

FACULTÉ POLYTECHNIQUE DE MONS



Service de Thermique et Combustion

---

LE SOLAIRE PASSIF

---

Prof. Véronique Feldheim

2008

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>iii</b>
0.1 L'approche bioclimatique [ARC, 1996a]	1
0.2 La conception solaire passive	1
0.3 Systèmes solaires passifs, actifs et hybrides	2
0.3.1 Systèmes actifs	2
0.3.2 Systèmes hybrides	2
0.3.3 Systèmes passifs	3
0.4 Eléments du plan du cours	3
<b>1 Le chauffage solaire passif</b>	<b>1</b>
1.1 Définition du « solaire passif » : « Construire avec le climat »	1
1.2 Bilan thermique simplifié d'une habitation	2
1.2.1 Notion de température sans chauffage	2
1.2.2 Considération particulière du rayonnement des parois vers la voûte céleste	3
1.2.3 Calcul de la température sans chauffage (moyenne temporelle)	4
1.3 Capteurs solaires passifs	8
1.3.1 Gain direct (vitrages)	8
1.3.2 Mur capteur	8
1.3.3 Mur Trombe ventilé	9
Surchauffe	10
1.3.4 Le mur Trombe composé - évolutions actuelles	10
1.3.5 Espace solaire attaché (véranda,...)	12
1.4 Calcul des capteurs solaires passifs	12
1.4.1 Utilisation d'une surface réceptrice équivalente de corps noir	12
1.4.2 Mur Trombe non ventilé	12
1.4.3 Mur Trombe ventilé	12
1.4.4 Véranda - espace solaire attaché	13
<b>2 Systèmes de refroidissement passif</b>	<b>1</b>
2.1 Le contrôle des apports solaires	1
2.2 La ventilation	1
2.3 Le refroidissement par évaporation	2
2.4 Systèmes de refroidissement nocturne	3
2.5 Refroidissement (ou chauffage) par contact avec le sol - puits canadien	4
2.5.1 Description du dispositif et méthode de calcul	4

2.5.2	Paramètres des simulations . . . . .	6
2.5.3	Résultats . . . . .	7
	Influence de la longueur et de la profondeur du puits . . . . .	7
	Influence du type de sol . . . . .	9
2.5.4	Couplage avec une habitation . . . . .	9
<b>3</b>	<b>La maison passive</b>	<b>1</b>
3.1	Introduction [ARC, 1996b] . . . . .	1
3.2	Histoire de la maison passive [Guerriat, 2006] . . . . .	3
3.3	Présentation des standards [Guerriat, 2006] . . . . .	5
3.4	Standards de la maison passive [Guerriat, 2006] . . . . .	6
3.5	Le logiciel PHPP2007 [Guerriat, 2008] . . . . .	8
	<b>Bibliographie</b>	<b>1</b>

# Introduction

## 0.1 L'approche bioclimatique [ARC, 1996a]

Toute réalisation architecturale concrétise un microcosme en rapport plus ou moins étroit avec l'environnement auquel il appartient. Le but de la conception, de la rénovation et de la construction d'un bâtiment est de réaliser ce microcosme en concordance optimale avec son environnement et de donner ainsi au climat une juste place parmi les dimensions fondamentales de toute intervention de l'architecte sur l'environnement. L'architecture ainsi définie inclut le climat et la dynamique qu'il implique : c'est l'architecture bioclimatique.

L'habitat bioclimatique tire parti du climat afin de rapprocher au maximum ses occupants des conditions de confort. Sous nos climats tempérés, les variations de l'ensoleillement, du vent et des températures demandent de mettre en oeuvre diverses stratégies adaptées aux différentes saisons. En hiver, il importe de profiter des apports solaires et de se protéger du froid (stratégie du chaud) ; en été, il faut se préserver du soleil et, parfois, ouvrir sa maison aux vents (stratégie du froid).

L'habitat bioclimatique s'accorde enfin aux rythmes naturels en tirant le meilleur parti possible de la lumière naturelle (stratégie de l'éclairage naturel).

## 0.2 La conception solaire passive

La conception solaire passive n'a de sens que si l'enveloppe du bâtiment est performante. La maison solaire passive doit donc être bien conçue du point de vue de la conservation de l'énergie, ce qui fait intervenir plusieurs paramètres :

- Le niveau d'isolation doit être garanti en tout point de l'enveloppe (valeurs U faibles, certainement inférieures à  $0.25\text{ à }0.4\text{ W/m}^2\text{K}$ ) en évitant soigneusement les ponts thermiques (balcons, complexe chevron/isolation, volets, fondations, etc.).
- L'enveloppe doit également garantir une étanchéité suffisante à l'air pour éviter les infiltrations inopportunes par grand froid ou par grand vent. Il faut veiller

au contrôle du renouvellement d'air par un système de ventilation.

- L'orientation du bâtiment doit être choisie de manière à maximiser les apports solaires. Le sud est à cet égard la meilleure orientation : le soleil y est disponible toute la journée, toute l'année, et la variation de la hauteur solaire fait en sorte que les apports sont plus importants en hiver qu'en été (loi du cosinus), à l'inverse des orientations est et ouest.
- Le travail de la coupe vise à laisser le soleil pénétrer le plus profondément au cœur du bâtiment. L'attention doit porter sur les hauteurs angulaires du soleil, le travail des niveaux, des cours intérieures, de l'éclairage zénithal, etc... Inversement, pour éviter la surchauffe, il convient de limiter la surface des baies vitrées orientées à l'ouest, d'utiliser un ombrage structurel de la façade (saillies, balcons) et de ventiler le bâtiment.
- Les habitations doivent être construites avec des matériaux lourds pour stocker la chaleur et atténuer les fluctuations de température (inertie thermique). Ces masses à haute capacité thermique seront disposées de manière à recevoir directement le rayonnement solaire.

### 0.3 Systèmes solaires passifs, actifs et hybrides

L'utilisation de l'énergie solaire est possible à différents niveaux d'intégration : solaire actif (technologie intégrée), solaire passif (conception architecturale intégrée) et solaire hybride au fonctionnement tantôt passif, tantôt actif.

#### 0.3.1 Systèmes actifs

L'énergie solaire captée en façade ou en toiture par un panneau solaire chauffe un fluide caloporteur (air, eau) qui transfère cette énergie à un stock. La circulation du fluide caloporteur nécessite une dépense d'énergie (généralement électrique) qui représente une fraction de l'énergie captée. Le chauffe-eau solaire avec pompe de circulation est un système actif très répandu, de même que le plancher solaire direct et les capteurs solaires en général. La performance du système dépend avant tout de son réglage et de la qualité des composants.

#### 0.3.2 Systèmes hybrides

Ces systèmes ont un fonctionnement tantôt passif, tantôt actif, comme le collecteur-fenêtre (ou capteur-fenêtre) avec circuit d'air chaud ou le capteur à air. Le capteur-fenêtre fonction de deux manières : lorsque le rayonnement est faible, il se comporte

comme une fenêtre ordinaire (gains directs) ; lorsque le rayonnement est plus intense (supérieur à  $300W/m^2K$ ), un store vénitien est abaissé dans la coulisse entre la fenêtre intérieure et la fenêtre extérieure et un ventilateur pulse l'air en circuit fermé du collecteur vers le stock (et retour). Ces systèmes sont relativement complexes, encombrants et coûteux.

### 0.3.3 Systèmes passifs

Les systèmes passifs les plus répandus sont la fenêtre, la véranda vitrée et la serre. L'utilisation passive de l'énergie solaire est en fait présente dans toute construction munie de fenêtres : elle consiste à laisser pénétrer le rayonnement solaire par les ouvertures transparentes, ce qui apporte à la fois lumière et chaleur. L'énergie solaire est captée et stockée dans les parties massives internes du bâtiment (dalles, plafonds, parois intérieures). La fenêtre est le capteur solaire le plus répandu et elle contribue, en l'état actuel, grâce à ses apports de chaleur, à réduire d'environ 10% la consommation d'énergie de chauffage. La performance des systèmes passifs dépend avant tout de la qualité et de la précision de la conception architecturale. De plus, le surcoût est limité et l'encombrement spécifique nul.

## 0.4 Eléments du plan du cours

- Le chauffage solaire passif
  - Définitions
  - Bilan thermique simplifié d'une habitation
  - Capteurs solaires passifs
  - Calcul des capteurs solaires passifs
- Systèmes de refroidissement passif
- La maison passive

# Chapitre 1

## Le chauffage solaire passif

### 1.1 Définition du « solaire passif » : « Construire avec le climat »

Les apports solaires peuvent réduire, de manière importante, la consommation énergétique des bâtiments. Ceci doit guider l'architecte dans la conception de tout nouveau bâtiment.

Le chauffage solaire **passif** consiste à capter, accumuler et ensuite utiliser la chaleur solaire, sans l'aide d'énergie extérieure (pompe, etc...), en utilisant au mieux l'implantation, le dessin et les matériaux du bâtiment lui-même. Cette conception entraîne généralement un surcoût faible, car elle consiste à appliquer quelques idées très simples. Pour que cela ne soit pas l'effet du hasard, il s'est avéré nécessaire de mieux quantifier ces apports solaires.

Par opposition, le chauffage solaire **actif** consiste à capter l'énergie solaire dans un collecteur, de la transporter à l'aide d'un fluide caloporteur entraîné par des pompes ou ventilateurs vers une installation de stockage spécialement prévue à cet effet ou vers les locaux. Ces équipements sont coûteux et la rentabilité en termes financiers est de l'ordre d'une dizaine d'années (chiffre dépendant fortement des scénarii d'augmentation du prix de l'énergie fossile ainsi que du montant des primes allouées par les services publics).

D'une manière générale, la conception rationnelle d'un habitat sur le plan thermique devrait s'inspirer des principes suivants :

- réduire les surfaces de baies vitrées sur les parois Nord ou peu ensoleillées ;
- utiliser sur les parois Sud des capteurs solaires passifs : vitrages isolants, murs accumulateurs, serres,... ;
- se protéger des vents dominants par des formes compactes ;

- répartir les volumes habitables en fonction de l'orientation et de l'utilisation des locaux (garage, buanderie, locaux peu utilisés, ... du côté des façades peu ensoleillées) ;
- une bonne isolation thermique des parois opaques permet de mieux valoriser les apports solaires.

## 1.2 Bilan thermique simplifié d'une habitation

Calcul de la température sans chauffage - notion de surface réceptrice de corps noir équivalente

### 1.2.1 Notion de température sans chauffage

Par définition, la température sans chauffage  $t_{sc}$  est la température moyenne atteinte dans un bâtiment non occupé et non chauffé.

Cette température est supérieure à celle de l'air extérieur  $t_{se}$  grâce au rayonnement solaire pénétrant par les surfaces extérieures, vitrées ou opaques.

L'importance de la notion de température sans chauffage a été mise en évidence par des expériences effectuées dans des maisons de Seneffe par le CSTC. Ces expériences réalisées sur des maisons identiques ont montré que, en hiver, c'est-à-dire lorsque tous les apports solaires sont récupérés, la consommation énergétique pour des maisons chauffées mais inoccupées, mesurée sur une période égale à plus de 5 fois la constante de temps du bâtiment, est proportionnelle à l'écart entre la température intérieure  $t_{rs}$  et la température sans chauffage  $t_{sc}$ , et non pas à la différence ( $t_{rs} - t_{se}$ ).

Cette constatation est facilement justifiée par les équations suivantes.

Le bilan énergétique du bâtiment, écrit avec des *puissances moyennes temporelles*  $\bar{\phi}$  sur la période considérée, donne :

$$\bar{\phi}_{chauff} + \bar{\phi}_{ag,int} + \bar{\phi}_{sol,bruts} = p_b(t_{rs} - t_{se})$$

puisque la période choisie est suffisamment longue que pour négliger l'accumulation dans la structure du bâtiment. Dans cette relation très générale, on considère la puissance des apports solaires bruts, à condition que la température intérieure  $t_{rs}$  soit la valeur moyenne réelle, compte tenu des surchauffes éventuelles.

Si le bâtiment est non chauffé ( $\bar{\phi}_{chauff} = 0$ ) et non occupé ( $\bar{\phi}_{ag,int} = 0$ ),  $t_{rs}$  devient égale à  $t_{sc}$ , par définition.

