

AMÉNAGEMENT NATURE, LOGEMENT

MINISTÈRE DU LOGEMENT,
DE L'ÉGALITÉ DES TERRITOIRES
ET DE LA RURALITÉ

*Direction de l'habitat, de l'urbanisme
et des paysages*

Arrêté du 13 octobre 2014 relatif à l'agrément de la demande de titre V relative à la prise en compte du système Lahe-Roof dans la réglementation thermique 2012

NOR : ETLL1422102A

(Texte non paru au *Journal officiel*)

La ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et la ministre du logement, de l'égalité des territoires et de la ruralité,

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 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,

Arrêtent:

Article 1^{er}

Conformément à l'article 50 de l'arrêté du 26 octobre 2010 susvisé, le mode de prise en compte du système Lahe-Roof, 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.

Article 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 *Bulletin officiel* du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et du ministère du logement, de l'égalité des territoires et de la ruralité.

Fait le 13 octobre 2014.

*La ministre du logement,
de l'égalité des territoires
et de la ruralité,*

Pour la ministre et par délégation :
*La sous-directrice de la qualité
et du développement durable
dans la construction,*
K. NARCY

*La ministre de l'écologie,
du développement durable
et de l'énergie :*

Pour la ministre et par délégation :

*La sous-directrice de la qualité
et du développement durable
dans la construction,
K. NARCY*

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

ANNEXE

MODALITÉS DE PRISE EN COMPTE DU SYSTÈME « LAHE-ROOF » DANS LA RÉGLEMENTATION THERMIQUE

1/ **Définition du système**

Au sens du présent arrêté, le système « Lahe-Roof » est un système de récupération des apports solaires sur une toiture traditionnelle en pente. Le système comprend deux collecteurs d'air qui s'intercalent entre les tuiles et l'écran de sous-toiture pour permettre de capter l'air sous la toiture à l'endroit le plus proche des tuiles.

Ce système est raccordé à un chauffe-eau thermodynamique ou à toute pompe à chaleur aérothermique destinée à la production d'eau chaude sanitaire.

2/ **Domaine d'application**

La présente méthode s'applique aux maisons individuelles neuves, accolées ou non avec combles aménagés/aménageables ou perdus. Dans le cas de maison avec combles perdus, la lame d'air sous les tuiles doit être délimitée par un écran de sous toiture rigide ou souple assurant cette délimitation nécessaire à la concentration des apports solaires dans la lame d'air.

La surface de toiture permettant l'utilisation du système « Lahe-Roof » doit être au minimum de 10m².

L'installation du système « Lahe-Roof » n'est possible qu'avec un fonctionnement de jour du chauffe-eau thermodynamique. Cela se traduit techniquement par la pose d'une horloge programmable sur le tableau électrique, ou par la programmation horaire de l'horloge intégrée pour les chauffe-eaux thermodynamiques qui en possèdent une. L'horloge doit être programmée pour un fonctionnement entre 10h et 19h.

Les pompes à chaleurs compatibles avec le système « Lahe-Roof » doivent avoir les caractéristiques suivantes :

- une plage admissible de température amont (air) entre -7°C et 45°C ;
- un COP nominal supérieur à 2,6 (selon la norme NF EN 16147 suivant une caractérisation pour une PAC air extérieur /eau) ;
- une puissance électrique inférieure ou égale à 1000W ;
- un débit d'air aspiré inférieur ou égal à 500 m³/h ;
- une perte de charge admissible supérieure ou égale à 25 Pa ;
- un raccordement de gaine d'air aspiré de diamètre 160 mm ;
- un raccordement à un volume de stockage supérieur ou égal à 200 litres ;

3/ **Procédure d'application du Titre V**

Pour décrire le système « Lahe-Roof » raccordée à une pompe à chaleur, il est nécessaire de saisir une pompe à chaleur dont la caractérisation des performances est celles des pompes à chaleur de type air extérieur/eau. La pompe à chaleur doit être connectée à l'espace tampon « LAHE-ROOF ». La pompe à chaleur connectée au système « Lahe-Roof » fonctionne de jour. Dans la production stockage, le type de gestion du thermostat de base du stockage

d'ECS doit être « chauffage de jour » qui fait l'objet d'une extension dynamique. S'il existe un appoint à la pompe à chaleur pour la production d'ECS, le type de gestion du thermostat d'appoint du ballon de stockage d'ECS peut être « chauffage permanent », « chauffage de nuit » ou « chauffage de jour ».

Dans le cas d'une maison avec combles perdus, l'utilisateur ne renseigne pas le comble comme un espace tampon, il calcule alors le btherm conformément aux règles Th-Bat qui sera une donnée d'entrée pour le module d'extension dynamique « Lahe-Roof ».

Dans le cas d'une maison avec combles aménagés ou aménageables, l'utilisateur renseigne sa toiture conformément aux règles Th-Bat, en prenant en compte une lame d'air fortement ventilée.

Dans les 2 cas, l'utilisateur relie l'espace tampon « Lahe-Roof » à la paroi déperditive du plancher haut :

- cas combles perdus : paroi entre le comble perdus et l'ambiance chauffée
- cas combles aménagés : pan de toiture sur lequel le système « Lahe-Roof » est connecté

4/ **Méthode de prise en compte dans les calculs pour la partie non directement modélisable**

Les fiches algorithmes « espace tampon LAHE-ROOF », « T5_STO_gestion_régulation_ballon_base » et « T5_STO_gestion_régulation_appoint_ballon » permettent de décrire les parties non directement modélisables dans la méthode Th-BCE.

4.1. Fiche algorithme espace tampon « Lahe-Roof »

1. INTRODUCTION

Cette fiche algorithme décrit la prise en compte du système « Lahe-Roof », un système de récupération des apports solaires de la toiture.

2. DESCRIPTION DU MODULE

Ce module permet de calculer la température amont d'un chauffe-eau thermodynamique raccordé au système « Lahe-Roof ». Le système est modélisé comme un espace tampon solarisé.

