

Méthode d'essai pour l'analyse thermique d'une enveloppe de bâtiment

Calcul des pertes par infiltration

Un préalable est de mesurer à la porte soufflante les pertes par infiltration sous une dépression de 4 Pascal entre l'intérieur et l'extérieur, exprimés en m³/h et par m² de surface déperditive d'enveloppe hors plancher bas.

Ce test se réalise en ayant au préalable coupé la VMC et colmaté toutes les entrées et sorties d'air (bouches d'extraction salle de bain, cuisine, WC, grilles d'aération de fenêtres)

On obtient une valeur de Q_{4Pa-surf} exprimé en (m³/h) par m² de surface déperditive hors plancher bas

Notons :

- Atbat la surface déperditive d'enveloppe hors plancher bas en m²
- Mea la somme des modules des entrées d'air exprimée en m³/h

Dans l'approche qui suit, on va se limiter à modéliser 2 phénomènes : les effets dynamiques liés au vent et le tirage thermique.

Le tirage thermique est le phénomène découlant de l'écart de pression entre l'extérieur et l'intérieur. Dans le cas d'un logement chauffé, l'air intérieur est moins lourd que l'air extérieur froid et va donc avoir tendance à s'échapper par les fuites ou les ouvertures les plus hautes. Il sera remplacé par de l'air froid entrant dans les fuites ou les ouvertures les plus hautes.

Une fois cet écart de pression déterminé, on évaluera le débit volumique d'air qui va affecter le bâtiment en raison

En matière de perméabilité à l'air, la plupart de modèles simplifiés sont basés sur une loi de type puissance. Au niveau d'un composant, on peut écrire :

$$Q = C * \text{signe de } (\Delta p) * (\text{abs}(\Delta p))^n$$

avec :

- Q débit passant à travers le composant en m³/h,
- C coefficient de perméabilité du composant,
- Δp différence de pression de part et d'autre du composant
- n coefficient sans unité permettant de caractériser l'écoulement.

En général, on modélise :

- les petites fuites comme des écoulements stationnaires avec $n = 2/3$, voire 1
- les entrées d'air comme des écoulements turbulents avec $n=0.5$

On choisit de représenter un bâtiment comme un ensemble de composants. En première approche, ces composants sont au nombre de 6 comme dans la méthode ThCE du CSTB :

face au vent haut	face au vent bas	latéral haut	latéral bas	sous le vent haut	sous le vent bas
----------------------	---------------------	--------------	-------------	----------------------	---------------------

Chaque composant peut être décrit par un ensemble de 4 coefficients :

- le coefficient de pression au vent C_{p_comp}

- la hauteur équivalente du composant h_{comp} , exprimée en m
- le poids des infiltrations sur le composant RI_{comp}
- le poids des entrées d'air sur le composant REA_{comp}

Notons P_{ext_comp} la pression extérieure en pascal au niveau du composant et P_{ib} la pression à l'intérieur du logement.

On pose $\Delta p = P_{ext_comp} - P_{ib}$

Loi des débits d'infiltration	QVI_{comp}	$Q_{4pa_surf} * A_{tbat} * (\text{signe de } \Delta p) * (\Delta p/4)^{2/3}$	
Loi des débits des entrées d'air	$QVEA_{comp}$	$\Delta p < 20$	$Mea * 1.1 * (\text{signe de } \Delta p) * (\Delta p/20)^{1/2}$
		$\Delta p \geq 20$	$Mea * (0.5 * (P_{ext_comp} - P_{ib}) + 78) / 80$

On fera en sorte que les poids soient choisis de telle sorte que :

$$\sum RI_{comp} = 1 \text{ et } \sum REA_{comp} = 1$$

Les sommes s'entendant sur les 6 composants.

A titre d'exemple, pour une maison individuelle, la méthode ThCE fixe tous ces coefficients à 1/6

On sait exprimer la pression extérieure :

$$P_{ext_comp} = \rho_{aext} * (1/2 * C_{p_comp} * (0.9 * \text{vitesse_vent})^2 - h_{comp} * (T_{int} - T_{ext}) * g / T_{ref})$$

Avec :

- $g = 9.81$ accélération de la pesanteur en $m \cdot s^{-2}$
- T_{ext} et T_{int} températures extérieure et intérieure exprimées en $^{\circ}C$
- $T_{ref} = 283 \text{ K}$
- $\rho_{aext} = 1.22 \text{ kg/m}^3$
- vitesse_vent exprimée en m/s

Les lois de débits précédemment exprimées QVI_{comp} et $QVEA_{comp}$ sont donc fonction d'une seule inconnue : P_{ib}

On peut donc exprimer le débit volumique traversant le bâtiment, du aux infiltrations, aux entrées d'air et à la ventilation mécanique, de la manière suivante, la somme s'entendant sur les 6 composants :

$$QV(P_{ib}) = Q_{vent} + \sum (RI_{comp} * QVI_{comp}(P_{ib}) + REA_{comp} * QVEA_{comp}(P_{ib}))$$

A ce stade, on cherche P_{ib} , pression à l'intérieur du bâtiment, que l'on suppose homogène, pour que $QV(p_{ib})$ soit nulle.