Par conséquent :

$$\bar{\phi}_{sol,bruts} = p_b(t_{sc} - t_{se})$$



et la puissance de chauffe nécessaire pour maintenir  $t_{rs}$  dans un bâtiment inoccupé ( $\bar{\phi}_{ag,int} = 0$ ) est donc :

$$\bar{\phi}_{chauff} = p_b(t_{rs} - t_{se}) - \bar{\phi}_{sol,bruts} = p_b(t_{rs} - t_{sc})$$

ce qui confirme les expériences du CSTC.

Pour un local occupé et chauffé, on obtient facilement :

$$\bar{\phi}_{chauff} + \bar{\phi}_{ag,int} = p_b(t_{rs} - t_{sc})$$

Dans le cas où il n'y a pas eu de surchauffe, la valeur de  $t_{rs}$  vaudrait la valeur de consigne  $t_{rs,cons}$  et les apports solaires  $t_{rs,cons}$  et les apports solaires bruts seraient tous utilisés.

Au contraire, lorsqu'il y a eu surchauffe, les apports solaires ne sont pas totalement utiles. On définit les apports solaires nets comme étant ceux qui permettent d'atteindre  $t_{rs,cons}$  sans dépassement :

$$\bar{\phi}_{chauff} + \bar{\phi}_{ag,int} + \bar{\phi}_{sol,nets} = p_b(t_{rs,cons} - t_{se})$$

Le rendement des apports solaires est défini par :

$$\eta = \frac{\bar{\phi}_{sol,nets}}{\bar{\phi}_{sol,bruts}}$$

Les apports solaires bruts seront déduits des données climatologiques solaires. Le rendement  $\eta$  ne peut être obtenu que par une simulation permettant de représenter les phénomènes avec une échelle de temps de 1 heure. Les valeurs déduites ainsi pour  $\eta$  seront corrélées pour être utilisées dans les méthodes manuelles.

### 1.2.2 Considération particulière du rayonnement des parois vers la voûte céleste

Il s'agit essentiellement de rayonnement IR dans la gamme des  $10 \mu m$  émis par la face externe des murs vers la voûte céleste, lorsque celle-ci est exempte de nuages. Un ciel serein correspond en effet à une température nettement plus basse que celle de l'air extérieur (voir figure 1.1).

Soit  $F_{pc}$  le facteur d'angle entre la paroi et le ciel. Le flux total  $\phi_e$  sortant de la paroi est donné par :

$$\phi_e = K_{e,conv}(t_{pe} - t_{se}) + \epsilon_p(1 - F_{pc})\sigma(T_{pe}^4 - T_{se}^4) + \epsilon_p F_{pc}\sigma(T_{pe}^4 - T_{ciel}^4)$$

Le deuxième terme du second membre est relatif aux échanges avec le sol et l'environnement et le dernier terme correspond aux échanges avec le ciel.

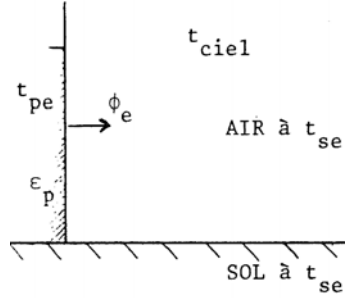


FIG. 1.1 – Rayonnement des parois vers la voûte céleste

On peut faire apparaître le coefficient de rayonnement  $K_{e,rayt}$  et le coefficient  $K_e$  traditionnel de la manière suivante :

$$K_{e,rayt}(t_{pe} - t_{se}) = \epsilon_p \sigma (T_{pe}^4 - T_{se}^4)$$

$$K_e = K_{e,rayt} + K_{e,conv} = 23W/m^2C$$

D'où :

$$\phi_e = K_e(t_{pe} - t_{se}) + F_{pc}\epsilon_p\sigma(T_{se}^4 - T_{ciel}^4)$$

$$\phi_e = K_e(t_{pe} - t_{se}) + F_{pc}\epsilon_p I_{IR,h}$$

avec  $I_{IR,h} = \sigma(T_{se}^4 - T_{ciel}^4)$  représentant le rayonnement infrarouge d'une surface noire horizontale ( $F_{pc} = 1$ ) vers le ciel. Des mesures montrent que par ciel serein (max = ciel serein)

$$I_{IR,h,max} \approx 100W/m^2$$

$\epsilon_p$  est généralement de l'ordre de 0.9 dans l'IR  $10\mu m$ .

### 1.2.3 Calcul de la température sans chauffage (moyenne temporelle)

On adopte un modèle unizone, ce qui signifie que l'on suppose l'intérieur du bâtiment à une température uniforme  $t_{rs}$ .

La période considérée pour l'établissement du bilan qui suit est supérieure à quelques jours, de sorte qu'on peut négliger les effets capacitifs. Toutes les variables

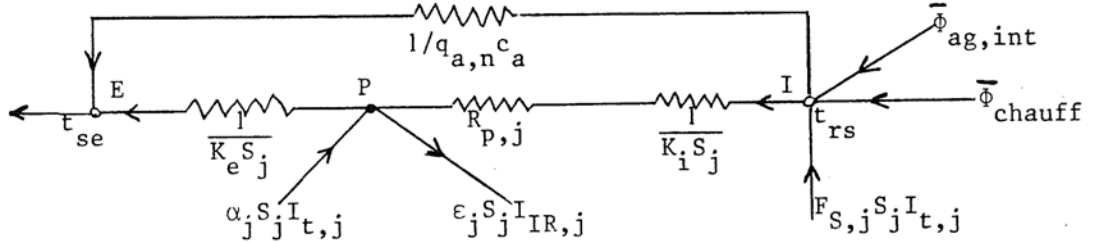


FIG. 1.2 – Modélisation d'une maison - monozone

sont donc des valeurs moyennes temporelles pendant la période. Celle-ci est généralement égale au pas de temps de calcul : dans les méthodes manuelles, elle est de 1 mois.

Les flux solaires seront donc représentés par leurs moyennes temporelles  $I_t$  de la valeur instantanée  $G_t$  déterminée à l'aide de la relation suivante, à partir des données climatologiques IRM. Les  $I_t$  sont fonction de la période considérée, de l'orientation et de l'inclinaison de la paroi. Ils sont donnés à la figure 1.3.

$$G_t = G_{b,n} \cos i + \frac{1 + \cos \beta}{2} G_{d,h} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} G_h$$

Le bilan thermique du bâtiment peut être représenté par le schéma équivalent suivant (voir figure 1.2), étendu à toutes les parois extérieures  $j$  du bâtiment.

Chacune des parois  $j$  est décomposée en trois résistances en série, de manière à faire apparaître le point représentatif de la face externe où sont appliqués des flux rayonnants.

Dans ce schéma, on a tenu compte :

- des déperditions par transmission  $K_{gl,j}(t_{rs} - t_{se})S_j$
- des pertes par ventilation  $q_{a,n}c_a(t_{rs} - t_{se})$
- du flux solaire sur la paroi si elle est opaque  $\alpha_j S_j I_{t,j}$ ,  $\alpha_j$  étant le facteur d'absorption de la paroi pour le rayonnement solaire
- du rayonnement IR vers la voûte céleste pour une paroi quelconque.
- du flux solaire pénétrant par la surface  $j$ , s'il s'agit d'une vitre,  $F_{S,j}$  étant le facteur solaire de cette vitre
- des apports gratuits internes  $\bar{\phi}_{a.g,int}$
- de la puissance moyenne de chauffe  $\bar{\phi}_{chauff}$

Rappelons que le coefficient de perte du bâtiment est défini par :

$$p_b = \sum_j K_{gl,j} S_j + q_{a,n} c_a$$

TABLEAU I. Valeurs de  $I_{t,j}$ .Rayonnement global réel - (valeurs moyennes période de référence 1966-1975 - méthodologie CEE - albedo 0,2). (W/m<sup>2</sup>)

Mois	Hor.	S	S-W S-E	W E	N-W N-E	N
1	26,7	40,8	32,5	18,3	11,3	10,8
2	52,5	67,1	55,8	35,8	22,1	19,6
3	91,7	87,1	78,3	59,6	39,6	32,9
4	143,3	102,5	101,3	87,5	64,6	50,8
5	190,4	108,8	115,8	112,5	90,4	72,5
6	205,0	106,3	116,3	117,9	98,8	80,8
7	193,3	105,8	112,5	110,0	90,4	74,2
8	170,4	112,9	113,8	102,1	76,3	59,2
9	125,8	112,1	103,3	81,3	53,3	41,7
10	72,5	86,3	72,9	49,2	30,0	25,8
11	34,6	52,1	41,7	24,2	14,2	13,3
12	20,4	35,0	27,5	15,0	8,8	8,3

Référence : IRM . Estimation des expositions énergétiques du rayonnement solaire sur diverses surfaces orientées et inclinées. (1983)  
Valeurs d'application pour la Belgique.  
Période de référence 1966-1975.

FIG. 1.3 - Rayonnement global réel

Les apports solaires bruts résultent des flux solaires et des échanges IR avec le ciel. Ils comportent donc les termes suivants résultant de l'application du principe de superposition.

- pour les vitrages, le flux transmis vers l'intérieur du bâtiment

$$F_{S,j} S_j I_{t,j}$$

dépendant du facteur solaire résultant de la fenêtre  $F_S$

- pour les parois opaques, le flux absorbé

$$\alpha_j S_j I_{t,j}$$

et appliqué au noeud  $P$  génère un flux vers l'intérieur du bâtiment donné par le rapport des résistances  $\frac{K_{gl}}{K_e}$ , d'où :

$$\frac{K_{gl,j}}{K_e} \alpha_j S_j I_{t,j}$$

- pour toutes les parois, opaques ou vitrages (une vitre est opaque dans l'IR), le flux IR soustrait au noeud  $P$  correspond à un flux négatif au noeud  $I$  donné par

$$\frac{K_{gl,j}}{K_e} \epsilon_j S_j I_{IR,j}$$

$\epsilon_j$  étant le facteur d'émission global de la paroi (correspondant à du rayonnement IR) et  $I_{IR,j}$  le flux rayonné vers la voûte céleste (réelle, compte tenu des nuages) par une paroi d'orientation  $j$ .

Il en résulte :

$$\bar{\phi}_{sol,bruts} = \sum_{j(vitres)} F_{S,j} S_j I_{t,j} + \sum_{j(opaques)} \alpha_j S_j I_{t,j} \frac{K_{gl,j}}{K_e} - \sum_{j(toutes)} \epsilon_j S_j \frac{K_{gl,j}}{K_e} I_{IR,j}$$

Pour simplifier l'écriture, on définit souvent la surface équivalente de corps noir pour la captation du rayonnement solaire  $S_{\acute{e}q,j}$  :

$$S_{\acute{e}q,j} = S_j F_{s,j} \text{ (vitre)}$$

$$S_{\acute{e}q,j} = S_j \alpha_j \frac{K_{gl}}{K_e} \text{ (opaque)}$$

D'où :

$$\bar{\phi}_{sol,bruts} = \sum_j (S_{\acute{e}q,j} I_{t,j} - \epsilon_j S_j \frac{K_{gl,j}}{K_e} I_{IR,j})$$

et

$$t_{sc} = t_{se} + \frac{1}{p_b} \sum_j (S_{\acute{e}q,j} I_{t,j} - \epsilon_j S_j \frac{K_{gl,j}}{K_e} I_{IR,j})$$

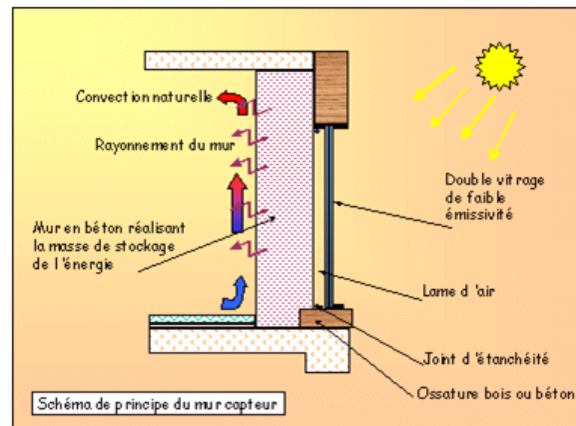


FIG. 1.4 – Principe du mur capteur [ADE, 2008]

## 1.3 Capteurs solaires passifs

### 1.3.1 Gain direct (vitrages)

Il s'agit tout simplement de baies vitrées orientées vers le Sud et complétées par une masse accumulatrice suffisante. Celle-ci est constituée principalement par le plancher situé près des baies vitrées, mais également par les murs porteurs du local. Cette masse accumule la chaleur, réduit ainsi la surchauffe momentanée et puis restitue la chaleur accumulée lorsque le soleil est disparu.

