande de la part de la boucle, les apports disponibles au niveau des récupérateurs sont reportés au pas de temps suivant, dans la limite où la température de la boucle ne sort pas des températures limites de fonctionnement fixées dans le présent arrêté à 12°C minimum et 48°C maximum.

De plus, pour prendre en compte l'inertie et le volume d'eau de la boucle avec éventuellement un stockage tampon, des apports potentiels d'énergie sont pris en compte en chaud et en froid.

Pour finir, les apports d'énergie restant à apporter par les systèmes d'appoint complémentaires sont déterminés.

Les détails de cette régulation sont décrits aux paragraphes 3.1.5 et 3.1.6.

Récupérateur sur air extrait :

La partie [3.2](#) décrit les calculs de la température de sortie de la boucle de récupération, et de la puissance récupérée par cette boucle, après passage dans l'échangeur sur air extrait.

Les caractéristiques de l'air et de l'eau peuvent être déterminées en utilisant la relation liant l'efficacité de l'échangeur et son nombre d'unités de transfert.

Les données d'entrée de cette fiche sont :

- Le débit et la température de l'eau de la boucle de récupération entrant dans l'échangeur à chaque pas de temps

- Le débit, la température et l'humidité relative de l'air extrait entrant dans l'échangeur, à chaque pas de temps

Les paramètres intrinsèques à saisir sont :

- La puissance de référence échangée au niveau de la batterie
- La température de référence de l'eau à l'entrée
- La température de référence de l'eau à la sortie
- La température de référence de l'air extrait à l'entrée
- La température de référence de l'air extrait à la sortie
- Le débit d'air humide de référence.

Récupérateur sur eaux usées :

La partie [3.3](#) décrit les calculs qui permettent de déterminer la température de sortie de la boucle de récupération après passage dans l'échangeur noyé de la cuve de récupération des eaux usées.

Les données d'entrée de cette fiche sont :

- Le débit et la température des eaux grises entrant dans la cuve de récupération à chaque pas de temps
- Le débit et la température de l'eau de la boucle de récupération entrant dans l'échangeur noyé à chaque pas de temps.

Les paramètres intrinsèques à saisir sont :

- Les caractéristiques de la ou des cuves de récupération des eaux usées (nombre, volume, coefficient de pertes)
- Les caractéristiques de l'échangeur noyé (coefficient d'échange).

Récupérateur sur sol :

La partie [3.4](#) décrit la modélisation d'un champ géothermique constitué de plusieurs puits qui permettent un échange de chaleur entre la boucle de récupération et le sol, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur.

Les données d'entrée de cette fiche sont :

- Le débit et la température de l'eau de la boucle de récupération l'entrée du champ géothermique à chaque pas de temps.

Les paramètres intrinsèques à saisir sont :

- Les caractéristiques des pieux géothermiques
 - o Profondeur
 - o Rayon d'un puits et distance entre chaque puits
 - o Caractéristiques de la tuyauterie (rayons intérieur/extérieur, conductivité)
 - o Conductivité du coulis
 - o Nombre de puits
- Les caractéristiques du sol (capacité thermique, température).

Systemes d'appoint complémentaire :

Lorsque les apports des récupérateurs et du volume d'eau (boucle et stockage tampon éventuel) sont insuffisants, il est alors nécessaire de faire appel à des systèmes d'appoint complémentaire. Leur prise en compte est décrite dans la partie [3.5](#).

Ainsi le refroidissement complémentaire peut être assuré par une tour de refroidissement modélisée dans l'extension dynamique à partir de la méthode Th-BCE. Il peut aussi être assuré par tous les générateurs de froid de la méthode Th-BCE dont l'id type est différent de 507 et dont le fluide aval est de l'eau :

- PAC à compression électrique eau/eau, PAC à compression électrique air/eau, PAC à compression électrique eau de nappe/eau : id type = 503
- PAC à absorption gaz, air/eau ou eau/eau : id type = 504
- Thermofrigopompe : id type = 508
- Réseau de froid : id type = 601
- Tout système générateur de froid intégré en tant que Titre V dont le fluide aval est l'eau

Le chauffage complémentaire de la boucle peut être assuré par tous les générateurs de chaleur de la méthode Th-BCE dont l'id type est différent de 507 et dont le fluide aval est de l'eau :

- Chaudière standard au gaz : id type = 100
- Chaudière basse température au gaz : id type = 101
- Chaudière à condensation au gaz : id type = 102
- Chaudière standard au fioul : id type = 200
- Chaudière à condensation au fioul : id type = 201
- Chaudière au bois : id type = 400
- PAC à compression électrique eau/eau, PAC à compression électrique air/eau, PAC à compression électrique eau de nappe/eau : id type = 503
- PAC à absorption gaz, air/eau ou eau/eau : id type = 504
- Thermofrigopompe : id type = 508
- Réseau de chaleur : id type = 600
- Système de cogénération : id type = 700
- Tout système générateur de chaud intégré en tant que Titre V dont le fluide aval est de l'eau

Les modèles mathématiques de ces différents générateurs d'appoint complémentaire sont ceux de la méthode Th-BCE.

Il est possible de mettre en cascade plusieurs générateurs de chaud et de froid sur la boucle d'eau. Le système de type générateur thermodynamique réversible eau/eau sera utilisé en priorité. Pour les autres générateurs d'appoint complémentaire éventuels, les indices de priorité en chauffage et en refroidissement seront incrémentés en fonction de leur ordre de priorité.

3.1. Description de la boucle de récupération

Dans la méthode Th-BCE les apports de chaleur ou de froid dus au fonctionnement des PAC sur boucle d'eau sont cumulés sur la boucle au pas horaire et en fonction du bilan un apport complémentaire de chaleur ou de froid est réalisé sur la boucle (cf. paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE). Cet apport est ici effectué prioritairement par les systèmes de récupération.

3.1.1. Nomenclature

Les tableaux ci-dessous donnent la nomenclature des différentes variables du modèle de boucle de récupération :

Entrées du composant			
Nom	Description	Unité	
Qreq_ch	Energie requise en chauffage en entrée du générateur	Wh	
Theta_aval_ch	Température aval en chauffage	°C	
Qreq_fr	Energie requise en refroidissement en entrée du générateur	Wh	
Theta_aval_fr	Température aval en refroidissement	°C	
num_mois(j)	Numéro du mois	-	
Assemblage	Q_tot_recup_AE(h)	Energie échangée au niveau de l'échangeur sur air extrait au pas de temps h	Wh
	Tes_recup_AE(h)	Température d'eau en sortie de l'échangeur sur air extrait au pas de temps h	°C
	Q_tot_recup_EU(h)	Energie échangée au niveau du récupérateur sur eaux usées au pas de temps h	Wh
	Tes_recup_EU(h)	Température d'eau en sortie du récupérateur sur eaux usées au pas de temps h	°C
	Q_tot_recup_sol(h)	Energie échangée au niveau du récupérateur sur sol au pas de temps h	Wh
	Tes_recup_sol(h)	Température d'eau en sortie du récupérateur sur sol au pas de temps h	°C
	Tmin_fonct_boucle	Température minimale de fonctionnement de la boucle	°C

Paramètres intrinsèques du composant				
Nom	Description	Unité	Intervalle	Def.
Name	Nom de la source amont	-	-	-
Index	Identifiant unique d'une source amont	-	[0 ; +∞[-

Idpriorite_Ch	Indice de priorité du générateur en chauffage	-	[1 ; +∞[-
Idpriorite_Fr	Indice de priorité du générateur en refroidissement	-	[1 ; +∞[-
Id_Source_Amont	Identifiant de la source amont	-	[1 ; +∞[-
Id_Fl_amont	Identificateur du fluide amont : 0 : sans objet 1 : eau 2 : air 3 : sol	-	[0 ; 3]	2
Id_Fl_Aval	Identificateur du fluide aval : 0 : sans objet 1 : eau	-	[0 ; 1]	1
Id_Fou_Gen	Fonction du générateur thermodynamique : 1 : Chauffage 2 : Refroidissement 3 : ECS 4 : Chauffage et ECS 5 : Chauffage et refroidissement	-	[1 ; 5]	5
Rdim	Nombre de générateurs identiques	-	[1 ; +∞[	1
Theta_max_av_IGen	Température avale maximale	°C	[0 ; +∞[	100
Theta_min_av_IGen	Température avale minimale	°C	[0 ; +∞[	-20

Paramètres du module				
Nom	Description	Unité	Intervalle	Def.
Id_recup_ae	Indice de présence du récupérateur sur air extrait : 0 : Absence 1 : Présence	-	[0 ; 1]	0
Id_recup_eu	Indice de présence du récupérateur sur eaux usées : 0 : Absence 1 : Présence	-	[0 ; 1]	0
Id_recup_sol	Indice de présence du récupérateur sur sol : 0 : Absence 1 : Présence	-	[0 ; 1]	0
Qeau ou debit_eau_boucle	Débit d'eau nominal de la boucle d'eau	m ³ /h	]0 ; +∞[-
Paux_boucle	Puissance du circulateur de la boucle d'eau	W	[0 ; +∞[-
θmin_boucle	Température minimale annuelle de la boucle d'eau	°C	[12 ; 48]	-

θmax_boucle	Température maximale annuelle de la boucle d'eau	°C	[12 ;48]	-
Id_mois_mini_boucle	N° du mois où la température de la boucle est la plus faible	-	[1 ; 12]	-
volume_boucle	Estimation du volume de la boucle (inertie) avec stockage si présent	litres	[0 ; +∞[-
chute_temp_boucle	Chute de température dans la boucle (inertie)	°C	[0 ; +∞[-
Id_appoint_froid_boucle	Type de refroidissement d'appoint complémentaire sur la boucle : 0 : Pas de tour de refroidissement 1 : Présence d'une tour de refroidissement	-	[0 ;1]	0