3. NOMENCLATURE DU MODELE

Table 1 : Liste exhaustive des variables du modèle

Entrées¹				
Nom	Description	Unité	Intervalle²	Def³
$I_{sr,k}(h)$	Rayonnement solaire global atteignant la toiture	W/m ²		
$V_{vent}(h)$	Vitesse du vent au pas de temps h	m/s		
$\theta_{ext}(h)$	Température de l'air extérieur, au pas de temps h	°C		
$\theta_{e,ciel}(h)$	Température du ciel, au pas de temps h	°C		
$U_{toiture}$	Coefficient de transmission thermique de la toiture	W/m ² .K		
β	Inclinaison de la toiture	°		
Paroi_ext_colle ction	Paroi correspond à la toiture			
Paramètres du module⁴				

¹ Valeurs opérées par d'autres modules

² Les intervalles donnent les limites les plus larges autorisées pour le calcul. Sauf mentions contraire, le test de compatibilité est fait dans le code, pour debugage uniquement. Préciser l'exclusion des bornes ([...], [...], [...] etc.).

³ Valeur par défaut

Nom	Description	Unité	Intervalle ⁵	Def
id_{comble}	Indice de type de comble 0 : Combles aménagés ou aménagables 1 : Combles perdus		{0; 1}	
A_{tuiles}	Surface du pan de toiture où se trouve le système LAHE-ROOF	m ²	[0 ; +∞[
$id_{\alpha_{tuile}}$	Type de donnée de coefficient d'absorption solaire de la tuile 0 : absorption de la tuile mesurée connue 1 : valeur par défaut catégorie clair 2 : valeur par défaut catégorie moyen 3 : valeur par défaut catégorie sombre 4 : valeur par défaut catégorie noir		{0; 1; 2 ; 3 ; 4}	
$\alpha_{tuile_mesuré}$	Coefficient d'absorption solaire de la tuile si connue et mesurée		[0 ; 1]	
b_{th}	Coefficient b de réduction du comble		[0 ; 1]	

Sorties

Nom	Description	Unité	Intervalle	Def
$\theta_{amont}(h)$	Température d'air dans l'espace tampon LAHE-ROOF	°C		
$b_{therm}(h)$	Coefficient de réduction des déperditions thermiques dû à la présence de l'espace tampon LAHE-ROOF		[0 ; 1]	
$b_{solaire}(h)$	Coefficient de réduction des flux solaires dû à la présence de l'espace tampon LAHE-ROOF		[0 ; 1]	
$b_{ecl}(h)$	Coefficient de réduction de l'éclairage dû à la présence de l'espace tampon LAHE-		[0 ; 1]	

⁴ Rentrés par l'utilisateur

⁵ Les intervalles de l'interface donnent les limites les plus larges autorisées pour le calcul. Sauf mentions contraire, le test de compatibilité est systématique fait dans le code. Préciser l'exclusion des bornes ([...], [...]] etc.).

ROOF

Variables internes⁶

Nom	Description	Unité	Intervalle	Def
$H_{la,th,ext}$	Coefficient de transmission thermique de la lame d'air vers l'extérieur	W/K		
$H_{la,th,int}$	Coefficient de transmission thermique de la lame d'air vers l'intérieur	W/K		
$A_{tuiles,i}$	Surface du volume i du pan de toiture où se trouve le système LAHE-ROOF	m ²		
$C_{m,la,i}$	Capacité thermique du volume i de la lame d'air	Wh/°C		
$F_{s,la,i}(h)$	Flux de chaleur transmis au travers les tuiles au volume i de la lame d'air	W		
D_i	Débit circulant dans la section principale du volume i	kg/s		
Inf_i	Débit d'infiltration dans la section principale du volume i	kg/s		
$\theta_{la,i}(h)$	Température du volume i de la lame d'air au pas de temps h	°C		
$\theta_{combles}(h)$	Température des combles au pas de temps h	°C		
$\phi_{la,i}(h)$	Somme des flux d'échanges thermiques de la lame d'air avec l'extérieur et la paroi intérieure	W		
$S_{f,tuiles}$	Facteur solaire des tuiles vers la lame d'air.	-	[0 ; 1]	
α_{tuile}	Coefficient d'absorption solaire de la tuile	-	[0 ; 1]	
$U_{paroi,tuile}$	Coefficient de transmission de la paroi constituée des tuiles	W/m ² .K		
$R_{th,paroi,tuile}$	Résistance thermique de la paroi constituée des tuiles	m ² .K/W		
$U_{vert,paroi,tuile}$	Coefficient de transmission de la paroi constituée des tuiles en position verticale	W/m ² .K		
$U_{horiz,paroi,tuile}$	Coefficient de transmission de	W/m ² .K		

⁶ Variables utilisées uniquement dans le module courant.

	la paroi constituée des tuiles en position horizontale	
$U_{\text{paroi_tuile},\beta}$	Coefficient de transmission thermique de la paroi constituée des tuiles dans sa position réelle en œuvre	$W/m^2.K$
$\phi_{\text{sh_paroi_tuile}}(h)$	Flux de chaleur dû au rayonnement froid de la voûte céleste à travers la paroi constituée des tuiles	W