Le système peut être complété par une isolation mobile extérieure jouant le rôle de pare-soleil. Cette isolation externe peut également être utilisée pour diminuer le rayonnement IR  $10\mu m$  vers la voûte céleste pendant les nuits claires. Il faut rappeler que l'augmentation de la surface vitrée augmente la puissance nominale de l'installation. Les vitrages réflecteurs-superisolants constituent une bonne solution.

### 1.3.2 Mur capteur

Il s'agit d'une masse accumulatrice placée directement derrière le vitrage. On supprime ainsi pratiquement les inconvénients dus à la surchauffe et à l'éblouissement. Le rayonnement solaire est valorisé par effet de serre, en disposant un vitrage devant un mur en béton (voir figure 1.4). L'énergie solaire est transmise par conduction à travers le mur puis par rayonnement à l'intérieur de la pièce. Cette transmission se fait avec un déphasage pouvant atteindre 11 heures si l'épaisseur de béton est de 40

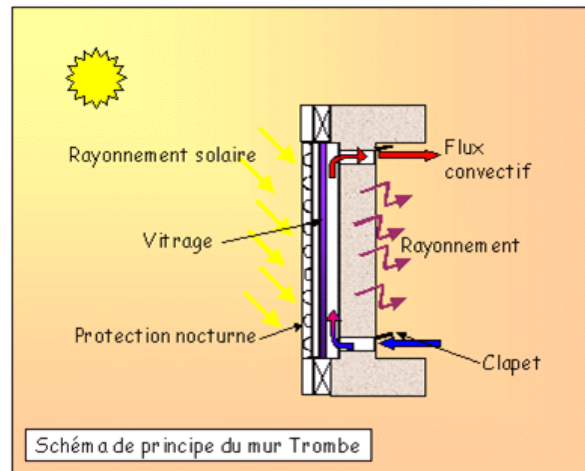


FIG. 1.5 – Principe du mur Trombe - Michel [ADE, 2008]

cm. Ce déphasage permet de chauffer la pièce au moment où il n'y a plus de soleil. En raison des pertes, le mur capteur ne restitue pas la nuit toute l'énergie reçue durant la journée. Afin de limiter ces pertes, il faut prévoir une isolation nocturne ou mettre en oeuvre un double vitrage.

Le rendement d'un mur capteur dépend :

- de son facteur d'absorption  $\alpha_p$  pour le rayonnement solaire ;
- du  $U$  du vitrage ;
- de la capacité et de la résistance thermique du mur. Une épaisseur de 29 cm de briques rouges constitue un optimum du point de vue capacité accumulative et du point de vue déphasage.

Le mur capteur est peu utilisé dans nos régions car il constitue un obstacle visuel complet. Il pourrait toutefois être combiné avec des vitrages à gain direct en façade Sud. Pour conserver la performance du mur, il est contre-indiqué de mettre en oeuvre une isolation. Les apports sont suffisants pour ne pas avoir une impression d'inconfort. Il est par ailleurs nécessaire d'effectuer une « maintenance » de l'installation (nettoyage régulier du vitrage extérieur).

### 1.3.3 Mur Trombe ventilé

Des ouvertures de ventilation peuvent être ménagées à la partie inférieure et à la partie supérieure du mur capteur de manière à augmenter l'efficacité de la convection

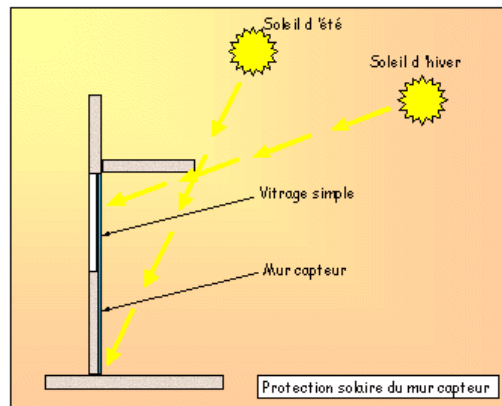


FIG. 1.6 – Protection contre la surchauffe [ADE, 2008]

par effet thermosiphon (voir figure 1.5). 3 à 5% de la surface totale constitués d'ouvertures est une proportion optimale. Ces ouvertures doivent toutefois être fermées la nuit (clapets à fermeture manuelle ou automatique) car en l'absence de rayonnement solaire, le flux convectif s'inverse et peut provoquer un refroidissement accéléré de la pièce.

**Surchauffe** Dès la conception, il est nécessaire de penser aux possibles problèmes de surchauffe. En été, le rayonnement solaire est moins incident sur des surfaces verticales qu'en hiver. Mais il est tout de même important, dans la mesure du possible, d'intégrer dès la conception, dans le projet architectural, des avancées à l'aide de balcons, de pergolas, qui permettent l'ensoleillement direct en hiver et le limitent en été (voir figure 1.6).

La maintenance du mur Trombe est plus contraignante que celle du mur capteur : outre le nettoyage régulier du vitrage extérieur, il faut aussi veiller au nettoyage régulier du vitrage intérieur. Le vitrage du mur Trombe s'encrasse à cause de la circulation d'air et il doit donc être facilement démontable.

#### 1.3.4 Le mur Trombe composé - évolutions actuelles

Une amélioration du mur Trombe classique consiste à essayer de limiter les déperditions nocturnes plus importantes qu'il occasionne à cause de la faible résistance thermique de sa paroi massive.



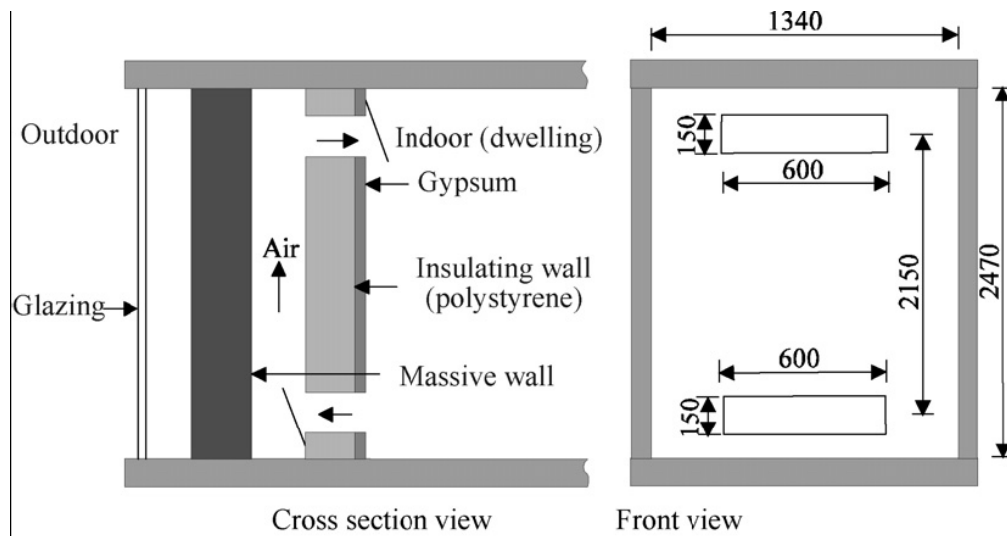


FIG. 1.7 – Mur Trombe-Michel composé [J. Shen, 2007]

Une possibilité est l'utilisation du mur Trombe composé (voir figure 1.7) qui comporte un élément isolant à l'arrière de la paroi massive. Le flux de chaleur est alors transmis de l'extérieur vers l'intérieur par conductibilité au travers de l'élément massif et puis par convection en utilisant le principe du thermosiphon entre l'élément massif et la paroi isolante (pourvue d'orifices de ventilation). S'il n'y a pas de soleil, ou durant la nuit, les orifices de la paroi isolante sont fermés. Les déperditions par transmission sont par ailleurs réduites à cause de la valeur importante de la résistance thermique de l'ensemble.

On peut également imaginer réduire l'encombrement du mur Trombe classique en remplaçant la paroi massive par un matériau à changement de phase : l'intérêt d'utiliser de tels matériaux (sels fondus) est de profiter du stockage / déstockage d'énergie sous forme de chaleur latente.

Enfin, certains chercheurs ont mesuré le coefficient de transmission (solaire) de matériaux à changement de phase pour différentes épaisseurs mises en oeuvre et ont constaté qu'il était supérieur à celui du verre, pour une épaisseur identique. Cela offre des nouvelles perspectives d'application pour ces matériaux dans le domaine de la construction et de l'isolation.

Ces deux dernières évolutions n'en sont encore qu'au stade expérimental.

### 1.3.5 Espace solaire attaché (véranda,...)

Il s'agit d'un local accolé au bâtiment et dont les parois principales sont vitrées. Le local ne peut que temporairement servir de terrasse couverte habitable, car la fluctuation de température y est élevée. On peut l'amortir par une capacité thermique suffisante. De plus, cet espace-tampon diminue les déperditions nominales du local contigu.

Le surcoût est toutefois élevé et ne peut être justifié uniquement par son intérêt sur le plan énergétique. Le rendement en est également inférieur à celui d'un vitrage isolant (gain direct).

## 1.4 Calcul des capteurs solaires passifs

### 1.4.1 Utilisation d'une surface réceptrice équivalente de corps noir

Les logiciels de simulation restent généralement des outils de recherche à vocation académique. Pour pouvoir effectuer des calculs simples (« manuels »), on utilise habituellement des méthodes basées sur la considération de moyennes temporelles des flux, et calculant pour chacun des capteurs solaires passifs une surface réceptrice de corps noir équivalente pour le calcul des gains directs.

Rappelons les relations suivantes :

- pour un vitrage :  $S_{\acute{e}q,j} = S_j F_{S,j} = S_j g_j (1 - c_j) f_{o,j}$
- pour une paroi opaque :  $S_{\acute{e}q,j} = S_j \alpha_j f_{o,j} \frac{U_{gl,j}}{U_e}$

### 1.4.2 Mur Trombe non ventilé

On a :

$$S_{\acute{e}q} = S_{Tr} F_S \alpha_p U_{gl} \left( \frac{1}{U_e} + R_v + R_l \right)$$

- $S_{Tr}$  : aire du mur Trombe
- $F_S$  : facteur solaire du vitrage placé devant le mur Trombe
- $\alpha_p$  : facteur d'absorption du mur Trombe

L'expression pour le mur Trombe non ventilé est justifiée par le schéma en résistances proposé à la figure 1.8.

### 1.4.3 Mur Trombe ventilé

Pour un mur Trombe ventilé, il faut tenir compte de l'augmentation de rendement liée à la ventilation.

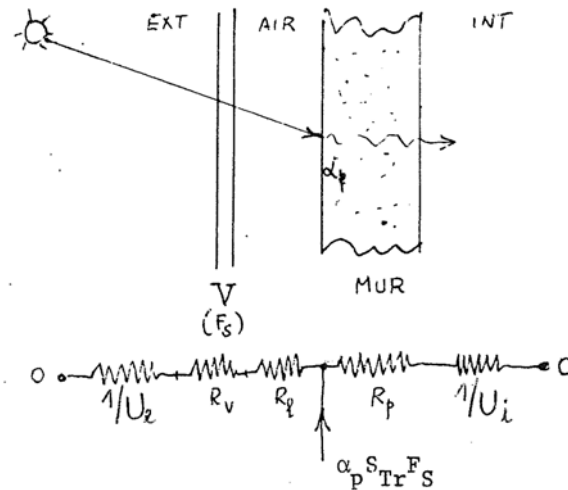


FIG. 1.8 – Schéma utilisé pour le calcul d'un mur Trombe non ventilé

Dès qu'on veut analyser les performances du mur Trombe ventilé ou de l'une de ses améliorations, il n'est plus possible de faire un calcul simplifié : il faut passer par la simulation numérique du comportement du système (simulation dynamique, heure par heure). Les figures 1.9 et 1.10 reprennent le schéma électrique équivalent relatif à l'étude du mur Trombe ventilé et du mur Trombe composé. La simulation numérique dynamique du comportement de ces deux systèmes a été réalisée par [J. Shen, 2007]. Les résultats intéressants de ces simulations sont l'évolution des températures à la surface interne ou externe du mur ainsi que le flux chaud transmis à l'intérieur du local concerné (figures 1.11 et 1.12).