Sorties		
Nom	Description	Unité
Id_Fou_Gen	Fonction du générateur : 1 : Chauffage, 2 : Refroidissement, 3 : ECS, 4 : Chauffage et ECS, 5 : Chauffage et refroidissement.	-
Qrest(h)	Energie restant à fournir à la fin du pas de temps, faisant l'objet d'un report de demande à un autre générateur en séquence ou au pas de temps suivant	Wh
∅_vc(h)	Pertes thermiques et puissances des auxiliaires du générateur transmises à l'ambiance	Wh
Qprelec(h)	Production électrique du générateur	Wh
Waux_Pro(h)	Consommation des auxiliaires au pas de temps h	Wh
Pmax(h)	Puissance maximale du générateur	W
Q_cons(h)	Puissance consommé par le générateur au pas de temps h	Wh
Q_fou(h)	Puissance fournie par le générateur	W
Taux_charge(h)	Taux de charge du générateur	-
Pn_Gen_Ch	Puissance nominale du générateur en chauffage	W
Q_Cef_Ch	Tableau des consommations en énergie finale pour le chauffage en fonction des énergies utilisées (Gaz, Fioul, charbon, Bois, Electricité, réseau de fourniture)	-
∅rejet(h)	Rejet du générateur thermodynamique au pas de temps h (valeur positive en refroidissement)	Wh

Variables internes		
Nom	Description	Unité
$\theta_{\text{boucle}}(h)$	Température de la boucle	°C
$T_{\text{ee}}(h)$	Température d'eau en entrée des récupérateurs	°C
$Q_{\text{volume_inertie_chaud}}(h)$	Apports potentiels d'énergie dus au volume du ballon ou à un stockage tampon en chauffage	Wh
$Q_{\text{volume_inertie_froid}}(h)$	Apports potentiels d'énergie dus au volume du ballon ou à un stockage tampon en refroidissement	Wh
$Q_{\text{bilan_chaud_recup_AE}}(h)$	Apport du récupérateur sur air extrait en chauffage	Wh
$\Delta T_{\text{recup_AE_ch}}(h)$	Différence de température de l'eau entre l'entrée et la sortie du récupérateur sur air extrait en mode chauffage	°C
$Q_{\text{bilan_chaud_recup_EU}}(h)$	Apport du récupérateur sur eaux usées en chauffage	Wh
$\Delta T_{\text{recup_EU_ch}}(h)$	Différence de température de l'eau entre l'entrée et la sortie du récupérateur sur eaux usées en mode chauffage	°C
$Q_{\text{bilan_chaud_recup_sol}}(h)$	Apport du récupérateur sur sol en chauffage	Wh
$\Delta T_{\text{recup_sol_ch}}(h)$	Différence de température de l'eau entre l'entrée et la sortie du récupérateur sur sol en mode chauffage	°C
$Q_{\text{bilan_chaud_recup_tot}}(h)$	Apport total des récupérateurs en chauffage	Wh
$\text{Somme_}\Delta T_{\text{recup_ch}}(h)$	Somme des différences de température de l'eau entre l'entrée et la sortie des différents récupérateurs en mode chauffage	°C
$Q_{\text{bilan_chaud_recup_util}}(h)$	Apport des récupérateurs utilisé par la boucle en chauffage	Wh
$Q_{\text{bilan_chaud_recup_tot_report}}(h)$	Apport des récupérateurs en chauffage reporté sur le pas de temps suivant	Wh
$Q_{\text{req_appoint_boucle}}(h)$	Demande d'énergie au générateur d'appoint complémentaire (non pris en compte au paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE) en chauffage	Wh
$N_{\text{b_report_ch_fr}}$	Nombre d'heures de report maximal	h
$I_{\text{d_report_ch}}(h)$	Indice de report des énergies excédentaires des récupérateurs en chauffage	-
$\text{Cumul_}\Delta T_{\text{recup_ch}}(h)$	Cumul de la somme des différences de température de l'eau entre l'entrée et la sortie des différents récupérateurs en mode chauffage	°C
$T_{\text{boucle_apres_report_ch}}(h)$	Température hypothétique de la boucle après prise en compte du cumul du report d'énergie en chauffage	°C
$Q_{\text{bilan_froid_recup_AE}}(h)$	Frigories fournies par le récupérateur sur air extrait en refroidissement	Wh
$\Delta T_{\text{recup_AE_fr}}(h)$	Différence de température de l'eau entre l'entrée et la sortie du récupérateur sur air extrait en mode refroidissement	°C
$Q_{\text{bilan_froid_recup_sol}}(h)$	Frigories fournies par le récupérateur sur sol en	Wh

	refroidissement	
deltaT_recup_sol_fr(h)	Différence de température de l'eau entre l'entrée et la sortie du récupérateur sur sol en mode refroidissement	°C
Qbilan_froid_recup_tot(h)	Frigories fournies au total par les récupérateurs en refroidissement	Wh
Somme_deltaT_recup_fr(h)	Somme des différences de température de l'eau entre l'entrée et la sortie des différents récupérateurs en mode refroidissement	°C
Qbilan_froid_recup_util(h)	Apport des récupérateurs utilisé par la boucle en refroidissement	Wh
Qbilan_froid_recup_tot_report(h)	Apport total des récupérateurs en refroidissement reporté sur le pas de temps suivant	Wh
Qreq_froid_boucle(h)	Demande d'énergie au générateur d'appoint complémentaire (non pris en compte au paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE) en refroidissement	Wh
Id_report_fr(h)	Indice de report des énergies excédentaires des récupérateurs en refroidissement	-
Cumul_somme_deltaT_recup_fr(h)	Cumul de la somme des différences de température de l'eau entre l'entrée et la sortie des différents récupérateurs en mode refroidissement	°C
Tboucle_apres_report_fr(h)	Température hypothétique de la boucle après prise en compte du cumul du report d'énergie en refroidissement	°C
Qfou_appoint_boucle(h)	Energie fournie par le générateur d'appoint complémentaire (non pris en compte au paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE) en chauffage	Wh
Qfou_froid_boucle(h)	Energie fournie par le générateur d'appoint complémentaire (non pris en compte au paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE) en refroidissement	Wh
Qrest_appoint_ch(h)	Energie restante à fournir après le générateur d'appoint complémentaire (non pris en compte au paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE), reporté sur le pas de temps suivant en chauffage	Wh
Qrest_appoint_fr(h)	Energie restante à fournir après le générateur d'appoint complémentaire (non pris en compte au paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE), reporté sur le pas de temps suivant en refroidissement	Wh
Qcons_app_boucle_conv(h)	Consommation du générateur d'appoint complémentaire (non pris en compte au paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE) en chauffage	Wh
Qcons_fr_boucle_conv(h)	Consommation du générateur d'appoint complémentaire (non pris en compte au paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE) en refroidissement	Wh

Constantes			
Nom	Description	Unité	Conv.
Cpe_boucle_bis	Chaleur massique de l'eau de la boucle de récupération	Wh/kg.K	1,163
Tmax_fonct_boucle	Température maximale de fonctionnement de la boucle	°C	48

3.1.2. Description mathématique du module

3.1.2.1. Description du générateur

Cette fiche algorithme décrit la modélisation de la boucle de récupération, vue comme un générateur thermodynamique réversible.

Ce générateur comprend les systèmes de récupération suivants :

- Récupérateur sur air extrait
- Récupérateur sur eaux usées
- Récupérateur sur sol.

La modélisation de ces récupérateurs est décrite dans les paragraphes 3.2 à 3.4 de la présente annexe.

Pour prendre en compte l'inertie et le volume d'eau de la boucle ainsi que d'un éventuel stockage tampon, des apports potentiels d'énergie sont pris en compte en chaud et en froid.

Des systèmes d'appoint complémentaires sont également prévus lorsque les apports des récupérateurs et du volume d'eau (boucle et stockage tampon éventuel) sont insuffisants (description au paragraphe 3.5).

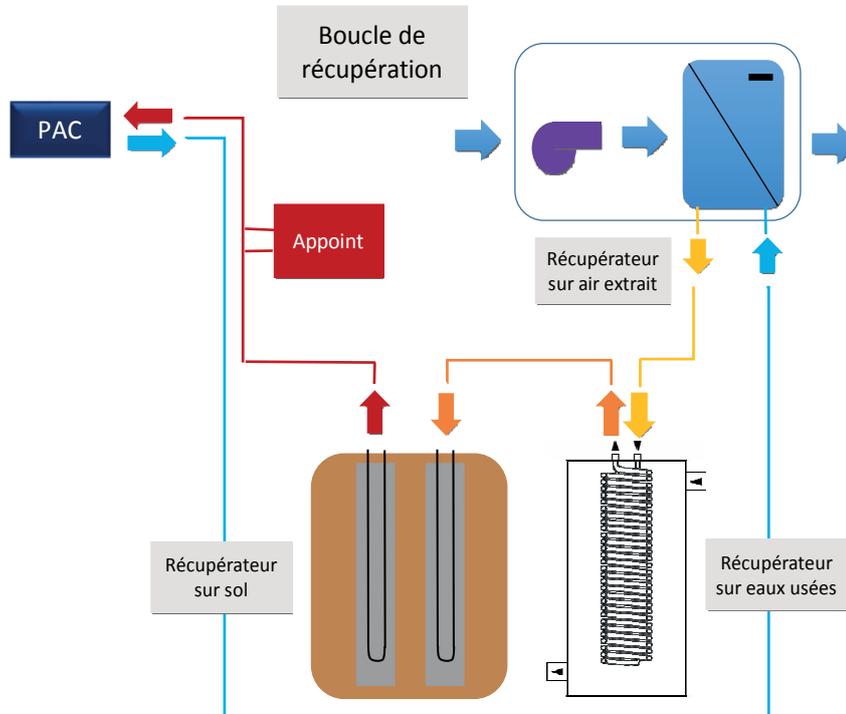


Figure 2 : Schéma de principe boucle de récupération¹

La température de la boucle est calculée de la façon suivante, selon la même méthode qu'au paragraphe 10.23 de la méthode Th-BCE :

$$\theta_{boucle}(j) = A + B \times \sin\left(2.\pi.\frac{num_{mois}(j)}{12} + \varphi\right) \quad (1)$$

Avec

$$A = \frac{\theta_{min_boucle} + \theta_{max_boucle}}{2} \quad (2)$$

$$B = \frac{\theta_{max_boucle} - \theta_{min_boucle}}{2} \quad (3)$$

$$\varphi = \pi.\left(\frac{3}{2} - \frac{Id_{mois_mini_boucle}(j)}{6}\right) \quad (4)$$

La température de la boucle est par la suite utilisée comme température d'entrée de chaque récupérateur. Ainsi la température au pas horaire d'entrée des récupérateurs Tee(h) est égale à la température de la boucle d'eau du mois j considéré :

$$Tee(h) = \theta_{boucle}(j) \quad (5)$$

¹ La boucle de récupération fonctionne ici en tant que source chaude, c'est-à-dire lorsque les PAC fonctionnent en mode chauffage.