Constantes⁷

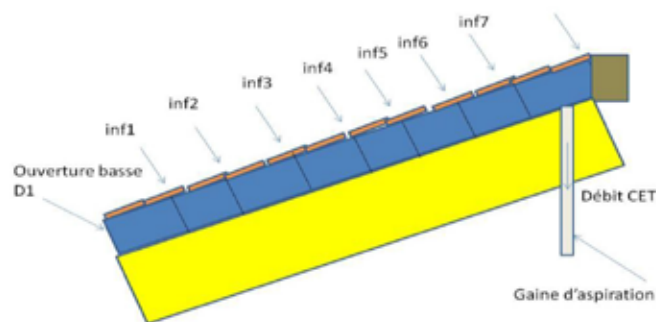
Nom	Description	Unité	Intervalle	Def
h_e	Coefficient d'échange global (convectif + radiatif) extérieur	$W/m^2.K$		25
R_{si}	Résistance superficielle intérieure	$m^2.K/W$		0,10
R_{se}	Résistance superficielle extérieure	$m^2.K/W$		0,04
K_{kJ_Wh}	Coefficient de passage du kJ au Wh	Wh/kJ		1/3,6
a_i	Constante permettant de calculer les infiltrations d'air à travers les tuiles au niveau du volume i	-		Voir tableau
b_i	Constante permettant de calculer les infiltrations d'air à travers les tuiles au niveau du volume i	-		Voir tableau
$c_{p,air}$	Capacité thermique massique de l'air	$J/(kg.K)$		1004
$c_{m,tuiles}$	Capacité thermique des tuiles :	$kJ/(m^2.K)$		800
U_{tuiles}	Coefficient de transmission thermique des tuiles	$W/m^2.K$		34,6

⁷ Constantes (ex: chaleur spécifique de l'eau) et conventions.

4. DESCRIPTION MATHÉMATIQUE

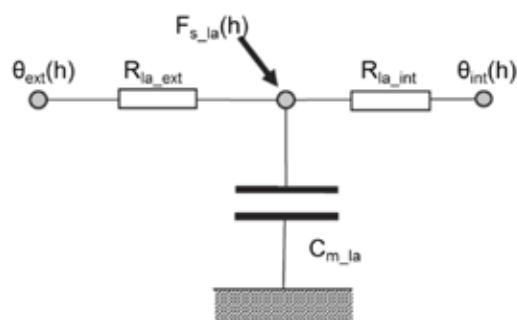
La lame d'air fait l'objet d'une modélisation dynamique simplifiée prenant en compte les échanges thermiques par les parois extérieures et intérieures, les débits d'air entrants et les apports solaires.

La représentation simplifiée de la toiture décompose celle-ci en huit zones. Chaque zone comporte un ensemble de tuiles, un volume d'air et la paroi intérieure en dessous. L'air s'écoule dans les volumes d'air dans la section principale et un débit infiltré ou exfiltré est imposé à l'entrée et à la sortie de chaque zone comme présenté à la figure ci-dessous :



L'objectif de ce module est le calcul de la température d'air horaire de la dernière zone de la lame d'air, c'est la température que verra le chauffe-eau thermodynamique en fonctionnement.

On adopte la modélisation simplifiée réseau RC suivante du comportement thermique du volume i de la lame d'air :



Les « résistances » du réseau englobent les phénomènes d'échange thermique par conduction à travers la toiture, les phénomènes de convection/rayonnement, et les échanges aérauliques.

Coefficient de corrections

L'extension dynamique est reliée au plancher haut saisi par l'utilisateur. Les coefficients $b_{solaire}(h)$ et $b_{ecl}(h)$ sont fixés à 1.

Si le comble est aménagé ($id_{comble} = 0$), alors

$$b_{therm}(h) = 1 \quad 1)$$

Si le comble est perdu ($id_{comble} = 1$), alors le coefficient $b_{therm}(h)$ est saisi par l'utilisateur :

$$b_{therm}(h) = b_{th} \quad 2)$$

Coefficients de transmissions thermiques avec l'extérieur

La lame d'air est en contact avec l'extérieur au travers des tuiles. Le coefficient de transmission thermique par la toiture est considéré constant au cours de la simulation :

$$H_{la_th_ext} = A_{tuiles,i} \times U_{paroi_tuile,\beta} \quad 3)$$

Avec :

$$A_{tuiles,i} = \frac{A_{tuiles}}{8} \quad 4)$$

Le coefficient de transmission thermique de la toiture $U_{toiture,\beta}$ est calculé en tenant compte de son inclinaison.

On pose :

$$R_{th\ paroi_tuile} = \frac{1}{U_{tuiles}} - 0,14 \quad 5)$$

$$U_{vert\ paroi_tuile} = \frac{1}{R_{th\ paroi_tuile} + 0,17} \quad 6)$$

$$U_{horiz\ paroi_tuile} = \frac{1}{R_{th\ paroi_tuile} + 0,14} \quad 7)$$

Si $\beta < 45$ alors :

$$U_{paroi_tuile,\beta} = U_{horiz\ paroi_tuile} \quad 8)$$

Sinon

$$U_{paroi_tuile,\beta} = \frac{U_{horiz\ paroi_tuile} + U_{vert\ paroi_tuile}}{2} \quad 9)$$

Coefficients de transmissions thermiques avec l'intérieur

La lame d'air est en contact avec l'intérieur au travers de la paroi intérieure de la toiture. Le coefficient de transmission thermique avec l'intérieur est constant au cours de la simulation :

$$H_{la_th_int} = \frac{1}{U_{toiture}} \quad 10)$$

Capacité thermique du volume i de la lame d'air :

La capacité thermique de l'espace tampon s'exprime en $Wh/°C$. Ce paramètre est constant au cours de la simulation.

$$C_{m,la,i} = C_{m,tuiles} \times A_{tuiles,i} \times K_{kj,Wh} \quad 11)$$

Calcul des apports solaires du volume i de la lame d'air :

Le flux de chaleur total transmis à la lame d'air est obtenu par le produit du rayonnement et du facteur solaire des tuiles.

$$F_{s_{la},i}(h) = I_{sr,k}(h) \times S_{f,tuiles} \times A_{tuiles,i} \quad 12)$$

$I_{sr,k}(h)$ est calculé par le moteur de calcul à partir de l'orientation de la toiture que renseigne l'utilisateur.

Le facteur solaire des tuiles est constant au cours de la simulation et est calculé à partir des règles Th-S :

$$S_{f,tuiles} = \alpha_{tuile} \times U_{paroi,tuile,\beta} \times R_{se} \quad 13)$$

L'utilisateur renseigne le coefficient d'absorption solaire de la tuile. Soit la valeur est mesurée et connue alors :

$$\alpha_{tuile} = \alpha_{tuile,mesuré}$$

Soit la valeur est prise par défaut suivant la catégorie.