Dans le cas du mur Trombe ventilé, le débit d'air de circulation et la température de l'air entre le verre et le mur sont directement influencés par le rayonnement solaire. La variation de l'amplitude de ces valeurs est beaucoup plus importante que dans le cas du mur Trombe composé, pour lequel la masse du mur capteur introduit un déphasage et une atténuation du signal. On observe donc sur les figures 1.11 et 1.12 l'intérêt d'utiliser un mur Trombe composé plutôt qu'un mur Trombe ventilé.

#### 1.4.4 VÉRANDA - espace solaire attaché

Pour une véranda (espace solaire attaché), deux aspects sont à considérer :

1. Une meilleure isolation thermique des locaux contigus à la véranda grâce à l'effet « tampon ». Il en résulte une diminution des déperditions calorifiques de ces locaux. La contribution des parois communes à la véranda (v) et aux locaux

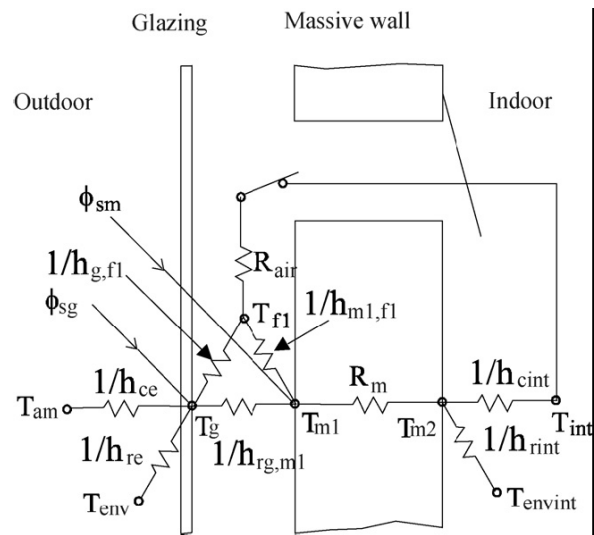


FIG. 1.9 – Schéma en résistances utilisé pour le calcul d'un mur Trombe ventilé [J. Shen, 2007]

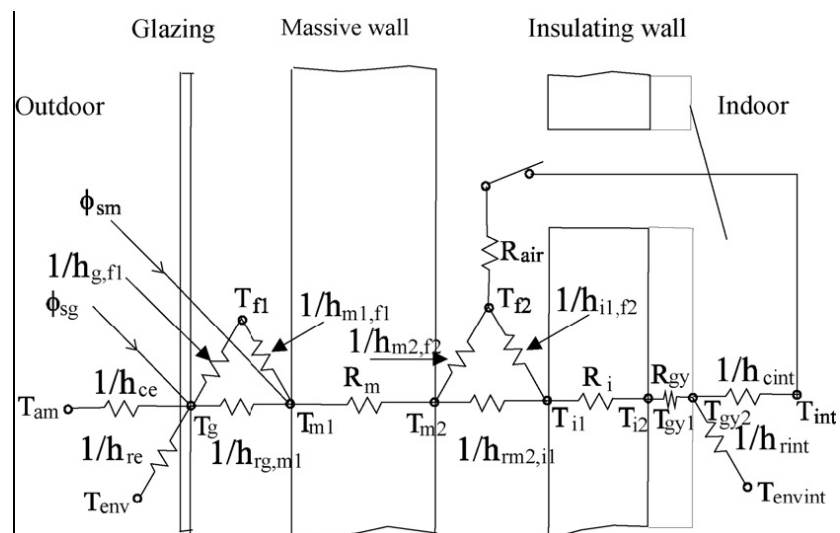


FIG. 1.10 – Schéma en résistances utilisé pour le calcul d'un mur Trombe composé [J. Shen, 2007]

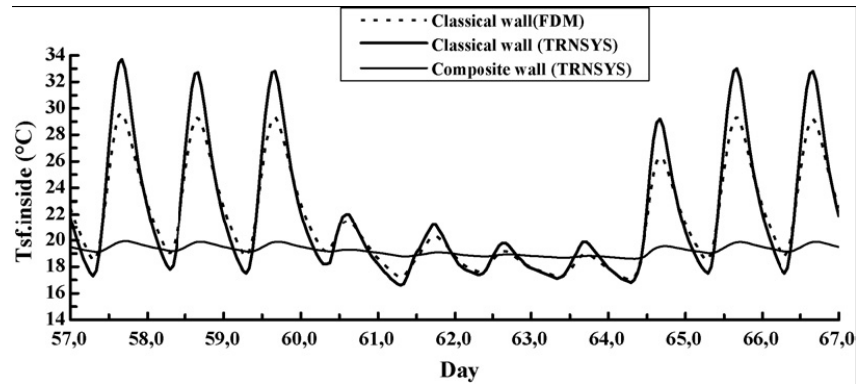


FIG. 1.11 – Evolutions temporelles de la température de surface intérieure d'un mur Trombe et d'un mur Trombe composé [J. Shen, 2007]

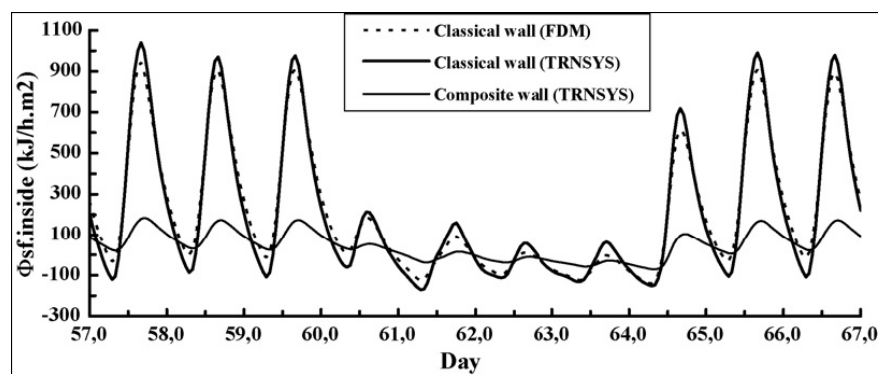


FIG. 1.12 – Evolutions temporelles du flux de chaleur transmis à l'intérieur du local dans le cas d'un mur Trombe et d'un mur Trombe composé [J. Shen, 2007]

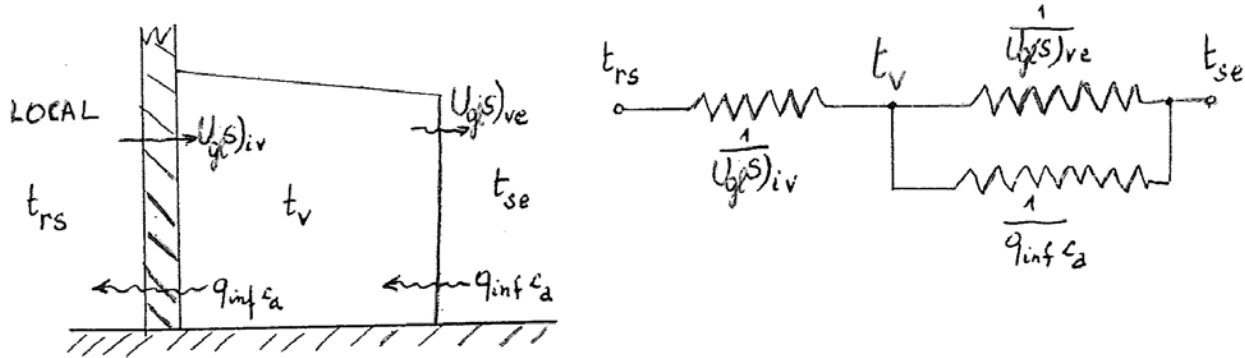


FIG. 1.13 – Schéma utilisé pour le calcul d'une véranda

contigus (i) devient :  $[U_{gl}S)_{iv} + q_{inf}c_a]r$ .

- $U_{gl}S)_{iv}$  : correspond à la transmission entre l'intérieur du local et la véranda
- $q_{inf}$  : sont les infiltrations par les baies vitrées du local, pratiquement non modifiées par la présence de la véranda ( $= q_{inf,v}$ )
- $r$  étant le coefficient ( $< 1$ ) d'atténuation de température (ou coefficient d'effet tampon) donné par :

$$r = \frac{U_{gl}S)_{ve} + q_{inf,v}c_a}{U_{gl}S)_{iv} + U_{gl}S)_{ve} + q_{inf,v}c_a}$$

Ceci résulte de l'expression de définition du coefficient d'effet tampon (déperditions du local contigu à la véranda) :

$$\Phi = (U_{gl}S)_{iv} + q_{inf,v}c_a)(t_{rs} - t_v) = (U_{gl}S)_{iv} + q_{inf,v}c_a)r(t_{rs} - t_{se})$$

et du bilan de la véranda :

$$U_{gl}S)_{iv}(t_{rs} - t_v) - U_{gl}S)_{ve}(t_v - t_{se}) + q_{inf,v}c_a(t_{se} - t_v) = 0$$

traduit par le schéma de la figure 1.13.

$r$  est souvent voisin de 1 (0.85 ... 0.95).

2. La surface réceptrice équivalente, qui comprend deux termes (voir figure 1.14) :
  - le rayonnement solaire direct transmis au travers des vitrages de la véranda et incident sur les parois vitrées ou opaques situées entre le local et la véranda

$$S_{\text{éq,dir}} = \tau_v \left( \sum S_V F_S + \sum S_p \alpha_p \frac{U_{gl,p}^*}{U_i} \right)$$

- $S_V F_S$  : se rapporte aux vitres du local
- $S_p \alpha_p \frac{U_{gl,p}^*}{U_i}$  : se rapporte aux parois opaques du local

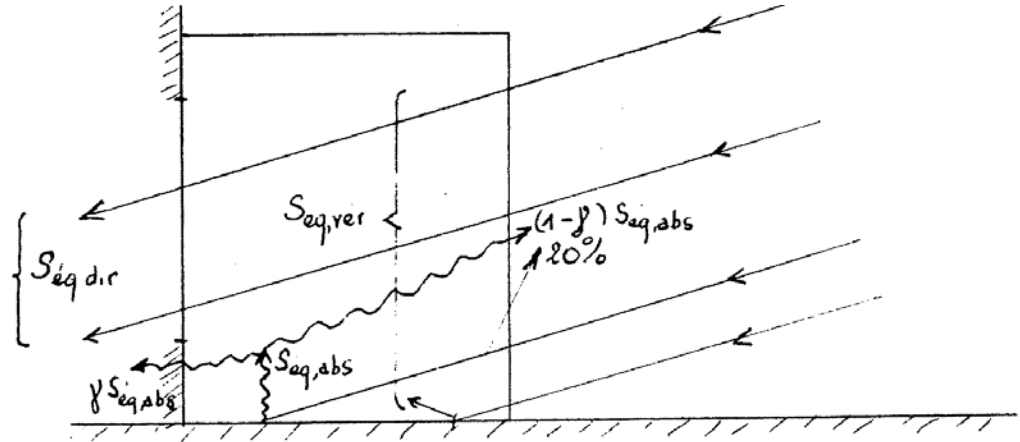


FIG. 1.14 – Bilan de la véranda

- $U_{gl,p}^*$  : se calcule avec un coefficient  $U_i$  pour les deux faces de la paroi
- $\tau_v$  : est le facteur de transmission de la véranda vis-à-vis du flux solaire
- Le flux indirect correspondant à la chaleur solaire absorbée à l'intérieur de la véranda et transmise par conductibilité au travers des parois situées entre le local et la véranda. Le flux total pénétrant dans la véranda correspond à une surface équivalente :

$$S_{\text{eq}}(\text{total véranda}) = \sum \left( 0.8 S_{V,\text{vér}} F_{S,\text{vér}} + \alpha_{p,\text{vér}} S_{p,\text{vér}} \frac{U_{gl,\text{vér}}}{U_e} \right)$$

- $S_{V,\text{vér}} F_{S,\text{vér}}$  correspond aux vitres de la véranda
- $\alpha_{p,\text{vér}} S_{p,\text{vér}} \frac{U_{gl,\text{vér}}}{U_e}$  correspond aux parois opaques de la véranda
- le facteur empirique 0.8 tient compte des 20% de rayonnement transmis par les vitres de la véranda, mais ressortant par réflexion sur les parois et objets situés dans la véranda.