3.1.3. Appel des récupérateurs

Les trois récupérateurs ne sont pas forcément présents en même temps.

Si le récupérateur sur air extrait est présent :

$$Id_{recup_ae} = 1$$

Sinon

$$Id_{recup_ae} = 0$$

Si le récupérateur est présent, les calculs de la quantité d'énergie $Q_{tot_recup_AE}(h)$ sont effectués à chaque pas de temps en concordance avec la modélisation présentée au paragraphe 3.2.

$$\text{Sinon } Q_{tot_recup_AE}(h) = 0$$

Si le récupérateur sur eaux usées est présent :

$$Id_{recup_eu} = 1$$

Sinon

$$Id_{recup_eu} = 0$$

Si le récupérateur est présent, les calculs de la quantité d'énergie $Q_{tot_recup_EU}(h)$ sont effectués à chaque pas de temps en concordance avec la modélisation présentée au paragraphe 3.3.

$$\text{Sinon } Q_{tot_recup_EU}(h) = 0$$

Si le récupérateur sur sol est présent :

$$Id_{recup_sol} = 1$$

Sinon

$$Id_{recup_sol} = 0$$

Si le récupérateur est présent, les calculs de la quantité d'énergie $Q_{tot_recup_sol}(h)$ sont effectués à chaque pas de temps en concordance avec la modélisation présentée au paragraphe 3.4.

$$\text{Sinon } Q_{tot_recup_sol}(h) = 0$$

3.1.4. Prise en compte de l'inertie

Pour prendre en compte l'inertie et le volume d'eau de la boucle avec éventuellement un stockage tampon, des apports potentiels d'énergie sont pris en compte en chaud et en froid. Ceux-ci sont calculés en prenant en compte un volume d'eau dans la boucle, la chaleur massique de l'eau et une différence de température :

$$Q_{\text{volume_inertie_chaud}}(h) = \text{Volume}_{\text{boucle}} \times C_{pe_{\text{boucle_bis}}} \times chute_{\text{temp_boucle}} \quad (6)$$

$$Q_{\text{volume_inertie_froid}}(h) = \text{Volume}_{\text{boucle}} \times C_{pe_{\text{boucle_bis}}} \times chute_{\text{temp_boucle}} \quad (7)$$

3.1.5. Régulation du générateur en mode chauffage

Si le bilan de la boucle est négatif (besoin d'un appoint en chauffage pour maintenir la boucle en température), l'énergie apportée à la boucle pour la réchauffer est déterminée pour chaque récupérateur.

Pour le récupérateur sur air extrait :

$$\text{Si } Q_{\text{tot_recup_AE}}(h) > 0$$

$$Q_{\text{bilan_chaud_recup_AE}}(h) = Q_{\text{tot_recup_AE}}(h) \quad (8)$$

$$\text{delta}_{T_recup_AE_ch}(h) = \text{Tes}_{\text{recup_AE}}(h) - \text{Tee}(h) \quad (9)$$

Sinon

$$Q_{\text{bilan_chaud_recup_AE}}(h) = 0 \quad (10)$$

$$\text{delta}_{T_recup_AE_ch}(h) = 0 \quad (11)$$

Pour le récupérateur sur eaux usées :

$$\text{Si } Q_{\text{tot_recup_EU}}(h) > 0$$

$$Q_{\text{bilan_chaud_recup_EU}}(h) = Q_{\text{tot_recup_EU}}(h) \quad (12)$$

$$\text{delta}_{T_recup_EU_ch}(h) = \text{Tes}_{\text{recup_EU}}(h) - \text{Tee}(h) \quad (13)$$

Sinon

$$Q_{\text{bilan_chaud_recup_EU}}(h) = 0 \quad (14)$$

$$\text{delta}_{T_recup_EU_ch}(h) = 0 \quad (15)$$

Pour le récupérateur sur sol :

$$\text{Si } Q_{\text{tot_recup_sol}}(h) > 0$$

$$Q_{\text{bilan_chaud_recup_sol}}(h) = Q_{\text{tot_recup_sol}}(h) \quad (16)$$

$$\text{delta}_{T_recup_sol_ch}(h) = \text{Tes}_{\text{recup_sol}}(h) - \text{Tee}(h) \quad (17)$$

Sinon

$$Q_{\text{bilan_chaud_recup_sol}}(h) = 0 \quad (18)$$

$$\Delta T_{recup_sol_ch}(h) = 0 \quad (19)$$

Bilan sur tous les récupérateurs :

$$Q_{bilan_chaud_recup_tot}(h) = Q_{bilan_chaud_recup_AE}(h) + Q_{bilan_chaud_recup_EU}(h) + Q_{bilan_chaud_recup_sol}(h) \quad (20)$$

$$somme_{\Delta T_{recup_ch}}(h) = \Delta T_{recup_AE_ch}(h) + \Delta T_{recup_EU_ch}(h) + \Delta T_{recup_sol_ch}(h) \quad (21)$$

Energie récupérée et utilisée par la boucle :

$$Q_{bilan_chaud_recup_util}(h) = \text{Min} \left(\begin{array}{l} Q_{req_ch}(h); \\ Q_{bilan_chaud_recup_tot}(h) + Q_{bilan_chaud_recup_tot_report}(h-1) \end{array} \right) \quad (22)$$

Energie restante à fournir après les récupérateurs et la prise en compte du volume d'eau (boucle et stockage tampon éventuel) :

$$Q_{req_appoint_boucle}(h) = \text{Max}(Q_{req_ch}(h) - Q_{bilan_chaud_recup_util}(h) - Q_{volume_inertie_chaud}; 0) \quad (23)$$

Energie des récupérateurs, reportée sur le pas de temps suivant si elle est plus importante que la demande de la boucle :

$$Q_{bilan_chaud_recup_tot_report}(h) = \text{Max} \left(\begin{array}{l} Q_{bilan_chaud_recup_tot}(h) \\ + Q_{bilan_chaud_recup_tot_report}(h-1) - Q_{req_ch}(h) \\ ; 0 \end{array} \right) \quad (24)$$

Limitation du report en fonction de la température

Si $Q_{bilan_chaud_recup_tot_report}(h) \neq 0$ et si $Q_{req_ch}(h) = 0$ alors

$$cumul_{somme_deltaT_recup_ch}(h) = cumul_{somme_deltaT_recup_ch}(h-1) + somme_{\Delta T_{recup_ch}}(h) \quad (25)$$

Sinon

$$cumul_{somme_deltaT_recup_ch}(h) = 0 \quad (26)$$

Température de la boucle en prenant en compte le cumul de température :

$$T_{boucle_apres_report_ch}(h) = Tee(h) + cumul_{somme_deltaT_recup_ch}(h) \quad (27)$$

Si $T_{boucle_apres_report_ch}(h) > T_{max_fonct_boucle}$ alors

$$Q_{bilan_chaud_recup_tot_report}(h) = 0 \quad (28)$$

$$cumul_{somme_deltaT_recup_ch}(h) = 0 \quad (29)$$

La température maximale de fonctionnement de la boucle est de 48°C.

3.1.6. Régulation du générateur en mode refroidissement

Si le bilan de la boucle est positif (besoin d'un appoint en refroidissement pour maintenir la boucle en température), l'énergie apportée à la boucle pour la refroidir est déterminée pour chaque récupérateur.

Pour le récupérateur sur air extrait :

Si $Q_{tot_recup_AE}(h) < 0$

$$Q_{bilan_froid_recup_AE}(h) = Q_{tot_recup_AE}(h) \quad (30)$$

$$\Delta_{T_recup_AE_fr}(h) = T_{es_recup_AE}(h) - T_{ee}(h) \quad (31)$$

Sinon

$$Q_{bilan_froid_recup_AE}(h) = 0 \quad (32)$$

$$\Delta_{T_recup_AE_fr}(h) = 0 \quad (33)$$

Le récupérateur sur eaux usées ne participe pas au refroidissement de la boucle.