Cette résolution d'une fonction non linéaire à une variable se fait via un algorithme de type Newton ou Decker-Brent

En notant Q_{vinf} , le débit entrant par infiltration, on peut alors écrire :

$$Q_{vinf} = \sum \text{Max}(0, RI_{comp} * QVI_{comp}(P_{ib})) + \sum \text{Max}(0, REA_{comp} * QVEA_{comp}(P_{ib}))$$

Il ne s'agit pas véritablement du débit total d'air entrant par infiltration mais plutôt du débit d'air entrant par infiltration et non déjà comptabilisé dans l'air entrant appelé par ventilation mécanique.

Pour faire plus précis, on pourrait envisager d'équilibrer les débits massiques mais il ne semble pas que cela apporte grand-chose. Si l'on souhaitait néanmoins le faire, il faut évaluer la masse volumique de l'air. Considérons un air caractérisé par une température T et une humidité relative w. On sait exprimer la masse volumique de l'air en kg/m³ de la façon suivante :

$$\rho(T,w) = \frac{101325 - 0,37802 * w * \exp^{59,484085 - 6790,4985/(T+273,15) - 5,02802 * \ln(T+273,15)}}{287,055 * (T + 273,15)}$$

Avec T température en °C et w humidité relative en %

L'expression du débit massique traversant le logement en kg/h est :

$$QM(Pib) = \rho(T_{ext}, w_{ext}) * Q_{vent} + \sum (RI_{comp} * \rho I_{comp} * QVI_{comp}(Pib) + REA_{comp} * \rho EA_{comp} * QVEA_{comp}(Pib))$$

Avec

$$\rho I_{comp} = \rho(T_{ext}, w_{ext}) \text{ si } QVI_{comp}(Pib) > 0$$

$$\rho I_{comp} = \rho(T_{int}, w_{int}) \text{ si } QVI_{comp}(Pib) < 0$$

$$\rho EA_{comp} = \rho(T_{ext}, w_{ext}) \text{ si } QVEA_{comp}(Pib) > 0$$

$$\rho EA_{comp} = \rho(T_{int}, w_{int}) \text{ si } QVEA_{comp}(Pib) < 0$$

En effet, si le débit volumique est négatif, c'est que de l'air sort et on utilise la masse volumique de l'air intérieur....dans le cas contraire, de l'air entre et on utilise celle de l'air extérieur....

Les sommes s'entendent sur les 6 composants.

Calcul d'un Ubat terrain instantané

Notons :

- P la puissance instantannée de chauffage en W mesurée à l'instant t
- S la surface de parois déperditives y compris plancher bas en m²
- Tint la température intérieure et Text la température extérieure
- Qvinf le débit d'infiltration en m³/h
- Qvent le débit de ventilation en m³/h
- Ca la capacité thermique volumique de l'air exprimé en Kwh/(m³ K) : Ca = 0,34 Wh / (m³ K)

Le Ubât instantané exprimé en W K⁻¹ m⁻² nous permet de caractériser l'efficacité de la paroi.

On a :

	Apports	Déperditions
Ubat =	$P / (S * (T_{int} - T_{ext}))$	$- Ca * Q_{vinf} / S - Ca * Q_{vent} / S$

On peut affiner les choses en injectant les apports humains du côté des apports et les pertes par ouverture de fenêtre du côté des déperditions

Mise en pratique au sein de THEMIS avec les données de l'expérimentation Allier Habitat.

Débit de ventilation extrait [m ³ /h]	Maison témoin (Mme Blanchet)		Maison avec thermacote (Roubelat)		Maison avec ITE (Sabbagh)	
Vitesse de ventilation	Lente	Rapide	Lente	Rapide	Lente	Rapide
WC	Non mesurable	Non mesurable	≈20 (mesure difficile)	≈20 (mesure difficile)	≈16 (mesure difficile)	≈16 (mesure difficile)
Cuisine	30	33	58	122	7	9
Salle de bain	25	25	38	38	29	29
Débit total	≈55	≈55	≈116	≈180	≈52	≈54

Pour les maisons individuelles de Allier Habitat objets de l'instrumentation ITE/thermacote, les résultats des essais à la porte souffante sont les suivants :

	Maison Témoin	Maison Thermacote	Maison ITE
Q4Pa-surf [(m ³ /h)/m ²]	1,21	0,87	1,93

Les 2 maisons sont identiques et on prend :

- Mea = 107 m³/h
- Atbat = 217 m²
- S = 217 + 80 = 297 m²
- h = 4m

On réalise le calcul du Ubat par l'intermédiaire du module du Post Process

On utilise l'algorithme dit infiltration_losses pour modéliser les pertes par infiltration à partir des température intérieure et extérieure et de la vitesse du vent