Si la catégorie renseignée par l'utilisateur est claire, alors $\alpha_{tuile} = 0,4$.

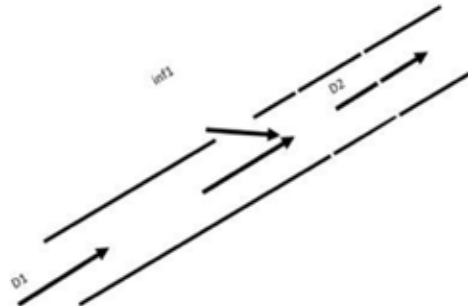
Si la catégorie renseignée par l'utilisateur est moyen, alors $\alpha_{tuile} = 0,6$.

Si la catégorie renseignée par l'utilisateur est sombre, alors $\alpha_{tuile} = 0,8$.

Si la catégorie renseignée par l'utilisateur est noire, alors $\alpha_{tuile} = 1$.

Calcul des débits entrants dans le volume i de la lame d'air

Le bilan des échanges aérauliques entre la lame d'air, l'extérieur et l'intérieur du bâtiment est écrit à l'entrée de chaque volume d'air pour déterminer le débit circulant dans la section principale de ce volume ainsi que la température de l'air entrant :



Exemple du bilan de masse pour les zones 1 et 2

Pour i allant de 1 à 8, à l'entrée de chaque zone ce bilan s'écrit :

$$D_{i+1} = D_i + \text{Inf}_i \quad 14)$$

Le débit D_1 et les débits d'infiltrations Inf_i sont calculés selon l'expression suivante :

$$D_1 = a_1 \times V_{\text{vent},c}(h) + b_1 \quad 15)$$

$$\text{Inf}_i = a_i \times V_{\text{vent},c}(h) + b_i \quad 16)$$

Si $\text{Inf}_i > 0$, il y a infiltration de l'air de l'extérieur dans la lame d'air. Si $\text{Inf}_i < 0$, il y a exfiltration de l'air de la lame d'air vers l'extérieur.

Les valeurs de a_i et b_i sont données dans le tableau suivant et dépendent de l'inclinaison de la toiture, renseigné par l'utilisateur.

Vitesse	Toiture inclinée à 15°		Toiture inclinée à 30°		Toiture inclinée à 45°	
	a	b	a	b	a	b
D1	0,00054349	0,04042967	0,00022967	0,01763333	0,00050769	0,03715002
Inf1	0,00053961	-0,00065	0,00024567	-0,00016243	0,00054247	-0,00013702
Inf2	0,00053798	-0,00064667	0,00024567	-0,00016243	0,00054247	-0,00013702
Inf3	0,00001444	0,001008	9,0333E-06	0,00052567	0,00001995	0,00151696
Inf4	-7,8133E-06	0,00105467	9,0333E-06	0,00052567	0,00001995	0,00151696
Inf5	-0,00023937	0,005309	-0,00010807	0,001266	-0,00023885	0,00582618
Inf6	-0,00023937	0,005309	-0,00010807	0,001266	-0,00023885	0,00582618
Inf7	-0,0005774	0,007032	-0,0002612	0,000672	-0,0005774	0,0075522
Inf8	-0,0005774	0,007032	-0,0002612	0,000672	-0,0005774	0,0075522

On pose :

$$D_{1,\beta=15} = a_{1,\beta=15} \times V_{\text{vent},c}(h) + b_{1,\beta=15} \quad 17)$$

$$D_{1,\beta=30} = a_{1,\beta=30} \times V_{\text{vent},c}(h) + b_{1,\beta=30} \quad 18)$$

$$D_{1,\beta=45} = a_{1,\beta=45} \times V_{\text{vent},c}(h) + b_{1,\beta=45} \quad 19)$$

Entre 15° et 30°, les débits d'infiltrations sont interpolés ainsi :

Si $\beta < 15^\circ$, alors :

$$D_1 = D_{1,\beta=15} \quad 20)$$

Si $\beta < 30^\circ$, alors :

$$D_1 = D_{1,\beta=30} - \frac{D_{1,\beta=30} - D_{1,\beta=15}}{(30 - 15)} \times 30 + \frac{D_{1,\beta=30} - D_{1,\beta=15}}{(30 - 15)} \times \beta \quad 21)$$

Si $\beta < 37,5^\circ$, alors :

$$D_1 = D_{1,\beta=30} \quad 22)$$

Sinon :

$$D_1 = D_{1,\beta=45} \quad 23)$$

Pour i allant de 1 à 8,

On pose :

$$\text{Inf}_{i,\beta=15} = a_{i,\beta=15} \times V_{\text{vent},c}(h) + b_{i,\beta=15} \quad 24)$$

$$\text{Inf}_{i,\beta=30} = a_{i,\beta=30} \times V_{\text{vent},c}(h) + b_{i,\beta=30} \quad 25)$$

$$\text{Inf}_{i,\beta=45} = a_{i,\beta=45} \times V_{\text{vent},c}(h) + b_{i,\beta=45} \quad 26)$$

Entre 15° et 30°, les débits d'infiltrations sont interpolés ainsi :

Si $\beta < 15^\circ$, alors :

$$\text{Inf}_i = \text{Inf}_{i,\beta=15} \quad 27)$$

Si $\beta < 30^\circ$, alors :

$$\text{Inf}_i = \text{Inf}_{i,\beta=30} - \frac{\text{Inf}_{i,\beta=30} - \text{Inf}_{i,\beta=15}}{(30 - 15)} \times 30 + \frac{\text{Inf}_{i,\beta=30} - \text{Inf}_{i,\beta=15}}{(30 - 15)} \times \beta \quad 28)$$