La surface  $S_{\text{eq}}$  correspondant au rayonnement absorbé à l'intérieur de la véranda vaut donc :

$$S_{\text{eq}}(\text{abs}) = S_{\text{eq}}(\text{total véranda}) - S_{\text{eq}}(\text{direct})$$

De cette énergie, la fraction :

$$\gamma = \frac{U_{gl} S)_{iv} + q_{inf} c_a}{U_{gl} S)_{iv} + U_{gl} S)_{ve} + q_{inf} c_a}$$

pénètre à l'intérieur du local, d'où :

$$S_{\text{eq}}(\text{indirect}) = S_{\text{eq}}(\text{abs}) \cdot \gamma$$

Cette analyse globale ne permet pas de prévoir la valeur des surchauffes à l'intérieur de la véranda et de voir à quel moment elle est habitable.

# Chapitre 2

## Systemes de refroidissement passif

Les systemes de refroidissement passif consistent à utiliser les flux naturels d'énergie pour transférer la chaleur vers des puits environnants (sol, air, ciel). Généralement, les systemes de chauffage passif seront utilisés dans le domaine résidentiel alors que les systemes de refroidissement passif trouveront leur application dans le tertiaire (bureaux, magasins,...).

### 2.1 Le contrôle des apports solaires

Quand on veut effectuer du refroidissement passif, la première étape est d'empêcher la chaleur d'entrer. Le contrôle architectural de base des apports solaires est normalement réalisé par l'ombrage des baies solaires : on permet le rayonnement direct en régime hiver mais on doit l'exclure en régime été.

Il existe différents types de contrôle des apports solaires : utilisation de surplombs, persiennes verticales, plantation d'arbres à feuilles caduques. Le choix judicieux de la couleur des façades, l'isolation de ces dernières ainsi que la bonne orientation du bâtiment sont également à considérer.

### 2.2 La ventilation

La circulation de l'air procure une sensation de confort chez les personnes via les mécanismes de convection et d'évaporation à la surface du corps. Les limites pour le confort sont une température de  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour une vitesse d'air de  $0.25\text{ m/s}$  ( $27.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour une vitesse de  $0.8\text{ m/s}$  et  $29.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour un écoulement d'air à  $1\text{ m/s}$ ).

Pour déterminer si les conditions de confort sont respectées, il faut calculer le



débit d'air  $Q$ , qui circule dans l'espace occupé.

$$Q = A_x V_a$$

avec

- $A_x$  la section de passage de l'air dans l'espace
- $V_a$  la vitesse de l'air dans la pièce

La disposition correcte des fenêtres, un aménagement paysager ouvert, des bâtiments étroits,... peuvent améliorer la circulation naturelle de l'air lors de la ventilation.

Le débit d'air au travers d'une fenêtre ouverte est donné par :

$$Q = C_v V_v A_f$$

avec

- $Q$  : débit d'air [ $m^3/s$ ]
- $A_f$  : section libre d'entrée de l'air (section de passage) [ $m^2$ ]
- $V_v$  : vitesse du vent [ $m/s$ ]
- $C_v$  : efficacité d'ouverture (=0.5-0.6 pour un vent perpendiculaire à l'ouverture, =0.25-0.35 pour un vent diagonal)

L'effet de cheminée (dû à la variation de densité d'un gaz avec la température) permet de ventiler les espaces (voir figure 2.1) : l'air chaud s'élève le long de la structure et sort par une ouverture pratiquée dans la partie haute tandis que l'air froid rentre par le bas pour le remplacer. L'effet cheminée est d'autant plus efficace que la hauteur de la structure et la température de l'air sont importantes. Le débit d'air obtenu est donné par :

$$Q = 0.116 A_j \sqrt{h(T_c - T_e)}$$

avec

- $A_j$  : section des entrées ou sorties [ $m^2$ ] (la plus petite)
- $h$  : distance entre l'entrée et la sortie [ $m$ ]
- $T_c$  : température moyenne dans la cheminée [ $^{\circ}C$ ]
- $T_e$  : température extérieure [ $^{\circ}C$ ]

Si une des deux sections (entrée ou sortie) est deux fois plus grande que l'autre, le débit est augmenté de 25%. Si le rapport est de 3 à 1, le débit croît de 35%.

## 2.3 Le refroidissement par évaporation

Si l'on fait circuler de l'air non saturé en humidité ( $\phi < 1$ ) au-dessus d'une surface d'eau, l'évaporation de l'eau contribue à la diminution des températures de l'air et de

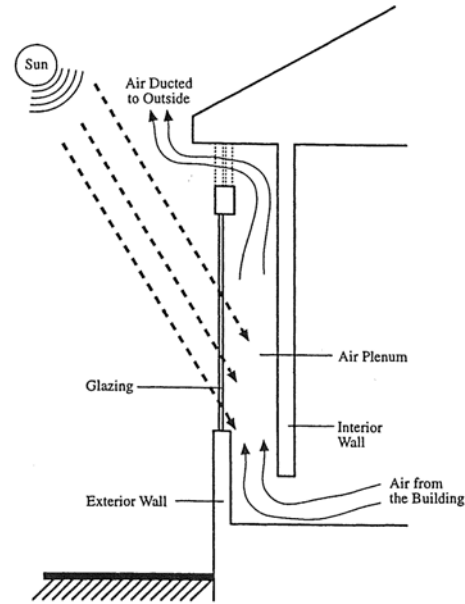


FIG. 2.1 – Illustration de l'effet cheminée [Goswami et al., 1999]

l'eau. La température la plus basse qu'on puisse atteindre avec cet effet d'évaporation directe est la température de bulbe humide. Si on a de l'air relativement sec au départ, on pourra observer une diminution importante de la température (ex : air à 26 °C avec  $\phi = 0.2$ ,  $t_h$  vaut 13 °C ; si l'air a un  $\phi = 0.5$ ,  $t_h$  vaut 18.5 °C).

On n'atteint normalement pas la valeur de  $t_h$ , mais on s'en approche d'autant plus que la surface du plan d'eau en contact avec l'air est importante et que ce contact dure longtemps. Un autre dispositif intéressant de refroidissement par évaporation est l'utilisation de sprays.

## 2.4 Systèmes de refroidissement nocturne

Il s'agit d'utiliser l'air de ventilation nocturne, plus froid, pour réduire la température du bâtiment ou d'une masse accumulatrice (ex : lit de galets). Ce faisant, la structure (bâtiment ou masse) est préparée à stocker une partie de l'énergie pendant les moments les plus chauds de la journée.

On peut aussi compter sur le rayonnement nocturne vers la voûte céleste pour éliminer l'énergie accumulée la journée.

Le flux émis, pour une surface horizontale, est donné par :

$$\phi_r = \epsilon\sigma(T_{surf}^4 - T_{ciel}^4)S_h$$

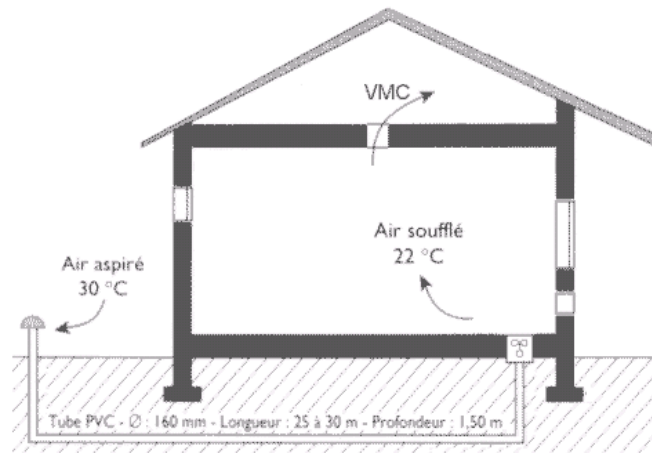


FIG. 2.2 – Principe de l'installation d'un puits canadien

Par nuit claire, la température du ciel peut descendre jusqu'à  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 2.5 Refroidissement (ou chauffage) par contact avec le sol - puits canadien

### 2.5.1 Description du dispositif et méthode de calcul

En faisant circuler l'air de ventilation d'un bâtiment à l'intérieur d'une canalisation enterrée, on peut observer un préchauffage de l'air en régime hiver ainsi que la limitation des risques de surchauffe en régime été (pré-rafraîchissement) : cela est rendu possible grâce à la bonne inertie du sol qui garantit une température quasi constante tout au long de l'année dès qu'on se situe suffisamment profondément.

Les phénomènes climatiques sont essentiellement non stationnaires et dès qu'on s'intéresse à une structure dans laquelle l'inertie joue un rôle important, il n'est pas évident de rendre compte des performances du système à l'aide d'un modèle simple. C'est pour cette raison qu'on évalue les performances du puits canadien à l'aide d'outils de simulation numérique. La figure 2.2 représente très schématiquement l'installation d'un puits canadien couplé à une maison quelconque.

Les transferts de chaleur qui se produisent à l'intérieur du puits ne peuvent pas être modélisés en une seule dimension. Dans l'étude numérique, on découpe le tuyau en tronçons d'égale longueur, sur lesquels on écrit un bilan énergétique. Le flux échangé dans chacun de ces tronçons est le résultat de la simulation numérique des transferts de chaleur dans la section d'entrée de ce tronçon (résolution numérique de l'équation de Fourier - Kirchhoff). On fait donc l'hypothèse d'une résolution explicite des transferts

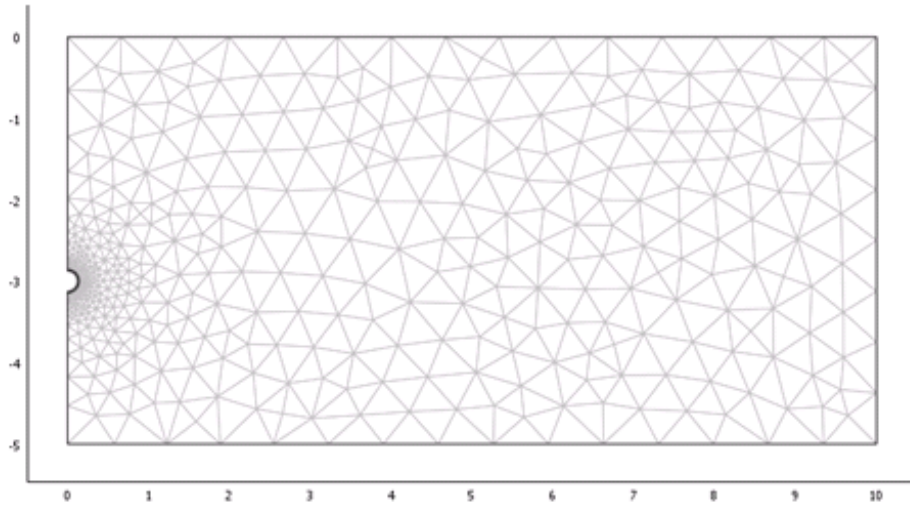


FIG. 2.3 – Coupe du puits canadien - maillage de la simulation 2-D (COMSOL) [Moinet, 2007]

de chaleur à l'intérieur du puits canadien. Pour simplifier quelque peu le problème, on a négligé le gradient de température sur l'épaisseur du tuyau. La simulation 2-D des transferts dans la section du tube a été réalisée grâce au logiciel aux éléments finis COMSOL.

Dans la section du tube (voir figure 2.3), on calcule le champ de température en résolvant l'équation de conservation de l'énergie avec ses conditions aux limites : condition de Fourier à la surface interne du tuyau, condition de Fourier et Neumann à la surface du sol (échange par convection avec l'ambiance, échange par rayonnement avec l'environnement et flux solaire incident) et température imposée au niveau de la frontière inférieure (présence de la nappe phréatique). On profite également de la symétrie du problème pour ne modéliser qu'un demi domaine et si ce domaine n'est pas trop restreint, on applique une condition de type Neumann (flux nul) à sa limite.