Pour le récupérateur sur sol :

Si $Q_{tot_recup_sol}(h) < 0$

$$Q_{bilan_froid_recup_sol}(h) = Q_{tot_recup_sol}(h) \quad (34)$$

$$\Delta_{T_recup_sol_fr}(h) = T_{es_recup_sol}(h) - T_{ee}(h) \quad (35)$$

Sinon

$$Q_{bilan_froid_recup_sol}(h) = 0 \quad (36)$$

$$\Delta_{T_recup_sol_fr}(h) = 0 \quad (37)$$

Bilan sur tous les récupérateurs :

$$Q_{bilan_froid_recup_tot}(h) = - Q_{bilan_froid_recup_AE}(h) - Q_{bilan_froid_recup_sol}(h) \quad (38)$$

$$\Delta_{T_recup_fr}(h) = \Delta_{T_recup_AE_fr}(h) + \Delta_{T_recup_sol_fr}(h) \quad (39)$$

Energie récupérée et utilisée par la boucle :

$$Q_{bilan_froid_recup_util}(h) = \text{Min}(Q_{req_fr}(h); Q_{bilan_froid_recup_tot}(h) + Q_{bilan_froid_recup_tot_report}(h - 1)) \quad (40)$$

Energie restante à fournir après les récupérateurs et la prise en compte du volume d'eau (boucle et stockage tampon éventuel) :

$$Q_{req_froid_boucle}(h) = \text{Max}(Q_{req_fr}(h) - Q_{bilan_froid_recup_util}(h) - Q_{volume_inertie_froid}; 0) \quad (41)$$

Energie des récupérateurs reportée sur le pas de temps suivant, si l'énergie récupérée est plus importante que la demande de la boucle :

$$Q_{bilan_froid_recup_tot_report}(h) = \text{Max} \left(\begin{array}{l} Q_{bilan_froid_recup_tot}(h) + Q_{bilan_froid_recup_tot_report}(h-1) \\ - Q_{req_fr}(h); \\ 0 \end{array} \right) \quad (42)$$

Limitation du report en fonction de la température :

Si $Q_{bilan_froid_recup_tot_report}(h) \neq 0$ et si $Q_{req_fr}(h) = 0$ alors

$$cumul_{somme_deltaT_recup_fr}(h) = cumul_{somme_deltaT_recup_fr}(h-1) + somme_{deltaT_recup_fr}(h) \quad (43)$$

Sinon

$$cumul_{somme_deltaT_recup_fr}(h) = 0 \quad (44)$$

Température de la boucle en prenant en compte le cumul de température :

$$T_{boucle_apres_report_fr}(h) = Tee(h) + cumul_{somme_deltaT_recup_fr}(h) \quad (45)$$

Si $T_{boucle_apres_report_fr}(h) < T_{min_fonct_boucle}$ alors

$$Q_{bilan_froid_recup_tot_report}(h) = 0 \quad (46)$$

$$cumul_{somme_deltaT_recup_fr}(h) = 0 \quad (47)$$

La température minimale de fonctionnement de la boucle est définie comme la température minimale de fonctionnement des PAC connectées à la boucle. Par convention, $T_{min_fonct_boucle} = 12^\circ\text{C}$.

3.2. Description de la récupération sur air extrait

3.2.1. Introduction

Cette partie décrit la modélisation de la récupération sur l'air extrait (échange air/eau). L'élément principal pris en compte est la batterie, considérée comme une batterie froide en période hivernale et une batterie chaude en période estivale.

3.2.2. Nomenclature

Les tableaux ci-dessous donnent la nomenclature des différentes variables du modèle de récupération sur air extrait :

Entrées du module		
Nom	Description	Unité
Qeau(h)	Débit d'eau à l'entrée de l'échangeur au pas de temps h	m ³ /h
Tee(h)	Température d'eau à l'entrée de l'échangeur au pas de temps h	°C
Q_air(h)	Débit d'air humide à l'entrée de l'échangeur au pas de temps h	m ³ /h
Tae(h)	Température de l'air extrait à l'entrée de l'échangeur au pas de temps h	°C
HRae(h)	Humidité relative de l'air extrait à l'entrée de l'échangeur au pas de temps h	%

Paramètres intrinsèques du composant				
Nom	Description	Unité	Intervalle	Conv.
P_ref	Puissance de référence échangée au niveau de la batterie	W	]0 ; +∞[-
Tee_ref	Température de référence de l'eau à l'entrée	°C	]0 ; +∞[-
Tes_ref	Température de référence de l'eau à la sortie	°C	]0 ; +∞[-
Tae_ref	Température de référence de l'air extrait à l'entrée	°C	]0 ; +∞[-
Tas_ref	Température de référence de l'air extrait à la sortie	°C	]0 ; +∞[-
Qair_ref	Débit d'air humide de référence	m ³ /h	]0 ; +∞[-

Sorties		
Nom	Description	Unité
Tes(h)	Température d'eau à la sortie de l'échangeur sur air extrait au pas de temps h	°C
Q_tot(h)	Energie échangée au niveau de l'échangeur sur air extrait au pas de temps h	Wh

Variables internes		
Nom	Description	Unité
Qm_eau(h)	Débit massique d'eau au pas de temps h	Kg/s
Qm_air(h)	Débit d'air extrait (air sec) au pas de temps h	Kgas/s
Wae(h)	Humidité spécifique de l'air extrait à l'entrée au pas de temps h	kgeau/kgas
pair(h)	Masse volumique de l'air humide	Kg/m3
Qm_eau_ref	Débit massique d'eau de référence	Kg/s
Qm_air_ref	Débit d'air extrait (air sec) de référence	Kgas/s
UA_ref	Coefficient d'échange de référence	W/K
UA_int_ref	Coefficient de transfert de référence côté eau	W/K
UA_ext_ref	Coefficient de transfert de référence côté air	W/K
ΔT_{lm}	Différence moyenne logarithmique	K
UA_int(h)	Coefficient de transfert côté eau au pas de temps h	W/K
UA_ext(h)	Coefficient de transfert côté air au pas de temps h	W/K
UA(h)	Coefficient d'échange au pas de temps h	W/K
C_air(h)	Débit énergétique dans le circuit à air	W/K
C_eau(h)	Débit énergétique dans le circuit de la boucle de récupération	W/K
C_min(h)	Débit énergétique minimal	W/K
C_max(h)	Débit énergétique maximal	W/K
C(h)	Rapport des débits énergétiques minimal et maximal	-
NUT(h)	Nombre d'unité de transfert de l'échangeur	-
E(h)	Efficacité de l'échangeur sur air extrait	-
Q_max(h)	Puissance maximale échangée au niveau de l'échangeur	W

Te_moy(h)	Température moyenne de la paroi de l'échangeur	°C
Trosee(h)	Température de rosée de l'air entrant	°C
Qm_eau_cond(h)	Débit d'eau condensée au pas de temps h	Kg/s
Tas(h)	Température de l'air à la sortie de l'échangeur	°C
Was(h)	Humidité spécifique de l'air extrait à la sortie de l'échangeur au pas de temps h	kgeau/kgas

Constantes			
Nom	Description	Unité	Conv.
n	Clé de répartition des coefficients d'échange intérieur et extérieur	-	1,89
ρ_{boucle}	Masse volumique de l'eau	Kg/m ³	1000
Cv	Chaleur massique de la vapeur d'eau	J/kg.K	1830
Ca	Chaleur massique de l'air	J/kg.K	1006
Cpe_boucle	Chaleur massique de l'eau de la boucle de récupération	J/kg.K	4180

3.2.3. Description mathématique du module

3.2.3.1. Description du récupérateur sur air extrait

Cette partie décrit les calculs de la température de sortie de la boucle de récupération après passage dans le récupérateur sur air extrait, ainsi que de la puissance récupérée par la boucle de récupération.

Les conditions de l'air et de l'eau peuvent être déterminées en utilisant la relation liant l'efficacité de l'échangeur et son nombre d'unités de transfert. L'échangeur est assimilé à un échangeur croisé avec fluide brassé côté air et fluide non brassé côté eau. Le coefficient global d'échange de chaleur est déterminé à partir d'un point de fonctionnement de l'échangeur.

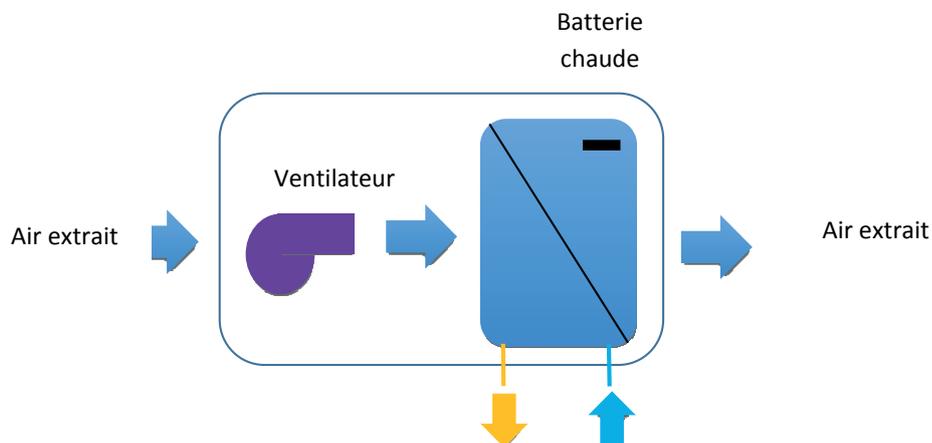


Figure 3 : Récupérateur sur air extrait en période hivernale : chauffage de la boucle

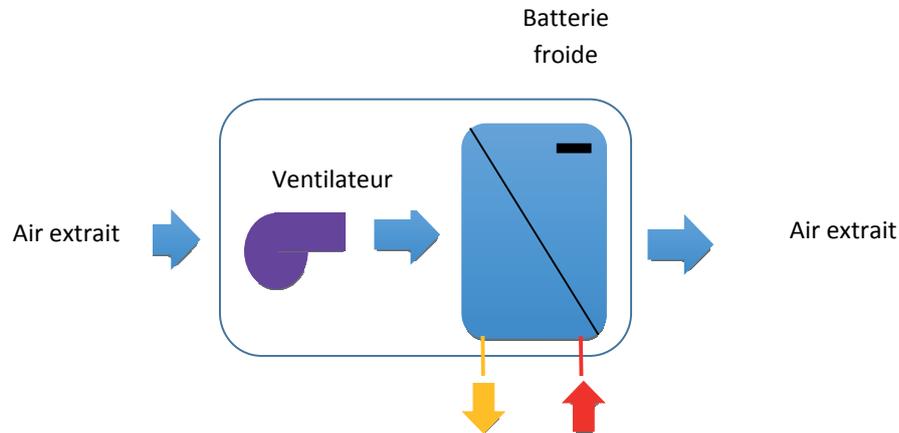


Figure 4 : Récupérateur sur air extrait en période estivale : refroidissement de la boucle

3.2.3.2. Calculs préliminaires

Conversion d'unités

Les équations des paragraphes suivants sont établies à partir des débits massiques d'air et d'eau en kg/s, il faut donc convertir les débits volumiques en débits massiques. Il faut également l'humidité spécifique de l'air entrant.