Si $\beta < 37,5^\circ$, alors :

$$\text{Inf}_i = \text{Inf}_{i,\beta=30} \quad 29)$$

Sinon :

$$\text{Inf}_i = \text{Inf}_{i,\beta=45} \quad 30)$$

Bilan thermique sur le volume i de la lame d'air :

On pose :

$$\theta_{la,i}(h = 0) = \theta_{\text{ext}} \quad 31)$$

Dans le cas où le comble est perdu (non aménagé ou non aménageables), on considère que la température des combles est la moyenne des températures des volumes i de la lame d'air :

$$\theta_{\text{combles}}(h) = \frac{1}{8} \times \sum_{i=1}^8 \theta_{la,i}(h - 1) \quad 32)$$

La somme des flux thermiques de la lame d'air est la suivante (en W) :

Si $\text{Inf}_i > 0$ (infiltration) alors :

$$F_{s,la}(h) + H_{la,th_ext} \times \theta_{\text{ext}}(h) + H_{la,th_int} \cdot id_{\text{comble}} \cdot \theta_{\text{combles}}(h) + D_i \times C_{p,\text{air}} \times \theta_{la,i}(h) + \text{Inf}_i \times C_{p,\text{air}} \times \theta_{\text{ext}}(h) = D_{i+1} \times C_{p,\text{air}} \times \theta_{la,i+1}(h) + C_{m_{la,i+1}} \times \frac{d\theta_{la,i+1}(h)}{dt}$$

On en déduit la température du volume i de la lame d'air :

$$\theta_{la,i+1}(h) = (\theta_{la,i+1}(h = 0) - A) \times e^{-\frac{D_{i+1} \times C_{p,air} h}{C_{m,la,i}}} + A \quad 34)$$

Avec :

$$A = (F_{s,la}(h) + H_{la,th,ext} \times \theta_{ext}(h) + H_{la,th,int} \cdot id_{comble} \cdot \theta_{combles}(h) + D_i \times C_{p,air} \times \theta_{la,i}(h) + Inf_i \times C_{p,air} \times \theta_{ext}(h)) / (D_{i+1} \times C_{p,air} + H_{la,th,ext} + H_{la,th,int} \cdot id_{comble})$$

Si $Inf_i < 0$ (exfiltration) alors :

$$\begin{aligned} F_{s,la}(h) + H_{la,th,ext} \times \theta_{ext}(h) + H_{la,th,int} \cdot id_{comble} \cdot \theta_{combles}(h) + (D_i + Inf_i) \times C_{p,air} \times \theta_{la,i}(h) \\ = D_{i+1} \times C_{p,air} \times \theta_{la,i+1}(h) + C_{m,la,i} \times \frac{d\theta_{la,i+1}(h)}{dt} \end{aligned} \quad 36)$$

On en déduit la température du volume i de la lame d'air :

$$\theta_{la,i+1} = (\theta_{la,i+1}(t = 0) - B) \times e^{-\frac{D_{i+1} \times C_{p,air} h}{C_{m,la,i}}} + B \quad 37)$$

Avec :

$$B = (F_{s,la}(h) + H_{la,th,ext} \times \theta_{ext}(h) + H_{la,th,int} \cdot id_{comble} \cdot \theta_{combles}(h) + (D_i + Inf_i) \times C_{p,air} \times \theta_{la,i}(h)) / (D_{i+1} \times C_{p,air} + H_{la,th,ext} + H_{la,th,int} \cdot id_{comble}) \quad 38)$$

On a alors :

$$\theta_{la,i=8}(h) = \theta_{amont}(h) \quad 39)$$

4.2. Fiche algorithme T5 STO gestion régulation ballon base

1. INTRODUCTION

Pour produire de l'eau chaude, un ballon de stockage peut posséder une ou deux source(s) de chaleur. Dans le premier cas, l'unique source de chaleur est appelée base, dans le second cas la base sera la source de chaleur prioritaire.

En tenant compte des paramètres de gestion-régulation du thermostat, nous calculons, en premier lieu, le volume d'eau chaude puisé dans le ballon puis l'énergie requise au niveau du générateur de base pour couvrir les besoins d'ECS et/ou de chauffage et compenser les pertes thermiques du ballon.

2. NOMENCLATURE

Le Tableau 1 donne la nomenclature des différentes variables du modèle.

Tableau 1 : Nomenclature des différentes variables du modèle

Entrées du composant					
Nom	Description	Unité			
h_{leg}	Heure légale au pas de temps h .	h			
θ_{cw}	Température de l'eau froide entrant dans le système de préparation de l'eau chaude	°C			
$\theta_{eci_max}^{gen}$	Température maximale des réseaux de distribution intergroupe d'ECS connectés à la génération gen .	°C			
$\theta_{ch_max}^{gen}$	Température maximale des réseaux de distribution intergroupe de chaud connectés à la génération gen .	°C			
$\theta_{bz}(h-1)$	Températures de la zone z ($z = 1$ à 4) du ballon au pas de temps précédent	°C			
$\theta_{bz}(h-2)$	Températures de la zone z ($z = 1$ à 4) du ballon au pas de temps $h-2$	°C			
$Pe_z(h-1)$	Pertes thermiques de la zone z ($z = 1$ à 4) du ballon au pas de temps précédent	W			
$Q_{w_sto_unit}(h)$	Besoins d'énergie requis en entrée du ballon	Wh			
$Q_{w_sto_unit_re_port}(h)$	Energie non assurée au pas de temps $h-1$, reportée au pas de temps courant	Wh			
z_{base}	Numéro de la zone du ballon qui contient l'échangeur du générateur de base	-			
z_{reg_base}	Numéro de la zone du ballon qui contient le système de régulation de la base	-			
$id_{fonction}(h)$	Indicateur de fonction du générateur accompagnant le $Q_{req_sto_base}(h)$ (1 : chauffage, 2 : refroidissement, 3 : ECS), pour les générateurs multi-fonctions.	Ent			
Paramètres intrinsèques du composant					
Nom	Description	Unité	Min	Max	Conv.
$type_{gest_bas}^e$	Type de gestion du thermostat de base du ballon de stockage 2. Chauffage de jour	-	2	2	-
V_{tot}	Volume total du ballon	L	0	$+\infty$	-
f_{aux}	Fraction effective concernée par l'appoint dans le cas d'un ballon base+appoint	-	0	1	-
$V_{(z_{reg_base})}$	Volume de la zone du ballon où se situe le système de régulation de la base	L	0	$+\infty$	-
V_z	Volume des zones du ballon (z allant de 1 à 4)	L	0	$+\infty$	-
N_{zone}	Nombre de zones dans le ballon	-	0	$+\infty$	4
Paramètres d'intégration du composant					
Nom	Description	Unité	Min	Max	Conv.
θ_{c_base}	Température de consigne de la partie du ballon gérée par la base	°C	0	110	55