L'équation à résoudre est l'équation de Fourier - Kirchhoff :

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \vec{\nabla}^2 t + q$$

Le bilan sur un tronçon du tube (voir figure 2.4) donnera :

$$\phi_{\text{échangé}} = m c_p (t_k - t_{k+1})$$

avec  $m$  qui est le débit d'air. On évalue donc la situation au noeud  $k + 1$  à partir de la situation au noeud  $k$ .

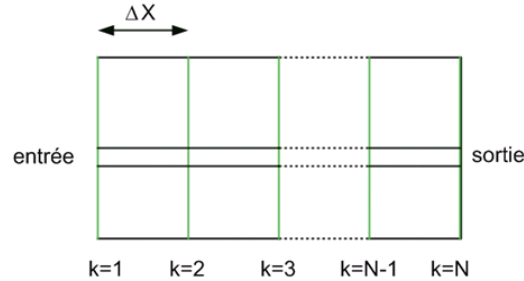


FIG. 2.4 – Discrétisation du puits canadien en tronçons [Moinet, 2007]

$\phi_{\text{échangé}}$  est le résultat de la simulation numérique des transferts dans le tronçon. Il est donné par :

$$\phi_{\text{échangé}} = hS_p(t_{\text{air}} - t_{\text{tube}})$$

$h$  est le coefficient de transfert entre l'air et le tube.

Il ne faut pas perdre de vue que tous ces calculs doivent être effectués en transitoire car les conditions extérieures sont disponibles heure par heure (par exemple quand on utilise le fichier météo de référence pour effectuer les simulations).

## 2.5.2 Paramètres des simulations

- Type de sol
  - Sol argileux :  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_p = 1550 \text{ J/(kg.K)}$ ,  $\lambda = 1.58 \text{ W/(m.K)}$
  - Sol sablonneux :  $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_p = 1000 \text{ J/(kg.K)}$ ,  $\lambda = 0.4 \text{ W/(m.K)}$
- Diamètre du tube : 15 cm ( $h_{\text{air-tube}} = 9 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$ ) et 25 cm ( $h_{\text{air-tube}} = 23 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$ )
- Profondeur du puits : 2 et 3 m
- Longueur de tube : de 75 à 150 m
- Nature du tube : PVC de 1 cm d'épaisseur
- Débit d'air :  $300 \text{ m}^3/\text{h}$
- Maillage : triangulaire à 1003 éléments
- Temps de simulation : 1 année
- Pas d'itération temporel : 1 h
- Taille du tronçon : 5 m

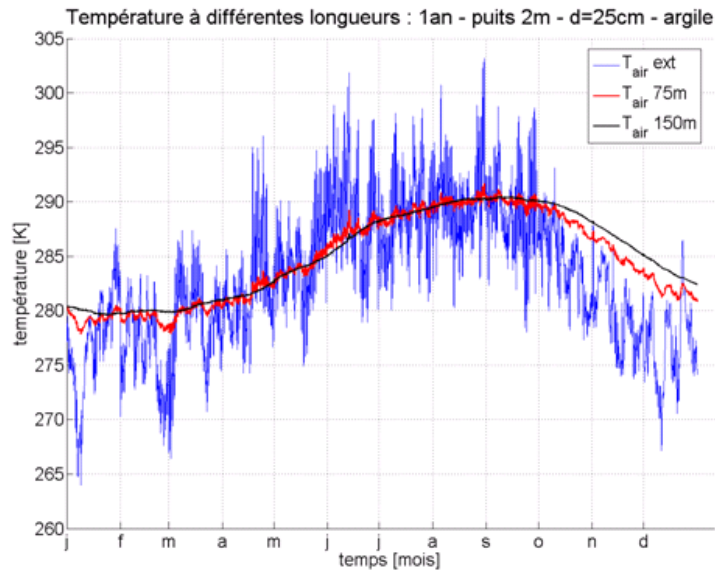


FIG. 2.5 – Température à différentes longueurs - puits à 2 m - sol argileux [Moinet, 2007]

### 2.5.3 Résultats

#### Influence de la longueur et de la profondeur du puits

La figure 2.5 représente l'évolution de la température à la sortie du puits tout au long de l'année climatique de référence pour 2 longueurs de puits ainsi que l'évolution de la température extérieure. Les résultats sont obtenus pour un puits enterré à 2 mètres de profondeur dans un sol argileux (diamètre du puits : 25 cm). On observe un amortissement évident du signal ainsi qu'un léger déphasage. L'amortissement et le lissage du signal sont d'autant plus importants que la longueur du puits est importante. Alors que la température extérieure fluctue entre 265 et presque 305 Kelvin tout au long de l'année, la température à la sortie du puits sera comprise entre 280 et 290 Kelvin en toute saison.

Si l'on s'intéresse à l'influence de la profondeur du puits (voir figure 2.6), on observe qu'à 3 mètres de profondeur, les tendances s'accroissent : déphasage du signal plus important et amortissement plus net (évolution des températures à la sortie du puits comprise entre 281 et 288 Kelvin).

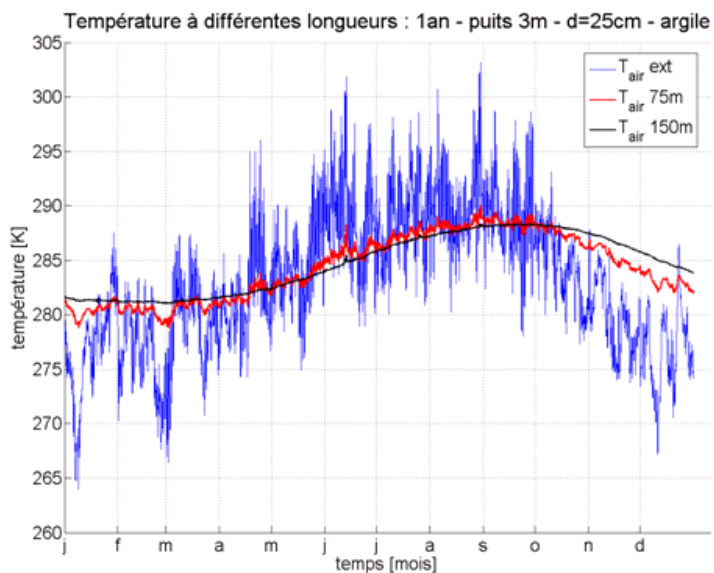


FIG. 2.6 – Température à différentes longueurs - puits à 3 m - sol argileux [Moinet, 2007]

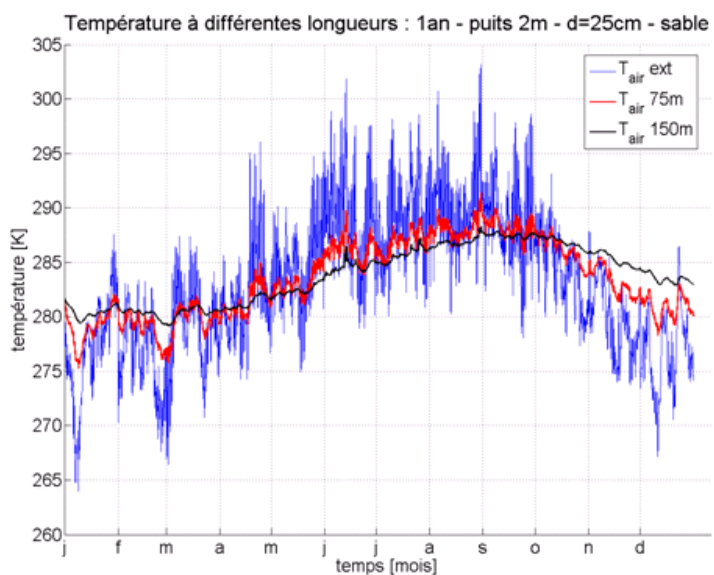


FIG. 2.7 – Température à différentes longueurs - puits à 2 m - sol sablonneux [Moinet, 2007]

### Influence du type de sol

Le type de sol influence les transferts de chaleur au sein du puits canadien. La figure 2.7 donne les résultats obtenus dans le cas d'un puits canadien enterré à 2 mètres de profondeur dans un sol sablonneux. Si on la compare avec la figure 2.5, on constate que l'argile permet d'atténuer beaucoup plus les oscillations du signal à haute fréquence, et ce pour toutes les longueurs de tube. Par contre, les niveaux de température atteints à la sortie du tube sont inférieurs dans le cas du sol sablonneux : cela occasionne des besoins de chauffage supérieurs en régime hiver et peut donner lieu à une meilleure efficacité du refroidissement en régime été.

### 2.5.4 Couplage avec une habitation

L'habitation étudiée possède les caractéristiques suivantes :

- Volume :  $375 m^3$
- Taux de renouvellement d'air :  $0.8 \text{ volume}/h$
- 2 étages
- Surface de plancher chauffée :  $150 m^2$
- Surface de fenêtre :  $30 m^2$
- Surface de toit :  $75 m^2$
- Murs extérieurs :  $143 m^2$ 
  - 9 cm de bloc ( $\lambda = 1.1W/(m.K)$ )
  - 4 cm d'isolant ( $\lambda = 0.04W/(m.K)$ )
  - 14 cm de briques ( $\lambda = 0.32W/(m.K)$ )

La simulation du comportement dynamique de l'habitation repose sur l'utilisation d'un schéma simple en résistances (repris à la figure 2.8). On effectue le calcul des déperditions (par les murs, fenêtres et par la ventilation) et des apports (solaires et gratuits). Le modèle permet de déterminer la température  $T_i$  à l'intérieur de la maison. Si cette température est inférieure à  $18^\circ C$ , on évalue alors les besoins en énergie pour le chauffage et lorsqu'elle dépasse  $25^\circ C$ , on évalue les besoins en énergie de refroidissement.

On comptabilise les heures de surchauffe dès que  $T_i > T_{confort} = 23^\circ C$ .

La simulation du comportement de la maison sur une année climatique type donne une consommation en énergie pour le chauffage de  $67 kWh/(m^2.an)$ , pour le refroidissement de  $6.8 kWh/(m^2.an)$  et 1442 h de surchauffe. La répartition de ces besoins est reprise à la figure 2.9.

Si l'on équipe la maison d'un puits canadien de 150 m de long (sol argileux), les besoins en énergie pour le chauffage diminuent de 24%, pour le refroidissement de



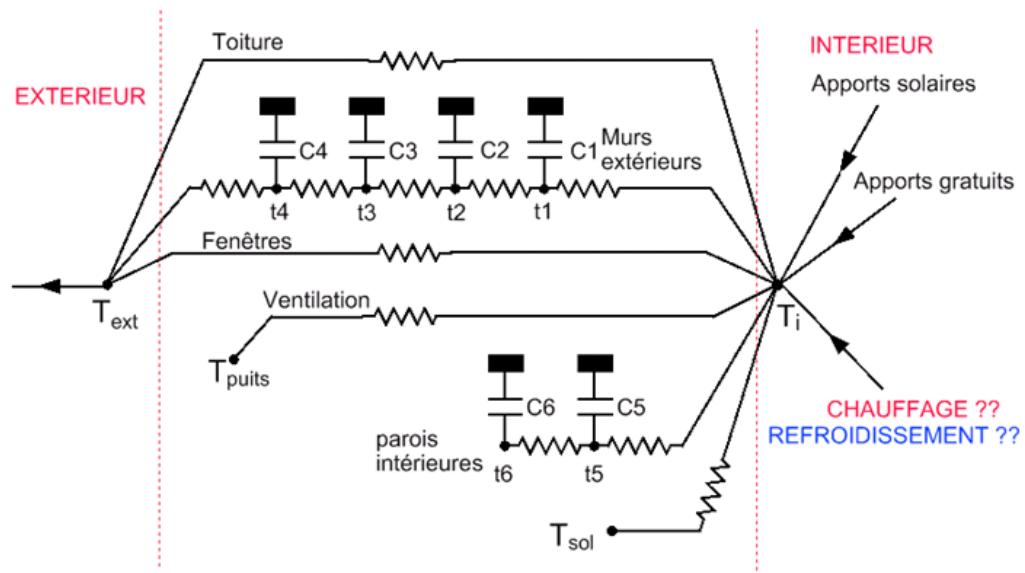


FIG. 2.8 – Schéma simple en résistances et capacités - simulation d'une habitation [Moinet, 2007]