Pour le débit massique d'eau :

$$Q_{m_eau}(h) = \frac{Q_{eau}(h) \times \rho_w}{3600} \quad (48)$$

Pour le débit massique d'air :

$$Q_{m_air}(h) = \frac{Q_{air}(h) \times \rho_{air}(h)}{3600} \quad (49)$$

Avec pour le calcul de la masse volumique de l'air en fonction de la température défini ci-dessous :

$$\rho_{air}(h) = 1,292 \times \frac{273,15}{273,15 + T(h)} \quad (50)$$

Pour le calcul de l'humidité spécifique à partir de la pression de vapeur saturante et de l'humidité relative, sont définies les équations suivantes :

$$W(h) = \frac{0,62198 \times P_{sat}(h)}{P_{atm} - P_{sat}(h)} \times \frac{HR(h)}{100} \quad (51)$$

Avec P_{atm} égale à 101325 Pa et P_{sat} calculée de la manière suivante :

$$P_{sat}(h) = 10^{u(h)} \quad (52)$$

Avec si $T \geq 0$

$$u(h) = 2,7862 + \frac{7,5526 \times T(h)}{239,21 + T(h)} \quad (53)$$

Sinon

$$u(h) = 2,7862 + \frac{9,7561 \times T(h)}{272,67 + T(h)} \quad (54)$$

3.2.3.3. Détermination des caractéristiques de l'échangeur sur air extrait (batterie froide)

Les caractéristiques de l'échangeur sont déterminées à partir d'un point de fonctionnement en utilisant la méthode des différences logarithmiques des températures, appliquée à un échangeur contre-courant.

$$P_{ref} = UA_{ref} \times F \times \Delta T_{lm} \quad (55)$$

D'où

$$UA_{ref} = \frac{P_{ref}}{F \times \Delta T_{lm}} \quad (56)$$

En considérant la valeur de la différence moyenne logarithmique pour un échangeur contre-courant :

$$\Delta T_{lm} = \frac{(Tae_{ref} - Tes_{ref}) - (Tas_{ref} - Tee_{ref})}{\ln\left(\frac{Tae_{ref} - Tes_{ref}}{Tas_{ref} - Tee_{ref}}\right)} \quad (57)$$

Et

$$F = \frac{r}{r_0} \quad (58)$$

Avec

$$r = \frac{q}{\ln\left(\frac{1}{1 - \frac{q}{p} \times \ln\left(\frac{1}{1-p}\right)}\right)} \quad (59)$$

$$r_0 = \frac{p - q}{\ln\left(\frac{1-q}{1-p}\right)} \quad (60)$$

Avec

$$p = \frac{Tae_{ref} - Tas_{ref}}{Tae_{ref} - Tee_{ref}} \quad (61)$$

$$q = \frac{Tes_{ref} - Tee_{ref}}{Tae_{ref} - Tee_{ref}} \quad (62)$$

Une clef de répartition n'est utilisée afin de déterminer UA_{ext_ref} et UA_{int_ref} à partir de la connaissance du coefficient global UA_{ref} :

$$UA_{int_ref} = n \times UA_{ext_ref} \quad (63)$$

Avec $n=1,89$

$$\frac{1}{UA_{ref}} = \frac{1}{UA_{int_ref}} + \frac{1}{UA_{ext_ref}} \quad (64)$$

D'où

$$UA_{int_ref} = (n + 1) \times UA_{ref} \quad (65)$$

$$UA_{ext_ref} = \left(\frac{n+1}{n} \right) \times UA_{ref} \quad (66)$$

De plus les débits massiques d'air et d'eau de référence sont déterminés :

$$\rho_{air_ref}(h) = 1,292 \times \frac{273,15}{273,15 + Tae_{ref}} \quad (67)$$

$$Q_{m_air_ref} = \frac{Q_{air_ref} \times \rho_{air_ref}}{3600} \quad (68)$$

$$Q_{m_eau_ref} = \frac{P_{ref}}{C_{pe_boucle} \times (Tes_{ref} - Tee_{ref})} \quad (69)$$

3.2.3.4. Détermination des caractéristiques de l'eau en sortie de l'échangeur

Grâce aux coefficients d'échange calculés précédemment au point de référence, l'évolution des coefficients d'échange en fonction des débits d'air et d'eau est déterminée :

$$UA_{int}(h) = \left(\frac{UA_{int_ref}}{Q_{m_eau_ref}^{0,8}} \right) \times Q_{m_eau}^{0,8}(h) \quad (70)$$

$$UA_{ext}(h) = \left(\frac{UA_{ext_ref}}{Q_{m_air_ref}^{0,67}} \right) \times Q_{m_air}^{0,67}(h) \quad (71)$$

$$UA(h) = \frac{1}{\frac{1}{UA_{int}(h)} + \frac{1}{UA_{ext}(h)}} \quad (72)$$

L'efficacité de l'échangeur grâce à la méthode NUT :

$$C_{air}(h) = Q_{m_air}(h) \times (C_a + W_{ae}(h) \times C_v) \quad (73)$$

$$C_{eau}(h) = Q_{m_eau}(h) \times C_{pe_boucle} \quad (74)$$

$$C_{min}(h) = \min(C_{air}(h); C_{eau}(h)) \quad (75)$$

$$C_{max}(h) = \max(C_{air}(h); C_{eau}(h)) \quad (76)$$

$$C(h) = \frac{C_{min}(h)}{C_{max}(h)} \quad (77)$$

$$NUT(h) = \frac{UA(h)}{C_{min}(h)} \quad (78)$$

Si $C_{min}(h) = C_{eau}(h)$

$$E(h) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{C(h)} \times (1 - \exp(-C(h) \times NUT(h)))\right) \quad (79)$$

Sinon

$$E(h) = \frac{1}{C(h)} \times [1 - \exp(-C(h) \times (1 - \exp(-NUT(h))))] \quad (80)$$

Par la suite la puissance maximale au niveau de l'échangeur est :

$$Q_{max}(h) = C_{min}(h) \times (T_{ae}(h) - T_{ee}(h)) \quad (81)$$

Et enfin la puissance récupérée par la boucle de récupération sur l'air extrait :

$$Q_{tot}(h) = E(h) \times Q_{max}(h) \quad (82)$$

Par ailleurs :

$$Q_{tot}(h) = C_{eau}(h) \times (T_{es}(h) - T_{ee}(h)) \quad (83)$$

On en déduit $T_{es}(h)$ grâce à l'équation suivante :

$$T_{es}(h) = T_{ee}(h) + \frac{Q_{tot}(h)}{C_{eau}(h)} \quad (84)$$

3.3. Description de la récupération sur eaux usées

3.3.1. Introduction

Cette partie décrit la modélisation de la récupération sur les eaux usées.

Les éléments pris en compte sont la cuve de récupération des eaux usées et l'échangeur noyé de celui-ci.

3.3.2. Nomenclature

Les tableaux ci-dessous donnent la nomenclature des différentes variables du modèle de récupération sur eaux usées :

Entrées du module		
Nom	Description	Unité
Qeau(h)	Débit d'eau à l'entrée de l'échangeur au pas de temps h	m ³ /h
Tee(h)	Température d'eau à l'entrée de l'échangeur au pas de temps h	°C

Paramètres intrinsèques du composant				
Nom	Description	Unité	Intervalle	Conv.
Nb_cuve	Nombre de cuve de récupération	-	]0 ; +∞[-
V_cuve	Volume de la cuve	m ³	]0 ; +∞[-
UA_cuve	Coefficient d'échange de la cuve vers l'ambiance	W/K	]0 ; +∞[-
UA_ech	Coefficient d'échange de l'échangeur	W/K	]0 ; +∞[-

Sorties		
Nom	Description	Unité
Tes(h)	Température d'eau à la sortie de l'échangeur sur eaux usées au pas de temps h	°C
Q_tot(h)	Energie échangée au niveau de l'échangeur sur eaux usées au pas de temps h	Wh

Variables internes		
Nom	Description	Unité
Vrecup(h)	Volume d'eau horaire à 40°C récupérable	L
Qeaux_usees(h)	Débit d'eaux usées	m ³ /h
Teaux_usees(h)	Température des eaux usées	°C
V_zone	Volume d'une zone du ballon	m ³
UA_cuve_zone	Coefficient d'échange vers l'extérieur d'une zone	W/K



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE
MINISTÈRE DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES



Premier ministre
Direction
de l'information
légale
et administrative

UA_ech_zone	Coefficient d'échange de l'échangeur sur une zone	W/K
UA_ech_zone_eq(h)	Coefficient d'échange équivalent de l'échangeur sur une zone	W/K
$TV_z^i(j)$	Température initiale de la zone z de la cuve de récupération à l'itération j	°C
$TV_z^f(j)$	Température finale de la zone z de la cuve de récupération à l'itération j	°C
$TP_z^i(j)$	Température initiale de l'échangeur en entrée de la zone z à l'itération j	°C
$TP_z^f(j)$	Température finale de l'échangeur à la sortie de la zone z à l'itération j	°C
$TV_z^f(h)$	Température finale de la zone z de la cuve de récupération à la fin du pas de temps h	°C
DT_ech(j)	Température moyenne de l'échangeur sur la zone z à l'itération j	°C
A	Coefficient pour le calcul de température de la cuve de récupération	W/K
B	Coefficient pour le calcul de température de la cuve de récupération	W
C	Coefficient pour le calcul de température de la cuve de récupération	Wh/K

Constantes			
Nom	Description	Unité	Conv.
ρ_{boucle}	Masse volumique de l'eau	Kg/m ³	1000
Cpe_boucle_bis	Chaleur massique de l'eau de la boucle de récupération	Wh/kg.K	1,163
Tamb	Température de l'ambiance où se trouve la cuve de récupération	°C	20

3.3.3. Description mathématique du module

3.3.3.1. Description de la récupération sur les eaux usées

Cette partie décrit les calculs qui permettent de déterminer la température de sortie de la boucle de récupération après passage dans l'échangeur noyé de la cuve de récupération des eaux usées.