$\Delta\theta_{base}$	Hystérésis du système de régulation de la base	K	0	20	-
$statut_delt$ a_theta	1 : valeur à saisir 2 : valeur par défaut	-	1	2	-

Sorties

Nom	Description	Unité
$Q_{req_sto_base}(h)$	Energie requise à fournir à l'élément de stockage par le générateur de base	W
Nb_{iter_vp}	Nombre d'itérations de la boucle pour le calcul du volume puisé total du ballon	-
$V_p(h)$	Volume puisé au pas de temps h	L

Variables internes

Nom	Description	Unité
f_p	Programmation (1 autorisé, 0 coupé)	-
V_{ap}	Volume de la partie du ballon chauffée par l'appoint	L
i	Numéro de l'itération en cours	-
θ_{max}^{gen}	Température maximale des distributions intergroupes soit de chaud soit d'ECS connectées à une même génération	°C
$Q_{w_sto_unit}(i)$	Besoins d'énergie requis en entrée du ballon au début de l'itération i	Wh
$Q_{w_sto_unit_report}(i)$	Energie non assurée à l'itération $i-1$, reportée à l'itération courant	Wh
$V_p(i)$	Volume puisé pendant l'itération i	L

Constantes

Nom	Description	Unité	Conv.
ρ_w	Masse volumique de l'eau	kg/L	1
c_w	Capacité calorifique massique de l'eau	Wh/(kg.K)	1,163

3. DESCRIPTION MATHÉMATIQUE

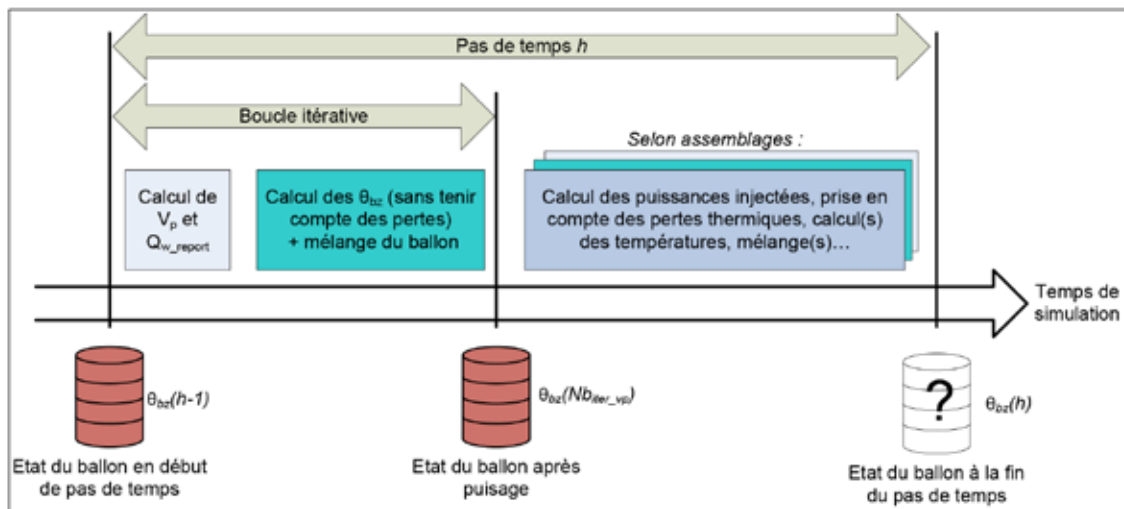
Ces algorithmes sont en amont du modèle de ballon et déterminent le volume à puiser au pas de temps h puis l'énergie à fournir par le générateur de base pour remonter le ballon à la température de consigne.

3.1. Itérations lors d'un même pas de temps horaire pour le calcul du volume puisé

Le calcul du volume puisé à partir de la demande d'énergie utilise la température de la zone supérieure du ballon θ_{br} (au pas de temps précédent). Par conséquent, chaque zone pouvant avoir une température différente, le volume puisé ne peut excéder le volume de la plus petite zone du ballon.

Pour remédier à cela, le volume puisé total du pas de temps h est calculé au cours de plusieurs itérations i , avec les hypothèses suivantes :

- le nombre d'itérations Nb_{iter_vp} dépend du f_{aux} ;
- le volume puisé, l'énergie reportée et les températures du ballon (V_p , $Q_{w_sto_unit_report}$, θ_{bz}) sont calculés à chaque itération ;
- si l'énergie reportée est nulle, la boucle itérative s'arrête ;
- ni les pertes ni les puissances injectées dans le ballon ne seront comptabilisées avant la dernière itération de la boucle ;
- la chronologie des événements est expliquée ci-dessous :



3.2. Calcul du nombre d'itérations

Le nombre total d'itérations servant à calculer le volume total puisé dans un ballon est égal à :

Si ballon ne possède qu'une source de chaleur,

$$Nb_{iter_vp} = 4$$

(1)

Si ballon possède deux sources de chaleur,

$$Nb_{iter_vp} = \text{arrondi.inf} \left(\frac{2}{\min(f_{aux}, 1 - f_{aux})} \right)$$

Et où $V_{ap} = f_{aux} * V_{tot}$.