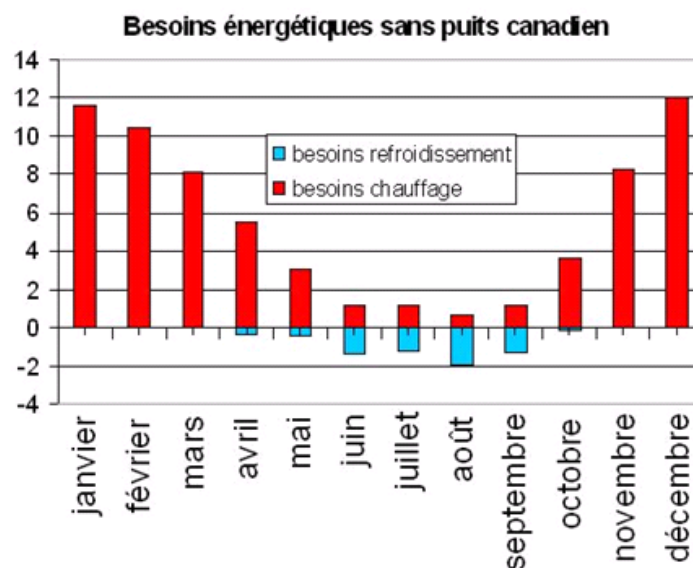


FIG. 2.9 – Evolution mensuelle des besoins en énergie (chauffage et refroidissement) - situation initiale [Moinet, 2007]

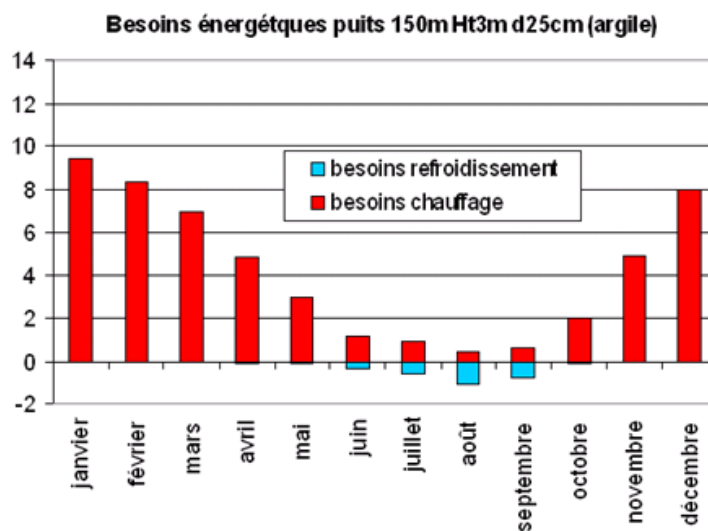


FIG. 2.10 – Evolution mensuelle des besoins en énergie (chauffage et refroidissement) - puits de 150 m [Moinet, 2007]

54%. Le nombre d'heures de surchauffe diminue de 20%.

Les figures 2.10 et 2.11 comparent les évolutions des besoins en énergie pour le chauffage et le refroidissement dans le cas d'un puits de 150 m de long et d'un puits deux fois plus court. La différence est minime : 21% de réduction pour le chauffage, 50% de réduction pour le refroidissement et un nombre d'heures de surchauffe de 1197. L'amortissement d'un puits de 150 m est estimé à 20 ans alors qu'il ne faut que 12 ans pour amortir la structure deux fois plus courte !

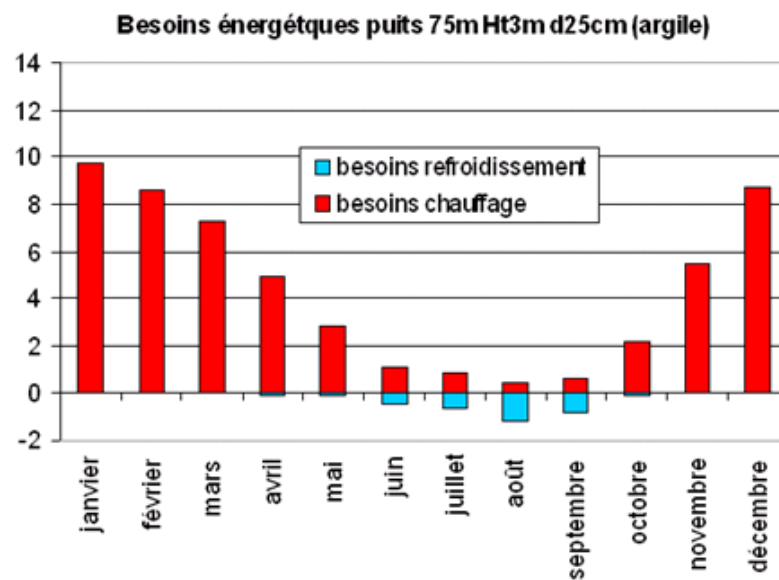


FIG. 2.11 – Evolution mensuelle des besoins en énergie (chauffage et refroidissement) - puits de 75 m [Moinet, 2007]

# Chapitre 3

## La maison passive

### 3.1 Introduction [ARC, 1996b]

Le label allemand « Habitat basse énergie » définit un standard de construction visant à réduire la consommation énergétique des immeubles d'habitation tout en assurant un climat intérieur confortable. Ce label a donné naissance en 2002 à une nouvelle réglementation thermique allemande qui reprend les objectifs-cibles du label :  $65 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$  pour le chauffage,  $25 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$  pour l'eau chaude sanitaire et  $30 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$  pour la consommation électrique. De plus, la réglementation demande qu'une « carte d'identité énergétique » du bâtiment soit communiquée lors de la location ou de l'achat d'un bâtiment.

Avec les développements actuels de la législation belge relative à la performance énergétique des bâtiments, c'est le même objectif qui est poursuivi.

Renforçant ces objectifs, l'« Institut pour l'Habitat Passif »(PHI) de Darmstadt est à l'origine d'un programme européen visant à mettre au point un label européen « Habitat Passif ». Ce label peut être atteint en suivant, lors de la conception du bâtiment, les principes suivants (voir figure 3.1) :

1. Assurer une conception solaire passive des bâtiments
  - la contribution solaire doit être égale à près de 40% des besoins en chauffage
  - le coefficient de déperdition thermique du vitrage sera inférieur à  $0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ .  
Le facteur solaire  $g$  sera au moins de 50%.
  - le coefficient de déperdition thermique des châssis sera au maximum de  $0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$

Dans ce cas, le bâtiment doit être orienté au sud pour bénéficier des apports solaires. Les fenêtres envisagées sont pourvues d'un triple vitrage et d'un châssis super-isolant.

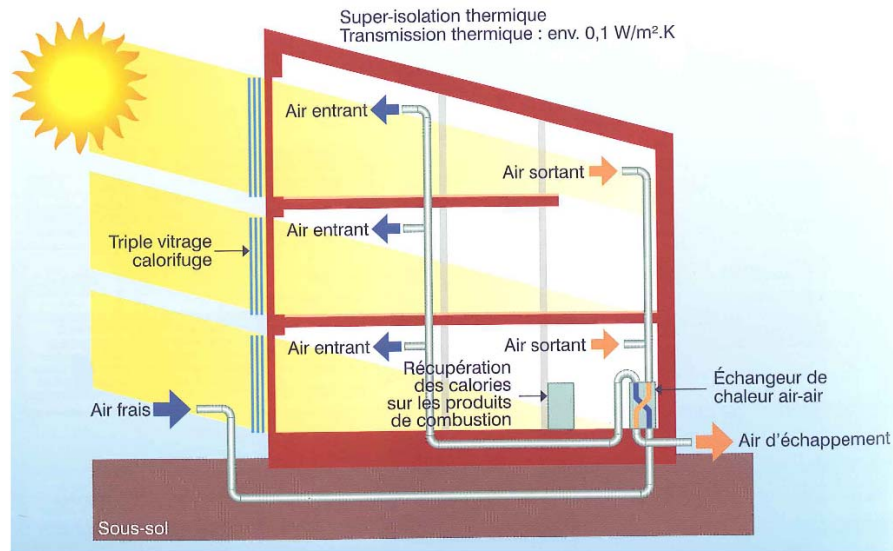


FIG. 3.1 – Principes constructifs et techniques d'un bâtiment passif en Allemagne (d'après Wolfgang Feist) [ARC, 1996b]

2. Renforcer l'isolation des bâtiments

- le coefficient de déperdition thermique de l'enveloppe doit être d'environ  $0.1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
- les ponts thermiques seront limités à  $0.01 \text{ W/mK}$  au maximum (valeur  $\psi$ )
- l'étanchéité à l'air de l'enveloppe sera au maximum de  $0.6 \text{ h}^{-1}$  à  $50 \text{ Pa}$  (valeur  $n_{50}$ ).

Cette exigence s'accompagne donc de mesures visant à limiter les ponts thermiques et à favoriser une étanchéité maximale à l'air.

3. Favoriser la complémentarité entre la récupération et les apports d'apports de chaleur

- le débit d'aération d'hygiène est de l'ordre de  $30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{personne}$
- le rendement de l'échangeur de chaleur air-air doit être supérieur à 80%
- la température de l'air frais préchauffé doit être au minimum de  $8 \text{ }^\circ \text{C}$ .

Ces exigences conduisent les concepteurs à prévoir une ventilation double flux avec échangeur de chaleur.

4. Optimiser l'efficacité électrique des équipements

5. Utiliser les énergies renouvelables en appoint

L'ensemble de ces mesures devrait conduire à réduire les besoins annuels de chauffage

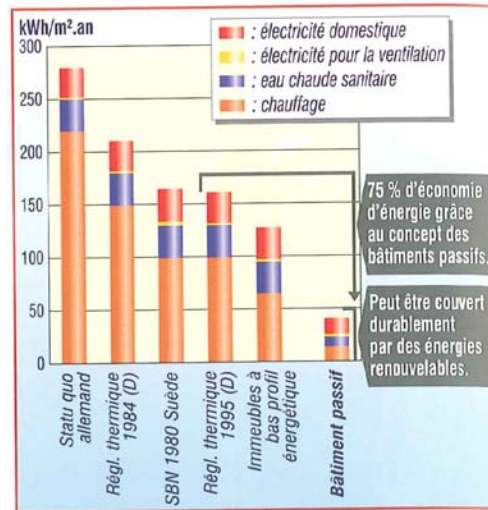


FIG. 3.2 – Comparaison entre les indices de performance énergétique en  $kWh/m^2.an$  pour les immeubles d’habitation [ARC, 1996b]

à  $15 kWh/m^2.an$  et à  $42 kWh/m^2.an$  au total (chauffage + eau chaude sanitaire + électroménagers).

La mise en oeuvre de ces exigences au niveau européen a fait l’objet ces dernières années d’un programme d’expérimentation appelé CEPHEUS (Cost Efficient Passive House as European Standards). La construction de 250 logements à travers l’Europe a permis de démontrer la faisabilité technico-économique de ce type de bâtiments.

La construction de bâtiments solaires passifs pourrait donc devenir dans les années à venir un standard de construction en Europe limitant ainsi le besoin total d’énergie finale pour le chauffage, l’eau chaude sanitaire et l’électricité à moins de  $50 kWh/m^2.an$  (environ  $120 kWh/m^2.an$  d’énergie primaire). Une telle valeur équivaldrait en moyenne au tiers, voire au quart, des consommations énergétiques des immeubles d’habitation construits actuellement en Europe (voir figure 3.2).

## 3.2 Histoire de la maison passive [Guerriat, 2006]

Au milieu des années 80, les maisons basse-énergie étaient déjà le standard des constructions neuves en Suède et au Danemark. La réflexion sur l’isolation, la prévention des ponts thermiques, l’étanchéité, les vitrages et la ventilation contrôlée étaient déjà des questions prises en considération.



FIG. 3.3 – Maison Pleiade à Louvain-la-Neuve

La Belgique n'est pas en reste puisque au début des années 90, le projet PLEIADE (Passive Low Energy Innovative Architectural Design - voir figure 3.3) a vu le jour grâce à l'action de la cellule de recherche Architecture et Climat (UCL), du CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) et au soutien de la Région Wallonne et d'Electrabel. Il s'agissait de la construction d'une maison entre mitoyens à Louvain-la-Neuve dont l'objectif était de consommer très peu d'énergie tout en garantissant un confort thermique élevé en été comme en hiver ainsi qu'une bonne qualité de l'air. Sur certains points, on s'approchait déjà de la maison passive (système de ventilation ou étanchéité à l'air par exemple). Par contre, les vitrages n'étaient pas très performants et l'isolation sur les mitoyens était insuffisante. A titre expérimental, deux systèmes de chauffage indépendants (gaz et électricité) avaient été mis en place : la maison PLEIADE n'avait donc pas une vocation de standardisation mais bien d'expérimentation.