Les données d'entrée de ce module sont :

- Le débit et la température des eaux usées entrant dans la cuve de récupération à chaque pas de temps
- Le débit et la température de l'eau de la boucle de récupération entrant dans l'échangeur noyé à chaque pas de temps

Les caractéristiques des équipements sont également à saisir :

- les caractéristiques de la cuve de récupération des eaux usées (dimensions, coefficient de pertes)
- les caractéristiques de l'échangeur noyé (diamètre, longueur, coefficient d'échange)

3.3.3.2. Calculs du volume d'eaux usées

La température d'eau chaude mtigée au point de puisage θ_{uw} est prise égale à 40°C. Elle est conventionnelle (page 937 des règles Th-BCE).

Le nombre de litres d'eau horaire à θ_{uw} pour la cuve de récupération est déterminé de manière identique aux équations horaires décrites au paragraphe 11.6.3 de la méthode Th-BCE.

Le volume d'eau horaire à 40°C récupérable (qui correspond aux besoins à 40°C avec les émetteurs connectés au système de récupération) est déterminé par :

$$V_{recup}(h) = \sum_{gr} \sum_{em-e} V_{uw_hebd_corr}^{gr,em-e} \times ah \quad (85)$$

Ce volume est assimilé à un débit horaire en m³/h :

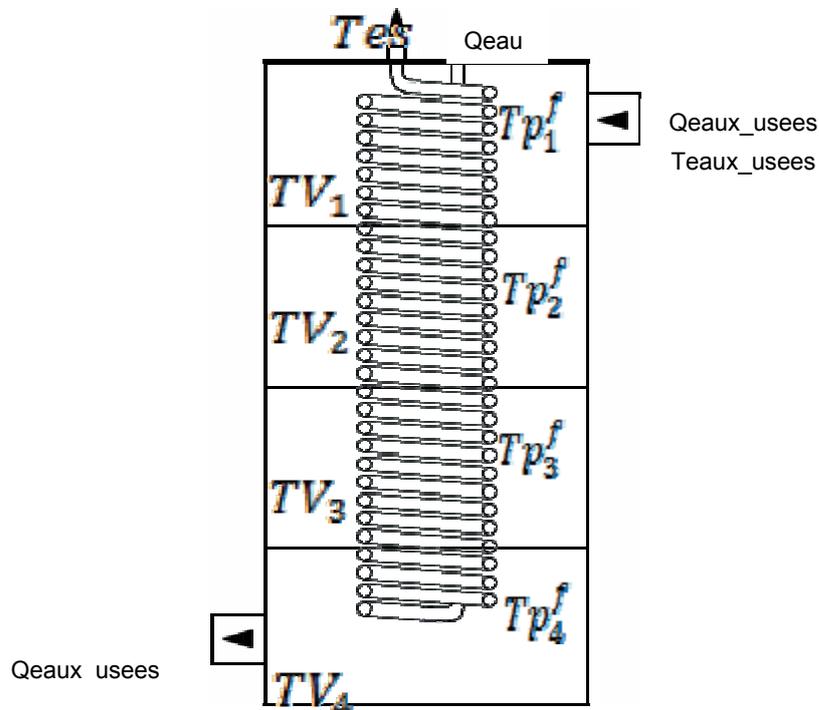
$$Q_{eaux_usees}(h) = \frac{V_{recup}(h)}{1000} \quad (86)$$

La température à l'entrée de la cuve est prise à 33°C :

$$T_{eaux_usees}(h) = 33^{\circ}C \quad (87)$$

3.3.3.3. Schéma du ballon

La cuve de récupération est divisée en 4 zones de volume identique. Il en est de même pour l'échangeur noyé.



Il est possible de mettre en place plusieurs cuves de récupération en série. Dans ce cas, l'ensemble des cuves sera assimilé à une seule cuve dont le volume équivalent sera égal à la somme des volumes des cuves.

3.3.3.4. Calcul des paramètres d'entrée du modèle

$$V_{zone} = \frac{V_{cuve} \times Nb_{cuve}}{4} \quad (88)$$

$$UA_{cuve\ zone} = \frac{UA_{cuve} \times Nb_{cuve}}{4} \quad (89)$$

$$UA_{ech\ zone} = \frac{UA_{ech} \times Nb_{cuve}}{4} \quad (90)$$

3.3.3.5. Calcul des températures à effectuer sur chaque pas de temps

Les températures initiales de la cuve de récupération sont considérées égales à 20°C.

Il y a 6 itérations j à chaque pas de temps h .

3.3.3.5.1. Calcul de la température de la cuve au début de l'itération (mélange + effet piston)

L'itération commence par la zone 1 puis pour les zones 2, 3 et 4.

Zone 1 de la cuve :

$$TV_1^i(j) = \frac{TV_1^f(j-1) \times \left(V_{zone} - \frac{Q_{eaux_usees}(h)}{6} \right) + \frac{T_{eaux_usees}(h) \times Q_{eaux_usees}(h)}{6}}{V_{zone}} \quad (91)$$

Autres zones :

$$TV_z^i(j) = \frac{TV_z^f(j-1) \times \left(V_{zone} - \frac{Q_{eaux_usees}(h)}{6} \right) + \frac{TV_{z-1}^i(j) \times Q_{eaux_usees}(h)}{6}}{V_{zone}} \quad (92)$$

A la première itération (pour $j = 1$), les températures du ballon sont :

$$TV_z^f(j-1) = TV_z^f(h-1)$$

3.3.3.5.2. Calcul des températures à la fin de l'itération

Il faut commencer par la zone 4 du ballon puis répéter le calcul pour les zones 3, 2 et 1.

Pour la zone 4 : $Tp_z^i(j) = Tee(h)$

Étape 1 : Une hypothèse est faite sur la température moyenne de l'échangeur sur la zone z

$$DT_{ech}(j) = Tp_z^i(j) + 1 \quad (93)$$

Étape 2 : Le calcul suivant est fait pour avoir la température de la zone z du ballon à la fin de l'itération

$$A = UA_{echzoneeq} \times DT_{ech}(j) + UA_{cuvezone} \times T_{amb}(h) \quad (94)$$

$$B = UA_{echzoneeq} + UA_{cuvezone} \quad (95)$$

Avec

$$UA_{echzoneeq} = Q_{eau}(h) \times 1000 \times C_{pe_boucle_bis} \times \left(1 - \exp \left(- \frac{UA_{echzone}}{Q_{eau}(h) \times 1000 \times C_{pe_boucle_bis}} \right) \right) \quad (96)$$

$$C = V_{zone} \times 1000 \times C_{pe_boucle_bis} \quad (97)$$

$$TV_z^f(j) = \frac{A}{B} - \left(\frac{A}{B} - TV_z^i(j) \right) \times \exp \left(- \frac{B}{C} \times j \right) \quad (98)$$

Avec

Etape 3 : La température en sortie de l'échangeur sur la zone z est calculée

$$Tp_z^f(j) = Tp_z^i(j) + \frac{C_{pe_boucle_bis} \times 1000 \times V_{zone} \times (TV_z^i(j) - TV_z^f(j)) - UA_{cuvezone} \times (TV_z^f(j) - T_{amb}(h))}{Q_{eau}(h) \times 1000 \times C_{pe_boucle_bis}} \quad (99)$$

Etape 4 : L'hypothèse sur la température moyenne est vérifiée

$$DT_{ech_verif}(j) = \frac{Tp_z^i(j) + Tp_z^f(j)}{2} \quad (100)$$

Si

$$DT_{ech_verif}(j) - DT_{ech}(j) \neq 0 \quad (101)$$

Alors il faut recommencer le calcul à l'étape 1 jusqu'à ce que le calcul converge avec

$$DT_{ech}(j) = DT_{ech_verif}(j) \quad (102)$$

Sinon le calcul est arrêté, toutes les données sur la couche z sont connues et il faut passer à la couche suivante (couche supérieure) du ballon sachant que $Tp_{z-1}^i(j) = Tp_z^f(j)$

3.3.3.6. Sorties à la fin du pas de temps

A la fin des 6 itérations et donc à la fin du pas de temps, la température de la boucle à la sortie de l'échangeur sur eaux usées est la suivante :

$$Tes(h) = Tp_1^f(j) \quad (103)$$

L'énergie échangée au niveau de l'échangeur sur eaux usées au pas de temps h est :

$$Q_{tot}(h) = Q_{eau}(h) \times 1000 \times C_{pe_boucle_bis} \times (Tes(h) - Tee(h)) \quad (104)$$

3.4. Description de la récupération sur sol

3.4.1. Introduction

Cette partie décrit la modélisation de la récupération sur le sol. En période hivernale, il s'agit de récupération de chaleur sur le sol, alors qu'en période estivale il s'agit de stockage de chaleur dans le sol.

Les éléments pris en compte sont des pieux géothermiques.