3.3. Initialisation de la boucle itérative

- i est initialisé à 1 au début du pas de temps h

(2)

3.4. Calcul du volume puisé d'ECS (boucle itérative)

Le volume puisé est calculé à partir de la température de la zone supérieure du ballon de l'itération précédente et ne peut excéder, à chaque itération, le volume de la plus petite zone du ballon de stockage.

Au préalable, on pose

$$\theta_{\max}^{\text{gen}} = \begin{cases} \theta_{\text{ecs_max}}^{\text{gen}} & \text{si } Id_{\text{fonction}} = 3 \\ \theta_{\text{ch_max}}^{\text{gen}} & \text{si } Id_{\text{fonction}} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

A la première itération ($i=1$),

$$Q_{w_sto_unit}(i) = Q_{w_sto_unit}(h) + Q_{w_sto_unit_report}(h-1) \quad (4)$$

Si la demande d'énergie ne peut être satisfaite, l'énergie à puiser sera reportée à l'itération suivante.

Si $\theta_{b4}(h-1) > \theta_{\max}^{\text{gen}}$

$$V_p(i) = \min \left(\frac{Q_{w_sto_unit}(i)}{\rho_w \cdot c_w \cdot (\theta_{b4}(h-1) - \theta_{cw}(h))}, \{V_z\}_{z \in \{1,4\}} \right) \quad (5)$$

$$Q_{w_sto_unit_report}(i) = Q_{w_sto_unit}(i) - \rho_w \cdot c_w \cdot V_p(i) \cdot (\theta_{b4}(h-1) - \theta_{cw}(h))$$

sinon

$$V_p(i) = 0 \quad (6)$$

$$Q_{w_sto_unit_report}(i) = Q_{w_sto_unit}(i)$$

La boucle itérative continue tant que ($1 < i \leq Nb_{\text{iter_vp}}$ et $Q_{w_sto_unit_report}(i) \neq 0$)

$$Q_{w_sto_unit}(i) = Q_{w_sto_unit_report}(i-1) \quad (7)$$

De même que précédemment,

Si $\theta_{b4}(i-1) > \theta_{\max}^{\text{gen}}$

$$V_p(i) = \min \left(\frac{Q_{w_sto_unit}(i)}{\rho_w \cdot c_w \cdot (\theta_{b4}(i-1) - \theta_{cw}(h))}, \{V_z\}_{z \in \{1,4\}} \right) \quad (8)$$

$$Q_{w_sto_unit_report}(i) = Q_{w_sto_unit}(i) - \rho_w \cdot c_w \cdot V_p(i) \cdot (\theta_{b4}(i-1) - \theta_{cw}(h))$$

sinon

(9)

$$V_p(i) = 0$$

$$Q_{w_sto_unit_report}(i) = Q_{w_sto_unit}(i)$$

La boucle itérative sur les algorithmes de la gestion-régulation de la base du ballon se termine ici. La dernière valeur de l'énergie $Q_{w_sto_unit_report}(Nb_{iter_vp})$ sera reportée au pas de temps suivant.

Le volume total puisé dans le ballon au pas de temps courant est noté de la manière suivante :

$$V_p(h) = \sum_{i=1}^{Nb_{iter_vp}} V_p(i) \quad (10)$$

3.5. Alerte sur le report d'énergie

Le nombre d'heures pendant lequel l'énergie reportée est non nulle s'exprime de la façon suivante :

Initialisation : $nbh_{report_e} = 0$

Si $Q_{w_sto_unit_report_e}(h) \neq 0$

$$nbh_{report_e}(h) = nbh_{report_e}(h-1) + 1 \quad (11)$$

Sinon

$$nbh_{report_e}(h) = nbh_{report_e}(h-1)$$

Si ce nombre dépasse 24, le moteur de calcul affichera une alerte.

3.6. Calcul de l'indice de programmation de la base du ballon : f_p

Selon le type de gestion de la base du ballon (fonctionnement de nuit ou fonctionnement permanent), on autorise ou non le(s) générateur(s) à fournir de l'énergie au ballon.

Si $type_{gest_base} = 2$ alors

$$\begin{cases} \text{si } 10h \leq h_{leg} \leq 19h & f_p(h) = 1 \\ \text{sinon} & f_p(h) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

3.7. Calcul de la puissance requise

Ce paragraphe est obsolète pour les assemblages dont le générateur de base est une boucle solaire (puisqu'en cas de solaire, toute la chaleur disponible est injectée dans le ballon).

Si $f_p(h) = 0$, alors $Q_{req_sto_base}(h) = 0$. Dans le cas contraire, $Q_{req_sto_base}(h)$ est calculé comme suit.

Le dispositif de régulation du ballon se base sur la température relevée en début du pas de temps dans la zone du ballon où est située la sonde du régulateur de la base z_{reg_base} . Le dispositif chauffant devra se déclencher si

$$\theta_{z_{reg_base}}(h-1) < \theta_{c_base} + \frac{Pe_{z_{reg_base}}(h-1)}{\rho_w \cdot c_w \cdot V_{(z_{reg_base})}} \quad (13)$$

et si

$$V_p(h) > 0$$

$$\text{ou } \theta_{b(z_{reg_base})}(h-1) < \theta_{c_base} - \Delta\theta_{base} \quad (14)$$

ou $(\theta_{c_base} - \Delta\theta_{base} \leq \theta_{b(z_{reg_base})}(h-1) < \theta_{c_base}$ et $\theta_{b(z_{reg_base})}(h-2) < \theta_{b(z_{reg_base})}(h-1)$)

Ce jeu de condition est introduit pour tenir compte de l'hystérésis de la régulation. Si $statut_delta_theta = 2$ (valeur par défaut), alors $\Delta\theta_{base} = 2^\circ\text{C}$.