L'idée de la maison passive en tant que telle est née lors d'un voyage d'étude du Prof. Wolfgang Feist (Darmstadt) en Suède et de sa rencontre avec le Prof. Bo Adamson (Université de Lund). Les maisons passives ont alors été définies comme des maisons ne nécessitant pas de chauffage actif conventionnel. On s'est vite rendu compte qu'il n'était pas logique de ne s'en tenir qu'à une comptabilité de la seule énergie de chauffage et cette restriction a ensuite été élargie à tous les types d'énergie consommée.

Pour réfléchir à la construction des premières maisons passives, un groupe de travail scientifique a été fondé et financé par le ministère de l'économie et de la technique de la Hesse (Allemagne). La ville de Darmstadt a rapidement manifesté son intérêt pour accueillir ces maisons expérimentales et, en 1991, les quatre premiers logements étaient habités. Après vérifications par des mesures en tout genre, il s'est avéré que les maisons passives répondaient parfaitement à leurs objectifs. Même lors de l'hiver 1996/1997, qui a été particulièrement rigoureux, et alors que des maisons traditionnelles connaissaient des problèmes de confort, les quatre logements passifs n'ont pas augmenté leur consommation d'énergie et ont réussi à préserver une température ambiante agréable tout l'hiver. Pour l'anecdote, il est amusant de savoir que ces quatre logements étaient quand même équipés de radiateurs (qui n'ont finalement jamais servis) parce que les concepteurs n'avaient pas osé y renoncer...

La constatation que la ventilation seule est capable de fournir l'appoint de chaleur nécessaire, et l'apparition des premiers appareils de ventilation avec récupération de chaleur ont permis d'étendre en 1997 le concept de maison passive à un plus large public car cette approche était devenue raisonnable. Etant le premier du genre, le bâtiment de Darmstadt a été très coûteux puisque certains composants avaient été fabriqués pour l'occasion.

Le concept de maison passive est considéré comme un saut spectaculaire dans l'évolution des normes en matière d'économie d'énergie. En effet, l'efficacité énergétique est loin d'être insignifiante puisqu'une économie de 75 à 80 % est réalisée sur l'énergie de chauffage! De telles données semblaient a priori utopiques, mais la réalité s'est imposée et plus de 10.000 bâtiments passifs ont été construits en Europe dont 7000 en Allemagne. La construction passive intéresse aujourd'hui également les promoteurs immobiliers qui voient là une aubaine pour construire des appartements attractifs.

### 3.3 Présentation des standards [Guerriat, 2006]

Les maisons passives sont des bâtiments qui assurent un climat intérieur confortable en été comme en hiver sans avoir recours à un système conventionnel de chauffage ou de refroidissement. Pour que cela soit possible, il est essentiel que, sous nos climats, la demande de chauffage annuelle ne dépasse pas  $15 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$ . Ceci correspond à une installation de chauffage d'une puissance maximale de  $10 \text{ W/m}^2$ . Ce faible besoin de chaleur peut alors être comblé par le système de ventilation, qui est de toute manière indispensable (NBN 50-001) pour garantir l'hygiène et la qualité de l'air.



Le terme de maison « passive » a été choisi principalement parce que l'usage « passif » des énergies ambiantes (rayonnement solaire à travers les vitrages) et des sources de chaleur internes (appareils et habitants) suffit à maintenir dans le bâtiment une température intérieure agréable durant toute l'année.

Les standards de la maison passive offrent donc une manière intéressante de réduire au minimum la demande énergétique des nouveaux bâtiments, répondant ainsi à l'objectif de durabilité tout en améliorant le confort des occupants. Sur cette base, il est possible de satisfaire la demande énergétique restante uniquement à partir de sources d'énergie renouvelables.

Les deux grands principes d'une maison passive sont les suivants :

1. Optimiser les conditions de base

Dans une maison passive, on rend plus performants des composants qui sont de toutes façons indispensables : l'enveloppe du bâtiment, les fenêtres et la ventilation. L'efficacité thermique de ces composants est améliorée jusqu'au point où un système de chauffage conventionnel n'est plus nécessaire. L'appoint nécessaire est amené par la récupération de la chaleur de l'air vicié.

2. Minimiser les pertes

La chaleur disponible dans un bâtiment est gardée à l'intérieur aussi efficacement que possible, ce qui implique une très bonne étanchéité. Les calculs réalisés d'après des modèles théoriques et de nombreux exemples construits prouvent que, dans nos conditions climatiques, une stratégie qui vise à réduire les pertes de chaleur est plus efficace qu'une stratégie qui se concentre principalement sur l'utilisation passive ou active de l'énergie solaire.

### 3.4 Standards de la maison passive [Guerriat, 2006]

1. Consommation d'énergie

- Chaleur

**Principe** : minimiser la consommation d'énergie utilisée pour le chauffage

**Norme** : besoins en énergie de chauffage inférieurs ou égaux à  $15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$

- Energie totale

**Principe** : minimiser la consommation totale d'énergie utilisée dans la maison (chauffage, ventilation, eau chaude, électroménager, etc.)

**Recommandation** : besoins en énergie totale inférieurs ou égaux à  $42 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$

- Energie primaire

**Principe** : minimiser la consommation d'énergie primaire utilisée dans la maison (choisir efficacement le type d'énergie utilisée)

**Recommandation** : besoins en énergie primaire inférieurs ou égaux à 120  $kWh/m^2.an$

## 2. Energie solaire

### – L'énergie solaire

**Principe** : orientation sud si possible pour capter un maximum de chaleur gratuite

**Recommandation** : environ 40 % de la chaleur nécessaire pour compenser les pertes de l'habitation

### – Les vitrages performants

**Principe** : triple vitrage low-e ou équivalent

**Norme** : coefficient U vitrage inférieur ou égal à  $0.8 W/m^2K$  - facteur solaire  $g$  supérieur à 50 % pour que les gains via la fenêtre soient plus importants que les pertes

### – Les fenêtres très isolantes

**Principe** : châssis parfaitement isolés (éviter les ponts thermiques)

**Norme** : coefficient U châssis inférieur ou égal à  $0.8 W/m^2K$

## 3. Isolation

### – Enveloppe (parties opaques)

**Principe** : isolation extrêmement efficace pour pouvoir se passer d'un système conventionnel de chauffage (épaisseur d'isolation : 30 cm dans le mur, 40 cm dans le toit et 20 cm dans le plancher)

**Norme** : coefficient U inférieur ou égal à  $0.15 W/m^2K$

**Recommandation** : coefficient U inférieur ou égal à  $0.11 W/m^2K$

### – Raccords

**Principe** : pas de pont thermique

**Norme** : coefficient de transmission linéaire  $\psi \leq 0.01 W/mK$

### – Étanchéité à l'air

**Principe** : enveloppe étanche (20 fois plus hermétique que la moyenne belge)  
- utilisation de portes hermétiques et/ou de sas

**Norme** : renouvellement de l'air correspondant à  $n_{50} < 0.6 h^{-1}$  (via test d'étanchéité certifié)

## 4. Récupération de chaleur

### – Ventilation

**Principe** : ventilation mécanique contrôlée (système D). Pulsions d'air dans

les espaces de vie (séjours, chambres, etc...), extraction dans les espaces sanitaires (locaux « humides »)

**Norme** :  $30 \text{ m}^3/h.personne$

**Recommandation** : réglage en fonction de la pollution de l'air

– Récupération de chaleur

**Principe** : échangeur air/air : récupération de la chaleur de l'air vicié sans contact entre les deux flux

**Norme** : rendement effectif de plus de 80 %

– Echangeur air/sol

**Principe** : préchauffage de l'air frais les jours très froids et refroidissement passif de l'air frais les jours très chauds via un puits canadien

**Norme** : température de l'air neuf supérieure à  $0 \text{ }^\circ\text{C}$

**Recommandation** : gain de température  $\Delta T > 8 \text{ }^\circ\text{C}$

5. Electricité

**Principe** : utilisation d'appareils électroménagers efficaces, d'ampoules économiques, alimentation en eau chaude pour le lave-linge ou le lave-vaisselle, pas de séchoir à condensation... Il est possible de réduire de 50 % la consommation d'électricité sans perte de confort.

6. Besoin d'énergie supplémentaire

**Principe** : utilisation d'énergies renouvelables puisque peu d'énergie est finalement nécessaire

Les éléments énumérés ci-dessus indiquent les critères à respecter pour qu'un bâtiment soit reconnu comme maison passive. Seuls les critères de consommation pour le chauffage, de consommation en énergie primaire et d'étanchéité à l'air sont impératifs pour obtenir la certification. Les autres critères en découlent et il est tout à fait possible de construire une maison passive sans puits canadien ou sans panneau solaire.

## 3.5 Le logiciel PHPP2007 [Guerriat, 2008]

Quand il projette une maison passive, le concepteur est tenu par l'obligation de se conformer aux critères de la norme formulée par le Passivhaus Institut (Darmstadt). Il est important de comprendre pourquoi ceci est crucial.

Si les critères d'isolation ne sont pas respectés à la lettre dans une maison basse-énergie, le bâtiment devra bien entendu être chauffé davantage, mais ce n'est pas problématique ; la chaudière, généralement surdimensionnée pour une telle maison,

pourra faire face à cette augmentation du besoin de chaleur. Dans une maison passive, par contre, la technologie de chauffage est spécifique ; la maison n'a pas de système de chauffage conventionnel et l'appoint de chaleur doit rester limité sinon l'occupant risque de rencontrer des problèmes d'inconfort et de devoir modifier l'installation.

Pour aider les concepteurs dans ce travail précis de dimensionnement, l'association allemande du Passivhaus Institut a développé un programme informatique aujourd'hui traduit en plusieurs langues, dont le français : le « Passiv Haus Projektierung Paket » ou PHPP. La version PHPP 2007 contient également les données climatiques correspondant aux différentes régions du Benelux et de France. Outre l'aspect pratique, c'est actuellement le seul programme validé pour la certification d'une maison ou d'un bâtiment. Le programme utilise en réalité le logiciel Excel et comprend une trentaine de feuilles de calcul qui réalisent une simulation du bâtiment mois par mois.

Dès le stade de l'esquisse, on peut entrer tous les paramètres du bâtiment et évaluer la situation : épaisseur d'isolant nécessaire, puissance de ventilation, surchauffe potentielle, présence de ponts thermiques, consommation d'énergie primaire, etc... On réagit alors en adaptant la qualité du vitrage, en adaptant la structure porteuse, en rectifiant un détail, etc... Grâce à ces simulations, la solution la plus appropriée au bâtiment peut être déterminée, y compris pour les bâtiments tertiaires.

# Bibliographie

- [ARC, 1996a] (1996a). Guide de l'architecture bioclimatique - haute qualité et développement durable. Observ'ER. Cours fondamental : Tome 2 Construire avec le climat.
- [ARC, 1996b] (1996b). Guide de l'architecture bioclimatique - haute qualité et développement durable. Observ'ER. Cours fondamental : Tome 4 Construire avec le développement durable.
- [ADE, 2008] (2008). Systèmes passifs. [http : //www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort = -1&cid = 96&m = 3&catid = 15040](http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=15040).
- [Goswami et al., 1999] Goswami, D. Y., Kreith, F., and Kreider, J. F. (1999). *Principles of Solar Engineering*. Taylor and Francis.
- [Guerriat, 2006] Guerriat, A. (2006). *La maison passive - introduction pour les architectes et les futures maîtres d'ouvrage*. Labelpages.
- [Guerriat, 2008] Guerriat, A. (2008). *Maisons passives - principe et réalisations*. l'inédite.
- [J. Shen, 2007] J. Shen, S. Lassue, L. Z. D. H. (2007). Numerical study on thermal behavior of classical or composite trombe solar walls. *Energy and buildings*, Vol. 39 :pp. 962–974.
- [Moinet, 2007] Moinet, M. (2007). *Analyse des performances d'échangeurs enterrés pour le préchauffage et le refroidissement de l'air neuf en ventilation mécanique contrôlée*. PhD thesis, Faculté Polytechnique de Mons.