3.4.2. Nomenclature

Les tableaux ci-dessous donnent la nomenclature des différentes variables du modèle de récupération sur le sol :

Entrées du module				
Nom	Description	Unité		
Q_eau(h)	Débit d'eau au pas de temps h	m ³ /h		
Tee(h)	Température d'eau à l'entrée au pas de temps h	°C		
num_mois(j)	Numéro du mois	-		
Paramètres intrinsèques du composant				
Nom	Description	Unité	Intervalle	Conv.
H_puits	Profondeur du puits	m	]0 ; +∞[
rb	Rayon d'un puits	m	]0 ; +∞[
dsep	Distance entre chaque puits	m	]0 ; +∞[
rp,i	Rayon intérieur de la tuyauterie	m	]0 ; +∞[
rp,e	Rayon extérieur de la tuyauterie	m	]0 ; +∞[
kp	Conductivité thermique de la paroi de la tuyauterie	W/m.K	]0 ; +∞[
kg	Conductivité thermique du coulis	W/m.K	]0 ; +∞[
N_puits	Nombre de puits géothermiques	-	]0 ; +∞[
θmin_sol	Température minimale annuelle de l'interface entre le sol et le pieu géothermique	°C	]0 ; +∞[
θmax_sol	Température maximale annuelle de l'interface entre le sol et le pieu géothermique	°C	]0 ; +∞[
ldmois_mini_sol	N° du mois durant lequel la température d'interface entre le sol et le pieu géothermique est la plus faible	-	[1 ; 12]	-
Cv_sol	Capacité thermique volumique du sol	MJ/ m ³ .K	]0 ; +∞[

Sorties		
Nom	Description	Unité
Tes(h)	Température d'eau à la sortie de la récupération sur sol au pas de temps h	°C
Q_tot(h)	Energie échangée au niveau des pieux géothermiques au pas de temps h	Wh

Variables internes		
Nom	Description	Unité
Qm_eau(h)	Débit massique d'eau au pas de temps h	Kg/s
$\theta_b(j)$	Température de l'interface avec le sol naturel le jour j	°C
ϕ	Déphasage de la fonction de détermination de la température du sol	rad
C_eau(h)	Débit énergétique dans le circuit à eau	W/K
Tf(h)	Température moyenne du fluide caloporteur de la boucle de récupération au pas de temps h	°C
Tsol(h)	Température du sol au pas de temps h	°C
Tsol_fin(h)	Température du sol à la fin du pas de temps h	°C
Rp	Résistance thermique totale du puits	K/W
Rp_lin	Résistance thermique linéaire totale du puits	m.K/W
Rconv	Résistance thermique par convection à l'intérieur du tube	m.K/W
Rcond	Résistance thermique par conduction dans la paroi du tube	m.K/W
Rb	Résistance thermique du puits	m.K/W
Hi(h)	Coefficient de convection de l'eau dans la tuyauterie	W/m ² .K
Vmoy(h)	Vitesse moyenne du fluide dans la tuyauterie	m/s
Re(h)	Nombre de Reynolds pour l'écoulement du fluide dans la tuyauterie	-
Pr	Nombre de Prandtl pour l'écoulement du fluide dans la tuyauterie	-
Nu(h)	Nombre de Nusselt pour l'écoulement du fluide dans la tuyauterie	-
Vcg	Volume du champ géothermique	m ³

Qtot'(h)	Puissance échangée entre le sol et la boucle de récupération avec prise en compte de la variation sinusoïdale de la température du sol	Wh
Qvar_mois(j)	Energie provenant de la variation mensuelle sinusoïdale de la température du sol	Wh

Constantes			
Nom	Description	Unité	Conv.
ρ_{boucle}	Masse volumique de l'eau	Kg/m ³	1000
λ_{boucle}	Conductivité de l'eau	W/m.K	0,65
μ_{boucle}	Viscosité dynamique de l'eau	Pa.s (Pl)	$5,04 \cdot 10^{-4}$
C_{pe_boucle}	Chaleur massique de l'eau de la boucle de récupération	J/kg.K	4180

3.4.3. Description mathématique du module

3.4.3.1. Description de la récupération sur le sol

Cette partie décrit la modélisation d'un champ géothermique constitué de plusieurs puits qui permettent un échange de chaleur entre un fluide caloporteur et le sol.

Les données d'entrée de cette fiche sont :

- Le débit de la boucle de récupération
- La température de la boucle à l'entrée du champ géothermique.

Les caractéristiques suivantes sont également à saisir :

- Les caractéristiques des pieux géothermiques
 - o Profondeur
 - o Rayon d'un puits et distance entre chaque puits
 - o Caractéristiques de la tuyauterie (diamètre, conductivité)
 - o Conductivité du coulis
 - o Nombre de puits
- Les caractéristiques du sol (conductivité, capacité thermique).

Les données précédentes permettent de calculer la température de sortie de la boucle d'eau après passage dans le champ géothermique et la température du sol après le passage de la boucle (en fonction de la chaleur récupérée ou cédée au sol).

3.4.3.2. Récupération par pieux géothermiques

Evolution de la température du sol sur l'année

Dans un premier temps, les équations de la méthode Th-BCE seront utilisées (équations 10.12 et 10.13 page 96 de l'annexe modificatif de la méthode Th-BCE).

Il est défini $\theta_b(j)$ température du sol au voisinage des sondes. $\theta_b(j)$ est calculée mois par mois sur la base de l'hypothèse d'une variation sinusoïdale au cours de l'année :

$$\theta_b(j) = A + B \times \sin\left(2\pi \cdot \frac{\text{num}_{\text{mois}}(j)}{12} + \varphi\right) \quad (105)$$

Avec

$$A = \frac{\theta_{\text{min_sol}} + \theta_{\text{max_sol}}}{2} \quad (106)$$

$$B = \frac{\theta_{\text{max_sol}} - \theta_{\text{min_sol}}}{2} \quad (107)$$

$$\varphi = \pi \cdot \left(\frac{3}{2} - \frac{\text{Id}_{\text{mois_min_i_sol}}(j)}{6}\right) \quad (108)$$

Transfert de chaleur dans un puits

Un champ géothermique est constitué de plusieurs puits qui permettent un échange de chaleur entre un fluide caloporteur et le sol. Un puits est composé d'un fluide caloporteur, d'une tuyauterie et d'un coulis. La figure suivante présente la configuration pour un puits avec un tube en U simple.

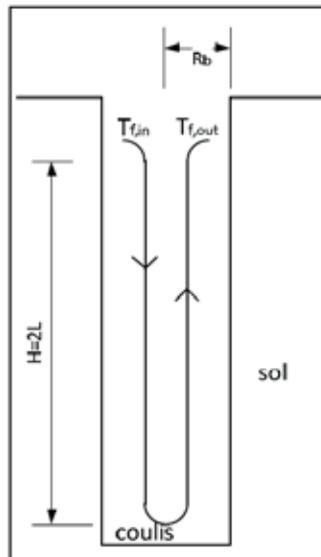


Figure 5 : Puits géothermique en U

Le puits est formé à l'aide d'une foreuse qui permet de faire un trou dans le sol. Par la suite, le tube est glissé à l'intérieur du forage et il est rempli d'un coulis. La longueur de la tuyauterie dans un tube en U représente le double de la profondeur du puits.

Pour calculer la puissance transmise au fluide par le sol, la résistance du puits est calculée.

La résistance totale du puits géothermique est composée de la résistance thermique de la tuyauterie.

Cette résistance inclue les pertes par conduction dans la paroi du tuyau et celles par convection.

Ensuite une résistance de puits est ajoutée pour tenir compte de la conductivité thermique du coulis et de la configuration de la tuyauterie à l'intérieur du puits.

L'énergie récupérée par le fluide dans le puits est calculée de la manière suivante :

$$Q_{tot}(h) = C_{eau}(h) \times (T_{es}(h) - T_{ee}(h)) \quad (109)$$

Avec

$$C_{eau}(h) = Q_{m_eau}(h) \times C_{pe_boucle} \quad (110)$$

Et

$$Q_{m_eau}(h) = \frac{Q_{eau}(h) \times \rho_{boucle}}{3600} \quad (111)$$

De plus la variation de la température entre l'entrée et la sortie est de l'ordre de quelques degrés. La température moyenne du fluide $T_f(h)$ est considérée constante sur toute la tuyauterie afin de simplifier le calcul de transfert de chaleur.

$$T_f(h) = \frac{T_{es}(h) + T_{ee}(h)}{2} \quad (112)$$

La température du fluide moyen est calculée à l'aide de la résistance thermique du puits R_p , de la puissance transmise par le sol et de la température de la paroi du puits $T_{sol}(h)$.

$$T_f(h) = T_{sol}(h) - Q_{tot} \times R_p \quad (113)$$

Avec

$$R_p = \frac{R_{p_lin}}{H_{puits}} \quad (114)$$

La température de la paroi du puits $T_{sol}(h)$ est égale à la température du sol du mois j considéré :

$$T_{sol}(h) = \theta_b(j) \quad (115)$$

La résistance thermique d'un puits dépend du type de tuyauterie utilisé, de la distance entre les tuyaux dans le puits, du coulis, du fluide, du débit et du rayon du puits. La résistance thermique totale d'un puits est calculée avec :

$$R_{p_lin} = R_{conv} + R_{cond} + R_b \quad (116)$$

La résistance en convection et celle en conduction dans la paroi du tube peuvent-être définies par les équations suivantes :

$$R_{conv} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r_{p,i} \cdot h_i} \quad (117)$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_{p,e}}{r_{p,i}}\right)}{4 \cdot \pi \cdot k_p} \quad (118)$$

Pour le calcul de la résistance du puits, le modèle de Paul (1996) exposé dans le mémoire de thèse de Philippe HUDON « Modélisation de puits géothermiques par charges horaires » sera utilisé :

$$R_b = \frac{1}{\beta_0 \times \left(\frac{r_b}{r_{p,e}} \right)^{\beta_1} \times k_g} \quad (119)$$

Avec les coefficients suivants en fonction des configurations A, B ou C.