La puissance requise à fournir par la base est donnée par l'équation :

$$Q_{req_sto_base}(h) = \max \left[\rho_w \cdot c_w \cdot \left(\sum_{z=z_{base}}^{N_{zone}} V_z \cdot \left(\theta_{c_base} - \frac{\sum_{z=z_{base}}^{N_{zone}} V_z \theta_{bz}(i-1)}{\sum_{z=z_{base}}^{N_{zone}} V_z} \right) \right) + \sum_{z=z_{base}}^{N_{zone}} Pe_z, 0 \right] \quad (15)$$

Les températures θ_{bz} sont celles de la dernière itération effectuée (voir les algorithmes du ballon de stockage).

4.3. Fiche algorithme T5 STO gestion régulation appoint ballon

1. INTRODUCTION

Dans le cas des ballons recevant deux sources de chaleur, le premier générateur sera appelé base, le second appoint. Ce dernier est piloté par les principes de gestion-régulation de son thermostat.

L'objectif de ces algorithmes est de déterminer, après fonctionnement du générateur de base, l'énergie requise au niveau du générateur d'appoint pour apporter au ballon le complément d'énergie que n'a pu fournir la base.

2. NOMENCLATURE

Le Tableau 1 donne la nomenclature des différentes variables du modèle de gestion-régulation de l'appoint du ballon.

Tableau 1 : Nomenclature des différentes variables du modèle

Entrées du composant					
Nom	Description	Unité			
h_{leg}	Heure légale au pas de temps h.	h			
$\theta_{oz}(h-1)$	Températures de la zone z (z = 1 à 4) du ballon au pas de temps précédent	°C			
$\theta_{oz}(h-2)$	Températures de la zone z (z = 1 à 4) du ballon au pas de temps h-2	°C			
$V_p(h)$	Volume puisé pendant le pas de temps	L			

Paramètres intrinsèques du composant					
Nom	Description	Unité	Min	Max	Conv.
$type_{gest_a}$	Type de gestion du thermostat d'appoint du ballon de stockage d'ECS	-	2	2	-
ρ	2. Chauffage de jour				
V_z	Volume des zones du ballon (z allant de 1 à 4)	L	0	$+\infty$	-
$V_{z_reg_ap}$	Volume de la zone du ballon où se situe le système de régulation de l'appoint	L	0	$+\infty$	-
N_{zone}	Nombre de zones dans le ballon	-	0	$+\infty$	4

Paramètres d'intégration du composant					
Nom	Description	Unité	Min	Max	Conv.
θ_{c_ap}	Température de consigne de la zone du ballon chauffée par l'appoint	°C	0	110	55
$\Delta\theta_{ap}$	Hystérésis du système de régulation de l'appoint	K	0	20	-
z_{ap}	Numéro de la zone du ballon qui contient l'échangeur du générateur d'appoint	-	1	4	-
z_{reg_ap}	Numéro de la zone du ballon qui contient le système de régulation de l'appoint	-	1	4	-
$statut_delta_the_ta$	1 : valeur à saisir 2 : valeur par défaut	-	1	2	-

Sorties

Nom	Description	Unité
$Q_{req_sto_a}$ D	Energie requise à fournir à l'élément de stockage par le générateur d'appoint	W

Variables internes

Nom	Description	Unité
f_{p_ap}	Programmation de l'appoint (1 autorisé, 0 coupé)	-

Constantes

Nom	Description	Unité	Conv.
ρ_w	Masse volumique de l'eau	kg/L	1
c_w	Capacité calorifique massique de l'eau	Wh/(kg. K)	1,163

3. DESCRIPTION MATHÉMATIQUE

Le mode de gestion du générateur d'appoint peut être différent de celui de base.

3.1. Calcul de l'indice de programmation de l'appoint du ballon : f_{p_ap}

Selon le principe de gestion du générateur d'appoint (fonctionnement de nuit ou fonctionnement permanent), on l'autorise ou non à fournir de l'énergie au ballon.

Si $type_{gest_a} = 2$ alors

$$\begin{cases} \text{si } 10h \leq h_{leg} \leq 19h & f_p(h) = 1 \\ \text{sinon} & f_p(h) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

3.2. Calcul de l'énergie requise au niveau de l'appoint

Si $f_{p_ap}(h) = 0$, alors $Q_{req_sto_ap}(h) = 0$. Dans le cas contraire, $Q_{req_sto_ap}(h)$ est calculé comme suit.

Le dispositif de régulation du ballon se base sur la température relevée en début du pas de temps dans la zone du ballon où est située la sonde du régulateur de l'appoint z_{reg_ap} . Le dispositif chauffant devra se déclencher si

$$\begin{aligned} &V_p(h) > 0 \\ \text{ou } &\theta_{b(z_{reg_ap})}(i-1) < \theta_{c_ap} - \Delta\theta_{ap} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{ou } (\theta_{c_ap} - \Delta\theta_{ap} \leq \theta_{b(z_{reg_ap})}(h-1) < \theta_{c_ap} \text{ et } \theta_{b(z_{reg_ap})}(h-2) < \theta_{b(z_{reg_ap})}(h-1))$$

Les deux dernières conditions sont introduites pour tenir compte de l'hystérésis de la régulation. Si $statut_delta_theta = 2$ (valeur par défaut), alors $\Delta\theta_{appoint} = 2^\circ\text{C}$.

L'énergie requise à fournir par l'appoint est donnée par l'équation :

$$Q_{req_sto_ap}(h) = \max \left[\rho_w \cdot c_w \cdot \left(\sum_{z=z_{ap}}^{N_{stoc}} V_z \cdot \left(\theta_{c_ap} - \frac{\sum_{z=z_{ap}}^{N_{stoc}} V_z \theta_{bz}}{\sum_{z=z_{ap}}^{N_{stoc}} V_z} \right) \right), 0 \right] \quad (3)$$

z_{ap} est un paramètre d'intégration et les températures du ballon à considérer sont indiquées dans les assemblages décrivant les productions avec ballon de stockage.

Afin de ne pas les comptabiliser deux fois (au niveau de la base et au niveau de l'appoint), les pertes de stockage n'apparaissent pas dans les formules ci-dessus.