Create new

infiltration_losses

Internal temperature feed :
salon_T1041

External temperature feed :
node:4:temp_ext_owm

Wind speed feed in m/s :
windspeed_owm

Ventilation flow rate in m3/s :
52

building height in m :
4

q4pasurf in m3/h/m2 - leakage flow rate at differential pressure of 4 pascals divided by atbat - q4pasurf is equivalent to european n50 :
1.93

atbat in m2 - wall surface exposed to energy losses :
217

mea in m3/h - air inlet module :
107

Enter output feed name for permeability losses in m3/h :
ITE_infiltrations_m3perh

Create new

infiltration_losses

Internal temperature feed :
salon_T1206

External temperature feed :
node:4:temp_ext_owm

Wind speed feed in m/s :
windspeed_owm

Ventilation flow rate in m3/s :
116

building height in m :
4

q4pasurf in m3/h/m2 - leakage flow rate at differential pressure of 4 pascals divided by atbat - q4pasurf is equivalent to european n50 :
0.87

atbat in m2 - wall surface exposed to energy losses :
217

mea in m3/h - air inlet module :
107

Enter output feed name for permeability losses in m3/h :
THC_infiltrations_m3perh

On obtient les flux numérotés 142 et 143

infiltration_losses	tint:24:salon_T1041 hbat:4 output:142:ITE_infiltration_m3perh	text:14:node:4:temp_ext_owm q4pasurf:1.93	ws:16:windspeed_owm atbat:217	qvent:52 mea:107	0 points behind	Run process
infiltration_losses	tint:10:salon_T1206 hbat:4 output:143:THC_infiltration_m3perh	text:14:node:4:temp_ext_owm q4pasurf:0.87	ws:16:windspeed_owm atbat:217	qvent:116 mea:107	0 points behind	Run process

Le reste des calculs se fait en utilisant l'algorithme basic_formula qui est un calculateur ultra-rudimentaire permettant de manipuler les flux avec des opérateurs arithmétiques : addition, soustraction, division, multiplication.

Create new

basic_formula

Enter your formula

Enter output feed name :

On commence par calculer les deltaT respectifs pour chaque pavillon

La température intérieure du salon du pavillon ITE est le flux 24.

La température intérieure du salon du pavillon THC est le flux 10

La température extérieure est le flux 14

Pour calculer ITE_deltaT et THC_deltaT, on utilise les formules f24-f14 et f10-f14

On obtient les flux 144 et 145

basic_formula	formula:f24-f14	output:144:ITE_deltaT	0 points behind	Run process
basic_formula	formula:f10-f14	output:145:THC_deltaT	-1 points behind	Run process

On peut désormais réaliser le calcul du Ubat.

Le flux 4 enregistre la puissance instantannée du chauffage du pavillon ITE

Le flux 6 contient les données mesurées de puissance instantannée du chauffage du pavillon Thermacote (THC)

Pour ITE, on saisit la formule :

$$f4/297/f144 - 34/100*f142/297 - 34/100*52/297$$

Pour Thermacote, on saisit la formule :

$$f6/297/f145 - 34/100*f143/297 - 34/100*116/297$$

basic_formula	formula:f4/297/f144-34/100*f142/297-34/100*52/297	output:146:ITE_ubat_WperKm2	0 points behind	Run process
basic_formula	formula:f6/297/f145-34/100*f143/297-34/100*116/297	output:147:THC_ubat_WperKm2	0 points behind	Run process

Matrices de composants utilisées pour le calcul du débit d'infiltration

Habitat individuel

N° composant	Cp	hcomp	RI_comp	REA_comp
towindtop	0.25	Hauteur du bâtiment /2	1/6	1/6
towindbottom	0.25	0	1/6	1/6
sidetop	-0.5	Hauteur du bâtiment /2	1/6	1/6
sidebottom	-0.5	0	1/6	1/6
downwindtop	-0.5	Hauteur du bâtiment /2	1/6	1/6
downwindbottom	-0.5	0	1/6	1/6

Habitat collectif traversant

N° composant	Cp	hcomp	RI_comp	REA_comp
towindtop	0.25	1.5	1/6	1/3
towindbottom	0.25	0	1/6	0
sidetop	-0.5	1.5	1/6	1/3
sidebottom	-0.5	0	1/6	0
downwindtop	-0.5	1.5	1/6	1/3
downwindbottom	-0.5	0	1/6	0

Habitat collectif non traversant

N° composant	Cp	hcomp	RI_comp	REA_comp
towindtop	0.25	1.5	1/4	1/2
towindbottom	0.25	0	1/4	0
sidetop	-0.5	1.5	0	0
sidebottom	-0.5	0	0	0
downwindtop	-0.5	1.5	1/4	1/2
downwindbottom	-0.5	0	1/4	0

L'algorithme infiltration_lossess n'implémente pour l'instant que la matrice de l'habitat individuel