Configuration	β_0	β_1
A	20.10	-0.9447
B	17.44	-0.6052
C	21.91	-0.3796

Figure 6 : Paramètres de l'équation précédente, tirée du mémoire de thèse de Philippe HUDON

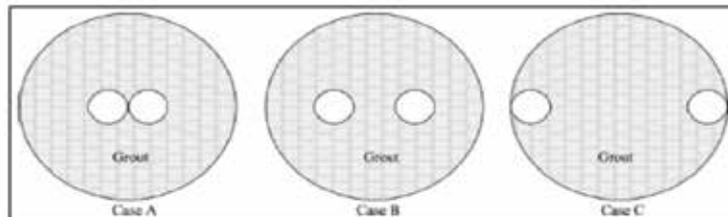


Figure 7 : Configuration des puits pour le calcul de la résistance thermique avec la méthode de Paul (1996)

Tirée du mémoire de thèse de Philippe HUDON

Les calculs seront simplifiés en considérant uniquement le cas B.

Ainsi en remplaçant dans l'équation 8 l'expression de $Q_{tot}(h)$ et $T_f(h)$ on obtient :

$$\frac{T_{es}(h) + T_{ee}(h)}{2} = T_{sol}(h) - C_{eau}(h) \times (T_{es}(h) - T_{ee}(h)) \times R_p \quad (120)$$

Ou encore

$$T_{es}(h) = \frac{2 \times T_{sol}(h) + (2 \times C_{eau}(h) \times R_p - 1) \times T_{ee}(h)}{1 + 2 \times C_{eau}(h) \times R_p} \quad (121)$$

Calcul du coefficient de convection du fluide dans la tuyauterie h_i :

Le coefficient h_i est calculé en utilisant les nombres de Reynolds, Prandtl et Nusselt sachant que :

$$Re(h) = \frac{2 \times r_{p,i} \times \rho_{boucle} \times v_{moy}(h)}{\mu_{boucle}} \quad (122)$$

$$Pr = \frac{C_{pe_boucle} \times \mu_{boucle}}{\lambda_{boucle}} \quad (123)$$

$$Nu(h) = \frac{2 \times r_{p,i} \times h_i(h)}{\lambda_{boucle}} \quad (124)$$

Avec

$$v_{moy}(h) = \frac{Q_{m_eau}(h)}{\rho_{boucle} \times \pi \cdot r_{p,i}^2} \quad (125)$$

D'où

$$h_i(h) = \frac{\lambda_{boucle} \times Nu(h)}{2 \times r_{p,i}} \quad (126)$$

De plus en fonction du type d'écoulement, les corrélations suivantes sont considérées :

Écoulement turbulent : $Re > 5000$ et $0,6 < Pr < 100$

$$Nu(h) = 0,021 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,43} \quad (127)$$

Écoulement laminaire : $Re < 5000$

$$Nu(h) = 1,86 \times (Re \ Pr)^{1/3} \times \left(\frac{r_{p,i}}{H_{puits}} \right)^{1/3} \quad (128)$$

Transfert de chaleur dans l'ensemble des puits

Dans le cas de plusieurs puits, il est défini le nombre N de puits du champ géothermique et la température de sortie des puits est calculée de la manière suivante :

$$T_{es}(h) = \frac{2 \times T_{sol}(h) + \left(\frac{2 \times C_{eau}(h) \times R_p}{N_{puits}} - 1 \right) \times T_{ee}(h)}{1 + \frac{2 \times C_{eau}(h) \times R_p}{N_{puits}}} \quad (129)$$

3.5. Appel des générateurs d'appoint complémentaire

La nomenclature applicable à cette partie est la nomenclature présente au paragraphe 3.1.1. Lorsque les apports des récupérateurs et du volume d'eau (boucle et stockage tampon éventuel) sont insuffisants, il est alors nécessaire de faire appel à des systèmes d'appoint complémentaires. L'énergie demandée à ces générateurs d'appoint complémentaires correspond à $Q_{req_appoint_boucle}(h)$ en chauffage et à $Q_{req_froid_boucle}(h)$ en refroidissement. La température aval à prendre en compte pour ces générateurs correspond à la température aval renvoyée par le moteur et définie dans l'assemblage PAC sur boucle (cf. paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE).

Les systèmes d'appoint en chauffage possible sont les suivants :

- Chaudière standard au gaz : id type = 100
- Chaudière basse température au gaz : id type = 101
- Chaudière à condensation au gaz : id type = 102
- Chaudière standard au fioul : id type = 200
- Chaudière à condensation au fioul : id type = 201
- Chaudière au bois : id type = 400
- PAC à compression électrique eau/eau, PAC à compression électrique air/eau, PAC à compression électrique eau de nappe/eau : id type = 503
- PAC à absorption gaz, air/eau ou eau/eau : id type = 504
- Thermofrigopompe : id type = 508
- Réseau de chaleur : id type = 600
- Système de cogénération : id type = 700
- Tout système générateur de chaud intégré en tant qu'arrêté Titre V dont le fluide aval est de l'eau

Les systèmes d'appoint froid possible sont les suivants :

- PAC à compression électrique eau/eau, PAC à compression électrique air/eau, PAC à compression électrique eau de nappe/eau : id type = 503
- PAC à absorption gaz, air/eau ou eau/eau : id type = 504
- Thermofrigopompe : id type = 508
- Réseau de froid : id type = 601
- Tout système générateur de froid intégré en tant qu'arrêté Titre V dont le fluide aval est l'eau

Les modèles mathématiques de ces différents générateurs d'appoint complémentaires sont ceux de la méthode Th-BCE. Leurs consommations sont calculées par le moteur de calcul. Les consommations décrites ci-dessous sont celles liées à l'appoint complémentaire apporté par la tour de refroidissement, lorsqu'elle est présente.

En chauffage, il n'y a pas d'appoint complémentaire à ceux décrits au paragraphe 10.13 de la méthode Th-BCE :

- énergie fournie : $Q_{fou_appoint_boucle}(h) = 0$
- énergie restante à fournir : $Q_{rest_appoint_ch}(h) = Q_{req_appoint_boucle}(h)$
- consommation du générateur : $Q_{cons_app_boucle_conv}(h) = 0$

En refroidissement, une tour de refroidissement peut assurer un appoint complémentaire :

- S'il y a une tour de refroidissement sur la boucle après les systèmes de récupération :
 - énergie fournie : $Q_{fou_froid_boucle}(h)$ calculée en fonction des caractéristiques de la tour de refroidissement
 - énergie restante à fournir par les autres générateurs d'appoint complémentaire ou renvoyée au pas de temps suivant :

$$Q_{rest_appoint_fr}(h) = Q_{req_froid_boucle}(h) - Q_{fou_froid_boucle}(h)$$
 - consommation du générateur : $Q_{cons_fr_boucle_conv}(h)$ correspondant à la consommation de la tour de refroidissement
- S'il n'y a pas de tour de refroidissement sur la boucle après les systèmes de récupération :
 - énergie fournie : $Q_{fou_froid_boucle}(h) = 0$
 - énergie restante à fournir : $Q_{rest_appoint_fr}(h) = Q_{req_froid_boucle}(h)$
 - consommation du générateur : $Q_{cons_fr_boucle_conv}(h) = 0$

Traitement des données de sortie

- En mode chauffage

Calcul des consommations

La boucle fonctionne tout le temps, mais lorsqu'il n'y a de demande d'énergie à celle-ci, le débit est réduit à 30% de son débit nominal. La consommation de la pompe de la boucle est donc réduite à 30% de sa puissance nominale.

Si $Q_{req_ch}(h) = 0$ alors

$$W_{aux_pro}(h) = 0,3 \times P_{aux_boucle}(1h) \quad (130)$$

Sinon

$$W_{aux_pro}(h) = P_{aux_boucle}(1h) \quad (131)$$

Consommation du générateur d'appoint complémentaire :

$$Q_{cons}(h) = Q_{cons_app_boucle_conv}(h) \quad (132)$$

Consommation totale renvoyée au moteur de calcul :

$$\{Q_{cef(1;50)}^{gr}(h)\} = (W_{aux_pro}(h) + Q_{cons}(h)) \times \{E_{(1;50)}\} \quad (133)$$

Calcul de l'énergie restante :

$$Q_{rest}(h) = Q_{rest_appoint_ch}(h) \quad (134)$$

Calcul des pertes thermiques récupérables :

$$\phi_{vc}(h) = 0 \quad (135)$$

Calcul du rejet du générateur :

$$\phi_{rejet}(h) = 0 \quad (136)$$

- En mode refroidissement

Calcul des consommations

La consommation de la pompe de la boucle d'eau est déjà calculée en mode chauffage. Elle sera imputée aux consommations en mode chauffage en priorité. Elle sera calculée en mode refroidissement uniquement lorsqu'aucun chauffage n'est réalisé (lorsque la boucle sert uniquement pour du refroidissement). Dans ce cas la méthode de calcul reste identique.

Si $Q_{req_fr}(h) = 0$ alors

$$W_{aux_pro}(h) = 0,3 \times P_{aux_boucle}(Ih) \quad (137)$$

Sinon

$$W_{aux_pro}(h) = P_{aux_boucle}(Ih) \quad (138)$$

Consommation du générateur d'appoint :

$$Q_{cons}(h) = Q_{cons_fr_boucle_conv}(h) \quad (139)$$

Consommation totale renvoyée au moteur de calcul :

$$\{Q_{cef(2;50)}^{gnr}(h)\} = (W_{aux_pro}(h) + Q_{cons}(h)) \times \{E_{(2;50)}\} \quad (140)$$

Calcul de l'énergie restante :

$$Q_{rest}(h) = Q_{rest_appoint_fr}(h) \quad (141)$$

Calcul des pertes thermiques récupérables :

$$\phi_{vc_ch}(h) = 0 \quad (142)$$

Calcul du rejet du générateur :

$$\phi_{rejet}(h) = 0 \quad (143)$$